



HAL
open science

Caractérisation de l'efficacité technique des systèmes de pulvérisation et des pertes de pesticides appliqués aux cultures basses dans les régions méditerranéennes : cas de la Tunisie

Hassouna Bahrouni

► **To cite this version:**

Hassouna Bahrouni. Caractérisation de l'efficacité technique des systèmes de pulvérisation et des pertes de pesticides appliqués aux cultures basses dans les régions méditerranéennes : cas de la Tunisie. Génie des procédés. Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomique "Montpellier SupAgro" / INAT-Tunisie, 2010. Français. NNT : . tel-00484346

HAL Id: tel-00484346

<https://theses.hal.science/tel-00484346v1>

Submitted on 18 May 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ACADEMIE DE MONTPELLIER
Montpellier SupAgro

UNIVERSITE DE CARTHAGE
Institut National Agronomique de
Tunisie

Thèse

présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de Montpellier SupAgro et INAT
Spécialité : Génie des procédés

Section
Energétique et Génie des Procédés

Présentée par

Hassouna BAHROUNI

*Caractérisation de l'efficacité technique des systèmes
de pulvérisation et des pertes de pesticides appliqués
aux cultures basses dans les régions
méditerranéennes : cas de la Tunisie*

Soutenue le 2 février 2010 devant le jury

Mohamed Nejib REJEB	Directeur de recherche, INRGREF	Président
Marie-France DESTAIN	Professeur, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux	Rapporteur
Mohamed KHELIFI	Professeur, Université Laval, Canada	Rapporteur
Carole SINFORT	Professeur, Montpellier SupAgro	Co-Directrice de thèse
Elies HAMZA	Maître de conférences, INAT	Co-Directeur de thèse
Christelle GEE	Professeur, AgroSup Dijon	Examinatrice

Remerciements

C'est ce rêve habitant en moi depuis mon âge de jeune étudiant qui m'a conduit dans cette belle aventure après vingt ans de service dans le domaine de l'ingénierie de la formation. J'ai tout d'abord intégré la recherche agricole en 2003, ensuite j'ai commencé cette thèse à la fin de 2005. Pourtant ce n'était pas évident de se retrouver après cette longue période passée loin des mathématiques et des statistiques, surtout avec les multiples charges familiales, sociales et professionnelles. C'est grâce à l'aide d'une multitude de collaborateurs et de collègues que j'ai pu surmonter ces difficultés et aller jusqu'au bout de l'aventure.

Ce travail de thèse s'est déroulé aux laboratoires de l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF) de Tunis au sein de l'Unité de Machinisme Agricole et de l'Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement (Cemagref) de Montpellier à l'UMR ITAP, en passant par l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT) et Montpellier SupAgro. La liste des personnes qui y ont laissé des empreintes serait bien trop longue à dresser pour figurer entre ces lignes de manière exhaustive, je tiens cependant à citer des noms.

Je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Carole Sinfort, qui m'a permis d'intégrer son équipe pendant les moments que j'ai passés à Montpellier. Son expérience, sa rigueur scientifique, sa disponibilité aux moments opportuns et sa patience ont fait de cette thèse une belle aventure. Elle m'a particulièrement simplifié la délicate tâche de développement du modèle de dérive. Ma reconnaissance va également à Elies Hamza qui a accepté de diriger ce travail en Tunisie. Ses qualités d'encadrement et d'écoute, son dynamisme, son esprit de synthèse et la liberté qu'il m'a laissée dans mes travaux m'ont beaucoup apporté. Il a contribué à développer mon goût initial pour la recherche après avoir dirigé mon master entre 1992 et 1994.

Je souhaite remercier Madame Marie-France Destain et Monsieur Mohamed Khelifi qui ont accepté la tâche de rapporteurs de cette thèse. Mes vifs remerciements vont également à Madame Christelle Gee et à Monsieur Mohamed Nejib Rejeb, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en se déplaçant pour participer à mon Jury de thèse.

Je tiens aussi à remercier « mes » étudiants pour la collecte de l'information pendant la première étape du travail.

Je me dois aussi de remercier les membres de mon comité de thèse dont les conseils m'ont été précieux pour faire les rectifications nécessaires à tous les niveaux et dans toutes les étapes du travail. Les remarques de Véronique Bellon-Maurel et Bernard Bonicelli ont donné beaucoup d'originalité à mon projet de recherche.

Je témoigne toute ma profonde reconnaissance aux organismes qui ont financé ce travail : le CMCU, l'AUF, l'IRESA et l'INRGREF. Je veux bien sûr afficher ma plus grande gratitude aux responsables qui ont bien voulu mettre en œuvre les moyens nécessaires à la réalisation de ce travail. Merci aussi au Cemagref de Montpellier pour l'accueil chaleureux et en particulier pour avoir mis à ma disposition tout ce qu'il faut pour l'aboutissement des essais en soufflerie.

Il me serait impossible de ne pas remercier l'équipe de l'Unité de Machinisme de l'INRGREF qui m'a souvent accompagné dans la lourde tâche de mise en place et réalisation des essais de terrain : Béchir M'hedbi qui est déjà à la retraite, Mohsen Khemira, Samir Zayani, Bechir Selmani et Afif Ammouri. Merci à mes collègues chercheurs Mohamed Ali Ben Abdallah et Tahar Mansouri pour l'entente et pour m'avoir déchargé d'une partie de mon travail. Merci aussi à mes collègues du laboratoire d'irrigation qui m'ont permis de mesurer l'indice foliaire de mes plantes de blé.

J'ai une pensée émue pour ma collègue Raouda Mougou, ex-responsable du service climatologie de l'INRGREF qui a mis à ma disposition toutes les données climatiques de la station de Cherfech et qui nous a quitté soudainement depuis quelques mois. J'ai pour sa famille une pensée affectueuse, en particulier pour son mari Monsieur Abdelaziz Mougou.

Mes vifs remerciements vont également aux collègues de l'Institut National des Recherches Agronomiques de Tunis (INRAT) pour l'accueil de mes bacs de blé dans leurs chambres de culture : laboratoire de Biotechnologie et Physiologie Végétale et laboratoire des Grandes Cultures. A ce propos, je ne saurais oublier Ahmed Jemeli pour la description microscopique de l'état de surface de la plante de blé Karim. Merci aussi à mon regretté collègue de laboratoire Mustapha Fitouri et à mon ami Chedly Derouiche de la Direction des sols, qui ont mis à ma disposition les cartes actualisées d'occupation des sols et des ressources en eau de la Tunisie.

Du côté de Montpellier, je voudrais rendre hommage à l'équipe « Technologies et Equipements » de l'UMR ITAP, en particulier aux personnes qui ont donné si généreusement de leur temps pour les essais en soufflerie : Eric Cotteux, Xavier Ribeyrolles, Cyril Tinet et Gérard Diouloufet. Ces remerciements vont également à Bernadette Ruelle, animatrice de l'Equipe pour la coordination et l'organisation du travail, à Ariane Vallet pour ses conseils dans les aspects théoriques en mécanique des fluides. Un grand merci à Jean Louis Vigneau qui m'a souvent assisté pour faire tourner la soufflerie dans les meilleures conditions et à Jean-Luc Lablée pour ses coups de main en informatique. Je remercie également Bernard Palagos pour ses enseignements sur l'utilisation des outils statistiques sous le logiciel "R" et ses contributions dans les analyses de données.

Je me dois également de remercier les auteurs de *DriftSim*, *AgDrift* et *PeDriMo* qui ont accepté de mettre à ma disposition leurs modèles.

Je ne pourrais pas achever ces paroles de reconnaissance sans remercier le personnel administratif et le cadre ouvrier des différents établissements que j'ai côtoyés. Je cite plus particulièrement Haj Hamdi et Sabiha Chemak de l'INAT, Michèle Egéa et Aline Merlot du Cemagref, Florence Latapie, Gérard Alvarez et Paul Oullier de SupAgro.

Mes pensées vont finalement à ma famille, tout particulièrement à mon père qui nous a quitté avant de voir le fruit de ce travail et à ma femme Aziza qui a payé quelque part de sa santé pour cette thèse. Malgré tout, elle m'a encouragé par tous les moyens pendant ces quatre années d'aventure.

Sans l'aide de toutes ces personnes, cette thèse n'aurait pas pu voir le jour, tout simplement merci à toutes et à tous...

Table des matières

I	Introduction générale	1
1	Contexte général et scientifique	3
1.1	Risques liés à l'application des pesticides	3
1.2	Contexte des traitements phytosanitaires en Tunisie	4
1.2.1	Place des cultures basses dans l'agriculture tunisienne	4
1.2.2	Les pesticides en Tunisie	5
1.2.3	Structure des exploitations agricoles	6
1.2.4	Les conditions météorologiques	6
1.2.5	Le matériel de pulvérisation	6
2	Caractérisation de la pulvérisation dans son milieu	10
2.1	Caractérisation du spectre de pulvérisation	10
2.2	Facteurs affectant l'efficacité de la pulvérisation et favorisant les pertes de pesticides	11
2.2.1	Introduction	11
2.2.2	Importance de la finesse des gouttelettes pour l'efficacité et pour l'environnement	11
2.2.3	Facteurs liés aux techniques de traitement	12
2.2.4	Conditions atmosphériques	12
2.2.5	Facteurs liés aux propriétés physico-chimiques de la formulation	13
2.2.6	Facteurs liés à la végétation	13
2.3	Approches de modélisation de la trajectoire du nuage	13
3	Objectifs de la thèse	14
3.1	Conclusions de la partie I et justification du choix du sujet	14
3.2	Objectifs	14
3.3	Présentation de la démarche	14
II	Etude expérimentale des pertes de pesticides lors de la pulvérisation	17
4	Etat de l'art	18
4.1	Mesure des dépôts de pesticides sur les plantes et dans l'environnement	18
4.1.1	Détection de l'impact des gouttelettes contenant de l'eau	18
4.1.2	Mesure des dépôts d'une solution à base de traceur	18
4.1.3	Mesure des dépôts d'une formulation à base de pesticide	20
4.2	Suivi du nuage de pesticides	20
4.3	Mesure de la densité de végétation	21
5	Description des protocoles d'essais	22
5.1	Généralités	22
5.2	Choix du traceur	22
5.3	Choix des collecteurs	23
5.3.1	Collecteur des émissions vers l'air	23

5.3.2	Collecteur des dépôts au sol	23
5.3.3	Collecteur des dépôts sur les plantes	25
5.3.4	Interprétation des quantités mesurées sur les collecteurs	26
5.3.5	Mesure de la surface foliaire des bacs à blé	27
5.4	Mesure des dépôts dans les différentes conditions	28
5.4.1	Essais au champ	28
5.4.2	Essais en soufflerie	29
5.4.3	Essais sous la rampe mobile	30
5.4.4	Conclusion pour le choix d'une méthodologie	32
III La dérive des gouttelettes		33
6	Etat de l'art de la modélisation de la dérive	36
6.1	Rappel du comportement physique du jet au voisinage des buses	36
6.2	Les grands types des modèles	37
6.2.1	Modèles statistiques	37
6.2.2	Modèles calculant les trajectoires de gouttelettes isolées	38
6.2.3	Prise en compte de l'évaporation	44
6.2.4	Modèles calculant la trajectoire du nuage	48
6.3	Présentation de quelques modèles	48
6.3.1	Le modèle IDEFICS	49
6.3.2	Le modèle AgDrift	49
6.3.3	Le modèle DriftSim	50
6.3.4	Résultats des modèles présentés	50
6.4	Conclusion	51
7	Modélisation de la dérive dans le contexte tunisien	53
7.1	Présentation du modèle développé, DriftL	53
7.1.1	Observations préliminaires et choix d'un formalisme	53
7.1.2	Développement	54
7.1.3	Calage des paramètres	56
7.2	Résultats pour les calculs de déport par DriftL	56
7.2.1	Résultats des essais au champ	56
7.2.2	Comparaison avec les résultats du modèle	58
7.2.3	Comparaison aux résultats d'autres modèles	58
7.3	Résultats pour les émissions vers l'air	60
7.4	Résultats pour l'évaporation	61
7.5	Discussion	62
7.6	Conclusion	63
IV Dépôts de pesticides au sol et rétention sur les plantes		64
8	Etat de l'art	66
8.1	Introduction	66
8.2	Processus physiques de la rétention	68
8.2.1	Efficacité de la rétention des gouttelettes	68
8.2.2	Effet de l'inertie sur la rétention	70
8.2.3	Fractionnement des gouttelettes	72
8.2.4	Ruissellement des gouttelettes sur la surface des feuilles	72
8.3	Modèles de rétention	73
8.3.1	Modèle de Grayson	74

8.3.2	Modèle de Gyldenkærne	74
8.3.3	Modèle de Forster	75
8.4	Conclusion	77
9	Résultats expérimentaux de la rampe mobile	78
9.1	Introduction	78
9.2	Présentation des résultats	78
9.2.1	Mesures des dépôts et de la rétention	78
9.2.2	Comparaison entre les résultats de la rampe mobile et ceux du terrain	82
9.2.3	Analyse statistique des résultats de la rampe mobile	83
9.3	Discussion	84
9.4	Conclusion	84
V	Conclusion générale et perspectives	86
10	Conclusions	87
11	Perspectives	91
VI	Annexes	93
A	Articles et conférences réalisés	94
A.1	Articles	94
B	Tables de dérive	101
B.1	Tables de dérive de la BBA	101
B.2	Tables de dérive du modèle USES	102
C	Vitesses typiques de sédimentation de gouttelettes d'eau	103
D	Propriétés physiques des principaux solvants et pesticides	104
E	Distance de dérive de DriftSim	105
F	Mesure du profil de vent de la soufflerie du Cemagref	106
G	Échelle du BBCH des stades phénologiques des cultures	109
G.1	Structure de l'échelle	109
H	Taux d'efficacité de quelques pesticides sur les sites d'action en fonction de la technique d'application et de la cible	111
I	Estimation du couvert végétal de quelques types de céréales à différents stades de traitement	112
	Bibliographie	113

Table des figures

1.1	Processus de transfert des pesticides vers les différents compartiments de l'environnement	4
1.2	Evolution des importations de pesticides en Tunisie entre 1999 et 2006	5
1.3	Evolution de la température maximale et de l'Humidité Relative minimale de janvier à avril entre 1997 et 2007, station de Cherfech au Nord de la Tunisie	7
1.4	Evolution de la vitesse du vent moyenne de janvier à avril entre 1997 et 2007, station de Cherfech, au Nord de la Tunisie	8
1.5	Les principaux types de buses pouvant équiper les pulvérisateurs à pression de liquide à jet projeté en Tunisie (a : buse à fente classique, b : buse antidérive à pastille de calibrage, c : buse antidérive à aspiration d'air, d : buse à turbulence classique, e : buse à miroir classique). Réalisé à partir d'un document Albu.	9
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.	15
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.	24
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.	24
5.3	Efficacité des tapis sélectionnés par rapport au banc à gouttière de la soufflerie du Cemagref pour les deux configurations D+ et D-.	25
5.4	Photos microscopiques de l'état de surface d'une feuille de blé "Karim". (a) Face supérieure (b) Face inférieure.	26
5.5	Dispositifs de mesure des pertes de pesticides et de la rétention sur les plantes au champ.	28
5.6	Dispositif de mesure des émissions vers l'air en soufflerie.	30
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.	31
5.8	Rampe mobile de pulvérisation pour mesurer les dépôts au sol et la rétention sur les plantes en conditions de laboratoire - INRGREF - Tunisie.	32
6.1	Comportement physique du jet au voisinage des buses en présence d'un vent relatif, latéral et vertical.	37
6.2	Pourcentage de perte de diamètre dû à l'évaporation de gouttelettes de 10 à 100 μm suivant le modèle d'Holterman. Les noms des courbes indiquent la taille initiale des gouttelettes, la température en $^{\circ}\text{C}$ et l'humidité relative, respectivement.	51
7.1	Répartitions observées en soufflerie pour un jet de buse à fente perpendiculaire au vent pour les configurations D+ (courbe discontinue) et D- (courbe continue).	54
7.2	Dépôts mesurés au champ pour deux VMD (127 et 322 μm) sous différentes conditions météorologiques et rampe parallèle au vent : campagnes 2006 et 2007.	57

7.3	Comparaison des résultats de DriftL aux répartitions observées en soufflerie pour une rampe de 3 buses et un vent latéral avec les configurations D+ et D-	58
7.4	Comparaison des résultats du modèle aux répartitions mesurées au champ pour les pulvérisations à VMD127 et 322 μm	59
7.5	Comparaison des résultats des modèles de dérive <i>DriftSim</i> , <i>AgDrift</i> et du groupe <i>FOCUS</i> aux valeurs estimées par les <i>tables de la BBA</i> à différentes distances, en % du débit initial.	59
7.6	Comparaison entre les émissions vers l'air mesurées au champ (campagnes 2006 et 2007) et en soufflerie pour deux VMD (127 et 322 μm), avec la rampe parallèle au vent.	61
8.1	Schéma de déformation d'une gouttelette montrant les scénarios possibles.	70
8.2	Phénomène de glissement d'une gouttelette sur une surface inclinée, montrant les angles de contact, avant, (θ_a) et arrière, (θ_r) ainsi que l'angle de glissement, (α_g).	72
9.1	Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD pour une vitesse V_a de 4 km.h^{-1} et une hauteur H de 0,5 m. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.	80
9.2	Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD pour une vitesse V_a de 7 km.h^{-1} et une hauteur H de 0,8 m. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.	81
9.3	Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD, de la vitesse d'avancement de la rampe et de la hauteur des buses. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.	82
9.4	Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction de la buse pour une pression de 4 bar, une vitesse d'avancement de la rampe de 7 km.h^{-1} et une hauteur des buses de 0,8 m. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.	83
A.1	Article de la revue : INAT - Tunisie, 2009	95
A.2	Article de la revue : Journal of Agricultural Machinery Science - Turquie, 2008	96
A.3	Conférence des Journées Scientifiques de l'IRESA - Tunisie, 2009	97
A.4	Conférence du congrès STIC et environnement - France, 2009	98
A.5	Conférence du congrès GFP - France, 2009	99
A.6	Conférence du congrès STIC et environnement - France, 2007	100
G.1	Description des stades phénologiques des mono et dicotylédones. a. Les stades principaux ont un code à un chiffre et les stades secondaires un code à deux chiffres. b. Entre ces deux stades peut s'intercaler un stade intermédiaire avec un code à trois chiffres (Meier, 2001).	110

Liste des tableaux

5.1	Résultats des essais de choix des collecteurs de mesure des pertes de pesticides et de la rétention.	27
5.2	VMD et conditions microclimatiques associés aux essais de mesure des dépôts au champ pour 2 campagnes (2006 et 2007).	29
5.3	VMD testés dans les conditions de laboratoire.	30
5.4	Conditions climatiques associées aux essais de mesure sous la rampe mobile.	31
6.1	Effet de la température et de la vitesse du vent (humidité relative = 50 %) sur le diamètre en fin de vol (d_f) et la distance de dérive (Dd) de gouttelettes éjectées à 0,5 m au dessus de la cible avec une vitesse de 20 m.s ⁻¹ (d'après Zhu <i>et al.</i> , 1994)	52
7.1	Coefficients b et c_{dif} calés à partir des répartitions mesurées en soufflerie.	56
7.2	Pertes vers l'air (en pourcentage du débit émis) observées au champ et en soufflerie ; comparaison avec les estimations du modèle DriftL.	61
7.3	Comparaison des évaluations de l'évaporation (en pourcentage du débit pulvérisé) par l'approche expérimentale et par le modèle DriftL.	62
9.1	Résultats des essais avec la rampe mobile.	79
9.2	Comparaison entre les résultats obtenus avec la rampe mobile et ceux obtenus sur terrain pour les deux VMD correspondant à D+ et D-, (127 et 322 μ m).	82
B.1	Table de dérive de la BBA, (d'après Ganzelmeier <i>et al.</i> , 1995).	101
B.2	Table de dérive du modèle Hollandais, "USES" (RIVM, 1998)	102
C.1	Des vitesses typiques de sédimentation des gouttelettes d'eau en fonction du diamètre (d'après Mercer <i>et al.</i> , 2007)	103
D.1	Propriétés physiques des principaux solvants et pesticides, (d'après Holterman <i>et al.</i> , 1997a).	104
E.1	Distance de dérive à partir des données expérimentales et des calculs de <i>DriftSim</i> (Reichard <i>et al.</i> , 1992a).	105
F.1	Caractérisation du profil du vent en soufflerie à un plan vertical $P1$, situé à une distance de 5 m de l'entrée du vent, (à 0,2m en amont de la rampe). Les mesures sont effectuées sur toute la largeur de la veine, pour 3 vitesses de vent (1,1, 3 et 6ms ⁻¹), une hauteur de 0,1 à 1,98 m et avec un maillage de 0,2mx0,2m.	107
F.2	Caractérisation du profil du vent en soufflerie à un plan vertical $P2$, situé à une distance de 8,5 m de l'entrée du vent, (à 3,3m en aval de la rampe). Les mesures sont effectuées sur toute la largeur de la veine, pour 3 vitesses de vent (1,1, 3 et 6ms ⁻¹), une hauteur de 0,1 à 1,98 m et avec un maillage de 0,2mx0,2m.	108
G.1	Les principaux stades de développement des cultures selon l'échelle du BBCH	109

H.1 Taux d'efficacité de quelques pesticides sur les sites d'action en fonction de la technique d'application et de la cible (d'après Graham-Bryce, 1977). 111

I.1 Estimation du couvert végétal de quelques types de céréales pour différents types et différents stades de traitement (d'après Olofsdotter et Streibig, 1997). 112

Préambule

Ce document présente les travaux de ma thèse sur l'application des pesticides en grandes cultures qui a démarré en novembre 2005. La première partie décrit les enjeux et justifie le choix du sujet. La deuxième partie décrit l'approche méthodologique élaborée. Les deux parties suivantes étudient respectivement la modélisation de la dérive et les dépôts sous la rampe au sol et sur les plantes pendant les traitements.

Le travail a fait l'objet de 2 articles dans des revues scientifiques : un qui a été déjà publié et l'autre accepté. 5 conférences ont été également présentées dans des congrès internationaux. Les résumés de ces différentes participations sont présentés dans l'annexe [A](#).

« Nous n'héritons pas de la terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants »
Antoine de Saint Exupéry

Nomenclature

a_t	longueur du tapis (dans le sens d'avancement)	[m]
A	adhérence	[%]
A_c	accélération d'une gouttelette	[m.s ⁻²]
A_l	pression de vapeur à la surface de la gouttelette	[Pa]
A_p	surface de la gouttelette	[m ²]
A_s	densité surfacique de la canopée	[m ² .m ⁻³]
b	paramètre de calage de DriftL : dépend du type de buse	[-]
b_t	largeur du tapis (sens perpendiculaire de l'avancement)	[m]
c	concentration du traceur	[g/l]
c_{dif}	paramètre de calage de DriftL : prend en compte les conditions initiales, au moment de l'éjection des gouttelettes	[-]
C_d	coefficient de traînée global de la gouttelette	[-]
C_e	coefficient de diffusion	[m ² .s ⁻¹ .K ⁻¹]
d_0	diamètre initial de la gouttelette	[μm]
d	diamètre de la gouttelette	[μm]
d_e	longueur caractéristique de la feuille	[mm]
D	dose de pesticide appliquée	[kg.m ⁻²]
D_d	fraction de dérive	[%]
D_e	fraction des gouttelettes évaporées	[% D]
D_f	diamètre du fil de piégeage des émissions vers l'air	[mm]
D_p	fraction des gouttelettes retenues par les plantes	[%]
D_s	fraction des gouttelettes déposées au sol	[%]
D_{ST}	tension superficielle dynamique de la solution S	[mN m ⁻¹]
D_t	coefficient de diffusion turbulente	[m ² .s ⁻¹]
D_v	fraction des gouttelettes perdues dans l'air	[%]
E	efficacité d'impact des gouttelettes sur les feuilles	[%]
f	coefficient de régression	[-]
F	fonction dont dépend l'adhérence des gouttelettes	[-]
F_A	force de portance	[N.kg ⁻¹]
F_g	force de gravité	[N.kg ⁻¹]
F_i	force d'inertie	[N.kg ⁻¹]
F_t	flux collecté sur un tapis	[kg.m ⁻²]
g	accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
I	intensité turbulente	[%]
k	coefficient dépendant de la buse	[-]
k_v	coef. de diffusion du liquide vaporisé dans l'air	[m ² .s ⁻¹]
K_a	diffusivité thermique de l'air	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
K_e	énergie cinétique de la gouttelette	[N.m]
K_g	coefficient de transfert de masse	[-]
K_R	coefficient de rétention	[-]

Nomenclature

K_{Ri}	coefficient de rétention au niveau i dans la canopée	[-]
K_{sf}	énergie de la gouttelette à sa déformation maximale	[N.m]
K_{si}	énergie de surface de la gouttelette quand elle quitte la feuille	[N.m]
l_c	chaleur latente de vaporisation de la gouttelette	[J.kg ⁻¹]
l_p	distance parcourue par la gouttelette suivant la pente	[m]
LAI	indice de surface foliaire	[(m ²). (m ⁻²)]
m	masse de la gouttelette,	[kg]
m_a	masse molaire de l'air	[kg.mol ⁻¹]
m_v	masse molaire du liquide qui se vaporise	[kg.mol ⁻¹]
M_{fi}	masse de traceur mesurée sur fil à la position " i "	[g]
M_T	coeff. dépendant de la morphologie de la cible	[-]
n_b	nombre de buses de la rampe	[-]
N	nombre de feuilles	[-]
N_f	nombre de Froude	[-]
N_g	nombre de gouttelettes	[-]
Nu	nombre de Nusselts	[-]
Nu'	nombre de Nusselts adapté au transfert de masse	[-]
p_{as}	pression partielle de l'air à la surface de la gouttelette	[Pa]
P	pression à la sortie de la buse	[bar]
P_v	pression de vapeur à la surface de la gouttelette	[Pa]
q_0	coefficient	[m ² .s ⁻¹ .K ⁻¹]
q_1	coefficient	[m ⁻¹]
q	débit	[l.min ⁻¹]
Q	volume de bouillie	[l.ha ⁻¹]
r_0	constante	[s ^{-1/2}]
Ra	rapport rugosité surface / diamètre de la gouttelette	[%]
Re	nombre de Reynolds	[-]
Re_p	nombre de Reynolds particulière	[-]
S_i	surface du feuillage au niveau i	[m ²]
s_0	constante	[m.s ^{-1/2}]
S_c	nombre de Schmidt	[-]
S_t	nombre de Stokes	[-]
t	temps	[s]
t_d	temps de diffusion de la gouttelette	[s]
T	température de l'air ambiant	[°C]
T_h	température humide de l'air ambiant	[K]
T_s	température de l'air à la surface de la gouttelette	[K]
$\%Tr$	pourcentage de traceur collecté	[%]
u_i	i ^{ème} composante du vecteur vitesse pour l'air	[m ⁻¹]
u_*	vitesse de frottement	[m.s ⁻¹]
u'	fluctuation de u autour de sa valeur moyenne	[m.s ⁻¹]

Nomenclature

U	vitesse de l'air	[m.s ⁻¹]
U_c	U vitesse de l'air à la hauteur de la culture z_c	[m.s ⁻¹]
$U(z)$	vitesse moyenne de l'air à la hauteur z	[m.s ⁻¹]
v'	V réelle d'une gouttelette soumise à des fluctuations	[m.s ⁻¹]
V	vitesse moyenne des gouttelettes	[m.s ⁻¹]
V_0	vitesse initiale de la gouttelette	[m.s ⁻¹]
VER	Volume Élémentaire Représentatif	[m ⁻³]
V_{fr}	fraction d'un nuage de gouttelettes entrant dans un VER	[]
v_r	vitesse radiale des gouttelettes	[m.s ⁻¹]
V_R	vitesse relative de la gouttelette (par rapport à l'air)	[m.s ⁻¹]
$V_{S,T}$	volume d'une solution, S déposé sur une cible T	[l.ha ⁻¹]
V_s	vitesse de sédimentation de la gouttelette	[m.s ⁻¹]
$V_{s,i}$	vitesse de sédimentation de la gouttelette à l'instant i	[m.s ⁻¹]
V_t	vitesse terminale de la gouttelette	[m.s ⁻¹]
$V_{S,WG}$	volume d'une solution, S déposé sur du verre	[l.ha ⁻¹]
We	nombre de Weber	[-]
W_m	énergie de la gouttelette pendant sa déformation maximale	[N.m]
x_0	position à l'entrée de la végétation	[m]
X_{ev}	taux d'évaporation de la gouttelette	[m ² .s ⁻¹]
X_{vs}	fraction molaire de vapeur à la surface de la gouttelette	[-]
z	hauteur	[m]
Z_c	hauteur de la culture	[m]
Z_d	distance de dérive	[m]

Lettres grecques

α	angle de glissement de la feuille sur la plante	[°]
α_g	angle de glissement critique	[°]
α_e	coef dépendant du diamètre et de l'inertie de la gouttelette	[°]
$\beta, \beta_1, \beta_2, \beta_3$	coefficients	[m ⁻¹]
γ	tension superficielle de la solution	[m.N.m ⁻¹]
γ_t	tension superf. de la solution au moment du contact	[m.N.m ⁻¹]
γ_w	tension superficielle de l'eau	[72 m.N.m ⁻¹]
ΔP_v	P de vapeur à la surface de la gouttelette - P de l'air ambiant de la gouttelette et celle de l'air ambiant	[Pa]
Δt	pas de temps	[s]
ΔT_v	Température de bulbe humide - température sèche.	[-]
ϵ	tension superficielle de la solution à l'équilibre	[m.N.m ⁻¹]
η	coefficient	[Pa.K ⁻¹]
θ	angle de la feuille de liquide par rapport à l'horizontale	[°]
$\theta_{W,G}$	angle de contact de l'eau sur une surface en verre	[°]
$\theta_{W,T}$	angle de contact de l'eau sur la cible en général,	[°]

Nomenclature

θ_a	angle de contact avant de la gouttelette	[°]
θ_m	moyenne arithmétique de θ_a et θ_r	[°]
θ_r	angle de contact arrière de la gouttelette	[°]
κ	constante de Von Karman (elle est d'environ 0,4)	[-]
λ_v	conductibilité de la vapeur	[W.m ⁻² .°C ⁻¹]
ν	viscosité cinématique de la solution	[m ² .s ⁻¹]
ν_a	viscosité cinématique de l'air	[m ² .s ⁻¹]
ν_e	efficacité du processus d'atomisation	[-]
ρ_a	masse volumique de l'air	[kg.m ⁻³]
ρ_l	masse volumique de la gouttelette	[kg.m ⁻³]
τ_a	temps de relaxation de l'air	[s]
τ_e	ordre de grandeur du temps d'évaporation de la gouttelette	[s]
τ_l	temps de relaxation d'une gouttelette	[s]

Abréviations

AUF	Agence Universitaire de la Francophonie
BBA	Centre allemand de recherche biologique pour l'agriculture et la forêt
Cemagref	Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agric. et de l'environn.
BSF	Brillant Sulfo Flavine
CMCU	Comité Mixte tuniso-français de la Coopération Universitaire
DGEDA	Direction Générale des Etudes et de Développement Agricole - MARH
DGPA	Direction Générale de la Production Agricole - MARH
DIX	Drift Potential Index
FOCUS	FORum for Co-ordination of pesticide fate models and their USE
IDEFICS	IMAG programm for Drift Eval. for Field sprayers by Computer Simul.
INAT	Institut National Agronomique de Tunisie
INERIS	Institut National de l'EnviRonnement Industriel et des Risques - France
INRAT	Institut National des Recherches Agronomiques de Tunis - Tunisie
INRGREF	Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts-Tunisie
INS	Institut National des Statistiques - Tunisie
IRESA	Institut de Recherches et d'Enseignement Supérieur Agricole
ITAP	Information et Technologies pour les Agro-Procédés - Montpellier
MARH	Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques - Tunisie
MISG	Mathematics in Industry Study Group (groupe australien-new zélandais)
PAN	Pesticide Action Network
RIVM	National Institute of Public Health and the Environment - Netherlands
UMR	Unité Mixte de Recherche
USEPA	United States Environmental Protection Agency - U.S.A
VMD	Volume Median Diameter

Première partie

Introduction générale

Vers les années 1940, les premiers pesticides de synthèse sont apparus sur le marché, avec des résultats révolutionnaires au niveau des rendements agricoles. Dans les années 1960, les premières accusations d'atteinte à la santé humaine et à l'environnement commencèrent à se faire entendre aux États-Unis, l'ouvrage du biologiste Rachel Carson « le Printemps Silencieux » dénonce pour la première fois la toxicité liée aux organochlorés (Van Der Werf, 1996). Par la suite, plusieurs études ont été menées et ont démontré l'accumulation de ces produits dans la chaîne alimentaire et en 1972, les organochlorés sont interdits d'utilisation en Amérique du Nord et en Europe. La présence de ces substances chimiques a aussi été signalée dans les eaux de surface depuis les années 1960 (Cope, 1965). Au fil du temps, ces substances se sont retrouvées dans les eaux, on a constaté leur passage jusqu'aux eaux souterraines (USEPA, 1977 ; Cohen *et al.*, 1984). Une grande partie de la matière active retrouvée dans ces eaux provient des sols contaminés par les pesticides à usage agricole. Depuis, le débat sur les risques encourus et les bénéfices recueillis de la lutte chimique s'est prolongé et de très nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de cette problématique.

Aujourd'hui, la présence des pesticides dans les différents compartiments de l'environnement est prouvée par de très nombreuses études réalisées sur le sujet. On estime à 2,5 millions de tonnes les quantités appliquées chaque année sur les cultures de la planète dont seulement une part très minime est reçue par les organismes cibles (Pimentel, 1996). La mise en cause du rôle des pesticides dans la contamination de l'environnement a amené les pouvoirs publics à s'interroger sur les risques potentiels encourus par les populations. Ainsi, les problèmes liés à la contamination de l'eau, à la présence des résidus dans les aliments et à l'exposition par voie aérienne des populations résidant à proximité des exploitations agricoles font depuis des années l'objet de suivi et d'évaluation.

Dans ce cadre, l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF) en Tunisie a mis en place en 2005 une action de recherche sur l'optimisation des traitements phytosanitaires et leur impact environnemental en grandes cultures. Le développement de ce travail est principalement construit autour de cette thèse qui vient s'inscrire dans le cadre d'une cotutelle entre l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT) et l'INRGREF d'un côté et l'Unité Mixte de Recherche "Information et Technologies pour les Agro-Procédés : **ITAP**" (Cemagref-Montpellier SupAgro) de l'autre.

Dans cette première partie, nous présenterons le contexte général et scientifique de l'application des pesticides en commençant par décrire les spécificités caractérisant le contexte tunisien des traitements phytosanitaires. Nous nous pencherons ensuite sur la description de la trajectoire du nuage à travers la présentation de ses différentes interactions avec son environnement. Le dernier volet de cette partie sera consacré à une synthèse sur les éléments justifiant le choix du thème et les objectifs de la thèse.

Chapitre 1

Contexte général et scientifique

1.1 Risques liés à l'application des pesticides

La protection des plantes est l'un des facteurs qui ont largement contribué à l'augmentation des rendements et à la régularité de la production. Les produits phytosanitaires (ou pesticides), faciles d'accès et d'emploi, relativement peu chers, se sont révélés très efficaces et fiables dans la plupart des cas. Ainsi, l'agriculture tunisienne a développé des systèmes de culture « intensifs », fondés sur la recherche de hauts rendements et un recours aux pesticides. Le matériel utilisé pour l'application de ces produits est le pulvérisateur avec différentes possibilités d'ajustement. Les quantités de bouillie pulvérisées sont en constante diminution dans plusieurs pays (INERIS, 2005) cependant elles restent encore élevées en Tunisie. Alors qu'en France et en Allemagne le volume moyen appliqué pour les grandes cultures est respectivement de 150 et de 200 l/ha, il est de l'ordre de 300 l/ha pour la Tunisie.

Pour les traitements de contact, on cherche à obtenir une pulvérisation la plus fine possible car l'efficacité dépend du nombre d'impacts et les grosses gouttelettes, trop lourdes, ont tendance à ruisseler sur le feuillage des plantes. D'autre part, il est nécessaire que les gouttelettes aient une masse qui leur permette de résister aux déports par les flux d'air et à l'évaporation avant d'atteindre leurs cibles. La maîtrise d'un traitement précise est difficile du fait des conditions qui sont celles d'un travail agricole : le véhicule se déplace sur un terrain qui n'est pas toujours plat, la culture évolue au cours de la saison (géométrie, densité) et les conditions climatiques sont extrêmement fluctuantes. Faute de disposer de méthodes de traitement suffisamment précises, dans la pratique, l'agriculteur privilégie souvent les modes de traitement garantissant la maximisation de la production. Ce choix a de lourdes conséquences sur l'environnement d'une façon générale : une grande proportion des quantités de pesticide appliquées est dispersée dans l'atmosphère, dans le sol et dans les eaux de surface, pendant et après le traitement. **Pendant le traitement**, l'atmosphère est principalement polluée par la **dérive** des petites gouttelettes (la présence de cette catégorie de gouttelettes est indispensable pour une bonne couverture du feuillage). Une autre partie des gouttelettes pulvérisées est déposée directement au sol sans toucher les plantes. D'autre part, les plantes ciblées par les substances chimiques, ne retiennent qu'une faible proportion des gouttelettes impactant la surface des feuilles, la **réretention**. L'autre partie, généralement constituée de grosses gouttelettes, est déposée au sol par ruissellement après rebond sur la surface des feuilles. **Après le traitement**, la pollution peut être liée au déport, à l'évaporation ou même à la fraction qui avait adhéré aux plantes pendant le traitement. Les principaux mécanismes de transfert des pesticides vers les différents compartiments de l'environnement sont schématisés à la figure 1.1. Ces différentes formes de transfert constituent une perte considérable sur différents plans. D'un point de vue agronomique, la proportion de matière active perdue, est une perte au niveau de l'efficacité du pesticide qui aura des conséquences directes sur les rendements. D'un point de vue économique c'est une charge supplémentaire au niveau du coût de traitement qui se répercutera sur le coût de production.

D'un point de vue environnemental, les pertes constituent une grande source de pollution des compartiments air, eau et sol et une menace potentielle pour la santé publique en général et celle des agriculteurs en particulier.

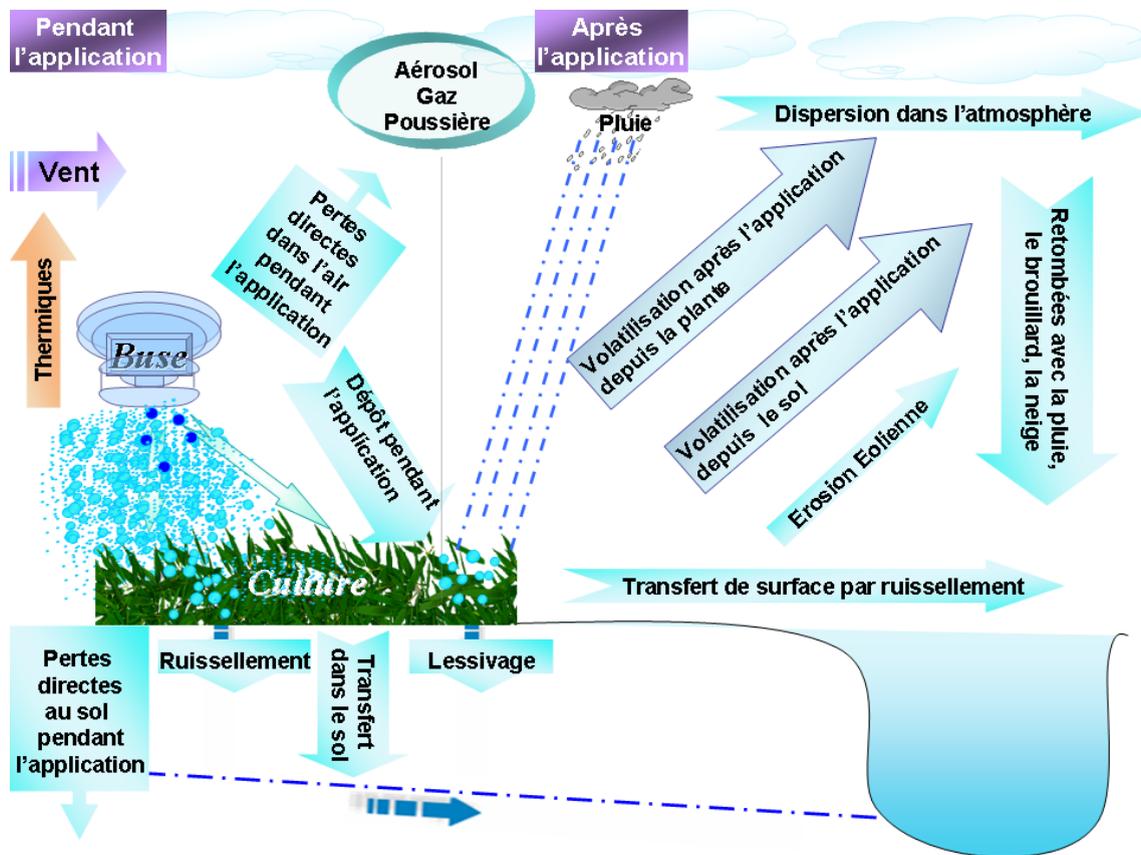


FIGURE 1.1 – Processus de transfert des pesticides vers les différents compartiments de l'environnement

Ainsi l'étude du phénomène de perte des pesticides dans un objectif de réduire le risque des pollutions environnementales est indispensable.

1.2 Contexte des traitements phytosanitaires en Tunisie

1.2.1 Place des cultures basses dans l'agriculture tunisienne

Le recoupement des données des enquêtes du Ministère de l'Agriculture relatives à l'occupation des sols (DGEDA, 2006), montre une répartition équilibrée entre les cultures basses (51%) et l'arboriculture (49%). Selon la même référence, en 2004, les oliveraies représentent à elles seules plus de 78% de la superficie occupée par des arbres fruitiers. D'autre part, selon le Centre Technique de l'Agriculture Biologique en Tunisie, les exploitants oléicoles sont en grande partie engagés dans une démarche de réduction, voire de non utilisation des pesticides pour l'entretien des oliveraies, ce qui suppose que, globalement, l'olivier ne subit pas de grands traitements chimiques. Ainsi, **la plus grande partie des superficies traitées en Tunisie est occupée par des cultures basses qui sont à 73% des céréales**. Dans le secteur céréalier, il y a en moyenne une superficie de 459,000 ha qui est traitée tous les ans, ce qui représente 31% des emblavures annuelles totales. **Sur ce total traité, 91% des traitements concernent le désherbage dont 99% dans le Nord du pays**. Dans cette zone de la Tunisie qui est la zone céréalière par excellence, le nombre moyen de traitements de la culture de blé est d'au moins trois par campagne : 1 à 1,5 désherbage pour les mono et les dicotylédones et un traitement fongique.

Ces résultats montrent bien qu'en Tunisie, **le désherbage des céréales** est l'opération la plus consommatrice de pesticides et que sur le plan géographique, le Nord du pays couvre la grande majorité des superficies désherbées.

1.2.2 Les pesticides en Tunisie

Les chiffres de l'Institut National des Statistiques (INS, 2008) montrent que la moyenne des importations annuelles de pesticides entre 1999 et 2006 s'élève à 3750 tonnes/an (voir fig. 1.2). Ces quantités sont utilisées principalement en agriculture (autour de 95%) pour une superficie traitée d'environ 761 000 ha/an soit près de 5 kg/ha. À titre de comparaison, la quantité utilisée en France s'élève à 110 000 t/an pour une SAU de 295 000 km² (soit 3,7 kg/ha en moyenne). Selon la DGPA, l'utilisation de ces quantités se répartie entre la céréaliculture avec une part de 63%, l'arboriculture avec 16% et le maraichage avec 21%, (DGPA, 2008).

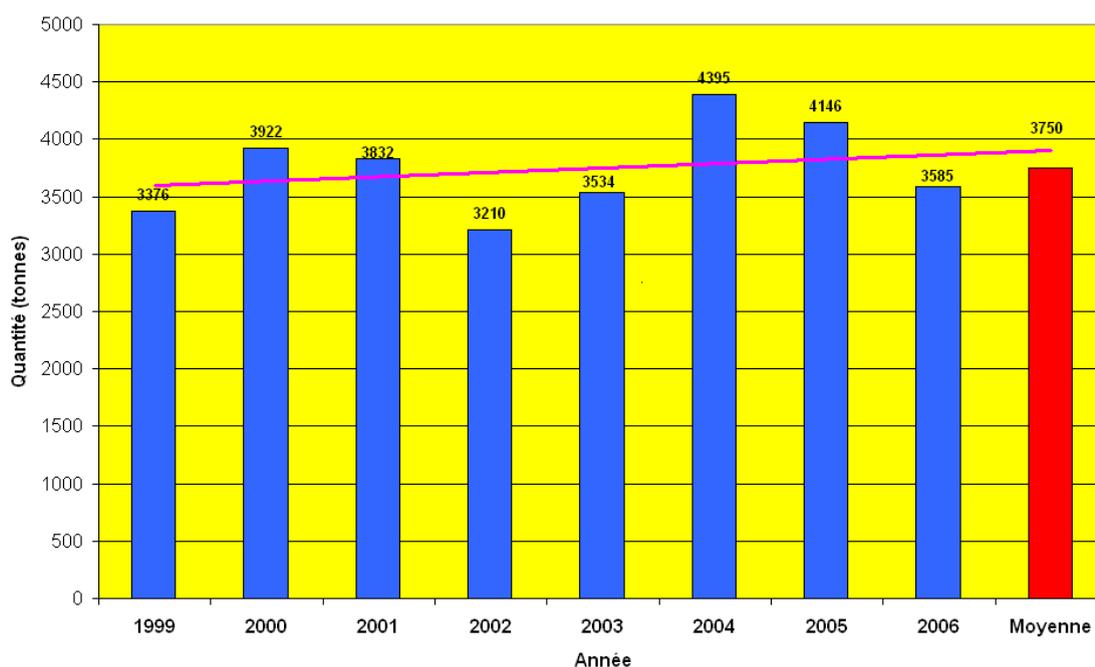


FIGURE 1.2 – Evolution des importations de pesticides en Tunisie entre 1999 et 2006

Présence des pesticides dans l'environnement : une situation préoccupante

En 2006, la banque mondiale et le Pesticide Action Network (PAN, 2006) ont réalisé une étude sur la situation des pesticides en Tunisie qui recense 725 produits et 330 matières actives commercialisés sur le marché local. Cette étude indique également que dans la seule région de Tunis, selon Greenpeace, 44 décès liés aux pesticides ont été recensés entre 1976 et 1986. On ne dispose pas de statistiques actualisées, mais certainement ce chiffre est à l'heure actuelle beaucoup plus important, en particulier dans les zones à vocation agricole.

Kallal *et al.* (1990) et Ennaceur *et al.* (2004) ont suivi les teneurs des pesticides organochlorés (POC) dans le lait maternel au Nord de la Tunisie (zones à vocation céréalière). Les deux études qui ont été réalisées dans 2 régions et à 2 époques différentes ont révélé une contamination générale du lait maternel par les POC. Hamza *et al.* (2004), ont effectué une autre étude dans la région de Bizerte avec l'objectif d'étudier la vulnérabilité à la pollution par les pesticides de la nappe de la plaine côtière de Metline-Ras Jebel-Raf où l'activité agricole est prédominante.

Les résultats ont montré que la nappe étudiée est assez vulnérable à la pollution par les pesticides, et que les zones à vulnérabilité élevée se concentrent dans des régions agricoles. Les zones à vulnérabilité moyenne à élevée occupent 36% de la superficie totale de la plaine. Mansour *et al.* (2003) ont mené une étude épidémiologique auprès de trois secteurs œuvrant dans le domaine des pesticides à savoir l'agriculture, les municipalités et la distribution. Comparant deux populations, exposée et non exposée, l'étude a mis en évidence la présence d'une symptomatologie évocatrice d'une intoxication par les produits pesticides dans 65% des cas.

Cadre réglementaire

En Tunisie, le secteur des pesticides est très pauvre en matière de réglementation. Le seul texte existant dans ce domaine est le décret *n*° 2002-3469 qui fixe simplement les modalités et les conditions d'obtention de l'homologation et de l'autorisation de vente des pesticides. Les seules lois qui sont en place concernent la qualité de l'air ambiant et portent surtout sur les polluants d'origine industrielle (voir par exemple, les normes *NT* 106,004 et *NT* 106,005). En ce qui concerne la protection de l'Homme et de l'environnement contre les pesticides pendant et après leur application sur les cultures, il n'existe pas encore de lois explicites.

1.2.3 Structure des exploitations agricoles

La superficie moyenne des exploitations agricoles est de plus en plus faible : selon la DGEDA (2006), la proportion des exploitations de moins de 10 ha représente 75%. Cette situation a bien sûr des répercussions directes sur l'acquisition du matériel agricole. Le travail réalisé à l'INRGREF par Messaoudi et Bahrouni (2007) sur la caractérisation du secteur des traitements phytosanitaires au Nord-Ouest de la Tunisie a montré un degré de mécanisation de 251 ha par pulvérisateur. A titre comparatif, en France, la taille moyenne est de 54 ha par exploitation et le degré de mécanisation est de 62 ha par pulvérisateur (Agreste, 2008a,b).

1.2.4 Les conditions météorologiques

En Tunisie, les traitements phytosanitaires des grandes cultures ont lieu généralement entre décembre et avril.

Selon les années, le désherbage peut commencer vers la mi-décembre pour s'étendre jusqu'au début mars. Les traitements fongiques quant à eux commencent vers le début février et continuent jusqu'à la fin avril (MARH, 2005). Or cette période est caractérisée par un climat méditerranéen qui est sensiblement différent de celui des régions européennes et américaines. Les moyennes de la température maximale des mois de mars et d'avril varient entre 17 et 24°C (fig. 1.3), avec des valeurs quotidiennes qui sont à 13% supérieures à 30°. Pour l'Humidité Relative minimale, les moyennes se situent entre 39 et 65% avec 36% des valeurs quotidiennes inférieures à 30%.

Le graphique 1.4 présente la vitesse du vent pour les mêmes mois. La moyenne générale est de 1,1 m.s⁻¹ par contre elle est de 1,6 m.s⁻¹ pour le mois d'avril et les valeurs quotidiennes sont dans 31% des cas supérieures à 3 m.s⁻¹.

1.2.5 Le matériel de pulvérisation

Contrairement à la situation en Europe, en Tunisie, le nombre de techniques de traitement phytosanitaire pratiquées est limité. Les produits phytosanitaires sont appliqués par pulvérisation et très rarement par poudrage ou par injection de gaz. L'objectif de ce travail étant limité à la pulvérisation, les autres techniques ne seront pas abordées dans cette introduction.

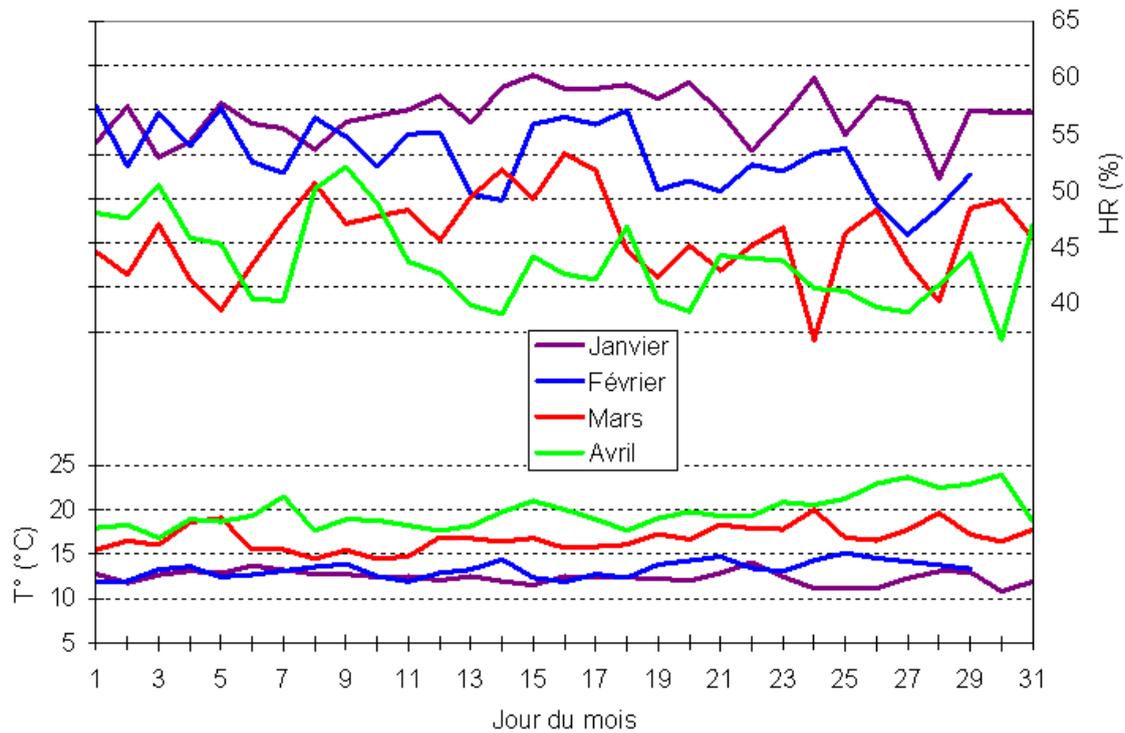


FIGURE 1.3 – Evolution de la température maximale et de l'Humidité Relative minimale de janvier à avril entre 1997 et 2007, station de Cherfech au Nord de la Tunisie

Le pulvérisateur est l'une des rares machines agricoles fabriquées localement. Compte tenu de la faiblesse de la superficie moyenne des exploitations agricoles, la demande du matériel sur le marché local est limitée. Dans ces conditions, dans un souci de pouvoir vendre leurs appareils, les industriels tunisiens proposent des pulvérisateurs de bas de gamme qui sont à la portée du petit exploitant mais qui disposent de peu de fonctions de sécurité et de protection aussi bien pour l'opérateur que pour l'environnement d'autant plus que ces aspects ne font pas encore partie des priorités de l'agriculteur tunisien.

Les appareils proposés sont des pulvérisateurs conventionnels à pression de liquide à jet porté (utilisés en arboriculture) ou à jet projeté (utilisés pour les cultures basses). Le premier type ne nous intéresse pas ici, quelques détails de fonctionnement du **pulvérisateur à jet projeté** sont donnés dans la suite. Ces détails permettront de comprendre le processus de formation et d'émission des gouttelettes dont l'étude du mouvement fait l'objet de ce travail. Pour ce mode de pulvérisation, l'énergie nécessaire à la fabrication des gouttelettes est directement fournie par la pompe sous forme de pression (5 à 30 bar). Cette pression, donne aux gouttelettes une certaine énergie cinétique et donc une vitesse d'émission permettant leur transport vers la cible.

La buse est la pièce maîtresse du processus de formation des gouttelettes. Elle détermine la forme, la composition et l'impact du jet. Le calibre d'une buse est défini par son débit q_b qui varie proportionnellement à la racine carrée de la pression.

En Tunisie, les ventes des principaux revendeurs de matériel de pulvérisation ainsi que les enquêtes de terrain réalisées par Messaoudi et Bahrouni (2007) montrent que les principaux types de buses utilisées sont : les buses à fente avec une part de marché de 78%, les buses à turbulence avec une part de 20% et les autres buses avec une part de 2% y compris celles à dérive limitée et à miroir qu'on commence à peine d'introduire (fig. 1.5). Les buses à turbulence et à miroir sont recommandées pour des traitements n'intéressant pas ce travail, nous allons nous limiter à la description des buses à fente et antidérive qui sont les plus utilisées pour le désherbage.

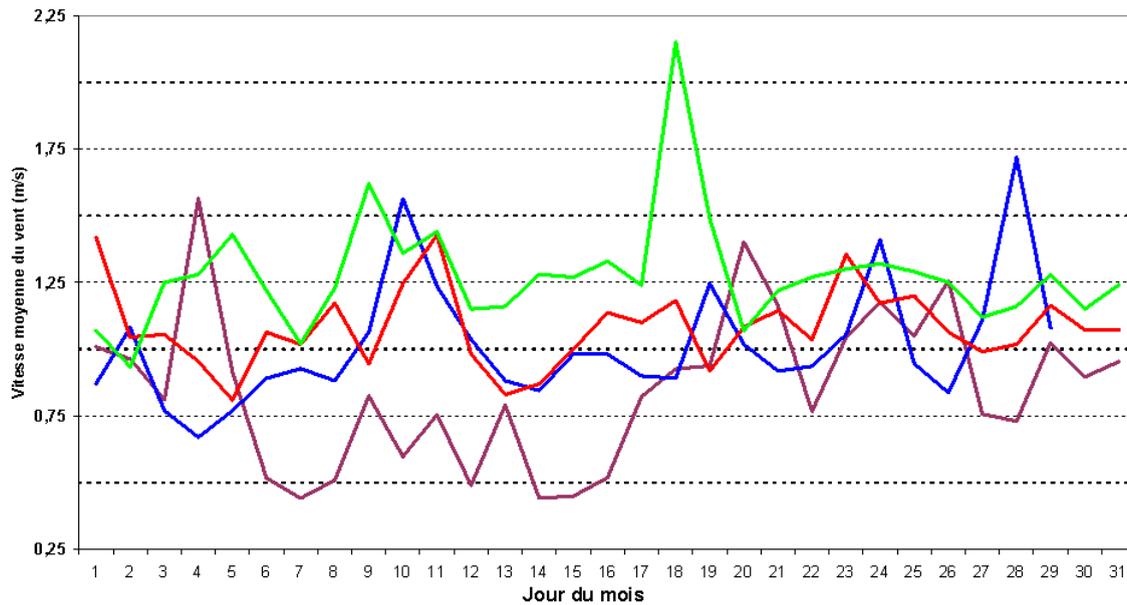


FIGURE 1.4 – Evolution de la vitesse du vent moyenne de janvier à avril entre 1997 et 2007, station de Cherfech, au Nord de la Tunisie

- **La buse à fente** : Elle est caractérisée par un orifice en forme d'ellipse donnant un jet plat d'un angle au sommet de 110° ou 80° . Sa pression de fonctionnement varie généralement de 1 à 7 bar, mais la moyenne pour le désherbage se situe entre 2 et 4 bar. Le VMD des gouttelettes est inférieur à $200 \mu\text{m}$. Cette buse est utilisée pour la plupart des traitements phytosanitaires mais surtout pour le désherbage.
- **La buse antidérive** : Ces dernières années, l'agriculteur tunisien a découvert la nouvelle génération des buses dites *antidérive* et commence à les introduire peu à peu malgré le prix élevé. Leur caractéristique principale est la réduction du risque de contamination de l'environnement grâce à la diminution des fines gouttelettes sensibles à la dérive. Sa pression de fonctionnement peut varier de 3 à 7 bar. Le volume médian (**VMD**) des gouttelettes est supérieur à $450 \mu\text{m}$. En dehors de ces qualités anti-dérive, cette buse favorise la multiplication du nombre d'impacts sur la cible par dislocation des gouttelettes, ce qui améliore l'efficacité du traitement et réduit le ruissellement des gouttelettes.

Quelque soit le type de buse, on peut modifier la taille des gouttelettes en jouant sur la pression et le diamètre de la pastille (qui détermine le calibre de la buse).

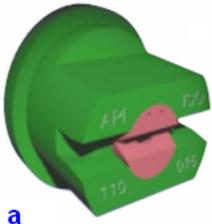
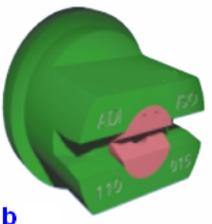
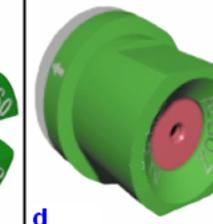
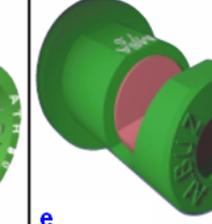
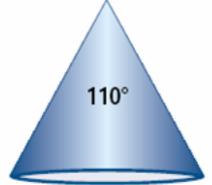
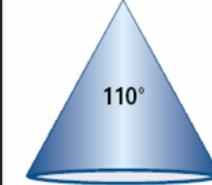
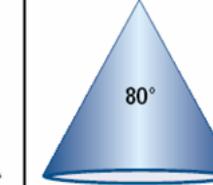
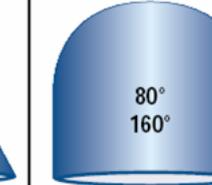
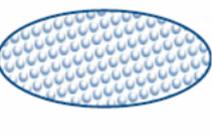
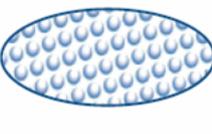
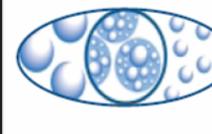
Buse					
Jet: forme & angle					
Taille des gouttes					
P(bar)	2 - 4	2 - 4	3 - 7	3 - 20	1 - 3
Dérive	Moyenne	Faible	Très faible	Faible	Élevée

FIGURE 1.5 – Les principaux types de buses pouvant équiper les pulvérisateurs à pression de liquide à jet projeté en Tunisie (a : buse à fente classique, b : buse antidérive à pastille de calibrage, c : buse antidérive à aspiration d’air, d : buse à turbulence classique, e : buse à miroir classique). Réalisé à partir d’un document Albuz.

Chapitre 2

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 microclimat 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.

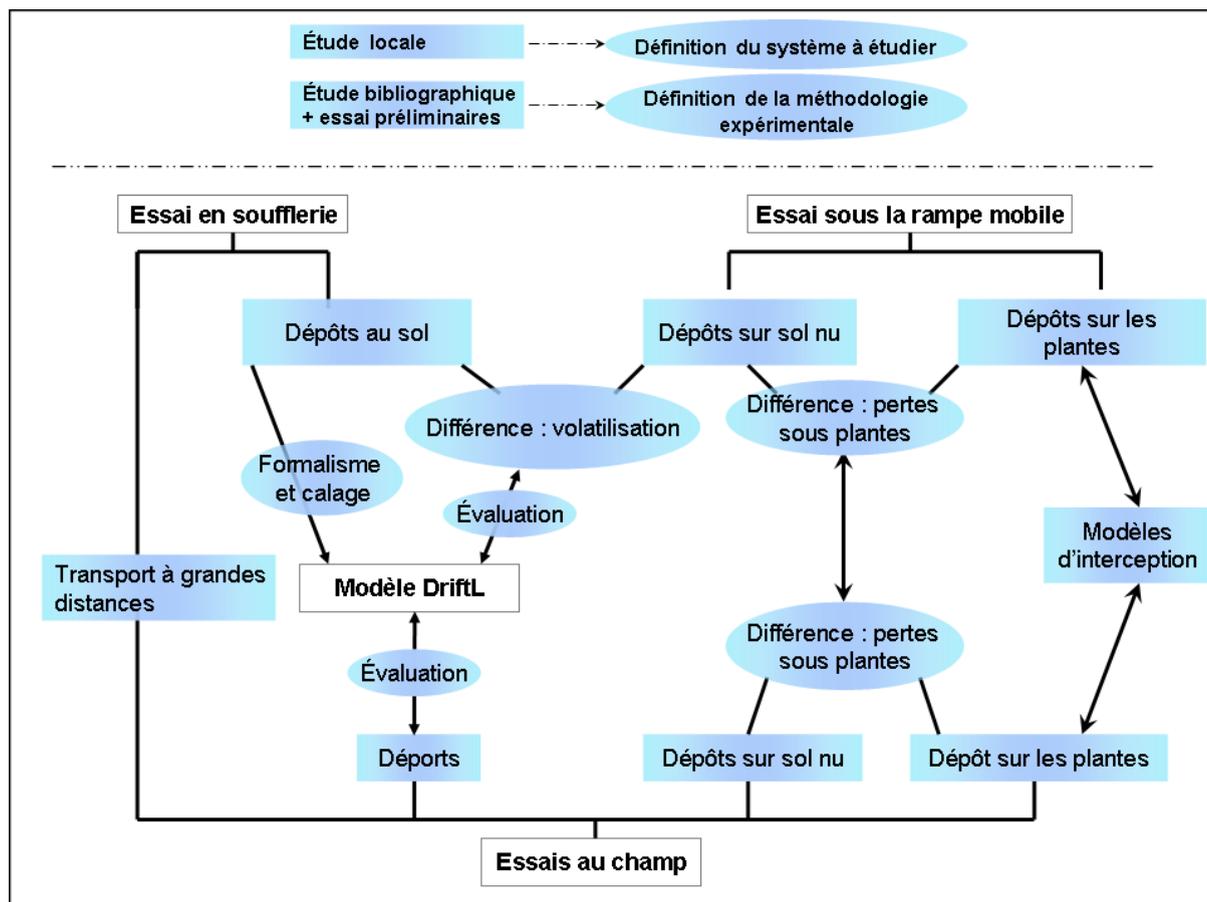


FIGURE 3.1 – Étapes de la démarche suivie pour l'estimation des pertes de pesticides et de la rétention sur les plantes dans les conditions tunisiennes.

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 m^2 . 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 μm (VMD correspondant à D+) et 322 μm (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 polyethyloxyethanol, « 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).

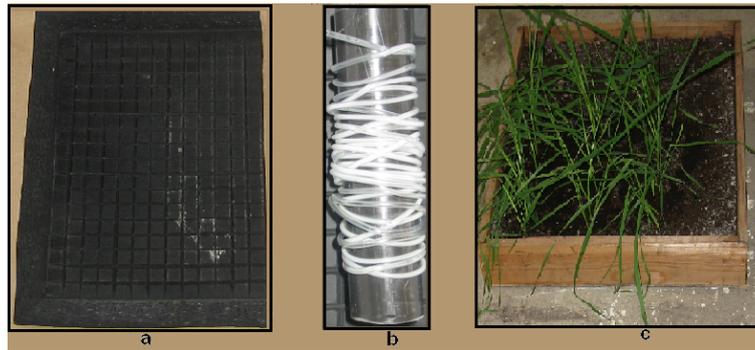


FIGURE 5.1 – Collecteurs sélectionnés pour le piégeage des dépôts au sol, des émissions vers l'air et de la rétention des plantes. (a) Tapis (b) Fil PVC et (c) Bac à blé.

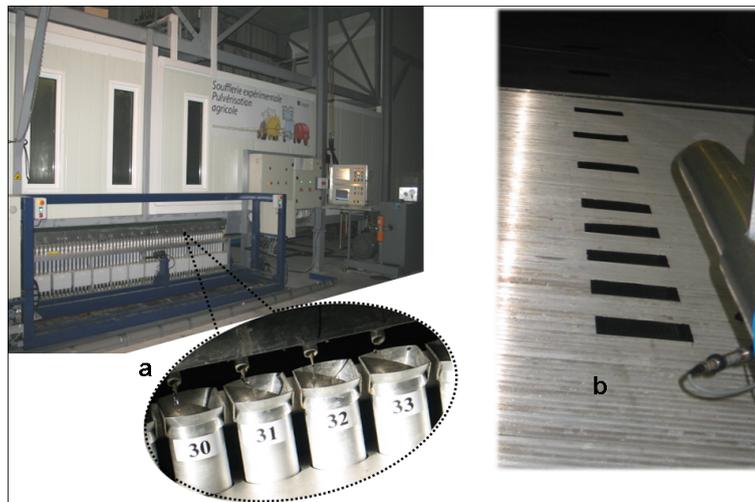


FIGURE 5.2 – Dispositif d'évaluation de l'efficacité des tapis par rapport au banc de répartition de la soufflerie. (a) Banc à gouttières accueillant de l'eau (b) Tapis accueillant la solution de traceur.

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-.

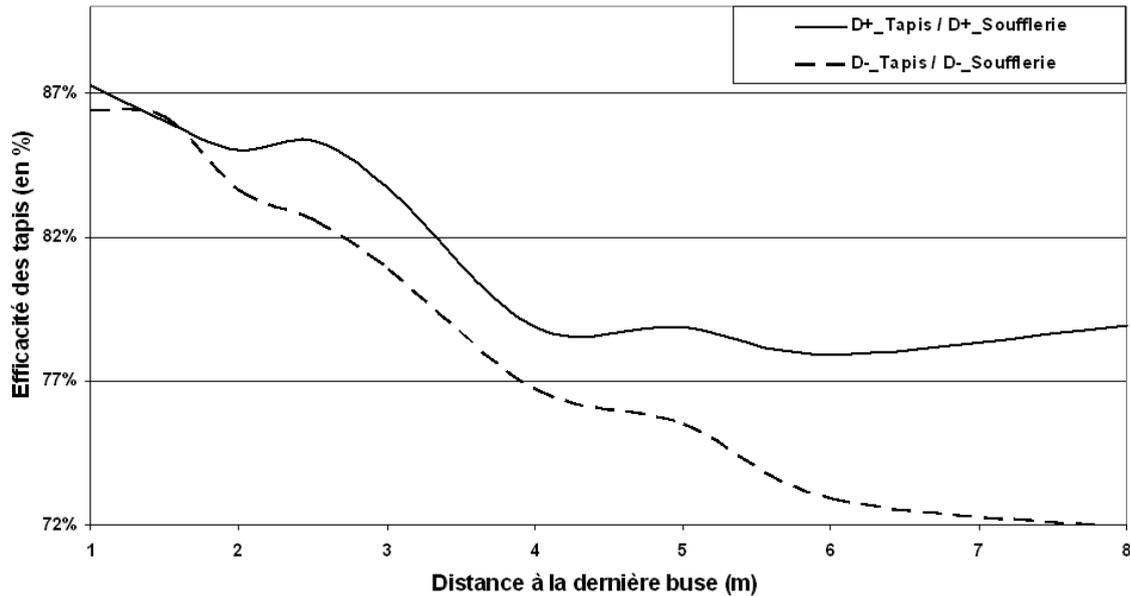


FIGURE 5.3 – Efficacité des tapis sélectionnés par rapport au banc à gouttière de la soufflerie du Cemagref pour les deux configurations D+ et D-.

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).

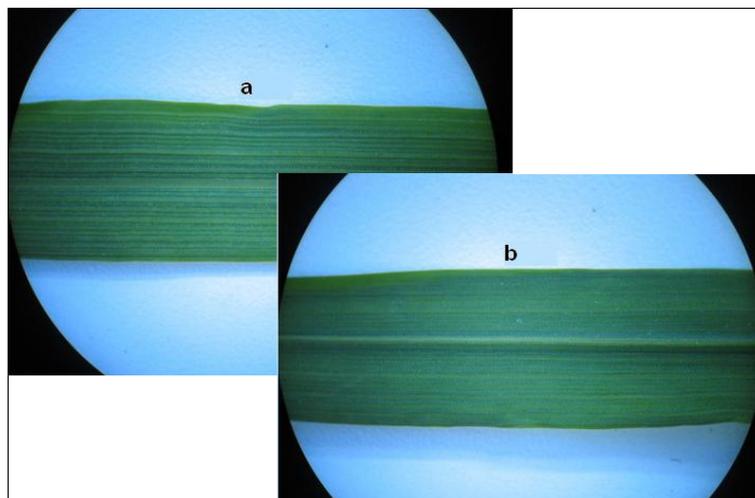


FIGURE 5.4 – Photos microscopiques de l'état de surface d'une feuille de blé "Karim". (a) Face supérieure (b) Face inférieure.

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).

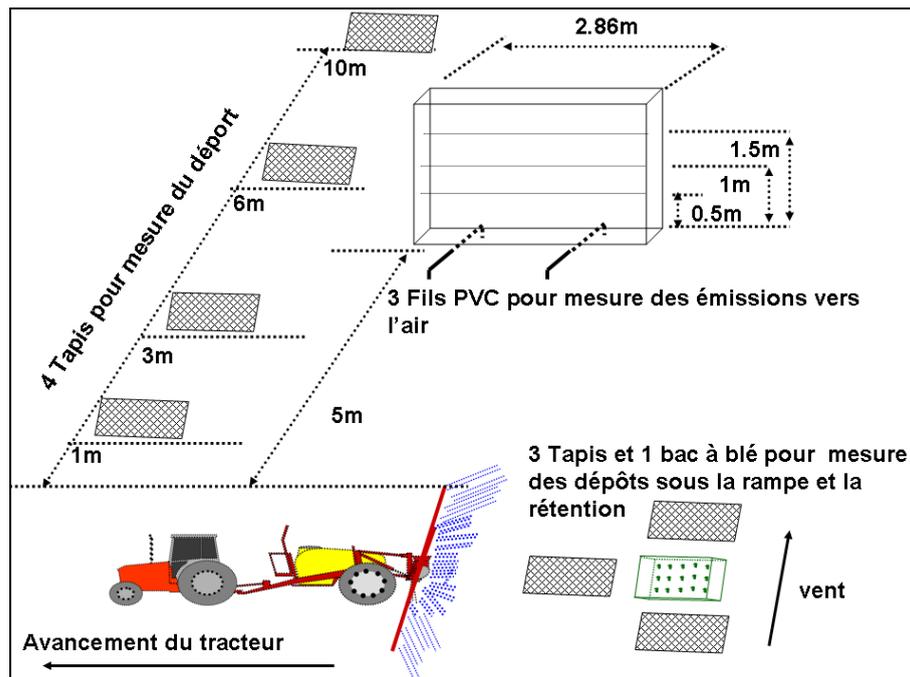


FIGURE 5.5 – Dispositifs de mesure des pertes de pesticides et de la rétention sur les plantes au champ.

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 ($^{\circ}\text{C}$)	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 $^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ 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.

Troisième partie

La dérive des gouttelettes

Les études menées au cours des dernières décennies sur la dispersion des pesticides dans l'environnement montrent la présence de nombreux composés organiques à usage agricole dans l'atmosphère sous différentes formes : dans l'air, dans la pluie, dans la neige et dans le brouillard. L'une des voies principales de transfert de ces produits dans l'atmosphère est la dérive pendant le traitement. Selon Majewski et Capel (1995), ces transferts se produisent à des degrés variés, compris entre 1 et 75% de la dose appliquée.

Dans des études menées par David Pimentel aux USA sur les pertes des pesticides et leur impact environnemental (Pimentel, 1995, 1996, 2002), seulement 0,03% des pesticides appliqués atteignent leurs cibles et les pertes par dérive varient de 10 à 30% de la dose appliquée. Pour les pulvérisateurs à rampe linéaire, cette perte dépend en grande partie des facteurs climatiques : dans des conditions normales elle est faible et représente environ 5% de la dose appliquée (Southcombe *et al.*, 1997). Dans des conditions extrêmes elle pourra dépasser les 30%. Une estimation de la dérive au sol en pourcentage de la dose appliquée a été établie par Ganzelmeier *et al.* (1995) et Ganzelmeier (1997) pour différents types de cultures à différentes distances de la cible.

Une autre part de perte provient de l'évaporation des fines gouttelettes pendant le traitement. Cette partie est considérée comme importante dans certaines conditions climatiques à haute température et faible taux d'humidité (Reichard *et al.*, 1992a ; Kaul *et al.*, 1996).

Les niveaux les plus élevés de ces pertes sont généralement détectés **à proximité de la parcelle traitée pendant les campagnes de traitement**. Toutefois, ils peuvent être détectés pendant d'autres moments de l'année et dans des endroits pouvant être très loin du site du traitement (Bacci *et al.*, 1986 ; Cotham et Bidleman, 1991 ; Buser, 1990 ; Jensen *et al.*, 1997). Sous des conditions bien déterminées, certains pesticides peuvent voyager de longues distances, à travers l'atmosphère, pour retomber au sol avec des dégâts importants sur les écosystèmes sensibles. Jensen *et al.* (1997) et Bidelman (1999) ont signalé la contamination de l'Arctique canadien par des pesticides qui ont été utilisés dans des zones situées à des milliers de kilomètres de cette région du monde. Les auteurs ont identifié des produits chlorés comme le *DDT*, le *lindane*, le *chlordan*e et la *dieldrine*. En effet, suivant la stabilité de la substance, une fois les gouttelettes qui sont chargées de matière active dans l'atmosphère, elles peuvent être transportées par les masses d'air à plus ou moins grande distance. Les courants ascendants et les vents les dispersent en altitude et assurent ainsi leur circulation atmosphérique.

Les pertes de pesticides peuvent être calculées en fonction de la plupart des paramètres pouvant affecter le processus de pulvérisation : le diamètre médian des gouttelettes, la hauteur et la largeur de la rampe, la température, l'humidité relative, la vitesse du vent, le nombre et la largeur des lignes de traitement, la fraction non-volatile et l'étendue relative de la distribution de la taille des gouttelettes.

Pour estimer le niveau de ces pertes, plusieurs modèles ont été développés pour compléter le travail expérimental mené sur le terrain. A priori, l'utilisation de ces modèles ne peut pas remplacer l'approche expérimentale ; c'est plutôt un complément puissant permettant de comprendre le phénomène de perte afin de prévoir les solutions les mieux adaptées.

Dans cette deuxième partie du rapport, nous nous intéresserons de près au phénomène de dérive pendant le traitement, telle que définie au début de ce document (section 2.1, p. 11), c'est-à-dire à la part incluant les dépôts ainsi que la volatilisation (gouttelettes perdues dans l'air + évaporation). Rappelons que les phénomènes entrant en jeu après le traitement ne font pas partie de nos préoccupations ici.

Nous commencerons par un état de l'art sur les différents types de modèles de dérive existants, leurs principes et leurs approches d'estimation des pertes. Une attention particulière sera donnée aux méthodes de prise en considération de la turbulence et de l'évaporation.

Après cette synthèse bibliographique, nous présenterons le modèle de dérive, **DriftL** développé dans le cadre de cette thèse, et nous comparerons ses résultats aux données expérimentales ainsi qu'à ceux de quelques autres modèles.

Chapitre 6

Etat de l'art de la modélisation de la dérive

6.1 Rappel du comportement physique du jet au voisinage des buses

L'énergie fournie par la pompe du pulvérisateur aux buses est globalement partagée en trois parties : une première portion est utilisée à l'intérieur de la chambre de la buse pour la fragmentation et l'éjection du liquide. La portion restante est elle-même divisée entre deux fractions : une consommée pendant la **déformation des gouttelettes** et l'autre sous forme d'énergie cinétique utilisée pour leur **déplacement** (Barthelemy *et al.*, 1990). La vitesse des particules dépendra de cette dernière fraction. Avec le déplacement des gouttelettes dans l'air, cette énergie baisse peu à peu sous l'effet du frottement et l'air est entraîné parallèlement au déplacement du jet. Ce mouvement d'air se traduit par une légère dépression à l'arrière du jet et de la buse. La conséquence immédiate de ce phénomène est la création d'un mouvement turbulent derrière le pulvérisateur. Dans ces conditions, les gouttelettes les plus fines du nuage n'ont pas l'énergie leur permettant de résister à cette turbulence, elles suivront alors le vent turbulent dans son **mouvement ascendant**. Les petites gouttelettes qui se trouvent à l'extérieur des zones de turbulence partiront par dérive sous l'effet ou bien du **vent latéral** : (vent parallèle à la rampe) ou bien du **vent relatif suivant le sens d'avancement du tracteur** : (vent résultant de l'avancement et du mouvement de l'air vers l'avant). Selon Asman *et al.* (2003), le mouvement des gouttelettes dans ces deux derniers cas peut être supposé comme horizontal. Peu importe la direction, ces différents mouvements d'air affectent en premier lieu le devenir des gouttelettes de faible diamètre et dont l'énergie est insuffisante. L'augmentation de la vitesse du vent augmente la quantité de bouillie sous le vent et ainsi le niveau de dépôt. La figure 6.1 schématise ces différents processus physiques en mettant en évidence l'effet du vent relatif, latéral et vertical.

La modélisation de ce mouvement des gouttelettes a bénéficié d'une grande attention de la part de la communauté scientifique. Plusieurs modèles de dérive basés sur les approches expliquées dans la section 2.3 (p. 13), et les principes de la mécanique des fluides ont ainsi été développés. Certains se basent sur des méthodes purement statistiques tandis que d'autres écrivent les équations de la physique (modèles descriptifs). Dans ces modèles, la turbulence est prise en compte de manière plus ou moins détaillée et modélisée par différentes approches. Ces modèles descriptifs diffèrent aussi par la prise en compte ou non de l'évaporation. Les phénomènes d'entraînement de l'air par le jet et la turbulence qui en résulte ont été décrits par Briffa et Dombrowski (1966) et une modélisation est proposée par Ghosh et Hunt (1994).

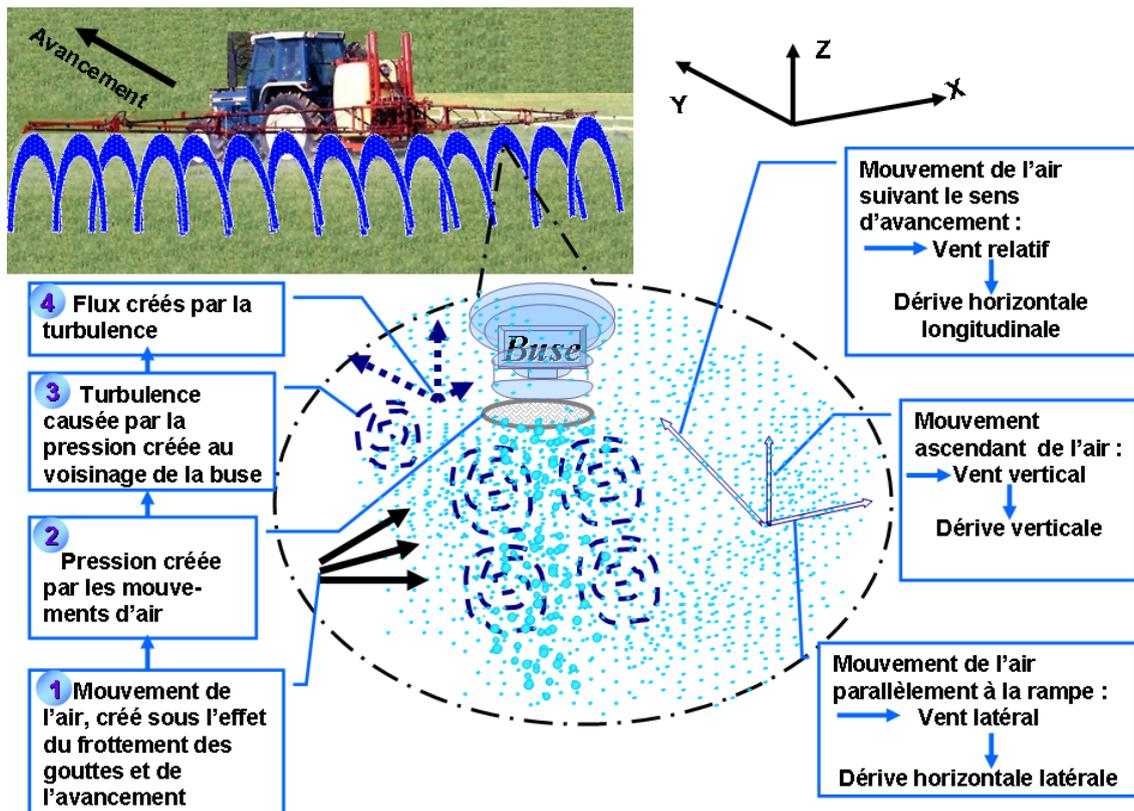


FIGURE 6.1 – Comportement physique du jet au voisinage des buses en présence d'un vent relatif, latéral et vertical.

6.2 Les grands types des modèles

Les modèles de dérive les plus connus sont présentés par Unsworth *et al.* (1999) et Gil et Sinfort (2005). Globalement, ces modèles peuvent être classés en trois types : les modèles basés sur l'intégration de données expérimentales (statistiques), les modèles dérivant les trajectoires de gouttelettes isolées et ceux qui calculent la trajectoire du nuage.

6.2.1 Modèles statistiques

Pour évaluer la dérive, certains chercheurs utilisent des méthodes statistiques combinant des données obtenues sous des conditions contrôlées et des résultats de terrain. Tout d'abord des outils d'estimation ont été réalisés à partir de l'assimilation expérimentale. Ainsi, la BBA¹ a mis en place d'importantes campagnes de mesures (Ganzelmeier *et al.*, 1995 ; Herbst et Ganzelmeier, 2000) pour déterminer les dérives dues à un vent latéral pour différentes techniques du traitement sur différents types de cultures (voir les tableaux de dérive présentés en annexe B.1). Par la suite, dans le cadre des travaux du groupe européen FOCUS², un modèle a été développé à partir de ces données en réalisant des multi-régressions pour calculer les taux de dérive en fonction de la distance dans différentes situations. Le pourcentage de dérive est estimé par :

$$D_d = a(Z_d)^b \quad (6.1)$$

avec a et b des coefficients qui dépendent de la culture et Z_d la distance de dérive.

1. Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft : Centre allemand de recherche biologique pour l'agriculture et la forêt.

2. FORum for Co-ordination of pesticide fate models and their USE : c'est un groupe créé en 1993 par la commission européenne pour harmoniser le calcul des concentrations de pesticides prévisibles dans l'environnement (PEC)

L'outil est décrit dans le rapport du groupe Focus concernant la mise en place de scénarios pour l'étude des contaminations des eaux de surface par les pesticides (FOCUS, 2000). En se basant sur ces tableaux également, la *BBA* (BBA., 2002) a développé un modèle d'estimation (*EVA1,1 : Exposure Via Air*) pour la prédiction de la dérive et de la volatilisation, terrestres et aquatiques.

Herbst et Wolf (2001) ont établi un modèle simple à partir d'essais conduits en soufflerie, permettant de calculer le potentiel de dérive (Drift Potential Index : DIX) pour différents types de buses. Selon les auteurs, les tests de validation qui ont été réalisés avec des données obtenues en soufflerie et sur terrain ont montré une bonne corrélation avec les dépôts mesurés et le calcul du modèle. *DIX* ne décrit formellement ni l'évaporation ni la turbulence. Cet outil est utilisé par la *BBA* pour l'estimation de la dérive sur terrain.

Smith et Miller ont également proposé une approche stochastique pour modéliser les trajectoires de particules des jets projetés (Smith et Miller, 1994). Sarker et Parkin (1995), ont élaboré un modèle empirique qui prédit la dérive des gouttelettes. Ils se sont basés sur des mesures réalisées en tunnel pour déterminer une corrélation entre les paramètres les plus influents dans le processus de dérive, sans aborder les aspects théoriques du phénomène.

Teske *et al.* (2001) proposent de représenter le taux de dépôt en fonction de la distance x au bord de la parcelle par la relation :

$$D(x) = \frac{c}{\left(1 + \frac{x}{a}\right)^b} \quad (6.2)$$

où a , b et c sont calés sur des mesures expérimentales. Ce modèle constitue le « niveau 1 » du modèle AgDrift pour l'évaluation de la dérive pour les traitements terrestres.

Dans la plupart de ces outils, la mesure de la dérive a été limitée à la détermination de la masse de pesticide déposée au sol en dehors de la zone traitée et des gouttelettes dispersées dans l'air. Ils ne donnent pas d'informations sur la fraction qui ne parvient pas à la cible par rapport à la dose appliquée.

6.2.2 Modèles calculant les trajectoires de gouttelettes isolées

Au cours de leur déplacement dans l'air, les gouttelettes sont soumises à plusieurs forces qui ont une influence plus ou moins importante sur leur mouvement. Ces modèles, dits « **Lagrangiens** », sont basés sur le calcul de la trajectoire des gouttelettes à partir du bilan des forces en prenant en compte la vitesse du vent et suivant les cas, la turbulence de l'air et l'évaporation des gouttelettes. La plupart des modèles décrits dans la littérature sont basés sur ce principe. Parmi eux, on peut citer :

- le modèle proposé par Walklate (1992),
- le modèle **Driftsim** (Reichard *et al.*, 1992b),
- le modèle **Idefics** (Holterman *et al.*, 1998b),
- le « niveau 2 » du modèle **AgDrift** (Teske *et al.*, 2001).

Calcul de la vitesse du vent

Dans ces modèles, la vitesse horizontale moyenne du vent au dessus de la culture est couramment estimée à l'aide d'une équation qui dépend principalement de la hauteur de la canopée et de la rugosité de la surface du couvert végétal (Thom, 1975 ; Hartley et Graham-Bryce, 1980) :

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \log\left(\frac{z - d_z}{d_r}\right) \quad (6.3)$$

avec :

$U(z)$ = vitesse du vent à la hauteur z ($m.s^{-1}$),

u_* = vitesse de friction ($m.s^{-1}$),

κ = constante de Von Karman (elle est d'environ 0,4),

z = hauteur (m),

d_z = correction de "z" pour prendre en compte la hauteur de la culture (m),

d_r = rugosité de la surface (m).

Dans son ouvrage *Momentum, mass and heat exchange of plant communities*, Thom (1975) indique que d_z est d'environ 0,6 à 0,8 fois la hauteur de la culture, alors que d_r est de l'ordre de 1/10ème de ce même facteur. Il ajoute qu'à l'intérieur de la végétation, le profil logarithmique du vent n'est plus valable et l'équation 6.3 doit alors être légèrement modifiée, ainsi il propose cette deuxième forme :

$$U(z) = \frac{U_c}{(1 + K(1 - \frac{z}{z_c}))^2} \quad (6.4)$$

où

- U_c est la vitesse du vent à la hauteur z_c (en $m s^{-1}$),

- z_c est la hauteur de la culture (en m), et

- K est une constante.

Dans Hartley et Graham-Bryce (1980), K dépend de la structure de la canopée et ils lui ont attribué la valeur 2.

Lorsque la végétation est dense et que la pulvérisation est assistée par un flux d'air, il faut calculer les vitesses d'air à l'intérieur de la végétation. Selon Walklate *et al.* (1996), le comportement du flux d'air dans la végétation peut être déterminé par une méthode empirique qui décrit la décroissance exponentielle de la vitesse du flux d'air généralement observée au sein d'une végétation.

$$U(x) = U(x_0) \cdot \exp[-\beta(x - x_0)] \quad (6.5)$$

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 \quad (6.6)$$

Dans la relation (6.6), β_1 est un facteur représentant la répartition du jet d'air à l'intérieur de la végétation, β_2 représente l'effet de la densité de la végétation et β_3 est un facteur qui tient compte de l'effet du mouvement des feuilles sur la densité de la végétation.

Dans leur modèle développé pour calculer la pénétration de la pulvérisation dans la vigne, Da Silva et Sinfort ont pris en compte seulement β_2 , (Da Silva, 2003 ; Sinfort, 2006) avec l'expression suivante :

$$\beta_2 = C_d \times A_s \quad (6.7)$$

où C_d est le coefficient de traînée global de la végétation et A_s la densité surfacique de la plante en $m^2.m^{-3}$. Les auteurs ont corrigé le terme C_d par un coefficient de masquage C_n qui prend en compte la superposition des feuilles.

La valeur de ce coefficient est comprise entre 0,1 et 0,5 et le maximum correspond à une feuille isolée qui est perpendiculaire au flux d'air.

La relation 6.7 ne donne qu'une expression de la vitesse moyenne du flux à l'intérieur de la végétation ; elle ne permet pas d'obtenir les vitesses instantanées caractérisant la turbulence.

Calcul de la vitesse initiale des gouttelettes

Les conditions initiales de formation du jet font partie des données indispensables pour décrire les trajectoires des gouttelettes. La vitesse initiale des gouttelettes à la sortie de la buse est l'une de ces conditions. Pour simplifier le calcul, certaines hypothèses sont proposées.

On suppose généralement que **la position de la source et la distribution des vitesses initiales sont connues**. Une autre hypothèse couramment utilisée est que **les particules sont sphériques et que leur masse volumique est constante**. Une troisième hypothèse consiste à considérer que **la formation des gouttelettes a lieu à la sortie de la buse, immédiatement après l'éjection du jet**, où l'effet de l'air est supposé être encore négligeable, comme dans Sidahmed (1996).

Partant de cette dernière hypothèse, la plupart des auteurs utilisent l'équation de Bernoulli pour calculer la vitesse d'émission, V_0 des gouttelettes.

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\nu_e P}{\rho_l}} \quad (6.8)$$

où :

ν_e : efficacité du processus d'atomisation,

P : pression à la sortie de la buse.

Goering *et al.* (1972) ont utilisé l'équation 6.8 en supposant que la perte d'énergie créée lors de la fragmentation est constante (20%). Ils ont alors appliqué un coefficient ν_e de 0,8 pour les différents types de buses et l'équation utilisée est donc :

$$V_0 = \sqrt{\frac{2 \times 0,8P}{\rho_l}} \quad (6.9)$$

Plusieurs auteurs ont cherché à prendre en compte l'effet de l'entraînement de l'air schématisé dans la figure 6.1 (p.37) sur la vitesse initiale des gouttelettes. Partant de ces observations, Holterman *et al.* (1998b) ont réalisé des mesures laser avec un PDA³ et ont calé les vitesses initiales du modèle IDEFICS à partir de ces mesures complétées par des mesures sur un banc de répartition. Une optimisation de la vitesse initiale par calage sur des données expérimentales a également été proposée par Teske *et al.* (2001) pour le niveau 2 du modèle AgDrift (cf. section 6.3.2, p.49).

Equations du mouvement

La trajectoire d'une gouttelette liquide dans un flux d'air est obtenue à partir du bilan des forces qui s'exercent sur elle et qui sont liées par la deuxième loi de Newton :

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum \vec{F} \quad (6.10)$$

Les forces qui s'appliquent sur cette gouttelette sont :

- Les **force volumiques**, \vec{F}_i : ce sont la gravité (le poids de la gouttelette : $\vec{F}_g = m\vec{g}$) et la force d'Archimède : $\vec{F}_A = m\vec{g}(\rho_a/\rho_l)$. Leur expression est :

$$\vec{F}_i = m\vec{g}\frac{\rho_l - \rho_a}{\rho_l} \quad (6.11)$$

avec

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \quad (6.12)$$

Certains auteurs négligent la portance car ils considèrent que la masse volumique de l'air est très faible par rapport à celle du liquide pulvérisé. La gravité est aussi parfois négligée.

- La **force de traînée**, \vec{F}_D :

$$\vec{F}_D = \frac{1}{2}\rho_a\frac{\pi d^2}{4}C_d\|\vec{U} - \vec{V}\|(\vec{U} - \vec{V}) \quad (6.13)$$

Il y a des auteurs qui ajoutent d'autres forces de moindre importance comme les forces électriques et moléculaires. Pour notre cas, ces types de forces ont un effet négligeable sur le mouvement global de la gouttelette.

L'équation de la vitesse de la gouttelette est ainsi déterminée à partir de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dV}{dt} = g\frac{\rho_l - \rho_a}{\rho_l} - \frac{\rho_a\pi d^2 C_d V^2}{8(\rho_l\frac{\pi d^3}{6})} \quad (6.14)$$

à l'équilibre ($dV/dt = 0$) on obtient la vitesse de sédimentation de la gouttelette :

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{g}{C_d}\frac{\rho_l - \rho_a}{\rho_a}d} \quad (6.15)$$

Le coefficient de traînée C_d dépend du nombre de Reynolds (Re) qui est donné par de nombreuses expressions . Celles ci sont généralement obtenues par des méthodes de régression à partir de résultats expérimentaux observés sur des sphères. La relation proposée par Perry *et al.* (1984) est :

- Pour $Re \leq 1000$:

$$C_d = \frac{24}{Re}(1 + 0,14Re^{0,70}) \quad (6.16)$$

Cette relation donne des valeurs tout à fait correctes pour un nombre de Reynolds particulière qui n'est pas élevé ce qui est bien notre cas étant donné le faible diamètre des gouttelettes.

- Pour $Re > 1000$:

$$C_d = 0,447 \quad (6.17)$$

Holterman *et al.* (1998b) utilisent une relation qui permet de retrouver les résultats expérimentaux publiés par Eck (1961) pour les nombres de Reynolds inférieurs à 10^4 :

$$C_d = \left(\left(\frac{a}{Re} \right)^c + b^c \right)^{1/c} \quad (6.18)$$

avec $a = 24$, $b = 0,32$ et $c = 0,52$

Reichard *et al.* (1992b) utilisent quant à eux la relation empirique suivante :

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + a_3 \times Re^2 \quad (6.19)$$

Au voisinage du sol, le mouvement du vent devient horizontal et la vitesse verticale de la gouttelette est proche de sa vitesse de sédimentation, V_s (eq. 6.15). V_s dépend uniquement de la taille de la gouttelette : à titre d'exemple, le temps de chute d'une gouttelette de 20 μm est de 4 minutes alors qu'il est de 2 secondes seulement pour une gouttelette de 400 μm (Ozkan, 1991). Mercer *et al.* (2007) proposent des vitesses typiques de sédimentation des gouttelettes d'eau en fonction du diamètre (cf. annexe C).

Les équations de la trajectoire sont intégrées sur un pas de temps fixe ou variable pendant lequel les variables sont supposées constantes. Pour DriftSim, le calcul est fait avec le logiciel Fluent qui utilise la méthode des volumes finis. Dans IDEFICS, Holterman *et al.* (1998b) utilisent un modèle de marche aléatoire dans lequel le pas de temps est adapté (il est plus court près de la buse) à partir de la variation du temps de relaxation de la gouttelette. L'intégration de la turbulence au sein de ces méthodes est détaillée dans la partie suivante.

Prise en compte de la turbulence dans le calcul de la trajectoire

La turbulence peut être prise en compte à deux niveaux :

Le premier niveau est celui de la turbulence générale de la couche limite atmosphérique. Il dépend en partie de la stabilité atmosphérique.

Le deuxième niveau est celui de la turbulence générée par le jet pulvérisé qui se déplace et par l'air entraîné à l'intérieur du jet (cf. fig 6.1, p. 37). Cette turbulence a été prise en compte dans le modèle AgDrift où l'énergie cinétique turbulente locale est corrigée par l'ajout d'un terme égal à 10% de la vitesse d'air entraîné par le jet. Dans les autres cas, elle n'est pas prise en compte de manière explicite.

Les principales méthodes utilisées pour calculer la trajectoire des gouttelettes en tenant compte de la turbulence sont présentées dans Xu *et al.* (1998). D'une manière générale, l'effet de la turbulence est représenté en calculant un grand nombre de trajectoires de gouttelettes appartenant à une classe de taille connue, ensuite les résultats obtenus sont appliqués à l'ensemble du nuage par des simples extrapolations. Dans ce qui suit, sont décrites les deux grandes familles de modèles : les modèles de marche aléatoire et les modèles basés sur les équations de Reynolds moyennées (RANS).

Modèles de marche aléatoire

Ces modèles se basent sur le processus de Markov. En calculant la trajectoire d'une particule, ils permettent d'introduire l'effet de la turbulence en considérant sa vitesse à l'instant t et à l'instant $t-\Delta t$, pondérées à l'aide d'une composante aléatoire qui représente les fluctuations de la vitesse d'air.

Cette approche a été suivie par plusieurs chercheurs en considérant des distributions gaussiennes de la vitesse de l'air, voir par exemple Thompson et Ley (1983) ; Miller et Hadfield (1989) ; Walklate (1992) ; Hobson *et al.* (1993) ; Xu *et al.* (1998).

Par exemple, l'expression utilisée par Holterman *et al.* (1998b), pour le modèle IDEFICS, est :

$$\overrightarrow{V}_{i+1} = \overrightarrow{V}_i \alpha_i + \overrightarrow{V}_{s,i} (1 - \alpha_i) \quad (6.20)$$

où $V_{s,i}$, la vitesse de sédimentation à l'instant i , s'écrit :

$$\overrightarrow{V}_{s,i} = \tau_i \overrightarrow{g} + \overrightarrow{u}_i \quad (6.21)$$

u_i désigne la vitesse du vent et τ_i , le temps de relaxation de la gouttelette à l'instant i :

$$\tau_i = \frac{4\rho_l d_i}{3\rho_a V_i C_d} \quad (6.22)$$

L'expression utilisée pour C_d est celle donnée en équation 6.18. A chaque pas de calcul, la vitesse u_i , est déterminée en utilisant la vitesse moyenne de l'air et une vitesse locale aléatoire calculée à partir de la stabilité atmosphérique.

Le pas de temps, Δt est estimé à partir de la dérivée du rapport

$$\left| \frac{\Delta\tau}{\tau} \right|$$

suivant la relation :

$$\Delta\tau = \frac{\partial\tau}{\partial V_r} \frac{dV_r}{dt} \Delta t + \frac{\partial\tau}{\partial d} \frac{d(d)}{dt} \Delta t \quad (6.23)$$

Le premier terme de cette expression désigne le changement dû à la vitesse de la gouttelette, à la vitesse locale de l'air et à l'orientation ; le deuxième terme désigne l'effet de la variation de diamètre due à l'évaporation (Williamson et Threadgill, 1974). L'expression 6.23 est utilisée pour borner la valeur maximale de Δt .

Modèles Reynolds Average Navier Stokes, « RANS »

Une autre méthode souvent appliquée consiste à moyenner les équations de Navier Stokes pour obtenir l'effet moyen de la turbulence. Cette méthode est essentiellement appliquée dans le domaine de la mécanique des fluides, pour résoudre les problèmes liés aux écoulements turbulents. Plusieurs scientifiques ont utilisé ces équations de Reynolds moyennées (RANS) pour le calcul de la trajectoire des gouttelettes à l'aide de codes de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics), le plus souvent, FLUENT ©.

Parmi les modèles RANS les plus couramment utilisés, le modèle K-Epsilon calcule l'effet moyen de la turbulence à partir du bilan de deux grandeurs : l'énergie cinétique turbulente K et le taux de dissipation visqueuse, ϵ . Ces deux grandeurs permettent de calculer la viscosité turbulente :

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

qui permet à son tour de calculer les termes du tenseur de Reynolds, $\langle u'_i u'_j \rangle$ (où les u' désignent les fluctuations de la vitesse de l'air et l'indice, la direction considérée) à partir de l'hypothèse de Boussinesq (pour plus de détails, voir par exemple Lesieur, 1994). Pour une trajectoire donnée, une composante aléatoire de vitesse est déterminée à chaque pas de calcul. On simule ensuite un grand nombre de trajectoires pour chaque diamètre de gouttelette.

Le modèle DriftSim a ainsi été construit à partir de simulations sous Fluent, validées par des essais en soufflerie (Reichard *et al.*, 1992a,b ; Zhu *et al.*, 1996). Brown et Sidhamed (2001) ; Sidhamed et Brown (2002) ; Gil *et al.* (2007) ont utilisé la CFD pour simuler la dispersion atmosphérique des pesticides pendant des traitements dans la vigne. Xu *et al.* (1998) ; Da Silva *et al.* (2005) ; Sinfort (2006) l'ont appliqué également dans la vigne pour étudier l'effet des interactions entre les flux d'air et la végétation.

Autres méthodes

Plusieurs autres méthodes ont été utilisées par les chercheurs pour considérer la turbulence dans le calcul de la trajectoire des gouttelettes. Teske *et al.* (2002) ont par exemple utilisé les représentations de Fourier pour construire leur modèle AgDrift. Pour cela, les composantes des flux d'air sont calculées à chaque pas de temps à partir d'expressions de modélisation des covariances turbulentes $\langle x'_i x'_i \rangle$, $\langle x'_i v'_i \rangle$, $\langle v'_i v'_i \rangle$, $\langle x'_i u'_i \rangle$, $\langle u'_i v'_i \rangle$, comme expliqué dans Teske *et al.* (2001), avec x' , v' et u' qui désignent les fluctuations locales de la position de la gouttelette, de la vitesse de la gouttelette et de la vitesse de l'air, respectivement et l'indice i , la direction considérée.

Baetens *et al.* (2007) ont utilisé une méthode analytique pour développer un modèle de dispersion gaussien en 3D autour de la trajectoire moyenne à l'aide d'un logiciel de CFD.

6.2.3 Prise en compte de l'évaporation

L'étude des principes physiques de ce phénomène a commencé depuis bien longtemps et continue toujours (Goering *et al.*, 1972 ; Williamson et Threadgill, 1974 ; Holterman *et al.*, 1997b ; Teske *et al.*, 2002 ; Reichard *et al.*, 1992a ; Da Silva, 2003 ; Gil, 2007). Ces différents chercheurs ont constaté la complexité des facteurs influant l'évaporation pendant l'application des pesticides (propriétés physico-chimiques de la formulation, caractéristiques des gouttelettes et conditions atmosphériques). Ils ont ainsi développé plusieurs types de modèles capables de prendre en compte ce phénomène. Ces travaux sont le plus souvent basés sur l'un des plus anciens modèles dans ce domaine qui est celui de Ranz et Marshall Jr. (1952a,b). A titre d'exemple, ce modèle a été utilisé par Goering *et al.* (1972), Williamson et Threadgill (1974), Holterman *et al.* (1997a), Brown et Sidhamed (2001), Asman *et al.* (2003) et bien d'autres. C'est ce modèle qui est aussi utilisé dans le code de calcul CFD Fluent©.

Dans les modèles de dérive, on considère en général que le produit phytosanitaire est non volatil mais qu'il est contenu dans un solvant (le plus souvent l'eau) qui constitue la phase qui s'évapore. Quand ce solvant est totalement évaporé, on considère que le produit phytosanitaire reste en suspension dans l'air.

Modèle de Ranz et Marshall

– Equations générales :

Ce modèle suppose que les molécules s'échangent librement entre l'air et la gouttelette, négligeant les phénomènes de tension superficielle. Le transfert de masse entre une gouttelette d'eau et l'air environnant est décrit, en régime permanent, par :

$$\frac{dm}{dt} = -K_g A_p \Delta P_v m_v \quad (6.24)$$

avec

$$K_g = \frac{k_v \rho_a}{m_a d p_{as}} Nu', \quad (6.25)$$

où

$$Nu' = 2 + 0,6 Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad (6.26)$$

Sc et Re sont respectivement les nombres de Schmidt et de Reynolds :

$$Sc = \frac{\nu_a}{k_v} \text{ et } Re = \frac{V_R d}{\nu_a}$$

D'après Williamson et Threadgill (1974), l'expression de Nu' a été précisée par Bird *et al.* (1960) :

$$Nu' = 2 + 0,552Sc^{1/3}Re^{1/2} \quad (6.27)$$

En considérant une gouttelette sphérique de diamètre d , on peut écrire que la section de la gouttelette est :

$$A_p = \pi d^2 \quad (6.28)$$

et que la masse de la gouttelette est :

$$m = \rho_l \pi \frac{d^3}{6}$$

ce qui implique :

$$\frac{dm}{dt} = \rho_l \pi \frac{d^2}{2} \frac{d(d)}{dt} \quad (6.29)$$

et, en combinant (6.24), (6.25), (6.28) et (6.29), on obtient :

$$\frac{d(d)}{dt} = -2 \frac{m_v}{m_a} \frac{k_v}{d} \frac{\rho_a}{\rho_l} \frac{\Delta P_v}{p_{as}} Nu' \quad (6.30)$$

Une expression du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau en fonction de la température est donnée par Ranz et Marhsall Jr. (1952a) :

$$k_v = 5,28 \times 10^{-10} T_s^{1,88} \quad (6.31)$$

Holterman (2003), lui, propose :

$$k_v = 21,2 \times 10^{-6} (1 + 0,007 \times T) \quad (6.32)$$

La relation (6.30) a été validée expérimentalement par Ranz et Marshall pour des gouttelettes d'eau de diamètre $954 \mu\text{m}$, avec des températures variant entre 19 et 25°C et pour des nombres de Reynolds entre 2 et 184.

– Simplifications :

Propriétés atmosphériques :

En considérant que l'air se comporte comme un gaz parfait, on peut écrire :

$$\frac{\rho_a}{m_a p_{as}} = \frac{1}{RT_s} \quad (6.33)$$

Si de plus on suppose que la vapeur d'eau qui s'évapore se comporte comme un gaz parfait, on peut aussi expliciter le rapport $\Delta P_v/p_{as}$. Williamson et Threadgill (1974) puis Reichard *et al.* (1992a) utilisent cette propriété et écrivent :

$$\frac{\Delta P_v}{p_{as}} = \frac{X_{vs} - X_{v\infty}}{1 - X_{vs}}$$

En supposant que la température des gouttelettes est peu différente de la température humide de l'air ambiant, Thompson et Ley (1983) et Holterman (2003) expriment ΔP_v en fonction de $\Delta T_v = T - T_h$ en utilisant la relation :

$$\Delta P_v = \eta \Delta T_v \quad (6.34)$$

avec ν la viscosité cinématique de la solution.

Après une discussion détaillée, ils ont proposé de considérer que η est approximativement constant (67 Pa/K).

On peut ensuite considérer que, dans l'équation (6.30), seuls d et V_R dépendent du temps, les autres valeurs dépendant uniquement des conditions atmosphériques. Ainsi Thompson et Ley (1983) puis Cox *et al.* (2000) utilisent les valeurs des grandeurs caractérisant les propriétés de l'air et de l'eau à 15°C⁴ :

$$\begin{aligned} m_v &= 18 \text{ g.mol}^{-1}, m_a = 29 \text{ g.mol}^{-1} \\ k_v &= 2,34 \times 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1} \\ \rho_a &= 1,23 \text{ kg.m}^{-3}, \rho_l = 1000 \text{ kg.m}^{-3} \\ p_{as} &= 10^5 \text{ Pa} \\ Sc &= \nu_a/k_v = 0,62 \end{aligned}$$

L'équation (6.30) devient alors :

$$\frac{d(d)}{dt} = -\frac{3,58 \times 10^{-13} \Delta P_v}{d} \left(2 + 124 \sqrt{V_R d} \right) \quad (6.35)$$

Cette formulation est reprise par Miller et Hadfield (1989) dans leur modèle de marche aléatoire pour simuler la dérive sous des buses de pulvérisateurs pour grandes cultures. Holterman (2003) généralise cette expression en combinant les expressions (6.30), (6.33) et (6.34) pour écrire :

$$\frac{d(d)}{dt} = -\frac{a}{d} \left(1 + b \sqrt{d V_R} \right) \quad (6.36)$$

avec

$$a = \frac{4\eta m_v k_v \Delta T_v}{\rho_l R T_s} \quad (6.37)$$

$$b = 0,276 (\nu_a k_v^2)^{-1/6} \quad (6.38)$$

a et b étant indépendants du diamètre de la gouttelette.

Taux d'évaporation :

Le taux d'évaporation de la gouttelette est défini par

$$X_{ev} = -\frac{d(d)^2}{dt} \quad (6.39)$$

S'il a été démontré que ce taux reste à peu près constant pour les grosses gouttelettes ($> 300 \mu\text{m}$), il faut, dans les autres cas, considérer ses variations avec le diamètre et la vitesse des gouttelettes. On peut écrire que :

$$X_{ev} = -2d \frac{d(d)}{dt} \quad (6.40)$$

soit, en remplaçant par (6.36)

$$X_{ev} = 2a \left(1 + b \sqrt{d V_R} \right) \quad (6.41)$$

Observant sur des simulations numériques que, quel que soit T ($\Delta T_v = 5^0C$), X_{ev} varie linéairement avec le diamètre des gouttelettes, Holterman (2003), en remplaçant V_R par V_t , propose la relation linéaire :

4. La relation (6.31) donne $k_v = 2,22 \times 10^{-5}$, la relation (6.32) donne $k_v = 2,34 \times 10^{-5}$ et Reichard *et al.* (1992a) prennent $k_v = 2,92 \times 10^{-5}$.

$$\sqrt{dV_t} \approx r_0 d + s_0$$

avec $r_0 = 64,65 \text{ s}^{-1/2}$ et $s_0 = -1,117 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1/2}$, obtenant un coefficient de corrélation de 0,999. En remplaçant dans (6.41), il obtient :

$$X_{ev} = q_0 \Delta T_v (1 + q_1 Dp) \quad (6.42)$$

où

$$\begin{aligned} q_0 &= \frac{2a}{\Delta T_v} (1 + b s_0) \\ q_1 &= \frac{b r_0}{1 + b s_0} \end{aligned}$$

Finalement, considérant que X_{ev} varie peu, il intègre la relation (6.39) et remplace X_{ev} par l'expression (6.42) pour obtenir :

$$d^2 = d_0^2 - X_{ev}.t = d_0^2 - q_0(1 + q_1 d)\Delta T_v.t \quad (6.43)$$

Cette expression permet de bien représenter les variations de diamètre observées expérimentalement par Williamson et Threadgill (1974).

Une hypothèse clé de cette approche consiste à supposer que dans les gouttelettes pulvérisées, seule la partie eau s'évapore. Cependant, Holterman précise que ce modèle est utilisable pour d'autres solvants que l'eau et fournit les propriétés physiques de quelques solvants et pesticides d'utilisation courante en agro-chimie (annexe D).

c. Autres modèles

– Modèle de Davis :

Ce modèle est dérivé de l'écriture de la conservation de l'énergie : il ne considère pas la conservation de la masse, seuls les transferts de chaleur convectifs sont pris en compte. Il a été utilisé par Walklate (1992) qui l'a adapté pour exprimer le taux d'évaporation de la gouttelette par la relation :

$$X_{ev} = -\frac{d(d^2)}{dt} = \frac{2\lambda_v}{\rho l_c} \Delta T_v Nu = C_e \Delta T_v Nu \quad (6.44)$$

en prenant $C_e = 4,13 \times 10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $Nu = 2,0 + 0,6Pr^{1/3}Re^{1/2}$,⁵ d'après la relation empirique donnée par Ranz et Marshall Jr. (1952a). Cette expression est simplifiée par rapport aux équations (6.41) ou (6.42) puisqu'elle ne dépend plus du diamètre des gouttelettes (en fait, le nombre de Reynolds dépend quand même du diamètre de la gouttelette). Là encore, tension superficielle et temps de refroidissement de la gouttelette sont négligés. Walklate (1992) estime que, même avec un vent de force 4, les gouttelettes de diamètre inférieur à 600 μm atteignent leur température d'évaporation en moins de 8 m. Il précise toutefois que, du fait de cette approximation et surtout du rôle de la tension superficielle, le modèle surestime l'évaporation.

5. $Pr = \frac{\nu_a}{K_a}$ où K_a est la diffusivité thermique de l'air [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

– Modèle de Trayford et Welch

Dans leur travaux de simulation des dépôts lors de pulvérisations aériennes, Trayford et Welch (1977) proposent de représenter le diamètre d'une gouttelette d'eau qui s'évapore dans l'air par la relation :

$$\frac{d^2}{d_0^2} = 1 - \frac{t}{\tau_e} \quad (6.45)$$

avec

$$\tau_e = \frac{d_0^2}{x_{ev} \Delta T_v (1 + 0,3Pr^{1/3}Re^{1/2})}$$

soit, en prenant $Pr = 0,72$:

$$\tau_e = \frac{d_0^2}{x_{ev} \Delta T_v (1 + 0,27\sqrt{Re})} \quad (6.46)$$

avec $x_{ev} = 84,76 \mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

6.2.4 Modèles calculant la trajectoire du nuage

Ce sont essentiellement des modèles de dispersion gaussiens qui ont été développés principalement pour évaluer la dérive des pulvérisations aériennes, (voir par exemple De-Leeuw *et al.*, 2000 ; Raupach *et al.*, 2001a ; Teske *et al.*, 2001 ; Craig, 2004). En supposant que la vitesse du vent et la diffusion turbulente n'ont pas de variation spatiale ni temporelle, l'équation d'advection-diffusion s'intègre en une loi Gaussienne. Selon Thistle (2000) et Teske *et al.* (2002), ce sont des modèles analytiques qui fournissent de bonnes estimations moyennes à des échelles de 0,5 à 10 km. Par contre, ils ne sont pas adaptés aux échelles proches de la buse.

L'utilisation de ces modèles exige des informations supplémentaires comme l'efficacité de collecte des dépôts, les effets du couvert végétal, de la stabilité atmosphérique et de l'évaporation ainsi que les propriétés physico-chimiques du produit appliqué. Il est également nécessaire de définir correctement la source d'émission. Il y a aussi à souligner que leurs méthodes de validation sont difficiles à mettre en place.

Brun (2007) a utilisé le concept du modèle gaussien pour développer un modèle à complexité réduite, *DriftX* pour la simulation du transport et de la dispersion des pesticides lors de la pulvérisation de vignes. La source de pesticide dans l'air est calculée à partir d'un modèle de jet rond en représentant la rétention par la végétation par une décroissance exponentielle. Le flux obtenu, calculé à 2,5 m au dessus de la vigne, est transporté par un modèle gaussien. Par rapport à la modélisation du nuage, l'originalité de ce modèle réside dans sa capacité à reconstruire un champ de vent sur une zone considérée, à partir de quelques points, puis de déformer le nuage gaussien en modifiant l'échelle des distances à partir de la vitesse du vent en chaque point.

Le calcul du déplacement et de l'expansion du nuage est également la méthode utilisée dans le modèle *PeDriMo*. Ce modèle est peu décrit dans la littérature. Kaul *et al.* (1995) indiquent seulement qu'à chaque pas de temps, le diamètre moyen des gouttelettes est recalculé pour prendre en compte l'évaporation. A partir de ce diamètre, le modèle calcule la vitesse de sédimentation puis, la taille et la position du nuage. Ce modèle développé par la BBA a été abandonné au profit du modèle par multi-régression décrit dans la partie 6.2.1.

6.3 Présentation de quelques modèles

Certains des modèles développés pour la prévision des pertes de pesticides sont devenus familiers à la communauté scientifique vue leur utilisation aussi bien par les chercheurs que par des

organismes spécialisés dans leur processus d'évaluation de la contamination de l'environnement. Ici, sont présentés trois exemples de ces modèles à savoir IDEFICS, AgDrift et DriftSim. Ces modèles ont été sélectionnés car ils sont diffusés ou que certains de leurs résultats sont publiés de sorte qu'on a pu comparer les résultats entre eux.

6.3.1 Le modèle IDEFICS

IDEFICS ou bien (IMAG programm for Drift Evaluation for Field sprayers by Computer Simulation) est un modèle de dérive développé aux Pays-Bas par Holterman (Holterman *et al.*, 1997a, 1998b,a) pour compléter l'estimation expérimentale de la dérive pendant le traitement des cultures basses. Il est conçu de façon à décrire la trajectoire d'un grand nombre de particules en combinant des profils 2 et 3 dimensions. C'est un modèle Lagrangien qui utilise une méthode par marche aléatoire. La dérive d'un pulvérisateur est évaluée en répétant le calcul pour un ensemble représentatif de buses parmi celles équipant la rampe. Le modèle calcule les trajectoires des gouttelettes en 3D dans une zone proche de la buse. Cette partie inclut des corrections pour la prise en compte de l'air entraîné par le jet. Lorsque cet effet est jugé négligeable, le calcul se poursuit en 2D. Le pas de temps d'intégration est variable (cf. eq. 6.23, p.43). La vitesse de vent suit un profil logarithmique et est modifié à l'intérieur de la culture. La turbulence est prise en compte par ajout d'une composante aléatoire en chaque point de calcul. L'évaporation est modélisée à partir de l'équation 6.43, p.47. Pour modéliser l'effet du sol sur le jet, le modèle intègre un flux d'air provenant d'une buse fictive au niveau du sol.

Les résultats du modèle ont été comparés à des mesures réalisées avec une buse montée sur un chariot et pulvérisant de la Brillant Sulfo Flavine. Pour des dépôts supérieurs à 10% de la dose, les valeurs calculées sont compatibles avec celles mesurées, alors qu'en dessous de 1%, le modèle surestime les dépôts avec un facteur de 2 à 3. Les auteurs expliquent cette différence par des probables fluctuations aléatoires de la direction du vent qui n'ont pas été prises en compte localement.

6.3.2 Le modèle AgDrift

AgDrift (AGricultural DRIFT) a été développé pour évaluer les risques des pesticides au niveau des différents compartiments de l'environnement. Il est dérivé du modèle **AgDisp** (AGricultural DISPersal) initialement développé par l'USDA-FS⁶ pour évaluer les risques des pesticides dans un cadre réglementaire aux USA (Bilanin *et al.*, 1989). AgDrift a été initialement développé pour des traitements aériens. Par la suite, deux autres modules ont été développés, l'un pour le traitement des vergers et l'autre pour les traitements en grande culture. Nous ne nous intéresserons ici qu'à ce dernier modèle. AgDrift comporte deux niveaux qui correspondent l'un à une première simulation rapide et l'autre à une simulation détaillée. Le premier niveau utilise le modèle statistique décrit en équation 6.2. Le deuxième niveau est basé sur une approche Lagrangienne. Le calcul est alors basé sur la définition de classes de diamètre et de leur volume associé. Les équations de la trajectoire sont intégrées pour calculer la position de l'impact d'une gouttelette moyenne de la classe. Les termes de covariance turbulente permettent de calculer la dispersion autour de la trajectoire moyenne et donc, les dépôts autour du point d'impact (cf. section 6.2.2, p.42). La vitesse initiale est calculée à partir de l'équation de Bernoulli. Le taux d'évaporation, est calculé en utilisant le modèle de Trayford et Welch (1977) (cf. p.48). Plusieurs optimisations ont été proposées : calage des paramètres à partir de données expérimentales, correction des vitesses initiales, prise en compte de l'effet du jet sur l'énergie cinétique turbulente autour du jet, correction du profil de vent près du sol.

Les résultats ont été comparés à des mesures réalisées à des données empiriques de 161 échantillons (Bird *et al.*, 2002). Les simulations donnent une bonne représentation des dépôts avec une tendance à la sous-estimation que les auteurs interprètent comme une mauvaise prise en compte de l'effet de la surface du sol (ou de la culture) sur le dépôt.

6. United States Department of Agriculture- Forest Service

6.3.3 Le modèle DriftSim

DriftSim ou (Drift Simulator pour Windows) est un autre modèle de prédiction de la dérive qui a été développé par Reichard *et al.* (1992a) sous Visual Basic. Il permet d'estimer la distance moyenne de dérive des gouttelettes émises par des buses, en particulier, celles des pulvérisateurs conventionnels. Les trajectoires des gouttelettes de diamètre connu ont été au préalable calculées par le logiciel de CFD, Fluent, dans plusieurs conditions prenant en compte la vitesse de vent, la hauteur d'éjection, l'intensité turbulente et l'évaporation. Ces simulations ont été validées par des essais en soufflerie. Les résultats ont été intégrés dans une base de données. Pour une buse donnée, le logiciel DriftSim reconstitue les classes granulométriques et calcule, pour chacune d'elles, la distance avant impact. Il indique également si la classe s'est évaporée ou non avant l'impact. Ces développements sont décrits dans Reichard *et al.* (1992a,b) et Zhu *et al.* (1994, 1996). Les comparaisons des trajectoires calculées par Fluent à celles mesurées dans la soufflerie donnent des résultats globalement cohérents : la plus grande différence enregistrée au niveau de la distance de dérive calculée par les deux programmes était de 0,67 m (soit 14%).

6.3.4 Résultats des modèles présentés

La plupart des modèles développés sont fondés sur des hypothèses simplificatrices concernant la description de la cinétique des particules et le couplage avec l'air environnant. Ils supposent qu'un nuage de gouttelettes en mouvement est constitué de gouttelettes d'eau (gouttelettes mono-composant), de forme sphérique et isolées dans l'air.

Dans ces modèles, le phénomène de dérive est représenté de manière plus ou moins complexe : le modèle peut considérer ou ne pas considérer l'effet de la turbulence sur les gouttelettes au moment de l'émission, ce qui se répercute directement sur leur comportement. Les modèles étant associés à la cinétique des gouttelettes, les distances de dérive obtenues peuvent varier dans des plages assez importantes, même en partant de conditions initiales qui se ressemblent.

Pour les différents modèles décrits dans cette partie, les facteurs qui se sont montrés les plus influents sur la trajectoire des gouttelettes sont la vitesse du vent, la taille et la densité des gouttelettes, la hauteur de la rampe et l'humidité relative. Il y a d'autres facteurs qui ont de l'influence mais avec moins d'importance : c'est surtout la température ambiante, l'intensité de turbulence, la vitesse initiale des gouttelettes et la volatilité du liquide pulvérisé.

a. Effet des conditions du traitement sur la dérive

Les travaux menés pour la mise en place d'AgDrift permettent d'étudier l'effet des conditions d'application sur la dérive. L'étude menée sur le terrain par Teske *et al.* (2002) a montré que les facteurs les plus influents sur la trajectoire, et donc sur le dépôt d'une gouttelette individuelle sont sa **taille**, sa **hauteur d'éjection** et la **vitesse du vent**.

Pour Reichard *et al.* (1992a), la distance de dérive dépend de nombreux paramètres dont principalement la granulométrie, la densité et la vitesse des gouttelettes, l'intensité de la turbulence, la hauteur des buses, la température, l'humidité relative et la vitesse du vent. L'essentiel des résultats de ces travaux est présenté en annexe E. Le rapport entre la distance de dérive calculée (D_c) par le modèle et celle mesurée (D_m) en tunnel, pour des gouttelettes isolées se situe dans la plupart des cas étudiés autour de 1. Le calcul des distances de dérive est fait sur la base d'une intensité de turbulence de 20%. Ceci reste un peu loin de la réalité du terrain où ce facteur a une grande variabilité spacio-temporelle et son effet sur les fines gouttelettes est considérable. Dans une deuxième phase de ce travail, les auteurs ont étudié les effets de la turbulence sur la distance de dérive et ont montré qu'ils ne deviennent négligeables que pour des gouttelettes de diamètre

supérieur ou égal à $200 \mu\text{m}$ (Reichard *et al.*, 1992b).

b. Effet de l'évaporation

1. Temps de vie des gouttelettes

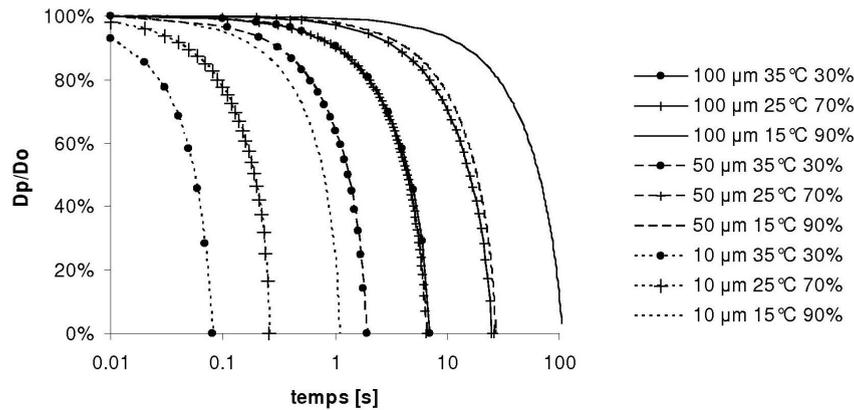


FIGURE 6.2 – Pourcentage de perte de diamètre dû à l'évaporation de gouttelettes de 10 à $100 \mu\text{m}$ suivant le modèle d'Holterman. Les noms des courbes indiquent la taille initiale des gouttelettes, la température en $^{\circ}\text{C}$ et l'humidité relative, respectivement.

La figure 6.2 montre la diminution du diamètre des gouttelettes en fonction du temps, calculée par le modèle utilisé dans IDEFICS pour plusieurs combinaisons de température et d'humidité relative. On voit que le temps de vie des gouttelettes peut varier d'un facteur 10 en fonction des conditions de température et d'humidité. Lorsque ces conditions restent constantes, on observe une variation du temps de vie d'ordre 100 entre des gouttelettes de $10 \mu\text{m}$ et des gouttelettes de $100 \mu\text{m}$. Il faut comparer ces temps de vie à la distance parcourue par la gouttelette : si la hauteur d'éjection est de 50 cm et que la vitesse initiale est de $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la gouttelette mettra 0,05 s pour atteindre le sol (en absence du vent). Trayford et Welch (1977) présentent un graphique comparable à la figure 6.2 et dont les résultats, bien qu'obtenus pour des températures de 15°C maximum, sont tout à fait compatibles.

2. Effet de l'évaporation sur la distance de dérive

Les simulations réalisées par Zhu *et al.* (1994) avec FLUENT[®] pour le modèle DriftSim permettent d'analyser l'influence du vent et de la température sur la taille des gouttelettes et sur leur distance de dérive. Les résultats sont repris dans le tableau 6.1.

On voit que seules les gouttelettes inférieures à $100 \mu\text{m}$ sont significativement affectées par l'évaporation. À partir de $150 \mu\text{m}$, l'effet de l'évaporation devient négligeable. On observe également que, pour un vent donné, lorsque la température augmente, la distance de dérive augmente car les gouttelettes s'évaporent plus et deviennent donc plus légères.

6.4 Conclusion

De nombreux efforts ont été réalisés depuis une vingtaine d'année par la communauté scientifique pour modéliser le phénomène de dérive des pesticides. D'un point de vue pratique, les modèles statistiques sont les seuls utilisés actuellement d'un point de vue réglementaire. Ils présentent l'avantage d'être basés sur des observations réelles et sont très bien validés pour les conditions dans lesquelles ces observations ont été faites.

Taille initiale (μm)	Vitesse du vent (m.s^{-1})	Température					
		10 $^{\circ}\text{C}$		20 $^{\circ}\text{C}$		30 $^{\circ}\text{C}$	
		d_f	Dd	d_f	Dd	d_f	Dd
50	0,5	0,0	3,53*	0,0	3,00*	0,0	2,97*
50	2,5	0,0	16,20*	0,0	10,00*	0,0	7,17*
50	5,0	0,0	32,30*	0,0	18,70*	0,0	12,60*
50	10,0	0,0	63,60*	0,0	35,90*	0,0	23,10*
70	0,5	59,4	1,58	43,6	1,92	0,0	3,81*
70	2,5	59,2	7,97	42,7	9,80	0,0	11,8*
70	5,0	59,0	16,00	41,9	19,70	0,0	21,4*
70	10,0	58,8	32,30	40,4	40,3	0,0	40,40*
100	0,5	96,7	0,65	93,7	0,65	88,7	0,72
100	2,5	96,7	3,21	93,7	3,27	88,7	3,55
100	5,0	96,7	5,94	93,7	6,55	88,6	7,13
100	10,0	96,6	13,10	93,5	13,30	88,3	14,50
150	0,5	149	0,18	148	0,18	147	0,18
150	2,5	149	0,83	148	0,87	147	0,91
150	5,0	149	1,70	148	1,75	147	1,84
150	10,0	149	3,65	148	3,74	147	3,91
200	0,5	200	0,04	199	0,04	199	0,04
200	2,5	200	0,17	199	0,17	199	0,17
200	5	200	0,36	199	0,36	199	0,36
200	10	200	0,82	199	0,82	199	0,82
300	0,5	300	0,01	300	0,01	299	0,21
300	5,0	300	0,10	300	0,10	299	0,10
300	10,0	300	0,21	300	0,21	299	0,21

*les gouttelettes sont entièrement évaporées avant dépôt

TABLE 6.1 – Effet de la température et de la vitesse du vent (humidité relative = 50 %) sur le diamètre en fin de vol (d_f) et la distance de dérive (Dd) de gouttelettes éjectées à 0,5 m au dessus de la cible avec une vitesse de 20 m.s^{-1} (d'après Zhu *et al.*, 1994)

Ils ne donnent cependant que des valeurs moyennes et ne permettent de prendre en compte ni l'effet du matériel ni celui des conditions extérieures. Parmi les modèles descriptifs, les modèles Lagrangiens sont ceux pour lesquels il existe le plus de développements. Ces modèles permettent de décrire l'influence de la turbulence et celle de l'évaporation. Il est ainsi possible de prendre en compte toutes les variables qui influencent la dérive. Par rapport à nos objectifs, cette approche semble donc être celle à retenir.

Dans les modèles décrits, l'évaporation est le plus souvent prise en compte mais du point de vue des résultats, seules les distances de dépôt sont calculées. De plus, ces modèles sont généralement calés par des observations expérimentales typiques des conditions européennes ou nord-américaines. Dans le chapitre suivant, nous décrivons le modèle que nous avons développé. Il reprend les principales avancées réalisées par la communauté scientifique en cherchant à utiliser au mieux les données expérimentales pour alléger les représentations des phénomènes complexes, notamment la turbulence. Il est également calé pour des conditions élargies à celles des pays méditerranéens.

Chapitre 7

Modélisation de la dérive dans le contexte tunisien

La démarche de modélisation que nous avons mise en place vise à estimer les pertes par dérive, y compris la volatilisation (évaporation + gouttelettes perdues dans l'air) qu'on ne sait pas mesurer directement. Comme expliqué dans le chapitre 3, le calcul des dépôts s'appuie sur des essais en soufflerie, en atmosphère saturée qui permettent de mesurer les dépôts en faisant varier la vitesse de vent, le type de buse et la pression d'alimentation. Ces mesures ont pour objectif de choisir le principe du modèle à développer et de caler ensuite ses paramètres de calcul. Les résultats ont été comparés à ceux des modèles décrits dans la partie 6.3. La partie volatilisation, est évaluée en comparant les résultats obtenus en soufflerie avec les mesures sous une rampe mobile en atmosphère isolée. Nous cherchons à confirmer les tendances générales observées en soufflerie et à situer l'ordre de grandeur des quantités perdues par volatilisation.

Finalement, les résultats du modèle (dépôts et évaporation) ont été confrontés à des résultats obtenus en plein champ dans les conditions tunisiennes.

7.1 Présentation du modèle développé, DriftL

Conformément au cahier des charges de ce projet de recherche, le modèle à développer doit répondre aux demandes suivantes :

1. Il doit permettre d'estimer les pertes par dérive pour des applications terrestres sur cultures basses, notamment le désherbage,
2. Il doit prendre en compte la volatilisation, dans des conditions climatiques méditerranéennes,
3. Il doit être facile à mettre en œuvre et ne pas nécessiter de lourds moyens de calcul.

7.1.1 Observations préliminaires et choix d'un formalisme

Pour la modélisation des dépôts, le modèle a été développé à partir des mesures réalisées sur le banc de répartition de la soufflerie. Concernant les dépôts, l'allure des courbes obtenues (cf. fig.7.1 pour les deux conditions extrêmes D+ et D-) nous a conduit à considérer la répartition sous le vent comme une somme de fonctions gaussiennes.

En se basant sur les résultats des essais de la soufflerie, nous avons choisi d'appliquer l'approche utilisée par Teske *et al.* (2002) et Baetens *et al.* (2009) pour leurs modèles de dérive : les jets sous les buses sont caractérisés par leur décomposition en classes granulométriques en appliquant pour chaque classe de diamètre un modèle d'advection-diffusion ce qui conduit à une gaussienne par classe.

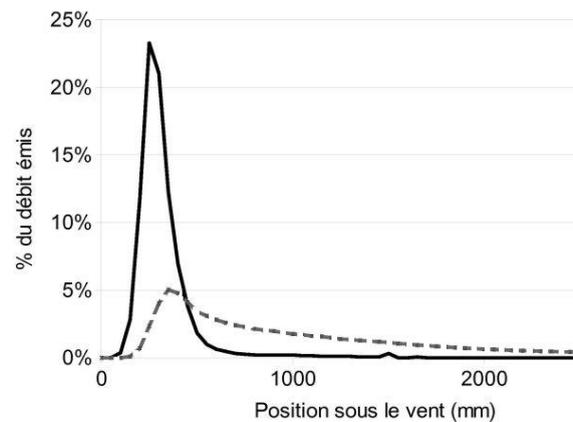


FIGURE 7.1 – Répartitions observées en soufflerie pour un jet de buse à fente perpendiculaire au vent pour les configurations D+ (courbe discontinue) et D- (courbe continue).

La répartition granulométrique des jets est facile à modéliser à partir des D_{10} , D_{50} et D_{90} .

Nous avons également considéré que les gouttelettes représentant les classes étaient éjectées verticalement et nous n'avons donc pas pris en compte directement la forme du jet.

Pour décrire l'évaporation, nous avons repris la démarche proposée par Holterman *et al.* (1997a) et qui est détaillée plus haut dans cette partie (cf. paragraphe 6.39, p. 46). Dès lors, l'évaporation de la gouttelette est calculée par une classique loi en d^2 : $X_{ev} = -d(d)^2/dt$. On retrouve cette même approche dans Teske *et al.* (2001).

Le calcul est effectué en fonction des paramètres **buse** (type, calibre, nombre et écartement), **pression** d'alimentation, **hauteur** de la rampe, **vitesse d'avancement** et **conditions micro-climatiques** (orientation et vitesse du vent, température et humidité relative).

Le modèle est basé sur quatre hypothèses clés :

- La vitesse du vent est horizontale (la composante verticale est nulle),
- La vitesse du vent est constante en tout point, ce qui est à peu près vrai dans la soufflerie, le profil de vent sur la section de mesure ayant été caractérisé lors des essais préliminaires (cf. tableaux de l'annexe F, p. 106).
- La vitesse d'éjection des gouttelettes est verticale et constante pour toutes les classes de diamètre. Cette hypothèse a été également utilisée par Reichard *et al.* (1992b) pour développer leur modèle *DriftSim*.
- Les pesticides étant le plus souvent mis en suspension dans l'eau, nous avons considéré que seule l'eau s'évapore ce qui entraîne une diminution du diamètre et une augmentation de la concentration dans la gouttelette. Lorsque le diamètre devient nul, nous considérons que le produit est perdu dans l'air. Cette hypothèse a été utilisée par plusieurs chercheurs comme par exemple Elliott et Wilson (1983) ; Holterman *et al.* (1997a).

7.1.2 Développement

DriftL a été développé sous SciLab, version 5,03 du 5 Novembre 2008¹.

1. Auteurs : consortium SciLab/INRIA/ENPC/Contributeurs - distribué sous les termes de la licence CeCILL et sous licence GPLv2 pour certains modules - <http://www.scilab.org>

Le calcul s'est déroulé en trois étapes :

- Reconstitution du spectre granulométrique pour 100 classes et calcul du pourcentage du débit par classe de diamètre,
- Calcul de la trajectoire et du point d'impact au sol pour chaque classe de diamètre. C'est un calcul balistique effectué à partir de la vitesse initiale des gouttelettes à la sortie de la buse en prenant en compte l'évaporation,
- Calcul de la dispersion autour du point d'impact.

La répartition granulométrique n'étant pas tout à fait symétrique, il a été décidé de la représenter par deux demi-distributions gaussiennes paramétrées par les valeurs (D_{10} et D_{50}) pour la première moitié et (D_{90} et D_{50}) pour la deuxième.

La vitesse d'éjection est obtenue à partir de la relation 6.8 discutée plus haut (section 6.2.2, p. 40).

Dans la pratique, pour une pression donnée, l'énergie consommée pendant le processus d'éjection des gouttelettes dépend du type et du calibre de la buse utilisée. La vitesse initiale des gouttelettes, V_0 dépend donc de la buse. L'équation 6.8 a été écrite sous la forme :

$$V_0 = -b\sqrt{\frac{2 \times P}{\rho_l}} \quad (7.1)$$

où b est un coefficient qui est supposé ne dépendre que du type de buse et de son calibre. Il est calé à partir de mesures en soufflerie.

En supposant les gouttelettes sphériques, l'application de la loi de la dynamique pour chaque classe de diamètre s'écrit :

$$A_c = -\frac{3}{4} \times C_d \times \frac{\rho_a}{d \times \rho_l} \|(\mathbf{V} - \mathbf{U})\| (\mathbf{V} - \mathbf{U}) \quad (7.2)$$

où A_c , désigne l'accélération de la gouttelette ; C_d , le coefficient de traînée ; ρ_a et ρ_l les masses volumiques de l'air et de l'eau respectivement ; \mathbf{V} et \mathbf{U} , les vitesses de la gouttelette et de l'air. L'équation 7.2 est intégrée deux fois par une méthode de Newton avec un pas de temps variable, pour obtenir la trajectoire de la gouttelette. A chaque pas de temps, le diamètre de la gouttelette est ré-évalué en calculant la masse évaporée à partir de la relation 6.42 proposée par Holterman *et al.* (1997a) (cf. eq 6.39, p. 46). Si la gouttelette ne s'est pas entièrement évaporée avant l'impact au sol, la dispersion des dépôts autour du point d'impact est représentée par une fonction gaussienne dont la médiane est la coordonnée horizontale du point d'impact et l'écart-type, σ_d est inspiré des travaux de Da Silva *et al.* (2005) qui corrigent l'écart-type d'un mouvement brownien pour des gouttelettes pulvérisées :

$$\sigma_d^2 = 2\alpha_e \cdot D_t \cdot t_d \quad (7.3)$$

où t_d désigne le temps de diffusion, c'est-à-dire la durée de déplacement de la gouttelette entre l'éjection et l'impact au sol, D_t représente le coefficient de diffusion turbulente et α_e est un coefficient correcteur qui dépend du diamètre et prend en compte l'inertie de la gouttelette. Dans le modèle DriftL, D_t est remplacé par un paramètre de calage c_{dif} qui prend également en compte la variabilité des conditions initiales, au moment de l'éjection des gouttelettes. L'équation 7.3 devient alors :

$$\sigma_d^2 = 2\alpha_e \cdot c_{dif} \cdot t_d \quad (7.4)$$

α_e est défini par :

$$\alpha_e = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} v' u' dt \tag{7.5}$$

où v' représente la vitesse de déplacement de la gouttelette réelle lorsqu'elle est soumise à une fluctuation de vitesse u' . En écrivant que cette vitesse peut avoir comme expression :

$$v'(t) = u' \times (1 - e^{-t/\tau_l}) \tag{7.6}$$

où τ_l désigne le temps de relaxation de la gouttelette, Da Silva obtient :

$$\alpha_e = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} (1 - e^{-t/\tau_l}) dt \tag{7.7}$$

Les valeurs de τ_l ont été obtenues par simulation de trajectoires de particules dans un écoulement turbulent à l'aide d'un logiciel de CFD (CFX) et sont données dans Da Silva *et al.* (2005).

Après calcul, le modèle peut générer deux types de sortie :

- Un graphique représentant les dépôts à différentes distances sous le vent par classe de diamètre, et pour la totalité du jet,
- Une zone texte renseignant sur le débit perdu dans l'air (gouttelettes sortant du domaine de calcul), le débit évaporé et le total perdu en $l.mn^{-1}$ et en %.

7.1.3 Calage des paramètres

Le choix des paramètres de calage du modèle, b et c_{dif} , a été orienté par les essais réalisés en soufflerie. Les deux paramètres ont été calés avec une **méthode de moindres carrés** pour 10 000 combinaisons (b , c_{dif}) avec 32 configurations : 4 buses (trois buses à fente de calibre 02, 03 et 06 et une buse anti-dérive de calibre 03), deux pressions (2 et 4 bar), deux hauteurs d'éjection (0,5 et 0,8 m), deux vitesses de vent (4 et 7 $km.h^{-1}$) et sans évaporation (HR=100%). A priori, b est supposé ne dépendre que de la buse et de son calibre tandis que c_{dif} dépend de trois facteurs à savoir : la buse (dispersion lors de l'éjection), la vitesse du vent (V_v) et la hauteur d'éjection (H).

Les valeurs obtenues pour les deux coefficients sont présentées au tableau 7.1. Il est clair que les valeurs de c_{dif} optimisées ne dépendent pas de la vitesse du vent. Les écarts cumulés entre répartitions simulées et mesurées varient entre 7 et 10% suivant les configurations, ce qui correspond aux variations observées entre les répartitions de deux buses d'une même série (Sinfort *et al.*, 1994) et est donc tout à fait acceptable.

	Buse	Classique			A injection d'air
	Calibre	02	03	06	03
b		0,13	0,21	0,27	0,09
c_{dif}	H=50 cm	0,3	0,5	0,8	0,2
	H=80 cm	0,5	0,5	0,5	0,2

TABLE 7.1 – Coefficients b et c_{dif} calés à partir des répartitions mesurées en soufflerie.

7.2 Résultats pour les calculs de dépôt par DriftL

7.2.1 Résultats des essais au champ

Face à la variabilité des conditions météorologiques pendant les essais au champ, il a été choisi de présenter les résultats en fonction du VMD qui ne dépend que de facteurs liés au matériel.

Les deux configurations D- et D+ correspondent à des VMD respectifs de $322 \mu\text{m}$ et $127 \mu\text{m}$. Pour des raisons de simplification de l'écriture, dans la suite, ces deux configurations sont notées *VMD322* et *VMD127*.

La figure 7.2 montre les dépôts mesurés sur le terrain au cours des campagnes de 2006 et 2007. Les conditions météorologiques correspondantes sont présentées au tableau 5.2, p.29. Cette figure compare les dépôts de traceur recueillis à quatre distances (1, 3, 6 et 10 m de l'axe de la dernière buse sous le vent). En un premier lieu, il faut noter la prédominance de l'effet de la granulométrie : les deux mesures réalisées avec le VMD127 sont celles pour lesquelles les dépôts sont les plus éloignés. Bien que les conditions météorologiques soient sensiblement différentes pour les deux campagnes, les courbes de même VMD ont le même comportement. La dérive la plus importante correspond au VMD127 lors de la campagne 2006 pour lequel la vitesse de vent était relativement élevée ($4,1 \text{ m.s}^{-1}$). Les masses les plus faibles sont par contre données pour le VMD322 pour la même campagne (Champ06-VMD322) et correspond à une vitesse de vent moins importante ($2,1 \text{ m.s}^{-1}$).

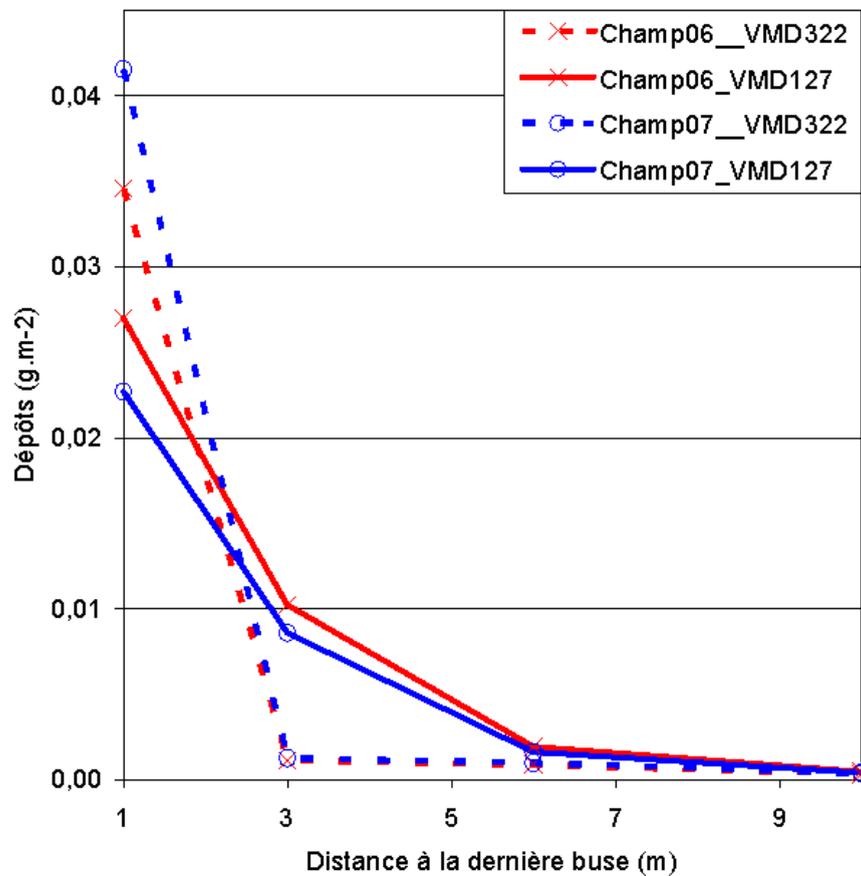


FIGURE 7.2 – Dépôts mesurés au champ pour deux VMD (127 et $322 \mu\text{m}$) sous différentes conditions météorologiques et rampe parallèle au vent : campagnes 2006 et 2007.

On observe que les dépôts mesurés à 3 m sous le vent sont environ 10 fois plus grands pour le VMD127 que pour le VMD322. A 6m, ce rapport a une valeur de 4 à 5. Le calcul du pourcentage des masses piégées pour le dépôt lors des essais de 2006 varie de 36 à 1,3% pour VMD127 et de 20,6 à 0,4% pour VMD322. Ces essais montrent qu'en passant d'un VMD à l'autre, la variation du vent n'a pas d'effet significatif : les masses les plus élevées sont toujours du côté de VMD127. Par contre, pour un même VMD, d'une campagne à l'autre, le niveau des dépôts piégés suit les facteurs microclimatiques. Parmi ces derniers, la vitesse du vent apparaît comme étant la

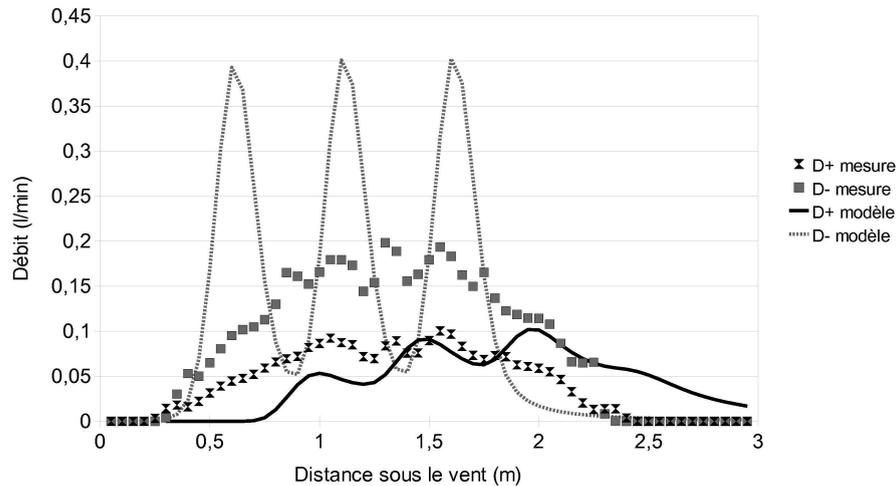


FIGURE 7.3 – Comparaison des résultats de DriftL aux répartitions observées en soufflerie pour une rampe de 3 buses et un vent latéral avec les configurations D+ et D-.

variable la plus influente. L'hygrométrie a certainement un rôle significatif mais qui n'a pas pu être quantifié ici.

7.2.2 Comparaison avec les résultats du modèle

Les conditions des essais au champ diffèrent de celles d'utilisation du modèle à deux niveaux :

1. la direction du vent : elle est parallèle aux jets (vent latéral) sur le terrain et perpendiculaire pour le calage du modèle,
2. les vitesses de vent : le modèle a été calé pour des vitesses de 1,1 et 1,9 m.s^{-1} (pour plus de 4 m.s^{-1} dans les conditions expérimentales).

Pour prendre en compte l'orientation du vent, nous avons voulu comparer les résultats du modèle à des mesures en soufflerie avec un vent latéral. Les résultats obtenus sont montrés sur la figure 7.3. Dans la configuration D+, le modèle exagère le dépôt. Dans la configuration D-, les pics sont à peu près bien positionnés mais la dispersion est très sous-évaluée.

Les essais précédents conduisent à émettre des réserves quant à l'utilisation du modèle pour l'évaluation des dépôts pour un vent latéral. De fait, la comparaison des dépôts mesurés et calculés montre des écarts de comportement (cf. fig.7.4). La première mesure se situe toutefois dans une zone où le dépôt varie très vite et les valeurs estimées sont acceptables si on considère les nombreuses causes de variation sur le terrain (vent, surface du terrain, hauteur de rampe). En s'éloignant de la rampe, les ordres de grandeur sont à peu près corrects même si au delà de la zone prédite par le modèle, les quantités mesurées sont encore très faibles.

7.2.3 Comparaison aux résultats d'autres modèles

Les tables de dérive de la BBA sont très référencées dans la littérature et sont très utilisées par la communauté scientifique et par les organismes internationaux, nous les utiliserons donc comme valeur de référence pour comparer les résultats des modèles. Le graphique 7.5 présente ainsi les résultats de notre modèle DriftL avec ceux du modèle DriftSim, du niveau I (statistique) d'AgDrift et du modèle du groupe FOCUS ainsi qu'avec les valeurs des tables données pour le 50^{ème} percentile des essais menés par la BBA. DriftSim et AgDrift ont été utilisés avec les conditions de nos essais en soufflerie pour les deux VMD127 et 322 μm (cf. section 5.4.2, p. 29). Le modèle du groupe FOCUS ne dépendant que du type de culture, le calcul a pris en compte

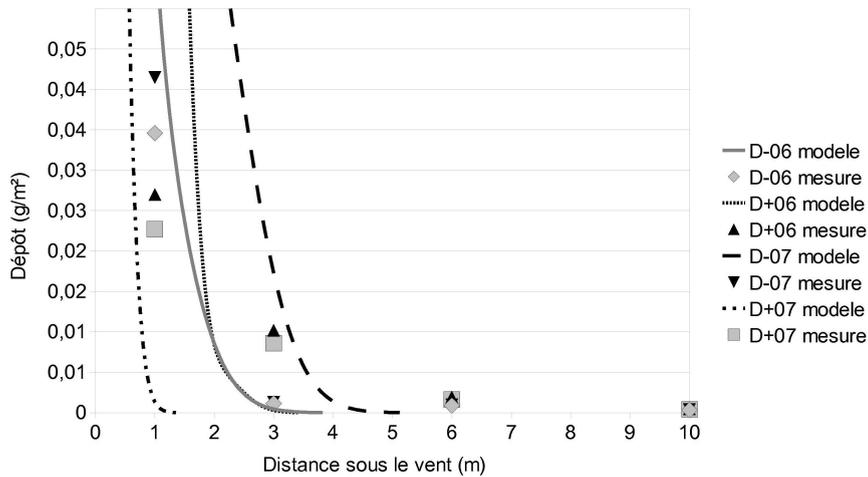


FIGURE 7.4 – Comparaison des résultats du modèle aux répartitions mesurées au champ pour les pulvérisations à VMD127 et 322 μm .

les coefficients proposés pour les cultures basses ($a=2,7593$ et $b=-0,9778$).

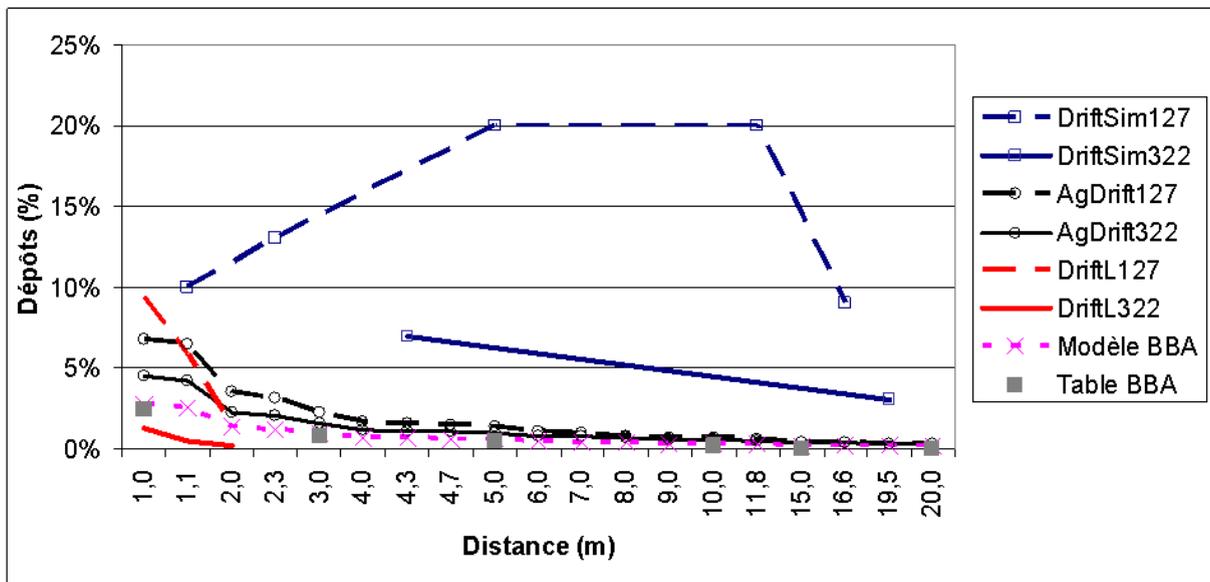


FIGURE 7.5 – Comparaison des résultats des modèles de dérive *DriftSim*, *AgDrift* et du groupe *FOCUS* aux valeurs estimées par les *tables de la BBA* à différentes distances, en % du débit initial.

On voit que le modèle *DriftSim*, surestime la dérive. A 5 m de la source, il estime à 20% les dépôts pour un VMD de 127 μm : soit 34 à 40 fois le taux proposé par la table de la BBA à une distance de 5 m. Ce résultat prouve bien que les jets de pulvérisation ne se comportent pas comme une somme de gouttelettes isolées et qu'il est important de prendre en compte des corrections.

Pour *AgDrift*, les calculs représentent correctement les dépôts. Cependant, la différence entre les taux calculés ne reflète pas les écarts entre les vitesses du vent et les VMD associés aux deux configurations objets du calcul.

Les simulations du modèle du groupe FOCUS sont les plus proches des valeurs expérimentales des tables de dérive. Toutefois, ce modèle de même que les tables de la BBA, ont certaines limites d'utilisation : ils ne prennent en compte aucune des variables liées à la machine et/ou aux conditions microclimatiques.

Au vu de ces comparaisons, notre modèle paraît fournir des résultats plutôt cohérents, même si la taille du domaine de calcul actuel est trop limitée. Les dépôts simulés pour les conditions D+ et D- encadrent les valeurs fournies par les tables de la BBA (ou du modèle du groupe FOCUS qui est calé dessus). Par rapport à AgDrift, les résultats ne sont pas tout à fait similaires. Pour le VMD127, les ordres de grandeur sont les mêmes mais la dérive diminue beaucoup plus vite pour DriftL. Pour le VMD322, les niveaux de dépôt prédits par DriftL sont beaucoup plus faibles.

7.3 Résultats pour les émissions vers l'air

Les conditions météorologiques qui ont accompagné les essais des deux configurations D- et D+ sont données dans la section II, p. 29, pour les mesures en soufflerie et p. 29 pour les essais au champ. Il faut noter que les conditions de vent sont très différentes : 3 m.s^{-1} pour D- et 6 m.s^{-1} pour D+ dans les mesures en soufflerie alors que, pour les mesures au champ, la vitesse moyenne du vent était d'environ 2 et 4 m.s^{-1} alternativement pour D+ et D- en 2006 et 2007.

La figure 7.6 présente les dépôts de traceur piégés par les fils PVC à trois hauteurs du sol (0,5, 1 et 1,5 m), pour les deux VMD considérés, au champ pour les campagnes 2006 et 2007 ainsi qu'en soufflerie. Il ressort que les émissions les plus importantes sont associées à la configuration VMD127 pour laquelle le vent est le plus élevé et la température aussi, tandis que les émissions les plus faibles sont liées à VMD322 qui est caractérisée par un vent faible et une température moins élevée. Le niveau des émissions mesurées décroît avec la hauteur.

Le tableau 7.2 présente le pourcentage des masses collectées. Les valeurs ont été obtenues par intégration des courbes de la figure 7.6. Les pertes vers l'air se situent autour d'une moyenne de 2% pour VMD322 et de 8 à 12% pour VMD127. Sous des conditions contrôlées, en soufflerie, ces moyennes sont respectivement de 3% et de 13%. Pour le VMD127, il est clair que la vitesse du vent joue un rôle important. Au vu des résultats obtenus au champ pour des vitesses de vent d'environ 2 et 4 m.s^{-1} , on aurait pu s'attendre à trouver des pertes plus importantes en soufflerie, où la vitesse du vent était de 6 m.s^{-1} . Il faut cependant noter que l'efficacité de collecte des fils a été évaluée par Gil *et al.* (2007) à 80% pour des vitesses d'air allant jusqu'à $3,5 \text{ m.s}^{-1}$. Pour une vitesse de 6 m.s^{-1} , il est possible que cette efficacité soit inférieure à 80%. Pour le VMD322, les pertes vers l'air sont plus faibles et à peu près constantes : 2% au champ et 3% en soufflerie.

Les résultats du modèle ont été obtenus pour une hauteur de rampe de 80 cm. Ils sont déterminés par différence entre le débit total perdu et le pourcentage évaporé et représentent ainsi la fraction de débit qui est non comptabilisée dans le domaine de calcul (à 2 m de la zone traitée) avant d'avoir impacté le sol. Les résultats suivent les mêmes tendances que les mesures : pertes de l'ordre de 10% pour le VMD127 et de 2% pour le VMD322 et influence du vent notable pour le VMD127. Dans le détail, le modèle donne des valeurs inférieures à celles mesurées pour les essais au champ et supérieures dans la soufflerie. Pour le VMD322, la tendance est inversée, mais ceci est sûrement dû au manque de précision du modèle pour les faibles valeurs : du fait de la représentation granulométrique en 100 classes de même débit, la précision obtenue par DriftL pour le calcul de l'évaporation (et des pertes vers l'air) est seulement de 1%. Nous avons donc une incertitude de 2% pour les résultats des pertes vers l'air (1% pour les pertes + 1% pour l'évaporation) et les différences observées ne sont donc pas très significatives. Il faut cependant noter que le résultat donné par le modèle en soufflerie est cohérent même si les pertes calculées

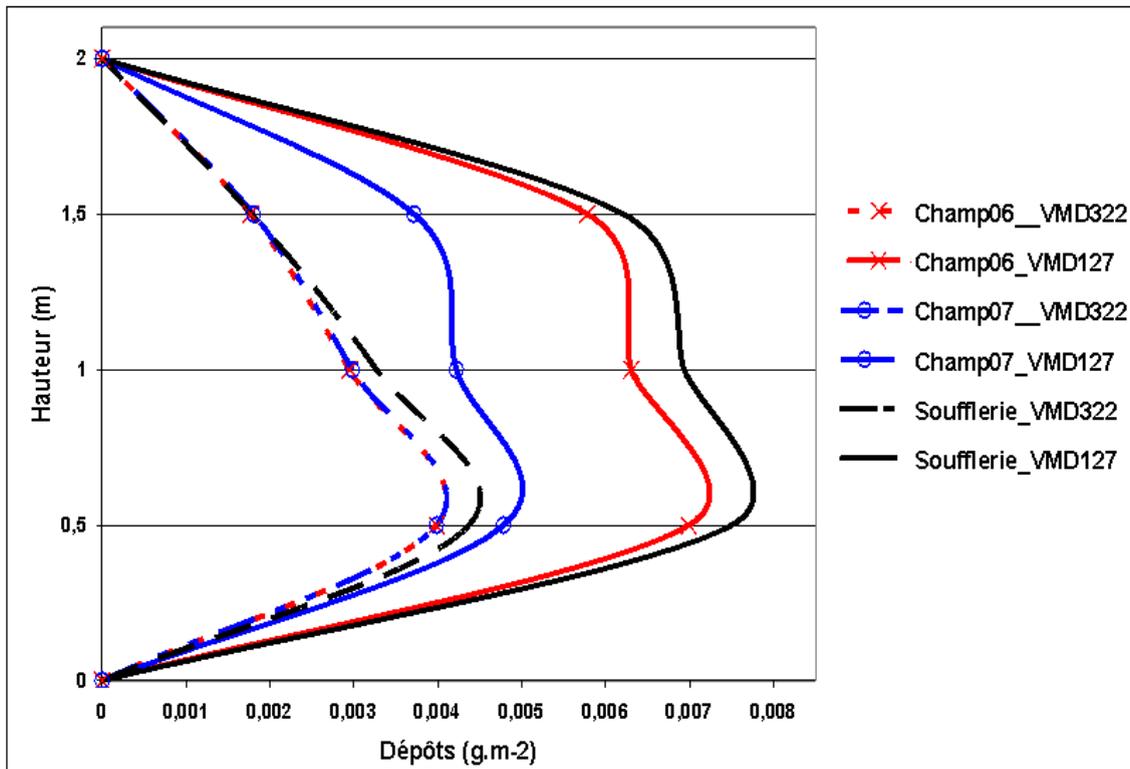


FIGURE 7.6 – Comparaison entre les émissions vers l’air mesurées au champ (campagnes 2006 et 2007) et en soufflerie pour deux VMD (127 et 322 μm), avec la rampe parallèle au vent.

sont plus faibles : cela est dû au fait que le modèle estime que l’évaporation est de l’ordre de 1% pour les conditions observées au champ et de 0 pour les conditions en soufflerie.

	2006			2007			Soufflerie		
	Vent m.s^{-1}	Mesure %	Modèle %	Vent m.s^{-1}	Mesure %	Modèle %	Vent m.s^{-1}	Mesure %	Modèle %
VMD127	4,1	12	8	1,8	8	7	6	13	16
VMD322	2,1	2	2	4,6	2	2	3	3	1

TABLE 7.2 – Pertes vers l’air (en pourcentage du débit émis) observées au champ et en soufflerie ; comparaison avec les estimations du modèle DriftL.

En conclusion, les quantités mesurées au champ et en soufflerie sont cohérentes entre elles. Elles sont de l’ordre de 10% pour le VMD127 et 2-3% pour le VMD322. Elles confirment l’importance de la taille des gouttelettes : pour le VMD322, les pertes sont faibles et peu influencées par le vent alors que pour le VMD127, l’influence du vent est très importante. Les résultats du modèle sont globalement conformes à ces observations, même si ils manquent de précision pour les faibles valeurs de pertes observées pour le VMD322.

7.4 Résultats pour l’évaporation

Nos protocoles ne nous permettaient pas de mesurer directement l’évaporation. Cette grandeur a donc été estimée en comparant les dépôts au sol obtenus en **soufflerie sous des conditions saturées en humidité**, D_{ss} , et ceux mesurés sous la **rampe mobile pour une humidité plus faible** (61% pour VMD127 et 58% pour VMD322), D_{sm} . La mesure en soufflerie étant réalisée pour une humidité relative de 100%, on peut s’attendre à ce que la différence obtenue soit apparentée aux pertes par évaporation.

Les comparaisons de ces calculs aux résultats du modèle pour les deux VMD est donnée dans le tableau 7.3. Les conditions de température et d'humidité choisies pour la simulation sont celles des essais sous rampe mobile.

Configuration	Evaporation			
	Dépôts sol		Évaluée	Calculée
	D_{ss}	D_{sm}	$D_{ss} - D_{sm}$	par DriftL
VMD127	60,8	59,0	1,8	1
VMD322	92,9	92,0	0,9	0

TABLE 7.3 – Comparaison des évaluations de l'évaporation (en pourcentage du débit pulvérisé) par l'approche expérimentale et par le modèle DriftL.

Les évaporations obtenues avec le modèle sont environ deux fois plus faibles que celles évaluées à partir des méthodes expérimentales. Cependant, il faut soulever le fait que l'évaluation expérimentale n'est pas rigoureuse : on ne sait pas vraiment si l'évaporation est la seule responsable des différences observées sur les dépôts sur les tapis en soufflerie et sur la rampe mobile. D'autre part, comme indiqué dans la section précédente, la précision obtenue par DriftL pour le calcul de l'évaporation est seulement de 1%. Cette valeur est du même ordre de grandeur que les quantités évaluées. Il faudrait donc augmenter la précision à ce niveau pour pouvoir mieux discuter ces résultats. Il serait également nécessaire d'avoir plus de points de comparaison. Les ordres de grandeur sont toutefois cohérents et suivent les bonnes tendances.

7.5 Discussion

Si, sur le principe, le modèle semble donner des résultats encourageants, un certain nombre de points doivent être discutés. Il apparaît en tout premier lieu nécessaire d'optimiser les paramètres de calage pour des conditions de travail plus larges. La hauteur maximale que nous avons envisagée en un premier temps est souvent dépassée dans la pratique : pour ne pas avoir de contact de la rampe avec le sol, les agriculteurs traitent souvent à une hauteur de 1 m ou même plus. Les vitesses de vent que nous avons choisies sont également trop faibles. En prenant l'exemple de la France, la vitesse maximale autorisée est de 5 m.s^{-1} (20 km.h^{-1}) : il faut au moins atteindre cette valeur qui s'est révélée être courante sur le terrain. Nous pourrions également élargir le calage à d'autres calibres de buse. Les valeurs trouvées pour les deux coefficients sont cohérentes avec les phénomènes physiques. Le facteur b qui corrige la vitesse augmente avec le calibre (il y a moins de frottement) et le coefficient de diffusion aussi. Les valeurs obtenues pour la buse à injection d'air sont plus faibles, notamment pour la valeur de b , ce qui signifie que la vitesse d'éjection est plus faible, ce qui a été observé sur des mesures de vélocimétrie laser reportées dans Lardoux (2002).

L'utilisation du modèle pour des dépôts latéraux, qui n'avait pas été envisagée dans le cahier des charges initial, semble finalement nécessaire pour permettre de comparer les résultats du modèle aux données de terrain (celles décrites ici ou celles présentes dans la littérature). Les essais en soufflerie montrent que sous sa forme actuelle, le modèle est peu adapté à cette configuration. L'hypothèse de verticalité de la vitesse d'éjection semble être la plus critiquable : cela suppose un jet « filaire », ce qui est loin de représenter les jets testés dont l'angle au sommet est de 110° . Ce défaut s'observe particulièrement pour la configuration D- pour laquelle les gouttelettes ont une forte inertie (masse et vitesse plus importantes) et la vitesse du vent est relativement faible.

Les écarts observés pour la configuration D+ (surestimation du déport) laissent penser que l'hypothèse du vent constant en tout point est à revoir. La prise en compte d'un profil logarithmique permettrait probablement d'améliorer ce point. La comparaison aux autres modèles est relativement satisfaisante mais il serait nécessaire d'élargir le domaine de calcul de DriftL.

Pour l'évaluation des pertes vers l'air et de l'évaporation, les comparaisons des résultats du modèle aux résultats obtenus dans les différentes conditions expérimentales (soufflerie, rampe mobile et champ) ne sont pas très précises mais permettent toutefois d'affirmer que les ordres de grandeur et les tendances sont les mêmes dans tous les cas. Il serait nécessaire d'améliorer la précision du modèle pour les faibles valeurs. Une solution serait de modifier la répartition granulométrique en choisissant les classes pour des plages de diamètre constant plutôt que pour des fractions de débit identiques. L'évaluation expérimentale présente également de nombreuses imprécisions, notamment pour l'évaluation de l'évaporation. L'amélioration de cet aspect demanderait la définition de protocoles dédiés à cette mesure dans des conditions de température et d'humidité contrôlées.

7.6 Conclusion

Les modèles de dérive décrits dans la littérature nous ont permis de développer un modèle facile à mettre en œuvre pour prédire les pertes par déport et par volatilisation (évaporation et pertes dans l'air) pour des applications terrestres sur cultures basses dans le contexte tunisien.

L'observation du phénomène de déport en soufflerie a conduit à mettre en place un modèle d'advection-diffusion adapté à la granulométrie du jet. Plusieurs hypothèses simplificatrices ont été retenues : vitesse d'éjection verticale, vitesse du vent horizontale et constante en tous points. L'évaporation a été prise en compte en considérant que seule l'eau s'évapore. Le modèle est calé sur deux paramètres (un coefficient de correction de la vitesse verticale et un coefficient de diffusion) à partir de mesures de répartition en soufflerie avec un vent perpendiculaire au jet.

L'utilisation du modèle pour un vent latéral (parallèle aux jets) met en évidence la simplification relative aux vitesses d'éjection mais l'étalement des dépôts paraît correct. La prise en compte des orientations de la vitesse d'éjection en fonction de la granulométrie devraient permettre de remédier facilement à ce défaut. Pour des vitesses de vent élevées le modèle surestime le déport, ce qui nécessitera l'approfondissement du calage. La comparaison des dépôts estimés par le modèle et mesurés sur le terrain montre que les ordres de grandeur sont corrects et que les tendances sont respectées.

L'estimation de la volatilisation et de l'évaporation par les différentes approches montre un certain nombre de limites mais l'état de l'art montre bien que ces données sont difficiles à évaluer. Sous l'hypothèse que le pesticide n'est perdu que si la totalité de la gouttelette est évaporée, le modèle ainsi que les essais en laboratoire et au champ montrent que les pertes par évaporation sont de l'ordre de 1 à 2% pour le VMD127, quelles que soient les conditions et qu'elles sont négligeable pour le VMD322. Pour les pertes vers l'air, les valeurs obtenues sont de l'ordre de 10% pour le VMD127 avec une forte sensibilité au vent (les pertes augmentent avec le vent). Pour le VMD322 ces pertes sont de l'ordre de 1 à 3% en fonction des conditions et des méthodes d'estimation utilisées.

Dans un objectif de prévoir les conditions permettant de traiter tout en préservant l'environnement, DriftL peut faire partie d'une démarche couplant la modélisation à une approche expérimentale pour l'élaboration d'un bilan complet d'un traitement phytosanitaire à travers l'évaluation des quantités perdues et de l'efficacité du traitement. Il peut être également utilisé comme un outil à part pour l'estimation des quantités de produit perdues par dérive.

Quatrième partie

Dépôts de pesticides au sol et rétention sur les plantes

Le sol n'est généralement pas la cible de l'application des pesticides, mais il est inévitablement atteint par une fraction de la substance active appliquée. Pendant l'application, une part des gouttelettes pulvérisées est déposée au sol directement à partir des buses, ce sont **les dépôts directs au sol**. D'autre part, les plantes ciblées par ces substances, ne retiennent qu'une fraction des gouttelettes impactant la surface des feuilles, c'est **la rétention** ou encore l'adhérence. L'autre partie, généralement constituée de grosses gouttelettes, est déposée au sol par ruissellement et/ou rebond sur la surface des feuilles, ce sont **les dépôts par ruissellement**.

Après l'application, une fraction de la substance qui a adhéré aux plantes peut être transférée vers l'atmosphère par volatilisation, une autre peut regagner le sol par lessivage foliaire sous l'effet de facteurs externes comme par exemple la pluie.

Au sol, une part des substances déposées, (que ce soit pendant ou après l'application) se volatiliserait dans l'atmosphère, (Bedos et Calvet, 2002). Le reste va soit se dissoudre, soit rester en suspension soit être adsorbé sur les sédiments, (Wolters, 2003). Cette dernière fraction sera par la suite entraînée par écoulement vers les eaux de surface et par lixiviation² vers les eaux profondes, (Gouy et Carluer, 2002), la contamination des eaux sera alors généralisée depuis la surface jusqu'à la nappe phréatique.

Dans le cadre de la démarche proposée pour cette thèse, nous cherchons des moyens pour élaborer un bilan complet d'un traitement phytosanitaire. Dans la partie précédente, nous avons développé le modèle qui estime les pertes par dérive. Cette partie vient compléter ce travail par une approche expérimentale permettant de fournir les informations sur les pertes au sol sous la rampe. Elle se propose donc d'étudier **les dépôts directs au sol sous les plantes et la rétention sur les feuillages pendant le traitement**. Tous les phénomènes intervenant après l'application ne sont pas pris en considération.

On commencera (chapitre 8) par un état de l'art concernant les différents processus physiques intervenant dans le phénomène de rétention ainsi que les principaux modèles développés pour prédire les dépôts au sol et les fractions retenues par les plantes. Dans le chapitre suivant (9) nous discuterons les données provenant de nos essais, pour une culture de blé au stade de traitement (stade végétatif 3 à 4 feuilles), tout en les comparant aux résultats obtenus par ces modèles et à ceux de DriftL.

2. Entraînement par les eaux de drainage

Chapitre 8

Etat de l'art

8.1 Introduction

Pendant le traitement, le sol, la partie aérienne de la plante et l'air sont les premiers compartiments recevant la substance pulvérisée. Il y a toujours une fraction du volume pulvérisé qui sera déposée au sol, même pour une culture dense. Les résultats issus d'essai de laboratoire et de terrain affichent des moyennes de 1,5 à 4,5% au stade de croissance BBCH 10 et de 1,5 à 31,5% au stade de croissance BBCH 29-63¹.

Peu de travaux traitent de ce sujet et on ne trouve que très rarement des publications visant la modélisation des fractions déposées directement au sol sous la rampe pendant l'application, (Wolters, 2003 ; Ganzelmeier *et al.*, 1995). Les travaux existants dans ce domaine ont pour objectif principal de modéliser la rétention des gouttelettes par les plantes en vue d'étudier l'effet des surfactants qu'on ajoute parfois à la formulation appliquée. Dans ces études, bien que les dépôts au sol soient déductibles, ils restent toujours en second plan. Pourtant, ces dépôts sont des paramètres d'entrée très importants pour la prise de décision quant à l'évaluation du potentiel des risques environnementaux (Linders *et al.*, 2000).

L'interaction entre les gouttelettes et les plantes a été étudiée par différentes équipes de chercheurs en particulier en Nouvelle Zélande, (Forster *et al.*, 2005 ; Zabkiewicz, 2007), en Australie, (Dorr *et al.*, 2006 ; Mercer *et al.*, 2007), en Europe, (Furmidge, 1961 ; Spillman, 1984 ; Grayson *et al.*, 1993 ; Gyldenkærne *et al.*, 1999 ; Jensen et Splid, 2003) et un peu moins aux USA, (Brazee *et al.*, 1991, 1999). D'après Jensen et Splid (2003) et Forster *et al.* (2005), l'interaction entre les gouttelettes et la surface des feuilles, et donc les dépôts au sol, dépendent de plusieurs facteurs dont la plupart sont interdépendants à savoir :

- les caractéristiques de la pulvérisation, (taille et vitesse de sédimentation des gouttelettes, volume de bouillie appliqué et hauteur de la rampe),
- les caractéristiques des feuillages, (densité, mouillabilité, angle de glissement et rugosité),
- les propriétés physiques de la formulation, (angles de contact avant et arrière).

Dans la partie I, nous avons bien détaillé l'effet des différents facteurs sur les pertes de pesticides et l'efficacité du traitement d'une façon générale. Cependant les facteurs qui ne concernent que la rétention des gouttelettes ou qui ont un effet particulier sur les dépôts au sol nécessitent parfois des explications supplémentaires. Ces suppléments seront avancés dans cette partie au fil des sections.

1. Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie : (centre fédéral de recherche biologique - Bureau fédéral des variétés de plante et de l'industrie chimique, Allemagne) : ce centre a élaboré une échelle permettant d'identifier le stade de croissance des plantes en se basant sur une codification spécifique à chaque stade pour chaque culture. L'annexe G présente la codification utilisée dans cette échelle.

La structure de la végétation est par exemple un facteur qui pourrait jouer un rôle important dans l'interception des gouttelettes mais qui n'a été abordé que superficiellement dans l'introduction générale. Une plante de blé, comme plusieurs autres types de plantes ou d'adventices, est constituée de feuilles et de tiges. Les feuilles peuvent être horizontales mais elles peuvent également occuper d'autres positions à des hauteurs différentes. Les tiges sont par contre toujours verticales, (sauf cas particuliers d'accidents naturels). Le comportement des gouttelettes à l'impact va dépendre en partie de la disposition de la surface de l'organe impacté. Tous autres facteurs égaux, une gouttelette qui vient impacter une feuille horizontale aura beaucoup plus de chance d'être interceptée et retenue qu'une autre qui percute une feuille inclinée ou une tige verticale.

Dans la littérature, la rétention est représentée de deux manières différentes : soit par estimation directe en **appliquant des facteurs déterminés expérimentalement**, soit à travers la **modélisation de l'adhérence ou du rebond des gouttelettes** sur la surface de la cible.

Jagers *et al.* (1998) ont mené une étude sur la relation entre l'architecture de la canopée et l'interception des gouttelettes pour l'orge de printemps à deux stades de développement. Cette étude a montré que la tige et la feuille contribuent toutes les deux de manière significative à l'interception des gouttelettes dont la corrélation à la surface des plantes était de type log-linéaire. Il a été montré aussi que la disposition et la taille de la feuille, l'épaisseur et la surface de la tige peuvent être toutes décrites comme une fonction de la hauteur de la feuille.

Graham-Bryce (1977) ont proposé un taux de rétention pour quelques combinaisons technique d'application / cible en pourcentage de la dose appliquée D , (annexe H). Par exemple, en appliquant le *Disulfoton* sur le blé pour traiter des pucerons, le taux de rétention est de 2,9%.

Le groupe européen FOCUS a adopté une approche basée sur les travaux réalisés en Allemagne par Becker *et al.* (1999) et aux Pays-Bas par Van de Zande *et al.* (1999). Cette approche introduit un facteur d'interception permettant d'obtenir la fraction retenue par les feuilles en fonction du type de culture et de son stade de développement. Déterminée par rapport à la dose pulvérisée, cette fraction est utilisée pour estimer la part de produit qui atteint le sol compte-tenu de la surface du sol exposée et du couvert végétal.

Olofsdotter et Streibig (1997) ont proposé un tableau dans lequel ils estiment le taux du couvert végétal de plusieurs cultures pour différents types de traitements en fonction du stade de développement de la plante. L'annexe I montre les estimations relatives à quelques céréales.

Dans l'outil Néerlandais d'aide à la décision "USES 2,0"² développé par l'Agence de santé publique environnementale des Pays-Bas (RIVM), les risques environnementaux sont caractérisés en considérant des fractions standards d'interception (D_p) et de dépôt au sol (D_s) spécifiques à chaque type de culture et à des périodes dans l'année (RIVM, 1998). Les fractions D_p et D_s proposées par cet outil pour les céréales sont respectivement de 0,1 et 0,8 pour des plantes encore jeunes (âgées d'environ un mois), et de 0,8 et 0,1 pour des plantes bien développées, (voir tableau, annexe B.2).

Linders *et al.* (2000) se sont basés sur le travail de Becker *et al.* (1999) et ont mené un travail sur l'interception des gouttelettes par la végétation. Ils ont produit un tableau complet sur les fractions de substance interceptées par les plantes (D_p) pour différentes cultures et différents stades végétatifs. Dans ce travail les auteurs ont supposé que, sauf indications particulières pouvant concerner d'autres voies de pertes de pesticides comme par exemple l'air, la somme des fractions (D_p) et (D_s) est égale à l'unité, ($D_p + D_s = 1$).

2. Uniform System for the Evaluation of Substances

Un autre travail a étudié l'interception des gouttelettes pour trois types de végétations, (folle avoine, laitue et coton) en combinant deux modèles (Dorr *et al.*, 2007). Un premier modèle de calcul de l'architecture des plantes permet de localiser l'emplacement des organes de chaque plante en 3D. Un deuxième modèle calcule la trajectoire des gouttelettes. Après simulation des dépôts, des comparaisons avec des mesures en soufflerie, ont permis de conclure que le type de végétation joue un rôle important dans l'interception des gouttelettes. Par exemple, les dépôts (en g.cm^{-2}) sur la folle avoine au stade « 5 feuilles » ont dépassé le double de ceux enregistrés sur la laitue ou sur l'avoine au stade « 2 feuilles ».

8.2 Processus physiques de la rétention

8.2.1 Efficacité de la rétention des gouttelettes

L'efficacité, E de l'impact des gouttelettes peut être définie comme le rapport entre la masse réelle des gouttelettes, (M_c), déposée sur la surface cible et celle du volume pulvérisé par la totalité des buses, (M_p).

$$E = \frac{M_c}{M_p} \quad (8.1)$$

L'efficacité E de l'impact sur les feuilles a été étudiée par Peters et Eiden (1992) en se basant sur le nombre de Stokes, S_t :

$$E = \left(\frac{S_t}{S_t + 0,8} \right)^2 \quad (8.2)$$

avec

$$S_t = \frac{\rho_l d^2}{18\rho_a \nu_a} \times \frac{V}{d_e} \quad (8.3)$$

où d_e est la longueur caractéristique de la feuille.

Or les expressions $(\rho_l d^2 / 18\rho_a \nu_a)$ et d_e / V représentent respectivement le temps de relaxation des gouttelettes, (τ_l) et de l'air (τ_a). Ainsi,

$$S_t = \frac{\tau_l}{\tau_a} \quad (8.4)$$

Cette expression montre que lorsque les gouttelettes suivent le flux d'air et s'éloignent de la cible, S_t est très faible ($\ll 1$) alors que les valeurs de S_t très supérieures à 1 représentent des conditions de forte inertie qui permet aux gouttelettes d'impacter leur cible.

Zhu *et al.* (1996) ont procédé à l'étude de l'interception des gouttelettes en leur attribuant une efficacité d'impact définie en fonction du nombre de Froude, $N_f = V / \sqrt{g \times d_e}$, et du nombre de Reynolds particulaire, $Re_p = \|U - V\|$ où U désigne la vitesse de l'air. Un coefficient d'efficacité C_{ef} ³ est calculé par simulation des trajectoires de différentes classes de gouttelettes lâchées dans un flux d'air horizontal venant percuter une bande verticale. Cette étude leur a permis d'écrire une relation analytique permettant de déterminer le coefficient C_{ef} :

$$C_{ef} = 100 \exp \left(0,5 \times (0,00065 \ln I - 0,0045) \times (N - 9 \ln I - 30)^2 \right) \quad (8.5)$$

avec $N = \left(\ln \frac{Re(d^3)}{N_f^2} \right)^{5/3}$

où I désigne l'intensité turbulente, N est le nombre de feuilles et N_f est le Nombre de Froude.

3. Ce coefficient est défini comme le pourcentage de trajectoires interceptées par la bande verticale

La conclusion principale de cette étude est que l'efficacité d'impact pourrait être améliorée avec l'augmentation de la taille des gouttelettes, de la vitesse du vent, (dans une certaine limite) et la profondeur de la cible. L'augmentation de la turbulence l'affecte fortement.

Makarov *et al.* (1996) ont étudié l'interception des gouttelettes et ont développé une équation de prédiction des dépôts D_p sur les plantes :

$$D_p = D.U.A_s.E(U, d) \quad (8.6)$$

où D est la dose de produit appliquée, A_s est la densité surfacique de la canopée (en $\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$) et E désigne l'efficacité d'impact sur les feuilles.

L'équation a été validée à partir de mesures expérimentales des dépôts sur plusieurs types de cultures parmi lesquelles le blé. Les auteurs ont conclu que l'efficacité de rétention dépend principalement de la structure du feuillage et de la taille des gouttelettes. Le travail de Bache (1980) a abouti aux mêmes conclusions, en ajoutant que pour les gouttelettes de diamètre supérieur à $150 \mu\text{m}$, l'effet de la vitesse du vent U est minime. Loin des cultures basses, Barry (1984) a étudié l'efficacité de rétention sur le feuillage des conifères et a observé que les gouttelettes interceptées sont celles dont le diamètre est inférieur à $60 \mu\text{m}$.

Walklate *et al.* (1996) et Raupach *et al.* (2001b) ont montré que dans la pulvérisation assistée par air, les dépôts dans la végétation d'une culture quelconque suivent une décroissance à allure exponentielle. Ils calculent cette décroissance à partir du coefficient de masquage présenté dans la section 6.2.2, p. 39.

Da Silva (2003) et Sinfort (2006) ont développé un modèle capable de simuler les dépôts sur la vigne en représentant la végétation de manière globale, en ne prenant en compte que sa géométrie et la densité des feuillages. Ils ont ainsi appliqué un *coefficient de masquage* qui tient compte de la superposition des feuilles pendant le transport des gouttelettes. La simulation est faite à partir d'un Volume Élémentaire Représentatif, (VER) en considérant que **les dépôts sont proportionnels à un coefficient d'efficacité, C_{ef}** . Seules quelques trajectoires ont été considérées pour calculer ensuite l'expansion du nuage. Les auteurs ont ainsi écrit que les dépôts dans un VER i sont :

$$D_i = V_{fr} \times C_{ef} \times M_i \times \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}}{\|\mathbf{V}\|} \quad (8.7)$$

où V_{fr} représente la portion de nuage qui rentre dans le VER (V_{fr} s'obtient par double intégration d'une fonction gaussienne). M_i correspond à la masse de produit contenue dans le nuage. \mathbf{n} est le vecteur unité normal à la section d'entrée d'un VER et \mathbf{V} est le vecteur vitesse pour une gouttelette. Les dépôts simulés ont été comparés pour plusieurs configurations avec des mesures réalisées dans un petit tunnel.

Un intérêt particulier de ce travail est d'avoir confirmé la conclusion de Walklate *et al.* (1996) concernant l'allure de l'évolution des dépôts dans la végétation. Cette représentation peut être très intéressante pour l'étude des contaminations du sol et de l'atmosphère.

Stevens *et al.* (1993) ont produit le premier modèle qui simule l'adhérence des gouttelettes à la surface des feuilles en considérant la vitesse et le diamètre de la gouttelette, l'angle de glissement des feuilles et la tension superficielle. Dans ce modèle, il a été montré que l'adhérence est liée en premier lieu à la tension superficielle avant impact et qu'elle est inversement proportionnelle à la taille et à la vitesse des gouttelettes ainsi qu'à l'angle de glissement des feuilles. Le travail a concerné des fourchettes de 110 à $880 \mu\text{m}$ pour le diamètre des gouttelettes, de $0,3$ à $2,8 \text{ m.s}^{-1}$ pour la vitesse des gouttelettes et de 0 à $67,5^\circ\text{C}$ pour l'angle de glissement sur la feuille. Dans ces conditions, les auteurs ont montré de bonnes corrélations entre la vitesse et la taille des

gouttelettes d'un côté et l'adhérence à la surface des feuilles de l'autre. Les caractéristiques des feuilles ne sont pas prises en compte.

Brazeo *et al.* (1991) ont construit un modèle de simulation du rebond des gouttelettes sur la surface des feuilles, toutefois complexe et les facteurs en jeu sont difficiles à mesurer.

8.2.2 Effet de l'inertie sur la rétention

Selon les fiches techniques de plusieurs marques de buses, pour la pulvérisation agricole conventionnelle, la taille des gouttelettes est comprise entre 100 et 800 μm et leur vitesse initiale se situe autour d'une moyenne allant de 15 à 18 m.s^{-1} . Dans ces conditions, l'application des deux équations 8.2 et 8.3 pour des gouttelettes d'eau⁴, même en considérant une vitesse V faible, montre qu'au moins 90% de ces gouttelettes impacteront la surface des feuilles. Ceci implique que l'effet de l'inertie pourrait être négligé sans conséquences significatives.

Pendant sa déformation à la surface de la feuille, la gouttelette perd une part de son énergie cinétique sous l'effet des frottements accompagnant cette déformation. L'autre part est transférée à l'énergie potentielle qu'elle stocke grâce à la tension superficielle (Yoon *et al.*, 2006). Dès que la déformation maximale est atteinte, la gouttelette commence à se rétrécir vers sa forme initiale (fig. 8.1). Elle fait alors face à deux scénarios :

- soit elle dispose encore de l'énergie qui va lui permettre de terminer son rétrécissement jusqu'à se détacher de la feuille et tomber au sol,
- soit elle n'as plus suffisamment d'énergie pour qu'elle puisse continuer son mouvement, elle reste alors attachée à la feuille.

Ce processus dépend de plusieurs facteurs dont principalement la taille et la vitesse des gouttelettes. Ces deux facteurs affectent directement l'énergie cinétique et le coefficient de frottement de la gouttelette pendant les phases d'étalement et de rétrécissement (Mourougou-Candoni *et al.*, 1999).

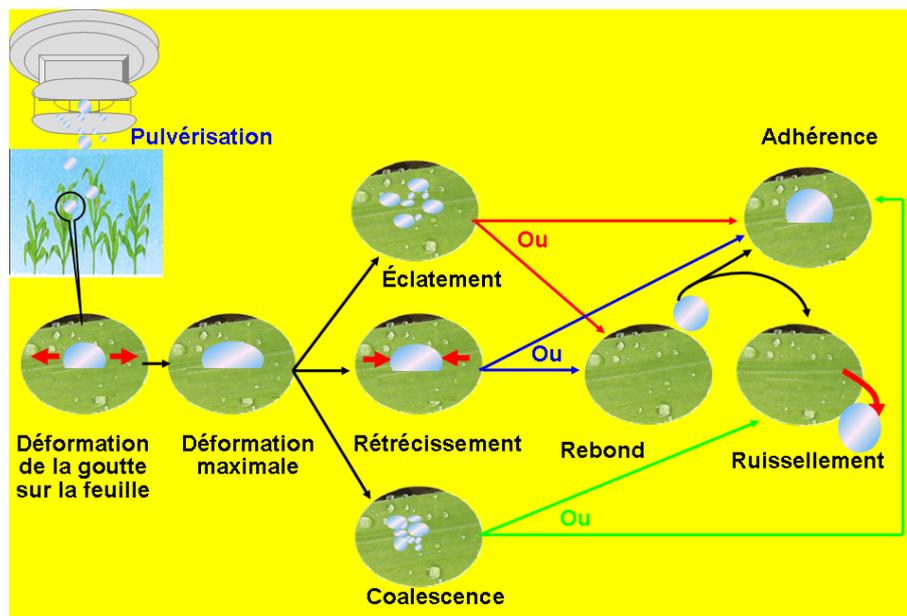


FIGURE 8.1 – Schéma de déformation d'une gouttelette montrant les scénarios possibles.

4. La solution est généralement à base d'eau.

Mercer *et al.* (2007) ont étudié ce phénomène et ont calculé la déformation maximale d'une gouttelette pendant son impact sur la feuille à partir de son bilan énergétique.

La conservation de l'énergie s'écrit :

$$K_e + K_{si} = K_{sf} + W_m \quad (8.8)$$

avec :

- K_e l'énergie cinétique de la gouttelette. Elle est donnée par :

$$K_e = \frac{\pi}{12} \rho_l \gamma^2 d^3 \quad (8.9)$$

- K_{si} l'énergie de surface initiale de la gouttelette quand elle quitte la feuille. Son expression est :

$$K_{si} = \pi d^2 \gamma \quad (8.10)$$

- K_{sf} l'énergie de surface de la gouttelette à sa déformation maximale, (l'indice f fait référence à l'énergie de surface en position de pleine expansion). Quand la gouttelette atteint sa pleine déformation, il est supposé que l'énergie cinétique est nulle). L'énergie de surface est obtenue à partir de :

$$K_{sf} = \frac{\pi}{4} d_{max}^2 \gamma (1 - \cos \theta_a) \quad (8.11)$$

- W_m l'énergie de la gouttelette pendant sa déformation maximale. Elle est calculée en appliquant la formule proposée par Pasandideh *et al.* (1996) :

$$W_m = \frac{\pi \rho_l v^2 d (d)_{max}^2}{3\sqrt{Re}} \quad (8.12)$$

où

- d , ρ_l et V sont respectivement le diamètre de la gouttelette, sa densité et sa vitesse,
- γ est la tension superficielle de la solution,
- θ_a est l'angle de contact avant de la gouttelette sur la surface de la feuille, (fig. 8.2),
- Re est le nombre de Reynolds de l'écoulement.

Le bilan d'énergie (équation 8.8) permet de calculer le facteur de déformation :

$$\beta_d = \frac{d_{max}}{d} = \sqrt{\frac{W_e + 12}{3(1 - \cos \theta_a) + \frac{4W_e}{\sqrt{Re}}}} \quad (8.13)$$

où W_e est le nombre de Weber :

$$W_e = \frac{\rho_l d V^2}{\gamma} \quad (8.14)$$

Selon Mercer *et al.* (2007), cette formule montre une bonne cohérence avec les résultats expérimentaux et des modèles numériques existant. Les auteurs ont calculé la déformation maximale de la gouttelette et l'énergie qu'elle perd pendant la phase de déformation, (pendant l'expansion seulement). Pour mettre en évidence les conditions d'adhérence de la gouttelette, ils ont déterminé l'énergie disponible au début de la phase de rétrécissement K_r :

$$K_r = K_{sf} - K_{si} \quad (8.15)$$

En supposant que K_r correspond à la quantité d'énergie consommée pendant la phase de rétrécissement, ils ont conclu que la gouttelette ne pourra adhérer à la surface de la feuille que si l'énergie cinétique (K_e) est inférieure à K_r .

L'approche énergétique a été également utilisée par d'autres chercheurs comme Webb *et al.* (2000), cependant elle reste difficile à appliquer.

8.2.3 Fractionnement des gouttelettes

Une gouttelette tombant sur une feuille, peut se fragmenter en de nombreuses petites gouttelettes. Ce phénomène pourra améliorer le taux de rétention dans la mesure où ces gouttelettes sont plus facilement capturées par les feuillages se situant autour du point d'impact. Mundo *et al.* (1995) se sont penchés sur l'étude de cette question et ont examiné les bilans énergétiques de façon similaire à celle décrite pour le rebond des gouttelettes. Ils ont alors développé l'inéquation suivante :

$$We^2 Re > K_a^4 \quad (8.16)$$

où K_a est une constante qui dépend de la rugosité adimensionnelle (R_a). R_a est le rapport de la rugosité de la surface au diamètre de la gouttelette et se situe dans la plage $0,001 < R_a < \infty$. La valeur de la constante K_a est déterminée d'une manière empirique pour chaque type de feuille : pour une large gamme de feuilles $K_a=57,7$. Mercer *et al.* (2007) précisent que l'inéquation 8.16, nécessite d'autres expériences de façon à pouvoir intégrer la rugosité de la surface et les angles de contact. Ainsi, on pourra prédire la valeur de K_a sous différentes conditions de travail. Mao *et al.* (1997) ont montré à travers des expériences que la valeur de cette constante peut aller jusqu'à 152 pour le cas de l'eau sur une surface cirreuse.

8.2.4 Ruissellement des gouttelettes sur la surface des feuilles

A leur sortie de la buse vers les plantes, les gouttelettes ne sont pas isolées les unes des autres, elles évoluent dans un nuage formé de milliers de gouttelettes de tailles différentes. Le comportement de ces gouttelettes à la surface des feuilles différera en fonction de leur taille et de l'angle d'inclinaison de la feuille, (ou angle de glissement). Pour les plus grosses, en raison de leur taille et de leur poids, elles peuvent impacter la surface des feuilles et ruisseler pour tomber au sol. Le phénomène est schématisé sur la figure 8.2. Les plus petites qui ont tendance à adhérer plus facilement à la feuille, peuvent augmenter progressivement de diamètre par coalescence jusqu'à atteindre une taille critique à partir de laquelle elles commencent à glisser sur la surface puis à ruisseler.

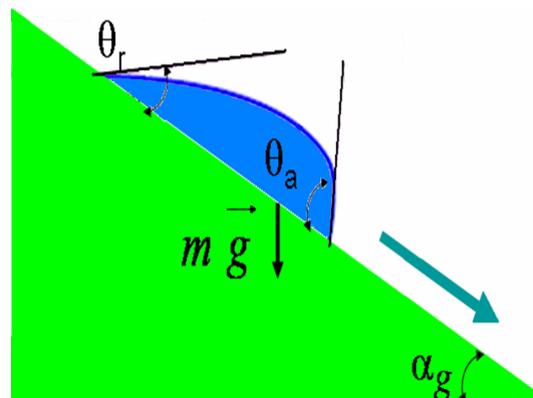


FIGURE 8.2 – Phénomène de glissement d'une gouttelette sur une surface inclinée, montrant les angles de contact, avant, (θ_a) et arrière, (θ_r) ainsi que l'angle de glissement, (α_g).

Ce sujet a fait l'objet de plusieurs études scientifiques, (Furmidge, 1961, 1962 ; Mercer *et al.*, 2007 ; Bouteau *et al.*, 2008) qui ont montré que les propriétés du glissement sont fortement affectées par la rugosité et l'angle d'inclinaison de la surface, la structure et la composition de la formulation (tension superficielle de la bouillie et angles de contact) et la taille des gouttelettes.

Il est bien connu qu'une petite gouttelette d'eau déposée sur une surface solide affiche une forme sphérique. Compte-tenu qu'une feuille n'est pas solide, Furmidge a considéré que sur sa surface, la gouttelette ne peut pas être sphérique, mais qu'elle forme une calotte sphérique d'une largeur ω qui est proportionnelle à la largeur de la gouttelette pouvant être assimilée à d . En écrivant les formules des volumes de la calotte sphérique et de la sphère, on peut déterminer d en fonction de ω :

$$\frac{\pi}{6}d^3 = \frac{\pi(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)}{24 \sin^3 \theta} \omega^3 \quad (8.17)$$

où θ est l'angle de contact avant avec la surface des feuilles.

En réarrangeant la formule on obtient :

$$d = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt[3]{\frac{(1 - \cos \theta)^2(2 + \cos \theta)}{4}} \omega \quad (8.18)$$

Lorsque la surface est inclinée au moment de l'impact de la gouttelette, alors que la partie avant de la sphère formée essaie de rester fixe, l'extrémité arrière commence à se déformer suivant la pente jusqu'à son détachement et son glissement. Furmidge (1961) a étudié la relation entre l'angle de glissement et les angles de contact de la gouttelette sur une surface solide. Les forces agissant sur la gouttelette quand elle commence à glisser vers le bas sont son poids et la force capillaire résultant de la différence des angles de contact à l'avant et l'arrière. Il a proposé une relation linéaire entre le poids de la gouttelette sur la surface et les angles de contact, (fig. 8.2).

$$W = mgl_p \sin \alpha_g = \omega \gamma (\cos \theta_r - \cos \theta_a) \quad (8.19)$$

où W est une constante qui varie seulement en fonction de la tension superficielle de la gouttelette, m est la masse de la gouttelette, l_p est la distance parcourue par la gouttelette suivant la pente, g est l'accélération de la pesanteur, α_g est l'angle de glissement critique défini comme étant l'angle minimum de l'inclinaison de la surface capable de déclencher le mouvement de la gouttelette, ω est la largeur de la gouttelette sur la feuille, γ est la tension superficielle du liquide. Dans cette équation, les angles de contact de la gouttelette sont θ_a à l'avant et θ_r à l'arrière.

Furmidge (1961) a utilisé la formule 8.17 pour montrer que pour une pulvérisation régulière sur une feuille donnée, la rétention D_p des gouttelettes dépend en grande partie de l'angle de la feuille (α) et des angles de contact θ_a et θ_r :

$$D_p = k \sqrt{\left(\frac{\pi \gamma (\cos \theta_r - \cos \theta_a)}{24 \rho_l g \sin \alpha}\right)} \sqrt{\left(\frac{(1 - \cos \theta_a)^2 (2 + \cos \theta_a)}{\sin^3 \theta_a}\right)} \quad (8.20)$$

où k est un coefficient qui dépend surtout du spectre des gouttelettes et qui est grosso modo constant pour la majorité des combinaisons pulvérisation/surface.

8.3 Modèles de rétention

Nous présenterons ici trois exemples de modèles qui sont couramment cités dans la littérature : le modèle de **Grayson *et al.* (1993)**, le modèle de **Gyldenkerne *et al.* (1999)** et celui de **Forster *et al.* (2005)**.

8.3.1 Modèle de Grayson

Développé en Angleterre par Grayson *et al.* (1991, 1993), ce modèle est basé sur l'équation de Young de l'adhérence des liquides à des surfaces solides.

Son équation est :

$$V_{S,T} = V_{S,WG} M_T \left[\frac{(1 + \cos \theta_{W,T})}{(1 + \cos \theta_{W,G})} \right] + f M_T \left[1 - \frac{(D_{ST})_s}{73} \right] \times \left[1 - \frac{(1 + \cos \theta_{W,T})}{(1 + \cos \theta_{W,G})} \right] \quad (8.21)$$

où

$V_{S,T}$ est le volume de bouillie d'une solution, S déposé sur une cible, T ,

$V_{S,WG}$ est le volume de bouillie déposé sur du verre,

M_T est le coefficient de la morphologie de la cible, T ,

$\theta_{W,T}$ est l'angle de contact de l'eau sur la cible,

$\theta_{W,G}$ est l'angle de contact de l'eau sur la surface de verre,

$(D_{ST})_s$ est la tension superficielle dynamique de la solution S à une surface donnée,

f est un coefficient de régression.

Il fait ainsi intervenir les caractéristiques physiques et morphologiques de la surface des feuilles des plantes et les propriétés physiques de la bouillie.

Il a été testé en mesurant expérimentalement les dépôts de pulvérisation sur quatre espèces différentes de plantes artificielles et d'une cible de tiges en verre.

Selon Grayson *et al.* (1993), la comparaison des simulations à des valeurs observées a montré une bonne cohérence. Les coefficients de corrélation étaient de 96,4% pour le blé, de 98,9% pour le pois, de 98,6% pour la betterave à sucre et de 99,4% pour les tiges de verre.

D'après Forster *et al.* (2004), dans sa forme actuelle, ce modèle reste très théorique pour pouvoir prédire la rétention réellement observée.

8.3.2 Modèle de Gyldenkærne

C'est l'un des rares modèles qui proposent d'estimer en même temps les dépôts au sol par ruissellement et ceux retenus par les plantes. C'est un modèle exponentiel simple, qui permet de calculer la quantité de pesticide déposée au sol (D_s) pendant l'application compte-tenu de la quantité appliquée (D) et de celle retenues par les plantes (D_p).

Les auteurs considèrent la plante qui est constituée principalement de feuilles et de tiges, comme un système dynamique qui évolue dans l'espace et dans le temps. Son stade de développement a donc été pris en compte dans la modélisation du processus de transport et de dispersion des pesticides dans son environnement. Ils ont supposé que les grandes variations dans les dépôts au sol sont liées à la densité du couvert végétal et que le paramètre le plus important qui les caractérise est l'indice de surface foliaire, (**LAI**).

Dans ce modèle, les dépôts au sol D_s , sont fonction de l'indice foliaire LAI et d'un coefficient de rétention K_R qui dépend de l'architecture et de la capacité d'interception des plantes. A un stade de développement donné et un niveau de hauteur i dans la canopée, les dépôts peuvent être calculés à partir de l'équation suivante :

$$D_s = D - D_p = D - \sum_{i=1}^n K_{Ri} S_i D_i \quad (8.22)$$

avec :

- D_s : la quantité de pesticide déposée sous les plantes (kg),
- D : la quantité de pesticide appliquée par le pulvérisateur (kg),
- D_p : la quantité de pesticides retenue par les plantes (kg)
- S_i : la surface des feuillages au niveau i dans la canopée (m^2),
- K_{Ri} : le coefficient de rétention du pesticide au niveau i dans la canopée,
- D_i : la quantité de pesticide retenue au niveau i , ($kg \cdot m^{-2}$ de feuilles).

Le modèle le plus simple recommandé par les auteurs pour calculer les dépôts serait que chaque feuille ait le même coefficient de rétention (K_R), indépendamment de la hauteur dans la végétation. Ils montrent alors que la quantité de produit déposée au sol peut s'écrire sous la forme :

$$D_s = D \exp(-K_R \cdot LAI) \quad (8.23)$$

où LAI est l'indice de surface foliaire (m^2 de feuilles $\cdot m^{-2}$ de sol).

Lorsque LAI s'approche de zéro, 100% de la bouillie atteindra le sol.

Le coefficient K_R dépend de l'architecture de la canopée, de la turbulence au voisinage des plantes, de la formulation et des caractéristiques des gouttelettes (taille et vitesse). Sa valeur pour une céréale est d'environ 0,45 mais elle varie en fonction de la rugosité de la surface des feuilles, elle peut aller de 0,38 pour l'orge jusqu'à 0,55 pour le blé, (Gyldenkærne *et al.*, 1999).

Le stade de développement de la culture au moment de l'application est donc un facteur très influent sur la répartition des dépôts entre le sol et les plantes : la fraction de la substance qui atteint le sol varie de 100% de la dose appliquée, pour une application avant la levée de la culture, à moins de 10% pour une culture dans un stade avancé. Ceci est principalement dû à la variation du LAI qui varie avant la levée de 0 à environ 4 m^2 de surface de feuilles par m^2 au sol pour une céréale bien développée (Charles, 2004).

A partir des résultats de leurs essais réalisés sur des céréales avec des VMD de 215 à 267 μm , les auteurs de ce modèle ont conclu que pour des cultures comme le blé, la variation de la taille des gouttelettes n'a pas d'effet sur les dépôts au sol. Ceci ne nous semble pas extrapolable à la réalité observée sur le terrain pour un spectre granulométrique plus large. Bache (1980) ont montré que la taille des gouttelettes est un paramètre important pour la rétention, en particulier pour un diamètre supérieur à 150 μm .

8.3.3 Modèle de Forster

Forster a repris un modèle initialement développé par Stevens *et al.* (1993) et a mis au point un modèle de simulation de l'adhérence dans lequel il a augmenté la fourchette des diamètres de gouttelettes étudiés et a introduit deux nouvelles variables qui sont la taille et la vitesse de la gouttelette au moment de l'impact, (Forster et Zabkiewicz, 1998).

Modèle de calcul de la vitesse des gouttelettes

Avant de calculer la vitesse, les auteurs ont déterminé le diamètre des gouttelettes selon une formule qui avait déjà été validée par Stevens *et al.* (1992) :

$$d(\mu m) = \sqrt[3]{\frac{1,91 \times 10^9 \mu L}{N_g}} \quad (8.24)$$

où N_g est le nombre de gouttelettes

La vitesse V des gouttelettes est calculée à partir du bilan des forces :

$$\frac{dV}{dt} = g - \frac{F_D}{m} \quad (8.25)$$

avec :

g l'accélération de la pesanteur et F_D la force de trainée dont l'expression a été donnée dans la partie 6.2.2.

Modèle de calcul des dépôts

Depuis son développement en 1998, ce dernier modèle a connu plusieurs améliorations, (Forster *et al.*, 2001, 2002) qui ont abouti en 2005 à un modèle général de prédiction de l'adhérence des gouttelettes baptisé par ses auteurs, « modèle universel » (Forster *et al.*, 2005). Basé sur les quatre modèles de Stevens *et al.* (1993) ; Forster et Zabkiewicz (1998) ; Forster *et al.* (2001, 2002), ce modèle se présente sous forme d'une régression logistique⁵ de l'adhérence :

$$A = \frac{100e^F}{(1 + e^F)} \quad (8.26)$$

L'adhérence A est différente pour chacun des quatre modèles.

Pour le modèle de Stevens *et al.* (1993)

$$F = -10,8 \ln V + 8(1 - \sin \alpha) - 2,7 \ln d + k_1 + k_2(\gamma_w - \gamma_t)^3 \quad (8.27)$$

où α est l'angle de la feuille, (en degrés par rapport à l'horizontale), γ_w est la tension superficielle de l'eau (72 mN.m^{-1}), γ_t est la tension superficielle de la solution au moment du contact, k_1 et k_2 sont des coefficients qui diffèrent pour chaque solution.

Pour le modèle de Forster et Zabkiewicz (1998), F prend la forme suivante :

$$F = a + 2,22(1 - \sin \alpha) - 0,136\theta + 0,187(\gamma_w - \gamma_t)^2 \quad (8.28)$$

où θ est l'angle de contact de l'eau sur les feuilles, et a est un coefficient dépendant de la taille des gouttelettes : sa valeur est de 8,67 pour les grosses gouttelettes (au voisinage de $1000 \mu\text{m}$) et de 12,75 pour des gouttelettes plus petites (au voisinage de $650 \mu\text{m}$).

Pour le cas du modèle de Forster *et al.* (2001), F est :

$$F = 16,0 - 6,91V + 0,97d + 2,82Vd + 4,38(1 - \sin \alpha) - 0,11\theta_a + 0,071(\gamma_w - \gamma_t) \quad (8.29)$$

où θ_a est l'angle de contact avant d'une solution "eau + acétone (4+1 par volume)" sur la surface des feuilles.

Et enfin pour le modèle de Forster *et al.* (2002), la forme de F est :

$$F = 13,47 - 2,89V - 3,16d - 2,3V \sin^3 \alpha - 0,05\theta_a + 0,08(\gamma_w - \gamma_t) \quad (8.30)$$

Chacun de ces quatre modèles est dédié à des cultures bien définies et à des stades phénologiques précis. Il faut également souligner que le calcul de la vitesse initiale des gouttelettes n'est pas possible. Ce facteur est important pour le calcul de la trajectoire de la gouttelette et de sa vitesse d'impact.

5. Par rapport à une régression linéaire, la régression logistique se distingue essentiellement par le fait que la variable expliquée est catégorielle.

Pour palier à cette anomalie, les auteurs ont adopté une approche totalement théorique qui a donné lieu à un modèle de rétention primaire, (le premier impact des gouttelettes) supposé être plus général (Forster *et al.*, 2005) et permettre d'identifier les facteurs influent sur la rétention :

$$F = 13,52 - 3,34V - 0,0033\alpha^{1,64} + 0,077(\gamma_w - \gamma_t) - 0,089\theta \quad (8.31)$$

En combinant l'équation 8.26 et celles des cinq modèles qui viennent d'être présentés, il est clair que l'adhérence peut être améliorée à travers une réduction de la vitesse des gouttelettes, de l'angle et de la rugosité des feuilles et de la tension superficielle. Cela semble être possible aussi à travers la variation de la vitesse des gouttelettes, V , dans les cinq équations. On peut constater aussi que la rugosité est le facteur qui a le plus d'effet sur l'adhérence. Toutefois, pour des espèces végétales ayant le même type de feuilles, (donc la même rugosité), la vitesse des gouttelettes (qui est liée au diamètre) est le facteur dominant.

Les paramètres de la plante (rugosité et angle de glissement) étant prédéterminés par sa nature, on ne peut modifier l'adhérence des gouttelettes qu'en agissant sur les caractéristiques des gouttelettes, (vitesse et taille) et sur la tension superficielle de la formulation, (i.e. les angles de contact).

8.4 Conclusion

Les modèles précédemment décrits sont en général difficiles à utiliser dans la pratique car ils reposent sur des variables qui sont difficilement accessibles, notamment l'angle des feuilles et l'angle de contact des gouttelettes. Ils ne peuvent pas être utilisés pour déterminer le pourcentage de dépôt au sol sous une culture, de manière globale. Le modèle de Gyldenkerne *et al.* (1999) est beaucoup plus simple et peut être utilisé avec nos données mais pour un même LAI, il donnera toujours la même fraction de dépôt au sol : $D_s/D = \exp(-K_R \times LAI)$.

Chapitre 9

Résultats expérimentaux de la rampe mobile

9.1 Introduction

L'objectif des essais menés sous la rampe mobile était de quantifier les pertes au sol et la rétention sur les plantes, puis de déterminer quelles variables les influencent.

Dans ce chapitre, les résultats seront présentés, puis comparés à ce que nous avons obtenu au champ ainsi qu'aux calculs effectués par notre modèle DriftL. La portion non mesurée est supposée volatilisée et a permis d'estimer les quantités évaporées pour évaluer les résultats de DriftL présentés dans la section 7.4.

9.2 Présentation des résultats

9.2.1 Mesures des dépôts et de la rétention

Les résultats obtenus, pour l'ensemble des 32 configurations testées sont présentés, (en pourcentage de la dose initiale) au tableau 9.1.

Effet du VMD

Les valeurs des dépôts au sol varient entre 46 et 92%. A titre de comparaison, le modèle de Gyldenkærne donne une valeur constante de 86%, en prenant $K = 0,4$ (ce qui correspond à la valeur moyenne proposée par les auteurs pour du blé) et le LAI que nous avons mesuré : 0,37. Les dépôts sur les plantes varient entre 5 et 32%.

D'une façon générale, les mesures effectuées sous la rampe mobile montrent une forte dépendance des pertes au sol et de la rétention sur les plantes au VMD, à la vitesse d'avancement et à la hauteur de la rampe. Pour mettre en évidence cette forte dépendance, nous avons interprété au moins deux des configurations testées pour chacun de ces facteurs à travers leurs graphiques. Pour illustrer l'effet du VMD, nous avons choisi deux configurations totalement différentes : i. **V4H50** qui est associée à une faible vitesse, (4 km.h^{-1}) et une hauteur réduite, (0,5 m) devant favoriser les dépôts au sol, ii. **V7H80** pour laquelle nous avons augmenté la vitesse et la hauteur, (7 km.h^{-1} et 0,8 m), de façon à favoriser les conditions de transfert par volatilisation. Les deux figures 9.1 et 9.2, présentent les résultats de ces deux configurations en fonction du VMD. Elles montrent une allure croissante des dépôts piégés au sol, (D_s) et décroissante pour la rétention, (D_p) et la volatilisation, (D_v). Pour les trois buses API, en passant d'un VMD de $127 \mu\text{m}$ à un VMD de $322 \mu\text{m}$, les masses piégées au sol pour *V4H50* passent de 75% à 92% et les dépôts D_p de 14% à 5%.

Buse	Pression (bar)	VMD (μm)	Vitesse (km.h^{-1})	Hauteur (m)	Dépôts (%)		Volatilisation (%)
					Sol	Plantes	
API02	4	127	4	0,5	75	14	11
				0,8	76	13	11
			7	0,5	59	29	12
				0,8	46	28	26
	2	144	4	0,5	79	11	10
				0,8	78	11	11
			7	0,5	67	22	11
				0,8	65	20	15
API03	4	162	4	0,5	82	11	7
				0,8	80	12	7
			7	0,5	71	21	8
				0,8	66	20	14
	2	210	4	0,5	86	9	5
				0,8	83	13	4
			7	0,5	76	18	7
				0,8	76	15	9
API06	4	234	4	0,5	89	7	4
				0,8	88	8	4
			7	0,5	86	9	5
				0,8	84	8	8
	2	322	4	0,5	92	5	3
				0,8	91	5	4
			7	0,5	92	5	2
				0,8	90	5	5
AVI03	4	438	4	0,5	78	20	2
				0,8	78	17	5
			7	0,5	61	32	7
				0,8	60	30	10
	2	641	4	0,5	80	18	2
				0,8	80	16	5
			7	0,5	72	25	3
				0,8	70	23	7

TABLE 9.1 – Résultats des essais avec la rampe mobile.

Pour *V7H80*, les écarts enregistrés sont encore plus importants : les pourcentages des dépôts obtenus vont de 46 à 90% au sol et de 28 à 5% sur les plantes. D_v étant calculée directement à partir de D_s et D_p , elle présente dans tous les cas étudiés une allure décroissante.

Ces différentes observations restent valables pour les autres configurations dites *intermédiaires*, *V4H80* et *V7H50* (tableau 9.1). Elles sont tout à fait conformes aux conclusions de Gyldenkærne *et al.* (1999) ; Jensen et Splid (2003) ; Forster *et al.* (2005) ; Mercer *et al.* (2007) qui montrent que l'effet du VMD sur les dépôts est très important.

Pour la buse antidérive, (VMD 438 et 641 μm) les pertes au sol sont plus faibles qu'avec les buses classiques et les dépôts sur les plantes sont nettement améliorés.

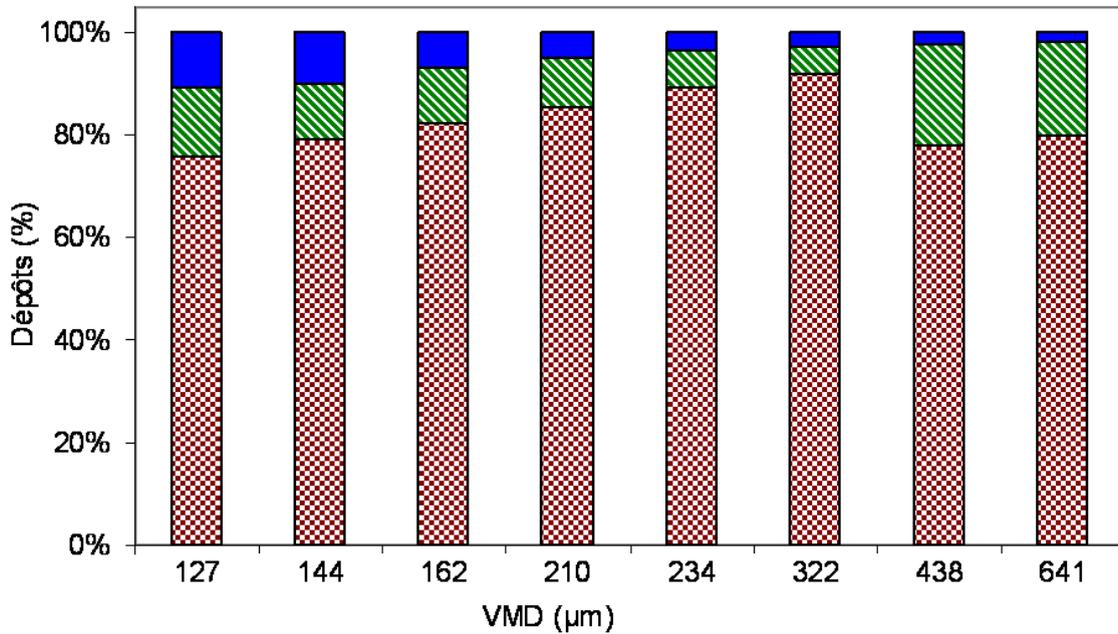


FIGURE 9.1 – Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD pour une vitesse V_a de 4 km.h^{-1} et une hauteur H de $0,5 \text{ m}$. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.

Effet de la vitesse d'avancement et de la hauteur de la rampe

La figure 9.3 compare les résultats obtenus pour les deux VMD, 127 et 322 μm qui correspondent aux VMD « extrêmes » donnés par les buses classiques testées. Pour un même VMD, les pourcentages minimum et maximum correspondent dans tous les cas à V4 pour les mesures au sol et à V7 pour les dépôts piégés sur les plantes.

Le détail du tableau 9.1 permet d'observer que pour les huit VMD testés, pour une hauteur donnée, le passage de la vitesse de 4 à 7 km.h^{-1} est toujours accompagné d'une réduction des dépôts au sol, d'une amélioration de la rétention sur les plantes et d'une augmentation de la part « volatilisée ». Par exemple, pour un VMD de $127 \mu\text{m}$ et une hauteur de $0,8 \text{ m}$, le changement de la vitesse provoque une réduction de D_s de 39% et une augmentation de 53% pour D_p et de 58% pour D_v .

Pour les six VMD relatifs aux buses classiques, avec cette même hauteur, la variation moyenne observée lors de cet accroissement de vitesse est de -15% pour D_s , de $+25\%$ pour D_p et de $+43\%$ pour D_v . Ce résultat n'est pas loin de ce qui a été observé par Taylor *et al.* (1989) qui ont étudié l'effet de la vitesse sur les transferts vers l'air et ont alors montré qu'en passant de 7 à 10 km.h^{-1} , l'augmentation des dépôts dépasse les 40% et peut atteindre 90% .

La hauteur des buses joue elle aussi un rôle important, en particulier pour la volatilisation. Le cas du VMD127, (fig. 9.3) montre que pour une vitesse de 7 km.h^{-1} , le passage de la hauteur de $0,5$ à $0,8 \text{ m}$ est accompagné d'un accroissement des émissions vers l'air de 54% . Globalement, ce même comportement est retrouvé avec tous les autres VMD.

En ce qui concerne la part non mesurée interprétée comme *volatilisation*, le tableau 9.1 permet d'observer que le maximum obtenu est de 26% et qu'il correspond à la combinaison VMD127, V7 et H0,8. Le minimum est de 2% et il est donné par la combinaison VMD641, V4 et H0,5. Compte-tenu des caractéristiques des deux configurations concernées, ce résultat est prévisible : la première configuration associe le VMD le plus faible, la vitesse la plus grande et la hauteur la

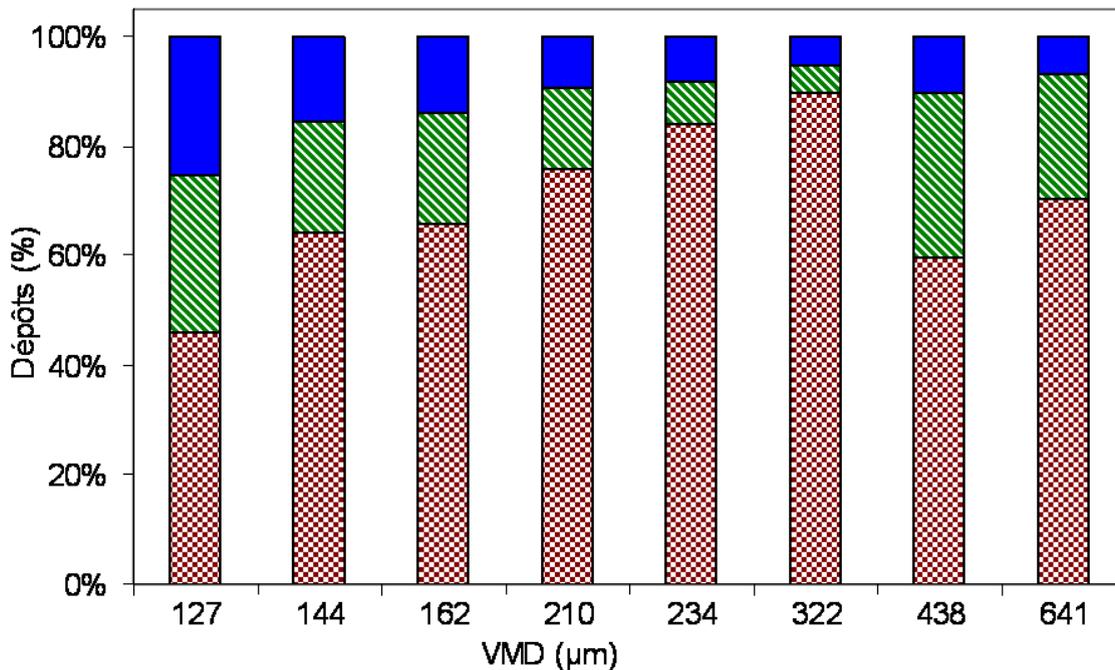


FIGURE 9.2 – Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD pour une vitesse V_a de 7 km.h^{-1} et une hauteur H de $0,8 \text{ m}$. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.

plus élevée. Il est ainsi logique qu'elle soit la plus sensible à la volatilisation et aux émissions vers l'atmosphère d'une façon générale. La deuxième fait intervenir la buse antidérive, avec une faible vitesse et une faible hauteur, on pouvait donc s'attendre à ce que les pertes par volatilisation restent minimales.

Effet de la buse

L'effet buse peut être constaté à travers la comparaison de deux types de données :

- Les résultats relatifs aux trois buses classiques API02, API03 et API06 qui renseignent sur l'effet du calibre,
- Les résultats des deux buses qui ont le même calibre, (classique API03 et antidérive AVI03) qui renseignent sur l'effet du type de buse.

Les résultats obtenus pour les quatre buses sont montrés sur la figure 9.4. Ils montrent clairement que l'allure des dépôts au sol croît rapidement avec le calibre alors qu'elle est décroissante sur les plantes. Dans le premier cas, pour les buses classiques, les pourcentages obtenus au sol et sur la végétation sont respectivement de 46 et 28% pour API02, 66 et 20% pour API03, 84 et 8% pour API06. Ces mêmes comportements sont retrouvés pour P2V4H50 (figure 9.4) ainsi que pour les deux configurations intermédiaires, P2V4H80 et P4V7H50 (tableau 9.1).

La comparaison des résultats des deux buses API03 et AVI03 met en évidence l'effet du type de buse. Pour les mêmes conditions de vitesse et de hauteur, la buse antidérive est caractérisée par moins de pertes et une meilleure efficacité. A titre indicatif, son utilisation avec la configuration P4V7H80 a donné des écarts importants par rapport à la buse API03. Ces écarts représentent -9% au sol, +50% sur la culture et -28% dans l'atmosphère.

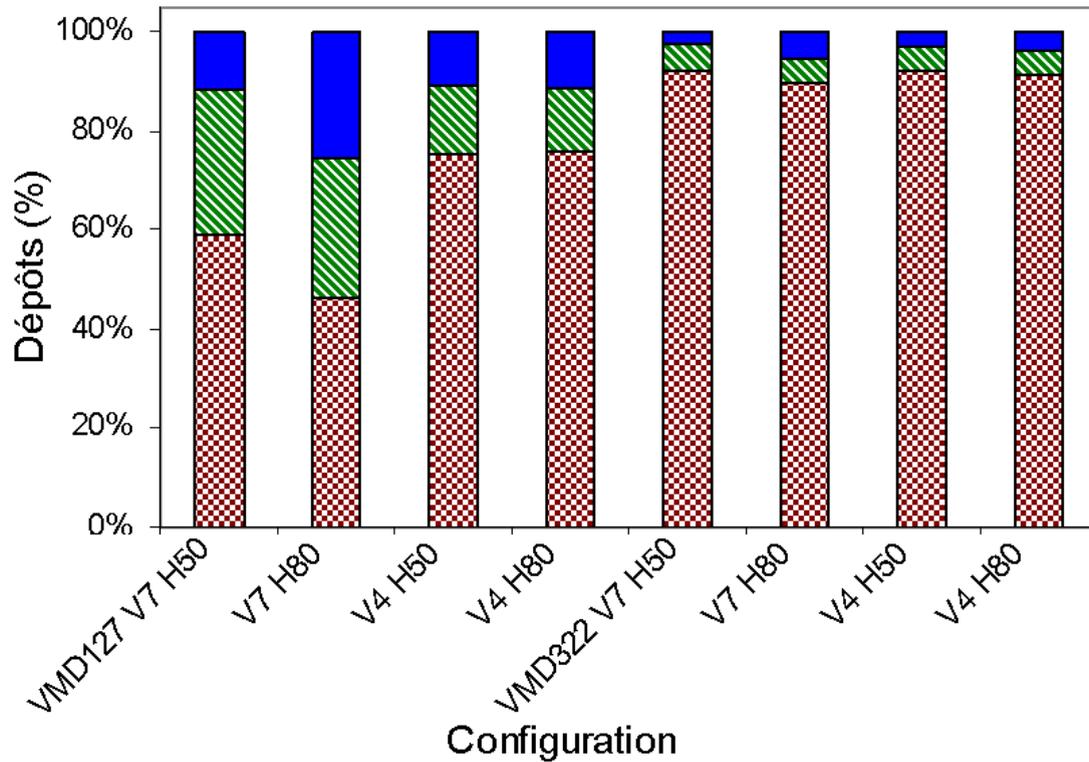


FIGURE 9.3 – Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD, de la vitesse d’avancement de la rampe et de la hauteur des buses. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.

9.2.2 Comparaison entre les résultats de la rampe mobile et ceux du terrain

Le tableau 9.2 présente une comparaison des dépôts obtenus dans des conditions réelles et au laboratoire. Dans l’ensemble, les résultats de terrain confirment ce que nous avons obtenu sous la rampe mobile. Les données obtenues sont comparables, les ordres de grandeur et les tendances sont corrects. Dans le détail, il est constaté que les dépôts piégés sous la rampe mobile sont légèrement supérieurs aux mesures de terrain. Il est tout à fait logique que pour un VMD donné, les dépôts les plus faibles sous la rampe soient associés à la configuration caractérisée par le vent le plus fort. D’une part, ce type de vent provoque l’agitation des feuillages et réduit donc les chances d’adhérence des gouttelettes aux feuilles. D’autre part, il « pousse » par déport une partie des gouttelettes émises et les dépose loin de la rampe. C’est ce qui explique les différences sous la rampe mobile pour laquelle la vitesse du vent est négligeable. Ces différences sont plus importantes pour les VMD les plus faibles.

	Champ06		Champ07		Rampe mobile	
	VMD127	VMD322	VMD127	VMD322	VMD127	VMD322
V-vent ($m.s^{-1}$)	4,1	2,1	1,8	4,6	0	0
Dépôts au sol (%)	59	86	52	89	59	92
Rétention (%)	8	4	12	4	29	5

TABLE 9.2 – Comparaison entre les résultats obtenus avec la rampe mobile et ceux obtenus sur terrain pour les deux VMD correspondant à D+ et D-, (127 et 322 μm).

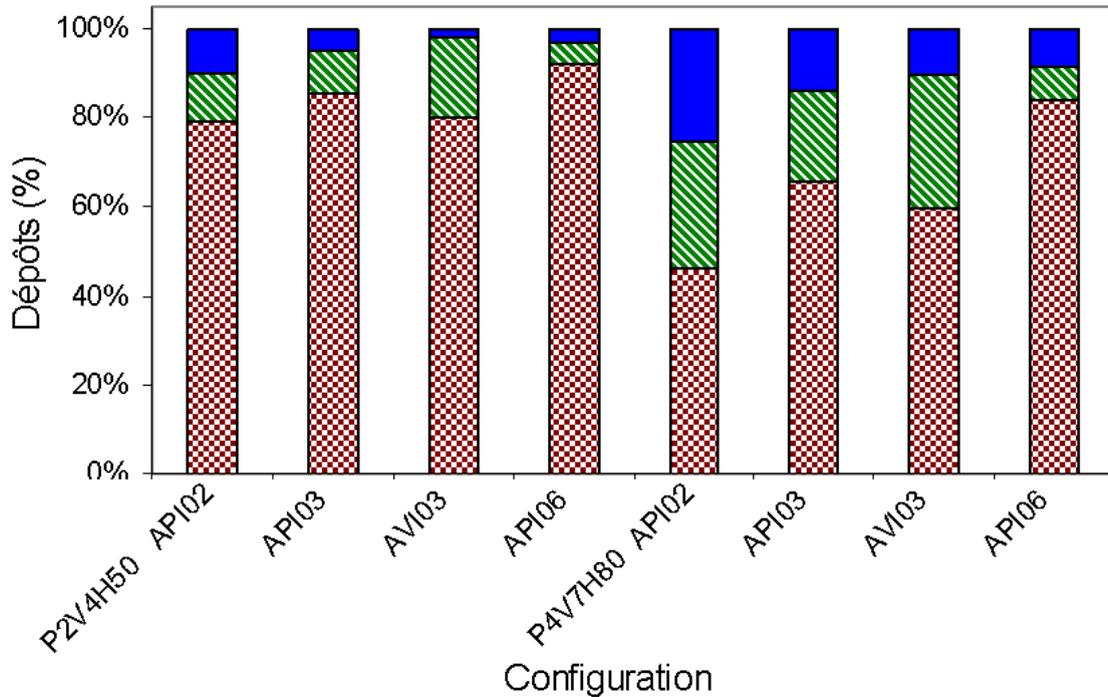


FIGURE 9.4 – Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction de la buse pour une pression de 4 bar, une vitesse d'avancement de la rampe de 7 km.h^{-1} et une hauteur des buses de 0,8 m. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.

9.2.3 Analyse statistique des résultats de la rampe mobile

Les facteurs considérés lors des essais de la rampe mobile sont le calibre de la buse (B), la pression (P), la hauteur des buses par rapport à la cible (H) et la vitesse d'avancement (V_a). Chacun de ces facteurs présente deux niveaux.

En considérant les buses API, le nombre d'observations obtenues est de 32, 16 au sol et 16 sur les plantes (cf. tableau 9.1). L'analyse statistique des données obtenues par la méthode des plans d'expérience a permis d'obtenir deux modèles :

– **Modèle des dépôts au sol dsf**

$$D_s = 2,33 + 1,17B + 0,19P - 0,62V_a + 0,14H + 0,12BP - 0,29BV_a - 0,1PV_a - 0,13PH \quad (9.1)$$

avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,84$.

– **Modèle des dépôts sur les plantes**

$$D_p = 0,23 - 0,026B + 0,061P - 0,028V_a - 0,037H \quad (9.2)$$

avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,83$.

Ces modèles sont obtenus avec un faible nombre d'observations d'un point de vue statistique. Ce sont des modèles de type "boîte noire" qui ne donnent pas suffisamment de renseignements pour la discussion. De plus, leur validation nécessiterait un grand nombre d'essais.

Ces différentes considérations nous ont conduit à ne pas tenir compte de ces modèles pour la suite du travail. Toutefois, l'analyse des données a permis de classer les facteurs par ordre d'influence sur le niveau des dépôts mesurés sous la rampe. Les facteurs les plus influents sont, dans l'ordre :

le VMD, la vitesse d'avancement et la hauteur des buses. Ce résultat confirme bien ce qui a été observé dans les conditions de terrain et en soufflerie relativement à l'ordre d'influence de ces facteurs sur le dépôt, (cf. section 9.2.1, p. 78). Cette conclusion a été proposée également par Gil *et al.* (2005) pour des mesures effectuées dans la vigne et auparavant par Teske *et al.* (2002).

9.3 Discussion

La rétention des gouttelettes de pulvérisation par les plantes repose sur des phénomènes complexes et les modèles développés par la communauté scientifique sont souvent trop détaillés pour pouvoir être utilisés de manière globale à l'échelle d'une parcelle. Seul le modèle de Gyldenkærne *et al.* (1999) est utilisable mais il n'est pas assez détaillé pour prendre en compte l'effet de la taille des gouttelettes et des différents réglages. Ces aspects confortent la pertinence de l'approche expérimentale que nous avons menée.

Nos mesures montrent que pour les configurations testées, les pertes de produit au sol peuvent varier du simple au double et dépasser les 90% alors que les quantités interceptées par les plantes varient entre environ 5 et 30%. On observe une forte dépendance des dépôts au sol et sur la plante au VMD, à la vitesse d'avancement et à la hauteur de la rampe. Le classement de ces facteurs par ordre d'influence est conforme à ce que nous avons obtenu au champ et en soufflerie. Une hauteur élevée des buses par rapport à la cible réduit la rétention sur les plantes et augmente considérablement les pertes, (en particulier la part non mesurée). Cependant dans la pratique, pour remédier aux problèmes provenant du contact de la rampe avec le sol, les agriculteurs traitent souvent à une hauteur qui dépasse de loin la valeur recommandée de 0,5 m. D'une manière générale, nos résultats sont cohérents avec ce qui a été observé par plusieurs chercheurs comme par exemple Taylor *et al.* (1989) ; Teske *et al.* (2002) ; Jensen et Splid (2003) ; Gil *et al.* (2005) ; Forster *et al.* (2005) ; Mercer *et al.* (2007).

Nos essais ne sont pas assez nombreux pour pouvoir réaliser un modèle statistique. Cependant la comparaison avec les essais au champ permettant de valider les résultats obtenus sous la rampe mobile, nous pourrions envisager de multiplier les essais afin de mener une telle démarche.

La buse antidérive se comporte d'une manière différente de celle des buses classiques. Elle est caractérisée par moins de pertes et plus de rétention. Nos mesures confirment donc l'intérêt de cette technologie pour les traitements sur culture basse.

9.4 Conclusion

L'approche expérimentale appliquée dans cette partie vient compléter l'approche par modélisation précédemment développée. Le protocole mis en place sous une rampe mobile a permis d'estimer les pertes au sol sous les plantes et la rétention par la végétation pour une culture de blé au stade 4 à 5 feuilles, pour les 32 configurations que nous avons sélectionnées (8 VMD \times 2 pressions \times 2 hauteurs). La mise en place de cette approche a nécessité l'élaboration d'une méthode et la fabrication d'un matériel spécial pour mesurer les pertes directes au sol et les taux retenus par les plantes, (cf. sections 5.3, p. 23 et 5.4.3, p. 30).

Les mesures effectuées au laboratoire montrent que dans les conditions tunisiennes, sur une culture peu développée (blé stade 4-5 feuilles) les quantités de pesticides que l'agriculteur perd au sol varient de 46 à 92%, alors que la fraction retenue par les plantes n'est que de 5 à 29%. La taille des gouttelettes, les facteurs climatiques et la hauteur des buses sont les variables qui influencent le plus les dépôts. Comme pour la dérive, l'analyse des mesures n'a pas permis d'évaluer l'effet exact de chaque facteur climatique de manière isolée mais les résultats montrent l'effet

important du VMD et de la hauteur de la rampe. Les essais réalisés sur le terrain confirment ces résultats et valident la méthode expérimentale élaborée : les dépôts mesurés pour les configurations VMD127 et VMD322 sont respectivement de 52 et 89% au sol et de 4 et 8% sur les plantes.

Cinquième partie

Conclusion générale et perspectives

Chapitre 10

Conclusions

Le travail réalisé dans cette thèse se situe au cœur des thèmes de recherche sur les problèmes posés par l'utilisation des pesticides en agriculture et plus particulièrement en grandes cultures. Le thème de recherche a été abordé pour deux raisons principales.

La première raison concerne le risque encouru par la population avoisinant les zones agricoles évoluant vers les concepts de l'agriculture moderne laquelle se base essentiellement sur l'application des technologies nouvelles et l'utilisation intense de divers intrants tels que les pesticides. Cette situation a imposé de nouvelles orientations dans le choix des actions de recherche qui tiennent compte non seulement de la production mais aussi des exigences d'une agriculture durable qui prend en considération la santé publique et l'environnement.

La deuxième raison réside dans la forte consommation des pesticides sur les céréales qui sont des cultures très pratiquées dans les régions méditerranéennes, ce qui entraîne une importante contamination de l'environnement.

Ces considérations nous ont amené à choisir de travailler sur les problèmes de pollution liés à l'application de pesticides en grandes cultures, tout en maintenant les objectifs d'efficacité du traitement au niveau de la plante. L'expérience acquise par la communauté scientifique en matière de savoir et de savoir faire relativement à la gestion des risques liés à la pollution de l'environnement nous a facilité cette tâche. Le travail étant étroitement lié à la machine, l'étude est restée limitée à échelle de proximité du pulvérisateur.

L'objectif principal de cette thèse était de caractériser les pertes de pesticides vers les deux compartiments air et sol ainsi que la rétention sur les plantes pendant les traitements en grandes cultures dans les conditions méditerranéennes en définissant un moyen permettant de discuter de manière objective de l'efficacité des traitements et des sources de pollutions qui y sont liées. Pour atteindre cet objectif, une démarche en cinq étapes, basée sur le couplage entre une approche expérimentale et la modélisation a été adoptée :

- une étude locale pour définir le système à étudier,
- une étude bibliographique et des essais préliminaires en conditions contrôlées pour définir la méthodologie expérimentale,
- le développement d'un modèle pour calculer la répartition au voisinage de la rampe et estimer les dépôts, en tenant compte de l'évaporation,
- la mise en place d'une approche expérimentale de mesure des dépôts au niveau des trois compartiments air, sol et plante,
- la validation du modèle à partir des données expérimentales obtenues.

Le principe de pulvérisation utilisé sur les cultures basses est essentiellement le jet projeté pour

lequel les gouttelettes sont créées par des buses de différents calibres. Les études réalisées pour déterminer les pertes et l'efficacité de ces pulvérisations ont établi que les principaux facteurs sont les paramètres physiques de fonctionnement du pulvérisateur, les conditions microclimatiques, les caractéristiques de la végétation et les propriétés physico-chimiques des pesticides. La pulvérisation se déroule en milieu extérieur où certains de ces paramètres comme les conditions climatiques ou la structure de la végétation sont fluctuants. Le comportement des gouttelettes va différer donc selon qu'elles sont déposées dans la végétation ou au sol ou qu'elles restent suspendues dans l'air. De plus, pendant leur trajet dans l'air, elles sont susceptibles de s'évaporer, sur les feuilles elles peuvent adhérer ou ruisseler au sol, elles peuvent également rebondir et/ou se fractionner.

L'étude du devenir des gouttelettes pulvérisées fait ainsi intervenir plusieurs phénomènes complexes qui interagissent pour rendre impossible d'envisager l'évaluation des dépôts dans les trois compartiments considérés en se basant sur une méthode purement expérimentale. Il a été ainsi choisi de compléter cette approche par le développement d'un modèle capable d'estimer les pertes par dérive en prenant en compte la volatilisation (évaporation et pertes dans l'air) dans des conditions climatiques méditerranéennes, pour des applications terrestres sur cultures basses. Le choix s'est porté sur une méthode basée sur le calcul des trajectoires des gouttelettes, ce qui permet de représenter les principaux phénomènes (y compris l'évaporation) tout en introduisant des paramètres de calage issus d'observations expérimentales pour prendre en compte les phénomènes les plus complexes (entraînement d'air par le jet à la sortie de la buse, turbulence). Il a été fait l'hypothèse que les gouttelettes sont sphériques, que leur vitesse d'éjection est verticale et constante pour toutes les classes de diamètre. Le calcul se déroule en trois temps : i. calcul du spectre granulométrique du jet, ii. calcul de la trajectoire et du point d'impact pour chaque classe de diamètre et iii. calcul de la diffusion autour du point d'impact.

Le modèle développé, DriftL, est calé sur deux paramètres (un coefficient de correction de la vitesse verticale et un coefficient de diffusion) avec une **méthode de moindres carrés** à partir d'essais systématiques dans la soufflerie faisant varier cinq facteurs : type et calibre de la buse, pression, hauteur de la rampe et vitesse du vent. L'évaporation a été prise en compte en considérant uniquement l'évaporation de l'eau. Les valeurs trouvées pour les deux coefficients de calage sont cohérentes avec les phénomènes physiques : le facteur b qui corrige la vitesse ne dépend que de la buse et augmente avec le calibre (il y a moins de frottements) ; le coefficient de diffusion c_{dif} dépend du calibre de la buse et de sa distance au sol. Les valeurs obtenues pour la buse à injection d'air sont plus faibles, notamment pour la valeur de b .

Les résultats de DriftL ont été évalués par comparaison avec des données expérimentales dans deux configurations : l'une, D+, favorisant la dérive et l'autre, D-, la minimisant. Les dépôts calculés ont été comparés aux mesures réalisées en conditions réelles, au champ. L'utilisation du modèle pour la mesure des dépôts latéraux ne figurait pas parmi les objectifs du travail (le modèle calcule les dépôts dans le sens d'avancement du pulvérisateur), mais elle a semblé nécessaire pour permettre des comparaisons aux données de terrain. Nous avons ainsi effectué des tests pour observer le comportement de DriftL avec cette configuration. La conclusion de ces essais est que sous sa forme actuelle, le modèle est peu adapté à la mesure des dépôts latéraux. Dans cette approche, un paramètre important a été négligé : il s'agit de la **composante horizontale de la vitesse d'éjection des gouttelettes**. Le choix qui a été fait de travailler avec une vitesse d'éjection verticale doit donc être reconsidéré. Compte-tenu de ces limitations, les calculs de DriftL surestiment légèrement le dépôt, en particulier pour la configuration D+, ce qui laisse penser que l'hypothèse du vent constant en tout point est à revoir. La prise en compte d'un profil logarithmique permettrait d'améliorer ce point. Il a été observé également que dans les conditions testées en soufflerie, il ne permet pas de prévoir les dépôts au-delà de 3 m. Il est possible que ces dépôts aient été dus à des rafales de vent pendant les essais.

Pour les pertes vers l'air les résultats du modèle ont été comparés à des mesures sur des fils verticaux en soufflerie et au champ. L'évaporation n'a pas pu être mesurée directement. Elle a été estimée de manière expérimentale en comparant les dépôts au sol dans la soufflerie, dans des conditions de saturation, avec ceux obtenus sous la rampe mobile, pour des humidités plus faibles, toutes les autres conditions étant maintenues égales par ailleurs. Malgré le faible nombre d'observations et les imprécisions relevées à la fois pour la partie expérimentale et dans les prévisions du modèle, les résultats sont encourageants et montrent une prévision des bons ordres de grandeurs ainsi que les bonnes tendances d'évolution.

Il serait utile de compléter cette approche afin d'aboutir à une validation expérimentale plus complète. Il apparaît en tout premier lieu nécessaire d'optimiser les paramètres de calage pour des conditions de travail plus larges, en particulier les paramètres liés au matériel : bien que les valeurs de la **hauteur** et de la **vitesse d'avancement** considérées pour les essais en soufflerie et au champ soient conformes à ce qui est recommandé pour les cultures basses, ces valeurs sont souvent dépassées par les agriculteurs. Il faut également élargir le calage à d'autres **calibres de buse**. Il s'avère aussi que les vitesses de vent testées sont faibles.

L'approche expérimentale qui a permis d'évaluer les résultats du modèle a fait l'objet d'études préalables visant le choix des collecteurs et la définition des protocoles. La méthodologie mise en place est basée sur le piégeage de dépôts sur des collecteurs dont le choix a fait l'objet de tests préliminaires menés en conditions contrôlées. Trois types de collecteurs ont été sélectionnés : des fils PVC pour les émissions vers l'air, des tapis en caoutchouc souple pour les dépôts au sol et des plantes de blé (remplaçant les adventices) cultivées hors sol pour la rétention. Lors des essais en extérieur, les résultats obtenus en terme de quantité de produit piégé montrent une sensibilité importante aux conditions microclimatiques, en cohérence avec les phénomènes connus. L'efficacité moyenne de ces collecteurs variait entre 80% et 85%.

Notre approche expérimentale a été construite autour de trois types d'essais :

- **Des essais en soufflerie** pour mesurer : i. les répartitions au voisinage de la rampe pour le choix du principe du modèle et du calage de ses paramètres, ii. les dépôts au sol, sous le vent, dans une atmosphère saturée en humidité (leur différence avec les dépôts sous la rampe mobile dans des conditions d'humidité plus faibles a ensuite permis d'évaluer l'évaporation) et iii. les émissions vers l'air.
- **Des essais en laboratoire sous une rampe mobile** pour évaluer les pertes au sol et la rétention sur les plantes. La rampe mobile de pulvérisation a été fabriquée et installée à l'INRGREF dans des conditions telles que les variables liées au matériel puissent être contrôlées. Ces essais ont permis d'estimer les dépôts au sol, sous les cultures, par différence entre les quantités interceptées par les plantes et celles collectées sur les tapis au sol, sous la rampe mobile.
- **Des essais au champ** pour la validation des calculs du modèle et des résultats de la rampe mobile. Les mesures ont été réalisées dans l'air, sur les plantes et au sol sous la culture.

En ce qui concerne les mesures réalisées, des comparaisons à des résultats obtenus par plusieurs chercheurs montrent des ordres de grandeurs corrects et des tendances logiques. Par rapport au débit émis, les dépôts et les émissions vers l'air sont respectivement de 1 à 36% et de 7 à 13% pour la configuration caractérisée par des fines gouttelettes, de 0,4 à 25% et de 1,5 à 3,4% pour la configuration produisant de grosses gouttelettes. Sous la rampe, les pertes au sol et la rétention des plantes ont des taux respectifs de 46 et 29% pour la première configuration et de 92 et 5% pour la deuxième. Les facteurs les plus influents sont le VMD, la vitesse d'avancement,

la hauteur des buses et les facteurs microclimatiques. Les résultats confirment que les émissions vers l'air et les dépôts les plus importants sont obtenus pour les gouttelettes les plus fines, la vitesse la plus grande et la hauteur la plus élevée. Pour les plantes, la meilleure rétention est associée à une faible taille, une vitesse plus lente et une hauteur moins élevée.

Pour les différentes évaluations expérimentales, le choix a été fait de se concentrer sur deux configurations extrêmes (D+ et D-), ce qui a conduit à un nombre d'observations limité pour pouvoir envisager une analyse statistique. Nous nous sommes limités donc à l'application d'outils simples comme le coefficient de variation (*CV*), les pourcentages et les ratios. L'analyse par la méthode des plans d'expériences a permis de modéliser les dépôts au sol sous la culture et la rétention sur les plantes. Cependant, vu l'insuffisance du nombre d'observations ayant servi pour l'élaboration des modèles d'un point de vue statistique, ils n'ont pas été pris en compte. Toutefois, cette analyse de données a permis de déterminer l'importance relative des facteurs étudiés dans des conditions données. Ces facteurs sont par ordre d'influence : le VMD, la vitesse du vent (réelle ou relative) et la hauteur. Si à dire d'experts l'effet de la vitesse du vent, de la température ambiante et de l'humidité relative est indiscutable, l'analyse de nos résultats n'a pas permis de mesurer l'effet exact de chacun de ces facteurs de manière séparée. Des travaux complémentaires seront nécessaires pour développer ces aspects en tenant compte des interactions entre les différentes variables influentes.

Il faut souligner, l'importance de l'approche expérimentale dans notre démarche. L'expérimentation a joué au niveau de l'élaboration de la méthode de travail, puis dans le calage du modèle et enfin dans la validation des résultats de ce modèle et de ceux de la rampe mobile. Finalement, elle a permis d'obtenir un moyen permettant de discuter de manière objective et avec une vision plus globale de l'efficacité des traitements et des sources de pollutions liées à l'utilisation des pesticides. Son application permettra de réaliser un bilan du devenir des pesticides pulvérisés dans les trois compartiments air, sol et plante ; c'est en cela que réside la principale originalité de ce travail.

Enfin pour conclure, on doit noter que même dans sa version actuelle, le modèle DriftL pourra être utile à pas mal de projets. Sans être exhaustif, on peut citer les trois exemples suivants :

- le projet de l'INRGREF "optimisation des traitements terrestres" qui a pour objectif principal de quantifier les pertes de pesticides : DriftL permet d'estimer ces pertes et donne des moyens pour conseiller l'agriculteur.
- le projet du Ministère de l'Environnement en Tunisie "estimation des stocks et des pertes de pesticides" : là aussi, DriftL permet de quantifier les pertes.
- le projet d'évaluation des pertes de pesticides liées aux traitements terrestres dans les bananeraies aux Antilles : à ce jour, il n'y a aucun modèle de quantification des pertes en France. On peut donc utiliser DriftL pour cette évaluation.

Chapitre 11

Perspectives

Les résultats décrits dans ce rapport montrent qu'il y a certains aspects importants qui restent à approfondir pour la suite de ce travail qui ne fait que commencer en Tunisie. Ces aspects ont été détaillés dans les conclusions partielles des différentes parties de ce document, ils ne seront alors repris ici que dans la mesure où ils alimentent la suite du projet pour le court et le moyen terme.

1. Au niveau de la méthode :

Pour l'étude des pertes par dérive, élargir la plage des conditions de travail en soufflerie et au champ permettra certainement d'augmenter le nombre d'observations collectées et d'envisager une analyse statistique. Nous pourrions par exemple considérer d'autres types et calibres de buse, d'autres hauteurs et d'autres vitesses d'avancement ainsi que d'autres conditions micro-climatiques. Pour l'étude des dépôts au sol et sur les plantes, nous pourrions par exemple envisager d'utiliser des méthodes de régression ou des plans d'expérience avec un nombre plus important d'observations. Pour cette étude, il serait souhaitable de pouvoir travailler dans des conditions totalement contrôlées. Dans ce cadre, un projet vient d'être amorcé pour la construction d'une soufflerie dans laquelle sera placée la rampe mobile, avec un générateur de vent et un système de climatisation. Ainsi, les dépôts et les transferts vers les différents compartiments pourront être étudiés avec le même dispositif et sous les mêmes conditions. Au delà de ces deux aspects, il sera nécessaire de mettre en place des mesures avec des produits phytosanitaires réels, dans les conditions de terrain en présence de la culture et des plantes adventices. Pour cela, toute une plateforme de mesure et d'analyse des dépôts des pesticides est déjà mise en place au laboratoire de mécanisation à l'INRGREF en Tunisie.

2. Au niveau du modèle :

Dans le même esprit d'élargissement des conditions de travail, il apparaît en tout premier lieu nécessaire d'optimiser les paramètres de calage de DriftL dans sa version actuelle pour une plage plus large. La considération des deux composantes de la vitesse d'éjection du jet pourra améliorer ses performances. D'autres aspects qui ont été cités dans le texte pourront être améliorés : augmentation du nombre de classes granulométriques, prise en compte d'un profil logarithmique du vent, élargissement du domaine de calcul.

Pour élargir le champ d'action du modèle développé, il est possible d'envisager pour le moyen terme, l'intégration d'un module supplémentaire qui permet d'estimer la rétention sur les plantes. Ainsi, on aura un outil d'aide à la décision capable d'élaborer, pour des conditions données, un bilan complet d'un traitement phytosanitaire en évaluant à la fois la dérive, le taux de rétention et les dépôts au sol sous la culture. Ces derniers peuvent être, sous entendu, déduits à partir de la différence entre la dose appliquée et la somme de la dérive et de la rétention.

Avec la plateforme de mesure et d'analyse récemment acquise et le projet de soufflerie en cours, cet outil permettra de mieux gérer le risque environnemental. Il sera capable non seulement de

conseiller les agriculteurs quant aux conditions d'application des pesticides, mais aussi de tester les technologies innovantes pour limiter les pertes vers l'environnement en vue de les adapter au contexte tunisien. Un projet si ambitieux nécessitera certainement les compétences d'équipes multidisciplinaires en matière de gestion des risques liés aux traitements phytosanitaires. La collaboration mise en place avec l'UMR ITAP à Montpellier à l'occasion de la co-tutelle de cette thèse fournit un appui qui sera précieux dans ce cadre : les avancées et l'expérience des équipes de cette unité de recherche dans le domaine de notre étude sont des points forts qui profiteront à l'aboutissement de ce projet.

Sixième partie

Annexes

Annexe A

Articles et conférences réalisés

Articles acceptés :

Bahrouni H., Hamza, E., Sinfort C., Palagoss B. Évaluation des pertes de pesticides au sol et de la rétention sur les plantes pendant les applications sur cultures basses : Développement d'une méthode expérimentale adaptée aux conditions tunisiennes. Revue de l'INAT 25 (1) accepté le 03 Novembre 2009.

Article Publié :

Bahrouni H., Sinfort C., Hamza E. Evaluation of pesticide losses during cereal crop spraying in Tunisian conditions. Journal of Agricultural Machinery Science 4 (2), 215-220.

A.1 Articles

Acceptés :

Publiés :

Conférences :

Soumises :

Bahrouni H., Sinfort C., Hamza E. An approach for pesticide loss estimation adapted to field crops in Mediterranean conditions. XVIIème congrès international de la CIGR - Québec, Canada - Juin 13-17, 2010,

Présentées :

- Bahrouni H., Hamza E., Sinfort C., Bonicelli B., Cotteux E. Développement et validation d'un modèle de dérive à complexité réduite adapté aux cultures basses en Tunisie. Journées Scientifiques de l'IRESA, Hammamet, du 2-3 décembre 2009
- Bahrouni H., Sinfort C., Hamza E., Cotteux E., Bonicelli B., Ruelle B. Un modèle de dérive à faible complexité pour les pulvérisations en cultures basses adapté aux conditions méditerranéennes : I. Congrès GFP, Toulouse (France), 13-15 mai 2009.
- Bahrouni H., Sinfort C., Hamza E. A simplified drift model fitted for crop spraying in Tunisian conditions : II. STIC & Environnement, Calais, du 16-18 juin 2009.
- Bahrouni H., Hamza E., Sinfort C. Pertes des pesticides pendant les traitements phytosanitaires en grandes cultures dans les conditions tunisiennes. Congrès STIC & Environnement,

EVALUATION DES PERTES DE PESTICIDES AU SOL ET DE LA RETENTION SUR LES
PLANTES PENDANT LES APPLICATIONS SUR CULTURES BASSES : UNE METHODE
ADAPTEE AUX CONDITIONS TUNISIENNES

H. BAHROUNI⁽¹⁾, E. HAMZA⁽¹⁾, C. SINFORT¹, B. PALAGOSS¹

RÉSUMÉ

Lors des traitements de cultures par pulvérisation, des quantités importantes de pesticides sont perdues dans l'environnement ce qui est préjudiciable pour les écosystèmes, la santé et l'économie. Les transferts vers l'environnement sont dus à la contamination de l'air et des sols. Les cultures Tunisiennes sont traitées dans des conditions extrêmes (températures élevées, faible humidité) avec des machines de faible niveau technologique. Les quantités de pesticides perdues ne sont pas connues et une approche expérimentale a été développée pour évaluer celles qui sont directement perdues au sol sous la rampe et le taux de rétention des plantes. La méthode élaborée permet de mesurer les dépôts directs au sol et la rétention par les plantes en conditions réelles et au laboratoire. Avec ces deux résultats, il est possible de déduire par calcul la part des émissions vers l'atmosphère. Ainsi, l'application de cette méthode permettra aux opérateurs d'élaborer un bilan complet d'un traitement phytosanitaire et d'en déduire non seulement les quantités perdues mais aussi l'efficacité de l'opération.

Peux d'outils ont été développés pour estimer la part des pesticides perdue sous forme de dépôts au sol, certains d'entre eux prenant en compte la rétention par les plantes. Quelques uns de ces outils sont distribués et aucun d'eux ne fournit l'information désirée dans les conditions externes locales. La comparaison des données obtenues sur le terrain et au laboratoire à des résultats calculés à l'aide d'un modèle existant montre des ordres de grandeurs corrects et des tendances logiques.

Mots clés : pulvérisateur, pesticide, pollution, sol, rétention, plantes, mesures de terrain.

Revue de l'INAT, Vol. 25 n° 1. Accepté le 03 Novembre 2009.

¹ Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts, El-Menzah IV BP 10, 2080 Ariana, Tunisie,

¹ Institut National Agronomique de Tunisie, 43 Avenue Charles Nicolle, Tunis 1082, Tunisie

¹ SupAgro - UMR ITAP 2 pl. Viala F-34060 Montpellier

¹ Cemagref - UMR ITAP, 361 R. J.F. Breton, BP 5095-34033 Montpellier

FIGURE A.1 – Article de la revue : INAT - Tunisie, 2009

Lyon (France), 13-15 novembre 2007.

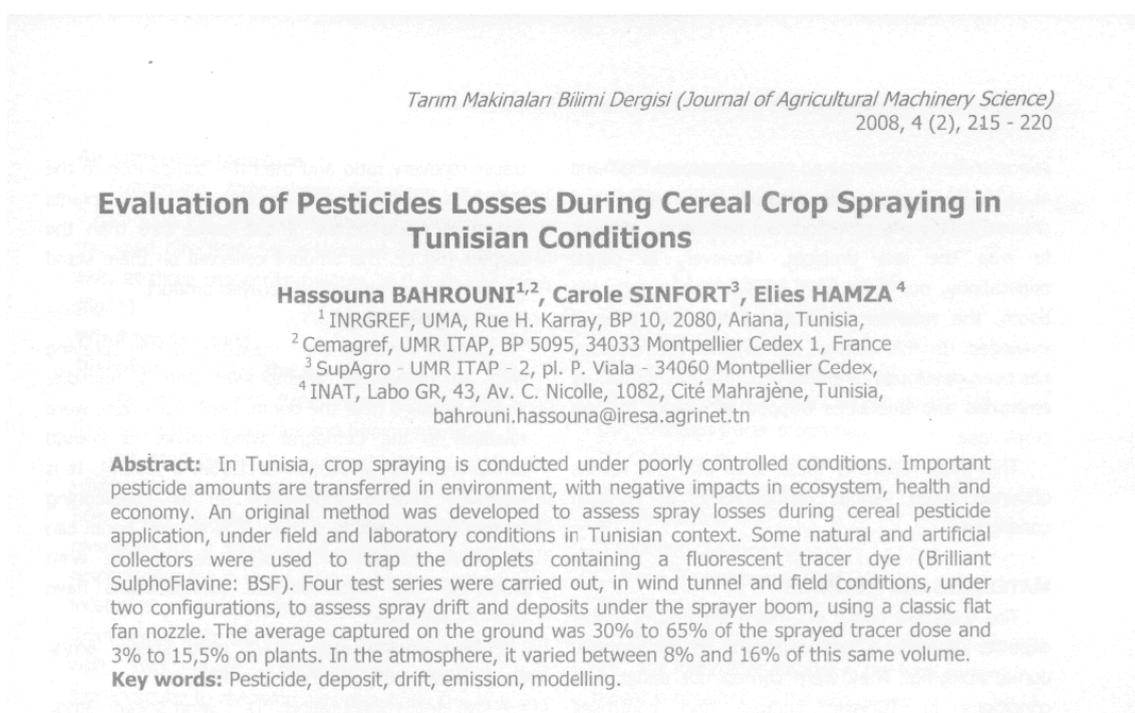


FIGURE A.2 – Article de la revue : Journal of Agricultural Machinery Science - Turquie, 2008

DEVELOPPEMENT ET VALIDATION D'UN MODELE DE DERIVE A COMPLEXITE REDUITE ADAPTE AUX CULTURES BASSES EN TUNISIE

H. Bahrouni¹, C. Sinfort², E. Hamza³, B. Bonicelli⁴, E. Cotteux⁴

¹ INRGREF - Laboratoire de Machinisme agricole, BP10, 2080 Ariana - Tunisia. Email : bahrouni.hassouna@iresa.agrinet.tn

² Montpellier SupAgro - UMR ITAP, 2 pl. Viala, 34060 Montpellier

³ INAT - 43, Avenue Charles Nicolle, cité Mahrajène - Tunisia

⁴ Cemagref Montpellier - UMR ITAP, 361 Rue J.F. Breton, BP 5095 -34033 Montpellier

RÉSUMÉ.

Les traitements chimiques des cultures par pulvérisation sont toujours accompagnés du transfert d'importantes quantités de pesticides vers l'environnement. Ces émissions présentent un risque permanent pour les écosystèmes et la santé et des pertes économiques. Les transferts vers l'environnement sont dus à la contamination de l'air et des sols. Les cultures Tunisiennes sont traitées dans des conditions de température et d'humidité parfois extrêmes, avec des machines de faible niveau technologique. Les quantités de pesticides perdues ne sont pas connues et l'utilisation d'un modèle a été choisie pour évaluer celles qui sont perdues par transport ou par évaporation. De nombreux modèles ont déjà été développés pour estimer la part des pesticides perdue sous forme de dérive, certains d'entre eux prenant en compte l'évaporation. Peu de ces modèles sont distribués et aucun d'eux n'est capable de fournir l'information désirée dans nos conditions externes. Un modèle de dérive, (DriftL) à complexité réduite a donc été développé et validé dans les conditions tunisiennes. L'objet de ce modèle est de produire rapidement des résultats, avec une essence pédagogique. Le modèle calcule la distribution au sol quand le jet est placé face au vent. Il utilise un simple développement par advection-diffusion pour chaque classe de taille en introduisant l'évaporation par modification du diamètre des gouttes à chaque pas de temps. Ses paramètres ont été calés à partir d'observations à l'intérieur d'une soufflerie. Les résultats du modèle représentent correctement les observations à l'intérieur de la soufflerie, où il n'y a pas d'évaporation. Dans les conditions extérieures le comportement du modèle est correct. La comparaison avec les mesures permet de discuter la validité des hypothèses de départ.

MOTS-CLÉS : modélisation, pesticides, pulvérisateur, pollution, sol, air, mesures de terrain.

Congrès : Journées Scientifiques de l'IRESA-Tunisie, Hammamet du 03 au 05 décembre 2009.

Simplified drift model fitted for crop spraying in tunisian conditions

Hassouna Bahrouni* — Carole Sinfort** — Elies Hamza***

* INRGREF
Laboratoire de Machinisme agricole
BP10 - 2080 Ariana
Tunisia
bahrouni.hassouna@iresa.agrinet.tn

** Montpellier SupAgro - UMR ITAP
2 pl. Viala
F-34060 Montpellier
sinfort@supagro.inra.fr

*** ISEP-BG
La Soukra - Rue du 13 Août
Chotrana II (Ariana)
Tunisia
h_elies@yahoo.fr

ABSTRACT. During chemical crop spraying, important pesticide amounts are transferred to the environment, with negative impacts for the ecosystem, for health and for economy. Tunisian crops are sprayed in extreme conditions (high temperature et low humidity) and with low technology machines. The amounts of lost pesticide are unknown and the use of a model was selected to evaluate the amount of lost products either from transport or evaporation (others methods were developped to quantify amounts directly lost on ground).

Numerous models were already developed to estimate the drifted part of the sprayed pesticides, some of them taking evaporation into account. Few of these models are distributed and none of them can be used to provide the needed information in the local external conditions and fit our experimental data. A specific drift model was then developed. The aim of this model is to produce quick results in a simplified way with a correct estimation of our data set so that it could be used as a demonstration tool.

The model computes the pattern of the ground distribution when the spray is placed in front of wind. It uses a simple advection-diffusion development for each granulometric class. It was adjusted from wind tunnel observations for flat fan nozzles. Evaporation was introduced within the transport model and modify the droplet diameter at each time-step. Finally the model computes ground patterns and lost amounts.

The results of the model correctly fits the observations in the wind tunnel, where there were no evaporation. In external conditions, the behavior of the model is shown to be correct. Comparison with measurements allows to discuss the validity of the main hypothesis.

KEYWORDS: modelling, advection-diffusion, pesticide, sprayer, spraying, pollution, ground, air, field measurements

FIGURE A.4 – Conférence du congrès STIC et environnement - France, 2009

Un modèle de dérive simplifié adapté aux cultures basses en Tunisie

H. Bahrouni* - C. Sinfort** - E. Hamza*** - E. Cotteux**** -
B. Bonicelli***** - B. Ruelle*****

* INRGREF - Laboratoire de Machinisme
BP10 - 2030 Ariana - Tunisia
bahrouni.hassouna@iresa.agrinet.tn

** Montpellier SupAgro - UMR ITAP
2 pl. Viala F-34060 Montpellier
sinfort@supagro.inra.fr

*** ISEP-BG
La Soukra - Rue du 13 Août
Chotttrana II (Ariana) Tunisia
h_elies@yahoo.fr

**** Cemagref - UMR ITAP
361 Rue J- F Breton BP5095
34033 Montpellier cedex 01

RÉSUMÉ. Lors des traitements de cultures par pulvérisation, des quantités importantes de pesticides sont perdues dans l'environnement ce qui est préjudiciable pour les éco-systèmes, la santé et l'économie. Les transferts vers l'environnement sont dus à la contamination de l'air et des sols. Les cultures Tunisiennes sont pulvérisées dans des conditions extrêmes (températures élevées, faible humidité) avec des machines de faible niveau technologique. Les quantités de pesticides perdues ne sont pas connues et l'utilisation d'un modèle a été choisie pour évaluer celles qui sont perdues par transport ou par évaporation (une autre approche a été développée pour évaluer les quantités directement perdues au sol).

De nombreux modèles ont déjà été développés pour estimer la part des pesticides perdue sous forme de dérive, certains d'entre eux prenant en compte l'évaporation. Peu de ces modèles sont distribués et aucun d'eux ne fournit l'information désirée dans les conditions externes locales, en correspondant à nos données expérimentales. Un modèle spécifique de dérive a donc été développé. L'objet de ce modèle est de produire rapidement des résultats avec une méthode simplifiée en fournissant une estimation correcte de données et pour une utilisation comme outil de démonstration.

Le modèle calcule la distribution au sol quand le jet pulvérisé est placé face au vent. Il utilise un simple développement par advection-diffusion pour chaque classe granulométrique. Ses paramètres ont été calés à partir de l'observation de distributions de buses à jet plat à l'intérieur d'une soufflerie. L'évaporation est introduite dans le modèle de transport et modifie le diamètre des gouttes à chaque pas de temps. Finalement, le modèle calcule la distribution au sol et les quantités perdues.

Les résultats du modèle représentent correctement les observations à l'intérieur de la soufflerie, où il n'y a pas d'évaporation. Dans les conditions extérieures le comportement du modèle est correct. La comparaison avec les mesures permet de discuter la validité des hypothèses de départ.

MOTS-CLÉS : modélisation, advection-diffusion, produit phytosanitaire, pulvérisateur, pulvérisation, pollution, sol, air, mesures de terrain

FIGURE A.5 – Conférence du congrès GFP - France, 2009

Pertes de pesticides pendant les traitements phytosanitaires en grandes cultures dans les conditions tunisiennes

H. Bahrouni^{1,2}, E. Hamza³, C. Sinfort⁴

¹ INRGREF-UMA, Rue H. Karray BP10, 2080 ARIANA, TUNISIE (bahrouni.hassouna@iresa.agrinet.tn)

² Cemagref UMR ITAP, BP 5095, 34033 MONTPELLIER Cedex 1 (hassouna.bahrouni@montpellier.cemagref.fr)

³ INAT, Labo GR, 43, Av. C. Nicolle, 1082, Cité Mahrajène, TUNISIE (h_ellies@yahoo.fr)

⁴ SUPAGRO - UMR ITAP - 2, pl. P. Viala - 34060 MONTPELLIER Cedex (sinfort@supagro.inra.fr)

Résumé

Les traitements phytosanitaires en Tunisie, essentiellement des désherbages, sont conduits dans des conditions mal maîtrisées. L'objectif de cette étude s'insère dans un projet de développement d'une plate-forme de modélisation des pertes de pesticides pendant les applications. Cette plate-forme permettra d'optimiser les conditions d'applications matérielles en fonction des conditions d'utilisation.

Des essais ont été réalisés dans la soufflerie du Cemagref pour fournir les premières données caractérisant les pertes de pesticides liées au traitement phytosanitaire des grandes cultures dans le contexte tunisien. Les premiers résultats montrent que les pertes par dérive, (déport et évaporation) relatives à la configuration « de dérive » qui correspond aux conditions tunisiennes sont relativement élevées : Elles sont environ dix fois plus élevées que celles générées par la configuration « de non dérive ».

Mots-Clés

Dérive, Dépôt, Evaporation, Pesticides, Plate-forme de modélisation.

FIGURE A.6 – Conférence du congrès STIC et environnement - France, 2007

Annexe B

Tables de dérivation

B.1 Tables de dérivation de la BBA

Distance de la cible (m)	Dépôt [en % de la dose appliquée]							
	Vignoble		Vergers		Houblon	Cultures basses		Sol
95 ^{ème} percentile de la dérivation								
5	1,6	5	20	20	12,5	0,6	5	0,6
10	0,4	1,5	11	4,5	9	0,4	1,5	0,4
15	0,2	0,8	6	6	5	0,2	0,8	0,2
20	0,1	0,4	4	1,5	4	0,1	0,4	0,1
30	0,1	0,4	2	0,6	2	0,1	0,2	0,1
40	0,1	0,2	0,4	0,4		-	0,2	-
50	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	-	0,2	-
50 ^{ème} percentile de la dérivation								
5	1,7	2,7	12,1	5,4	7,9	0,5	2,7	0,5
10	0,4	0,9	5,8	2,2	3,5	0,2	0,9	0,2
15	0,2	0,4	2,9	1,2	2,7	0	0,4	0
20	0,1	0,2	1,9	0,7	1,2	0	0,2	0
30	0	0,1	0,9	0,3	0,5	0	0,1	0
40	0	0	0,1	0,1	0,2	-	0	-
50	0	0	0,1	0,1	0,1	-	0	-

TABLE B.1 – Table de dérivation de la BBA, (d'après Ganzelmeier *et al.*, 1995).

B.2 Tables de dérive du modèle USES

Mode d'application	Fraction de la dérive
Traitement localisé	0,005
Traitement en ligne	0,005
Traitement de sol nu	0,01
Traitement de cultures basses $H < 25$ cm	0,01
Traitement de culture basses $H > 25$ cm	0,02
Traitement d'arboriculture	0,1
Traitement par avion	1
Traitement sous serres	0
Traitement de fossés	0,1

TABLE B.2 – Table de dérive du modèle Hollandais, "USES" (RIVM, 1998)

Annexe C

Vitesses typiques de sédimentation de gouttelettes d'eau

Diamètre de la gouttelette (μm)	Vitesse de sédimentation (m.s^{-1})
100	0,29
300	1,35
500	2,30
700	3,16
1000	4,23

TABLE C.1 – Des vitesses typiques de sédimentation des gouttelettes d'eau en fonction du diamètre (d'après Mercer *et al.*, 2007)

Annexe D

Propriétés physiques des principaux solvants et pesticides

Substance	M_v [g/mol]	ρ [25 °C] [kg/m ³]	P_{vs} [20 °C] [Pa]	Point d'ébullition (1 atm) [°C]
Eau	18,0	998	2340	100
Ethanol	46,1	789	5380	78,5
Methylbromide	94,9	1732 ^a	190000	3,6
1,3-dichloropropene	111,0	1214	3700	104-112
Methyl-isocyanate ^b	107,2	1069 ^c	2700	118
Dichlorvos	221,0	1425 ^d	2,1 ^e	234
Parathion	291,3	1270	0,00089	150
Fipronil	437,2	1480-1630	$3,7 \times 10^{-7}$	-

^aliquide, 0°C - ^bsurtout utilisé sous forme de sel - ^c à 37°C - ^d à 20°C - ^e à 25°C

P_{vs} : pression de vapeur saturante

TABLE D.1 – Propriétés physiques des principaux solvants et pesticides, (d'après Holterman *et al.*, 1997a).

Annexe E

Distance de dérive de DriftSim

Taille des gouttelettes (μm)	Vitesse du vent (m/s)	Distance de dérive mesurée : Dm		Distance de dérive calculée : Dc		Dc/Dm
		Plage	Moyenne	Plage	Moyenne	
		(m)	(m)	(m)	(m)	
148	0,48	0,22-0,44	0,33	0,30-0,35	0,33	1,00
148	1,07	0,54-0,76	0,65	0,63-0,84	0,74	1,14
148	1,99	1,13-1,50	1,32	1,20-1,50	1,35	1,02
148	2,36	1,46-1,88	1,67	1,30-1,86	1,58	0,95
253	0,49	0,08-0,14	0,11	0,09-0,10	0,10	0,91
253	1,02	0,10-0,20	0,15	0,15-0,17	0,16	1,07
253	2,03	0,23-0,42	0,33	0,31-0,35	0,33	1,00
253	4,00	0,68-0,96	0,82	0,77-0,88	0,83	1,01
253	6,21	1,10-1,92	1,51	1,35-1,63	1,49	0,99
424	1,01	0,02-0,04	0,03	0,03-0,04	0,04	1,33
424	2,07	0,03-0,10	0,07	0,07-0,08	0,08	1,14
424	3,05	0,10-0,17	0,14	0,13-0,15	0,14	1,00
424	3,93	0,15-0,22	0,19	0,18-0,19	0,19	1,00

TABLE E.1 – Distance de dérive à partir des données expérimentales et des calculs de *DriftSim* (Reichard *et al.*, 1992a).

Annexe F

Mesure du profil de vent de la soufflerie du Cemagref

Point de mesure par rapport à la paroi gauche de la soufflerie (m)											
Hauteur(m)	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5
	m										
Vitesse du vent = 1,13m/s											
1,90	0,93	0,98	0,99	0,98	1,00	0,98	1,02	1,03	0,93	1,05	0,96
1,70	1,03	1,06	1,05	1,05	1,08	1,04	1,10	1,10	1,06	1,10	1,05
1,50	1,10	1,12	1,12	1,11	1,14	1,11	1,15	1,14	1,10	1,14	1,11
1,30	1,08	1,15	1,09	1,17	1,16	1,14	1,18	1,18	1,14	1,18	1,15
1,10	1,06	1,14	1,10	1,19	1,17	1,14	1,18	1,21	1,13	1,17	1,14
0,90	1,06	1,11	1,06	1,13	1,14	1,12	1,17	1,16	1,13	1,16	1,09
0,70	1,07	1,15	1,06	1,10	1,20	1,13	1,22	1,20	1,12	1,16	1,14
0,50	1,14	1,13	1,11	1,15	1,24	1,16	1,24	1,23	1,13	1,21	1,12
0,30	1,13	1,15	1,08	1,16	1,21	1,13	1,21	1,18	1,14	1,17	1,11
0,10	1,18	1,19	1,11	1,19	1,22	1,14	1,24	1,21	1,15	1,17	1,17
Vitesse du vent = 3,04m/s											
1,90	2,47	2,88	2,66	2,66	2,75	2,73	2,80	2,87	2,87	2,79	2,88
1,70	2,66	2,99	2,87	2,92	3,02	2,91	3,07	3,12	2,90	3,08	2,94
1,50	2,89	3,14	3,07	3,11	3,17	3,10	3,26	3,30	3,10	3,21	3,12
1,30	2,90	3,04	2,98	3,01	3,18	2,99	3,27	3,24	2,97	3,21	3,02
1,10	2,91	3,05	2,96	3,10	3,17	3,05	3,25	3,26	3,05	3,19	3,05
0,90	2,92	3,08	2,85	3,02	3,20	3,00	3,26	3,23	2,97	3,06	3,02
0,70	2,98	3,17	2,89	2,99	3,25	3,08	3,32	3,34	3,09	3,17	3,13
0,50	3,03	3,12	2,96	3,04	3,18	3,02	3,26	3,30	3,08	3,24	3,10
0,30	3,03	3,15	2,91	2,99	3,17	2,98	3,27	3,26	3,08	3,12	3,12
0,10	3,14	3,20	3,02	3,09	3,29	3,05	3,34	3,35	3,10	3,16	3,14
Vitesse du vent = 6,04m/s											
1,90	4,98	5,11	5,40	5,41	5,56	5,62	5,68	5,96	5,90	5,83	5,29
1,70	5,43	5,65	5,92	6,03	6,17	6,00	6,35	6,48	6,08	6,39	6,08
1,50	5,93	6,52	6,37	6,42	6,58	6,41	6,79	6,87	6,39	6,69	6,45
1,30	5,98	6,10	6,13	6,27	6,63	6,32	6,77	6,76	6,77	6,64	6,44
1,10	5,89	6,31	5,85	6,38	6,53	6,39	6,65	6,77	6,34	6,67	6,32
0,90	6,06	6,37	5,99	6,24	6,69	6,27	6,83	6,68	6,19	6,47	6,28
0,70	6,18	6,56	6,03	6,13	6,59	6,39	6,72	6,87	6,46	6,64	6,51
0,50	6,25	6,45	5,95	6,17	6,54	6,27	6,72	6,78	6,40	6,72	6,44
0,30	6,26	6,50	5,96	6,12	6,55	6,26	6,73	6,74	6,62	6,45	6,31
0,10	6,57	6,65	6,25	6,32	6,82	6,36	6,95	6,89	6,43	6,58	6,56

TABLE F.1 – Caractérisation du profil du vent en soufflerie à un plan vertical $P1$, situé à une distance de 5 m de l'entrée du vent, (à 0,2m en amont de la rampe). Les mesures sont effectuées sur toute la largeur de la veine, pour 3 vitesses de vent (1,1, 3 et $6ms^{-1}$), une hauteur de 0,1 à 1,98 m et avec un maillage de $0,2m \times 0,2m$.

Point de mesure par rapport à la paroi gauche de la soufflerie (m)											
Hauteur(m)	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5
	m										
Vitesse du vent = 1,13m/s											
1,90	0,90	0,84	0,82	0,88	0,85	0,89	0,76	0,81	0,84	0,90	0,96
1,70	1,05	1,01	1,03	1,03	1,05	1,04	1,05	1,04	1,04	1,05	1,10
1,50	1,09	1,13	1,11	1,10	1,16	1,13	1,17	1,15	1,16	1,16	1,17
1,30	1,13	1,15	1,15	1,13	1,19	1,15	1,20	1,18	1,20	1,19	1,19
1,10	1,09	1,17	1,12	1,11	1,12	1,11	1,18	1,16	1,23	1,15	1,19
0,90	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,15	1,18	1,19	1,17	1,18	1,15
0,70	1,14	1,15	1,14	1,17	1,16	1,17	1,23	1,20	1,19	1,19	1,16
0,50	1,16	1,16	1,14	1,17	1,19	1,17	1,24	1,25	1,21	1,24	1,19
0,30	1,18	1,17	1,16	1,19	1,21	1,19	1,26	1,25	1,21	1,23	1,19
0,10	1,16	1,14	1,14	1,17	1,20	1,17	1,20	1,24	1,22	1,22	1,19
Vitesse du vent = 3,04m/s											
1,90	2,30	2,40	2,50	2,51	2,70	2,61	2,75	2,73	2,66	2,58	2,33
1,70	2,69	2,74	2,85	2,92	3,04	2,96	3,12	3,11	3,06	3,03	2,86
1,50	2,88	2,94	3,05	3,14	3,22	3,17	3,30	3,30	3,29	3,24	3,09
1,30	2,97	3,03	3,08	3,13	3,24	3,15	3,31	3,30	3,32	3,28	3,17
1,10	2,95	3,02	3,04	3,12	3,18	3,15	3,30	3,30	3,24	3,19	3,10
0,90	3,02	3,10	3,02	3,12	3,20	3,15	3,33	3,30	3,32	3,19	3,14
0,70	3,09	3,10	3,06	3,09	3,25	3,17	3,41	3,32	3,32	3,16	3,14
0,50	3,11	3,14	3,08	3,10	3,23	3,19	3,36	3,38	3,33	3,30	3,22
0,30	3,17	3,19	3,08	3,09	3,23	3,20	3,36	3,38	3,29	3,25	3,23
0,10	3,14	3,16	3,12	3,05	3,26	3,19	3,33	3,41	3,32	3,26	3,19
Vitesse du vent = 6,04m/s											
1,90	4,81	4,97	5,24	5,23	5,50	5,43	5,64	5,71	5,61	5,51	4,89
1,70	5,45	5,65	5,90	6,03	6,19	6,13	6,39	6,46	6,39	6,31	5,90
1,50	5,92	6,09	6,34	6,46	6,63	6,57	6,82	6,88	6,87	6,76	6,41
1,30	6,05	6,22	6,23	6,47	6,70	6,56	6,81	6,87	6,90	6,85	6,61
1,10	5,93	6,16	5,94	6,49	6,54	6,54	6,70	6,80	6,77	6,66	6,45
0,90	6,16	6,21	6,16	6,44	6,69	6,51	6,89	6,81	6,71	6,62	6,48
0,70	6,29	6,38	6,20	6,45	6,58	6,64	6,81	6,94	6,83	6,76	6,61
0,50	6,34	6,47	6,07	6,42	6,58	6,58	6,83	6,88	6,81	6,80	6,73
0,30	6,40	6,59	6,13	6,44	6,61	6,62	6,83	6,96	6,76	6,74	6,74
0,10	6,57	6,63	6,35	6,44	6,79	6,62	6,93	6,96	6,80	6,74	6,63

TABLE F.2 – Caractérisation du profil du vent en soufflerie à un plan vertical $P2$, situé à une distance de 8,5 m de l'entrée du vent, (à 3,3m en aval de la rampe). Les mesures sont effectuées sur toute la largeur de la veine, pour 3 vitesses de vent (1,1, 3 et $6ms^{-1}$), une hauteur de 0,1 à 1,98 m et avec un maillage de $0,2m \times 0,2m$.

Annexe G

Échelle du BBCH des stades phénologiques des cultures

G.1 Structure de l'échelle

Les différentes phases du développement d'une plante sont divisées en dix stades principaux numérotés de 0 à 9, (cf.fig. G.1-a). Ces différentes phases de développement, décrites dans le tableau 1 sont de longue durée et clairement reconnaissables.

Stade	Description
0	Germination / levée / développement des bourgeons.
1	Développement des feuilles (tige principale)
2	Formation des pousses secondaires / tallage.
3	Élongation de la tige / formation de la rosette / développement des pousses (tige principale).
4	Développement des parties végétatives de récolte ou des organes de multiplication végétative / développement des organes de reproduction sexuée, gonflement de l'épi ou de la panicule (tige principale).
5	Apparition de l'inflorescence (tige principale) / épiaison.
6	Floraison (tige principale).
7	Développement des fruits.
8	Maturation des fruits ou graines.
9	Sénescence et mort ou début de la période de dormance.

TABLE G.1 – Les principaux stades de développement des cultures selon l'échelle du BBCH

Pour définir précisément les stades d'application ou d'évaluation, il n'est pas conseillé d'utiliser seulement les stades principaux, car ceux-ci recouvrent une durée importante dans le développement de la plante. On utilise les stades de développement secondaires pour déterminer un moment exact du développement. Par rapport aux stades principaux, les stades secondaires définissent des étapes limitées dans le temps. Ils sont donnés par des valeurs de 0 à 9, qui se suivent à l'intérieur d'un stade principal. On obtient ainsi un code à deux chiffres composé par le stade principal et le stade secondaire. On utilise les chiffres 0 et 1 pour la description de la tige principale, les chiffres de 2 à 9 correspondent aux pousses secondaires (d'ordre 2 à n), (cf.fig. G.1-b).

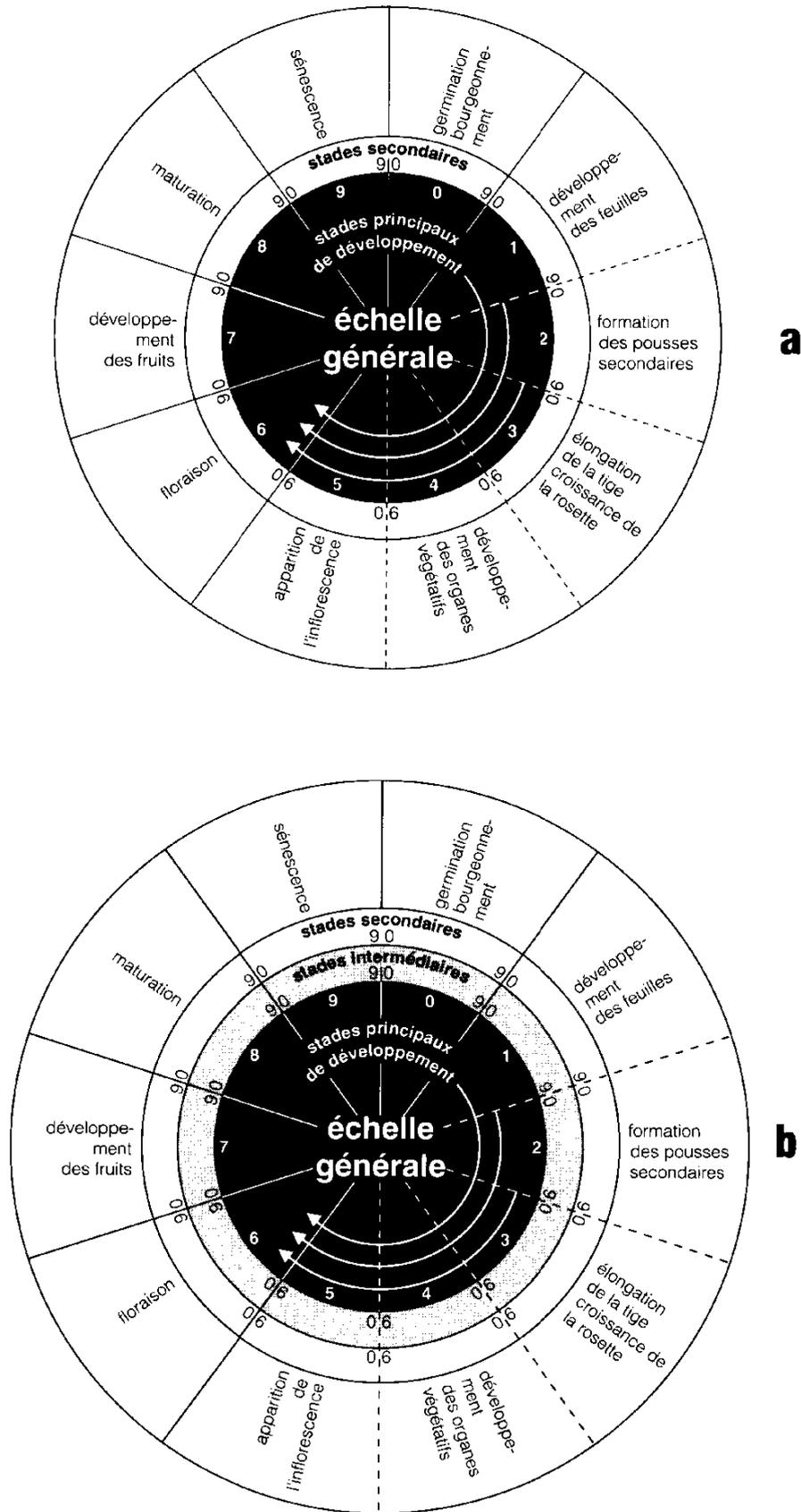


FIGURE G.1 – Description des stades phénologiques des mono et dicotylédones. a. Les stades principaux ont un code à un chiffre et les stades secondaires un code à deux chiffres. b. Entre ces deux stades peut s'intercaler un stade intermédiaire avec un code à trois chiffres (Meier, 2001).

Annexe H

Taux d'efficacité de quelques pesticides sur les sites d'action en fonction de la technique d'application et de la cible

Pesticide	Méthode	Objectif	Rétention (en% de la dose D)
Dimethoat	Application foliaire	Pucerons sur haricots	0,03
Lindane	Application foliaire	Capsides sur cocoa	0,02
Ethirimol	Traitement des semences	Mildiou sur orge	2,2
Disulfoton	application sur cultures basses	Pucerons sur le blé	2,9
Lindan/dieldrin	Application par avion	Les criquets	6,0
Paraquat	Application foliaire	Graminées adventices	$\leq 30,0$

TABLE H.1 – Taux d'efficacité de quelques pesticides sur les sites d'action en fonction de la technique d'application et de la cible (d'après Graham-Bryce, 1977).

Annexe I

Estimation du couvert végétal de quelques types de céréales à différents stades de traitement

Culture	Traitement	Développement de la culture (nbre de feuilles)	Couvert végétal (%)
	Désherbage précoce	2-3 feuilles	10-30
	Désherbage tardif	3-4 feuilles	25-40
	Désherbage tardif	6 feuilles	80-100
	Tr. fongique précoce	3-4 feuilles	25-40
	Tr. fongique	6 feuilles	80-100
	Tr. insecticide		75-95
Blé d'hiver	Désherbage d'automne	2 feuilles	10-20
	Désherbage de printemps	4 feuilles	20-40
	Tr. fongique précoce	4 feuilles	20-40
	Tr. fongique	5-6 feuilles	50-70
	Tr. fongique x 2		80-100
	Insecticide		80-100
Orge et seigle d'hiver	Désherbage d'automne	2 feuilles	10-20
	Désherbage de printemps	4 feuilles	25-40
	Tr. fongique	4 feuilles	25-40
	Tr. fongique x 2	6 feuilles	80-100
	Tr. insecticide		80-100

TABLE I.1 – Estimation du couvert végétal de quelques types de céréales pour différents types et différents stades de traitement (d'après Olofsdotter et Streibig, 1997).

Bibliographie

- AFNOR, 2005. Equipment for crop protection-methods for field measurement of spray drift. International Standard Organization, Geneva, Switzerland, reference number ISO/FDIS 22866.
- Agreste, 2008a. Enquête sur la structure des exploitations en 2007, Agreste Chiffres et Données Agriculture n 201. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, France.
- Agreste, B., 2008b. Enquête sur la structure des exploitations en 2007 -n 98. Tech. rep., Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, France.
- Alem, C., Labhilili, M., Brahmi, K., Jlibene, M., Nasrallah, N., Filali-Maltouf, M., 2002. Adaptations hydrique et photosynthétique du blé dur et du blé tendre au stress salin copyright I 2002 académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales elsevier sas. all rights reserved. Elsevier B.V., Éditions scientifiques et médicales 325, 1097–1109.
- Asman, W., Jørgensen, A., Jensen, P., 2003. Dry deposition and spray drift of pesticides to nearby water bodies. Tech. rep., Danish Protection Environmental Agency.
- Bacci, E., Calamari, D., Gaggi, C., Fanelli, R., Focardi, S., Morosini, M., 1986. Chemosphere 15, 747–754.
- Bache, D. H., 1980. Transport and capture processes within plant canopies. Spraying Systems for the 1980's, BCPC Monograph 24, 127–32.
- Baetens, K., Ho, Q., Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Melese Endalew, A., Hertog, M., Nicolaï, B., Ramon, H., Verboven, P., 2009. A validated 2-d diffusion-advection model for prediction of drift from ground boom sprayers. Atmospheric Environment 43, 1674–1682.
- Baetens, K., Nuyttens, D., Verboven, P., De Schampheleire, M., Nicola, B., Ramon, H., 2007. Predicting drift from field spraying by means of a 3d computational fluid dynamics model. Tech. rep.
- Barry, J. W., 1984. Deposition of chemical and biological agents in conifers. American Chemical Soc. Symposium 238, 117–137.
- Barry, J.W. and Ekblad, R., 1978. Deposition of insecticide drops on coniferous foliage. Transactions of the ASAE, 438–441.
- Barthelemy, P., Bosgontier, D., Jouy, L., P., L., 1990. Choisir les outils de pulvérisation, 160 p. I.T.C.F.
- BBA., 2002. Programm zur abschätzung der abdrift und verflüchtigungsbedingten deposition von psm wirkstoffen im nichtzielbereich nach freilandanwendungen. Tech. rep., BBA Germany.
- Becker, F., Klein, A., Winkler, R., Jung, B., Bleiholder, H., Schmider, F., 1999. The degree of ground coverage by arable crops as a help in estimating the amount of spray solution intercepted by the plants. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd 51, 237–242.

- Bedos, C., Calvet, R., 2002. Modélisation des transferts de pesticides dans l'environnement,. Club CRIN, Ch. Transfert dans l'atmosphère, (III-5), pp. 25–35.
- Bidelman, T. F., 1999. Exchange of pesticides. *Water Air Soil Pollut* 115, 115–166.
- Bilanin, A. J., Teske, M. E., Barry, J. W., Ekblad, R. B., 1989. AGDISP : the aircraft spray dispersion model, code, development and experimental validation. *Transactions of the ASAE* 32 (1), 327–334.
- Bird, R., Stewart, W., Lightfoot, E., 1960. *Transport phenomena*. (Wiley International Edition). New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Bird, S. , Perry, S., Teske, M., 2002. Evaluation of the agdisp aerial spray algorithm in the agdrift model. *Environ Toxicol Chem* 21(3), 672–681.
- Bousquet, L., 2007. *Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles*. Ph.D. thesis, Université Paris 7 - Denis Diderot - UFR de physique.
- Bouteau, M., Cantin, S., Benhabib, F., Perrot, F., 2008. Sliding behavior of liquid droplets on tilted langmuir-blodgett surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science* 317, 247–254.
- Braze, R., Reichard, D., Bukovac, M., Fox, R., 1991. A partitioned energy transfer model for spray impaction on plants. *Journal of Agricultural Engineering Research* 50 (1), 11–24.
- Braze, R. D., Bukovac, M. J., Cooper, J. A., Reichard, D. L., 1999. Droplet shape oscillations : effects on spray impaction and retention and fourier analysis of their natural frequencies. *Transactions of the ASAE* 42(2), 319–325.
- Briffa, F. E. J., Dombrowski, N., 1966. Entrainment of air into a liquid spray. *American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Journal* 12 (4), 708–717.
- Brown, R., Sidhamed, M., 2001. Simulation of spray dispersal and deposition from a forest airblast sprayer - part II : Droplet trajectory model. *Transactions of the ASAE* 44 (1), 11–17.
- Brun, J.-M., 2007. *Modélisation de la dispersion des nuages de pesticides à l'échelle de la parcelle agricole*. Ph.D. thesis, Montpellier SupAgro.
- Buser, H., 1990. *Environ. Sci. Technol.* 24, 1049–1058.
- Cai, S., Stark, J., 1997. Evaluation of five fluorescent dyes and triethyl phosphate as atmospheric tracers of agricultural sprays. part b-pesticides contaminants and agricultural wastes. *Journal of Environmental Science and Health* 32, 969–983.
- Caldwell, D., 2006. *Quantification of spray drift from aerial applications of pesticide*. Ph.D. thesis, University of saskatchewan, department of plant sciences.
- Carlton, J., Bouse, L., 1981. Characterizing spray deposit on film by light transmission. *Transactions of the ASAE*, 277–280.
- Charles, R., 2004. *Modelling pesticides residues raphael charles*. Ph.D. thesis, Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, Institut des Sciences et Technologies de L'Environnement, Lausanne.
- Cohen, S., Creeger, S., Carsel, R., Enfield, C., 1984. Potential for pesticide contamination of groundwater resulting from agricultural uses. in r.f. kruger & j.n. seiber : *Treatment and disposal of pesticide wastes*. ACS Symp. American Chemical Society, Washington, DC, USA . 259, 297–325.

- Cope, O., 1965. C. chichester : Research in pesticides. academic press, new york, usa., Agricultural chemicals and freshwater ecological systems In C. CHICHESTER : Research in pesticides. Academic Press, New York, USA,, 115–128.
- Cotham, W., Bidleman, T., 1991. Ax. Chemosphere 22, 165–188.
- Cox, S., Salt, D., Lee, B., Ford, M. G., 2000. A model for the capture of aerielly sprayed pesticide by barley. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 87, 217–230.
- Craig, I. P., 2004. The GDS model – a rapid computational technique for the calculation of aircraft spray drift buffer distances. Computers and Electronics in Agriculture 43, 235–250.
- Cross, J. V., Walklate, P. J., Murray, R. A., Richardson, G. M., 2001a. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer : 2.effects of spray liquid flow rate. Crop Protection 20 (1), 13–30.
- Cross, J. V., Walklate, P. J., Murray, R. A., Richardson, G. M., 2001b. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer : 1.effects of spray quality. Crop Protection 20 (4), 333–343.
- Cross, J. V., Walklate, P. J., Murray, R. A., Richardson, G. M., 2003. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer : 3.effects of air volumetric flow rate. Crop Protection 22 (2), 381–394.
- Da Silva, A., 2003. Modélisation numérique des dépôts de produits phytosanitaires. Ph.D. thesis, Académie de Montpellier - Université de Montpellier II.
- Da Silva, A., Sinfort, C., Bonicelli, B., Voltz, M., Huberson, S., 2002. Spray penetration within vine canopies at different vegetative stages. Aspects of applied biology 66, 331–339.
- Da Silva, A., Sinfort, C., Tinet, C., Pierrat, D., Huberson, S., 2005. A lagrangian model for spray behaviour within vine canopies. Aerosol Science.
- De-Leeuw, F. A. A. M., Van Pul, W., Van der Berg, F., Gilbert, A. J., 2000. The use of atmospheric dispersion models in risk assesment decision support systems for pesticides. Environmental Monitoring and Assesment 62, 133–145.
- DGEDA, 2006. Enquête sur les Structures des Exploitations Agricoles 2005. MARH.
- DGPA, 2008. Rapport d'activités de la dgpa. Tech. rep., MARH, document interne.
- Dorr, G., Hanan, J., Hewitt, A., Adkins, S., Noller, B., 2007. Modeling the interaction of plant architecture and spray techniques. In : ASABE Annual International Meeting. Paper Number : 071031. p. Paper Number : 071031.
- Dorr, G., Hanan, J., Woods, N., Kleinmeulman, P., Adkins, S., Noller, B. . S., 2006. Spray deposition on plant canopies within a wind tunnel. Aspects of Applied Biology 77, 395–403.
- Duchemin, B., Boulet, G., Maisongrande, P., BenHadj, I., Hadria, R., Khabba, S., Chehbouni, A., Ezzahar, J., Olioso, A., 2005. Un modèle simplifié pour l'estimation du bilan hydrique et du rendement de cultures céréalières en milieu semi-aride. In : WATMED 2, Marrakech 14-17 November.
- Eck, B., 1961. Technische Strömungslehre.
- Elliott, J. G., Wilson, B. J. (Eds.), 1983. The influence of weather on the efficiency and safety of pesticide application - the drift of herbicides. Occasional Publication No.3, British Crop Protection Council, Croydon, UK, p. 135.

- Ennaceur, S., Drissa, M. R., N., G., 2004. Evaluation des résidus de pesticides organochlorés dans le lait maternel de deux régions de la tunisie. *Revue maghrébine de pédiatrie* 14(05), 255–262.
- FOCUS, 2000. Groundwater scenarios in the eu review of active substances. report of the focus groundwater scenarios workgroup, ec. document reference sanco/321/2000 rev.2, 202p. Tech. rep., FOCUS.
- Forster, W. A. Kimberley, M. O., Zabkiewicz, J. A., 1998. Spray droplet adhesion models : Evaluation of critical solution and leaf factors. In *Proc. 5th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals* . P. McMullan, ed. Sponsored by the ISAA 98, 55–60.
- Forster, W., Kimberley, M., Zabkiewicz, J., 2005. A universal spray droplet adhesion model. *Transactions of ASAE* 48, 1321–1330.
- Forster, W., Kimberley, M. O., Zabkiewicz, J. A., 2001. Application of a universal spray droplet adhesion model. In : *6th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals*. pp. 35–40.
- Forster, W., Steele, K., Gaskin, R., Zabkiewicz, J., 2004. Spray retention models for vegetable crops : preliminary investigation. *Zydenbos, S.M. New Zealand Plant Protection* 57, 125–128.
- Forster, W. A., Kimberley, M. O., Zabkiewicz, J. A., 2002. Pesticide spray droplet adhesion modeling. in *pesticide formulations and application systems : A new century for agricultural formulations*. ASTM STP 1414. J. C. 21, 163–174.
- Fox, R., Derksen, R., Zhu, H., Downer, R., Brazee, R., 2004. Airborne spray collection efficiency of nylon screen. *Applied Engineering in Agriculture* 20, 147–152.
- Furmidge, C., 1961. Studies at phase interfaces, i. the sliding of liquid drops on solid surfaces and a theory for spray retention. *Journal of Colloid Science* 17, 309–324.
- Furmidge, C., 1962. Physico-chemical studies on agricultural sprays, iv. the retention of spray liquids on leaf surfaces. *J. Sci. Food Agric.* 13, 127–140.
- Ganzelmeier, H., 1997. Abtrift und bodenbelastungen beim ausbringen von pflanzenschutzmitteln. Tech. rep., Mitt. BBA für Land und Forstwirtschaft. Berlin Dahlem, Heft.
- Ganzelmeier, H., Rautmann, D., Spangenberg, R., Streloke, M., Herrman, M., Wenzelburger, H., Walter, H., 1995. Report number 305, studies on spray drift of plant protection products, results of a test program carried out throughout the federal republic of germany. Tech. rep., Mitt. BBA für Land und Forstwirtschaft. Berlin Dahlem.
- Gaskin, R., Steele, K., W.A., F., 2005. Characterising plant surfaces for spray adhesion and retention. *New Zealand Plant Protection* 58, 179–183.
- Ghosh, S., Hunt, J. C. R., 1994. Induced air velocity in droplet-driven sprays. *Proceedings - Royal Society. Mathematical and physical sciences* ISSN 0962-8444 444 (1920), 105–127.
- Gil, Y., 2007. Caractérisation expérimentale des émissions de pesticides vers l'air pendant les pulvérisations viticoles. Ph.D. thesis, Montpellier SupAgro.
- Gil, Y., Sinfort, C., 2005. Emission of pesticides to the air during sprayer application : A bibliographic review. *Atmospheric Environment* 39(28), 5183–5193.
- Gil, Y., Sinfort, C., Bonicelli, B., Bellon-Maurel, V., Vallet, A., 2005. Methodology for assesment of drift from radial sprayers in vineyard applications. In : *Information and technology for sustainable fruit and vegetable production*. Montpellier, France, September 12-16. pp. CD–Rom.

- Gil, Y., Sinfort, C., Brunet, Y., Polveche, V., Bonicelli, B., 2007. Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying. *Atmospheric Environment* 41, 2945–2957.
- Gilbert, A., Bell, G., 1988. Evaluation of drift hazards from pesticide spray application. *Aspects of Applied Biology* 17, 363–375.
- Goering, C., Bode, L., Gebhardt, M., 1972. Mathematical modelling of spray droplet deceleration and evaporation. *Transactions of the ASAE* 15 (2), 220–225.
- Gouy, V., Carluer, N., 2002. Modélisation de transferts de pesticides dans l'environnement. Club CRIN, Environnement et Société, Ch. Transfert vers les eaux de surface, (III-4).
- Graham-Bryce, I., 1977. Crop protection : a consideration of the effectiveness and disadvantages of current methods and of the scope for improvement, b 281 (), pp. . *Philos. Trans. R. Soc. London B281*, 163–179.
- Grayson, B. T., Pack, S. E., Edwards, D., Webb, J. D., 1993. Assessment of a mathematical model to predict spray deposition under laboratory track spraying conditions : Ii. examination with further plant species and diluted formulations. *Pestic. Sci.* 37(2), 133–140.
- Grayson, B. T., Webb, J., Pack, S. E., Edwards, D., 1991. Development and assessment of a mathematical model to predict foliar spray deposition under laboratory track spraying conditions. *Pesticide Sci.* 33, 281–304.
- Gyldenkerne, S., Secher, B. J., Nordbo, E., 1999. Ground deposit of pesticides in relation to the cereal canopy density. *Pesticide Science* 55, 1210–1216.
- Hamza, M. H., Added, A., Ben Mammou, A., Abdeljaoued, S., Rodriguez, C. R., 2004. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution potentielle par les pesticides, de la nappe côtière alluvionnaire de la plaine de metline-ras jebel-raf raf, nord-est tunisien, selon la méthode drastic appliquée par les systèmes d'information. *Houille blanche, Coden Hoblab 05*, 86–94.
- Hartley, G., Graham-Bryce, I., 1980. *Physical principles of pesticide behaviour*. Academic Press, London.
- Herbst, A., 2001. A method to determine spray drift potential from nozzles and its link to buffer zone restrictions federal biological research centre for agriculture and forestry braunschweig. In : Paper Number : 01-1047 An ASAE Meeting presentation.
- Herbst, A., Ganzelmeier, H., 2000. Classification of sprayers according to drift risk, a german approach. *Aspects of Applied Biology Pesticide Application* 57, 35–40.
- Herbst, A., Molnar, G., 2002. Comparison of spray drift collectors in a wind tunnel. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 54, 233–238.
- Herbst, A., Wolf, P., 2001. Spray deposit distribution from agricultural boom sprayers in dynamic conditions. In : ASAE Annual International Meeting, California, August 2001. p. 12.
- Hobson, P., Miller, P., Walklate, P., Tuck, C., Western, N., 1993. Spray drift from hydraulic spray nozzles, the use of a computer simulation model to examine factors influencing drift. *Journal of Agricultural Engineering Research* 54, 293–305.
- Holterman, H., 2003. Kinetics and evaporation of water drops in air isbn 90-5406-234-7 nugi 849/nur 950. Tech. rep., Wageningen UR-IMAG.
- Holterman, H., Michielsen, J., Van de Zande, J., 1998a. Spray drift in crop protection : validation and usage of a drift model. In : EurAgEng Paper no 98-A-012.

- Holterman, H., Van de Zande, J., Porskamp, H., Michielsen, J., 1998b. Idefics, a physical model of spray drift from boom sprayers in agriculture. In : ILASS-Europe 98.
- Holterman, H., Van de Zande, J., Porskamp, H. J., Huijmans, J., 1997a. Modelling spray drift from boom sprayers. *Computers and electronics in agriculture* 19, 1–22.
- Holterman, H. J., Van de Zande, J. C., Porskamp, H. A. J., Huijmans, J. F. M., 1997b. Modelling spray drift from boom sprayers. *Computers and electronics in agriculture* 19, 1–22.
- INERIS, 2005. Détermination des pesticides à surveiller dans le compartiment aérien : approche par hiérarchisation synthèse du comité de pilotage verneuil-en-halatte, oise. Tech. rep., INERIS-France.
- INS, 2008. Rapport annuel 2007. Tech. rep., Institut National des Statistiques.
- Jagers, O., Akkerhuis, G. J. M., Axelsen, J. A., (1), K. C., 1998. Towards predicting pesticide deposition from plant phenology ; a study in spring barley. *Pestic. Sci.* 53, 252–262.
- Jensen, J., Adare, K., Shearer, R., 1997. Rapport de l'évaluation des contaminants dans l'arctique canadien, programme de lutte contre les contaminants dans le nord, affaires indiennes et du nord canada, 1997, 508 p. Tech. rep., Institut National de Recherche sur les Eaux, (INRE)-Canada.
- Jensen, P., Jørgensen, L., Kirknel, E., 2001. Biological efficacy of herbicides and fungicides applied with low-drift and twin-fluid nozzles danish institute of agricultural sciences, department of crop protection, research centre flakkebjerg, dk-4200 slagelse, denmark. *Crop Protection* 20, 57–64.
- Jensen, P., Splid, N., 2003. Deposition of spray liquid on the soil below cereal crops after applications during the growing season. *European Weed Research Society Weed Research* 43, 362–370.
- Kallal, Z., Alguemi, C., Ghattas, A., 1990. Problématique des résidus des pesticides dans les aliments, institut national de nutrition de tunis. In : *Seminaire africain sur les pesticides*.
- Kaul, P., Gebauer, S., Neukampf, R., 1995. Pedrimo, major aim of the model : Simulation of spray drift (sediment and loss to the air) for field sprayers and aircrafts most recent release. *Nachrichtenbl Deut Pflanzenschutz* 47(2), 1995.
- Kaul, P., Gebauer, S., Neukampf, R., Ganzelmeier, H., 1996. Modellierung der direkten abtrift von pflanzenschutzmitteln, pflanzenschutzgeräte für flächenkulturen. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutz* 48, 21–31.
- Khelifi, M., Brown, R., C., L., 1993. Prediction of temperature, wind speed, and actual vapor pressure at different heights above the crop canopy. *Transactions of the ASAE* 36(6), 1755–1760.
- Lardoux, Y., 2002. Etude de la repartition au sol des produits phytosanitaires sous une rampe en mouvement a partir d'une modelisation dynamique - application a la definition de methodes d'évaluation des pulverisateurs a jets projetes. Ph.D. thesis, Académie de Montpellier - Université de Montpellier II.
- Lesieur, M., 1994. La turbulence.
- Linders, J., Mensink, H., Stephenson, G., Wauchope, D., Racke, K., 2000. Foliar interception and retention values after pesticide application. a proposal for standardized values for environmental risk assessment. *Pure and applied chemistry* 72(11), 2199–2218.

- Majewski, M., Capel, P., 1995. Pesticides in the atmosphere : distribution, trends, and governing factors. Tech. rep., Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, 214 p.
- Makarov, V. I., Ankilov, A. N., Koutsenogii, K. P., Borodulin, A. I., Samsonov, Y. N., 1996. Efficiency of the inertial wind capture of pesticide aerosols by vegetation species. *J. Aerosol Sci* 27(1), 67–68.
- Mansour, H., Daly, L., Rammeh, H., Hidri, A., Trigui, M., Mahmoud, A., Chakroune, R., Hédhili, A., Kahouach, L., Nouaigui, H., Laiba, M., 2003. Etude de l'utilisation des pesticides en milieu professionnel en tunisie. L'Institut tunisien de Santé et de Sécurité au Travail, <http://www.isst.nat.tn/fr/etudes/pesticides.htm>.
- Mao, T., Kuhn, D., Tran, H., 1997. Spread and rebound of liquid droplets upon impact on flat surfaces. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 43(9), 2169–2179.
- MARH, 2005. Culture du blé en zones humides et sub-humides de la Tunisie. Ministère de l'Agriculture et de Ressources Hydrauliques.
- Meier, U., 2001. Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées-BBCH Monographie, 2. édition. Centre Fédéral de Recherches Biologiques pour l'Agriculture et les Forêts.
- Mercer, G., Sweatman, W., Elvin, A., Counce, J., Fulford, G., Harper, S., Penniford, R., 2007. Process driven models for spray retention by plants. In : *Proceedings of the 2006 Mathematics-In-Industry Study Group*. ed. G Wake. pp. 57-85.
- Messaoudi, B., Bahrouni, H., 2007. Caractérisation du parc de pulvérisateurs au Nord de la Tunisie : la taille et les performances. Tech. rep., Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts - Unité de Machinisme Agricole.
- Miller, P. C. H., Hadfield, D. J., 1989. A simulation model of the spray drift from hydraulic nozzles. *Journal of Agricultural Engineering Research* 42 (2), 135–147.
- Mourougou-Candoni, N., Prunet-Foch, B., Legay, F., Vignes-Adler, M., Wong, K., 1999. Retraction phenomena of surfactant solution drops upon impact on a solid substrate of low surface energy. *Langmuir* 15, 6563–6574.
- Mundo, C., Sommerfield, M., C., T., 1995. Droplet-wall collisions : Experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow* 21(2), 151–173.
- Olofsdotter, M., Streibig, J., 1997. Deposits of pesticides on the soil surface - Report No. 27. The Royal Veterinary and Agricultural University / Danish EPA.
- Ozkan, H., 1991. Reducing spray drift. Tech. rep., OSU Extension Bulletin 816. Ohio State University Extension, Columbus, Ohio.
- PAN, A., 2006. Identification des acteurs impliqués dans la gestion des pesticides en tunisie " , rapport final. Tech. rep., Pesticide Action Network avec l'appui de la Banque mondiale et de PAN UK, Projet Renforcement des Capacités des ONGs en Afrique en Appui au Programme Africain relatif aux Stocks de Pesticides obsolètes (PASP)/DGF-O5.
- Pasandideh, F., Qiao, Y., Chandra, S., Mostaghimi, J., 1996. Capillary effects during droplet impact on a solid surface. *Physics of Fluids* 8, 650–659.
- Perry, R., Green, D., Maloney, J., 1984. *Perry's Chemical Engineers' Hand-book*.
- Peters, K., Eiden, R., 1992. Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest. *Atmospheric Environment* 26(A), 2555–2564.

- Pimentel, D., 1995. Amounts of pesticides reaching target pests : environmental impacts and ethics. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 8, 17–29.
- Pimentel, D., 1996. Pest management in agriculture. In D. Pimentel, ed. *Techniques for Reducing Pesticides : Environmental and Economic Benefits*. Chichester, England : John Wiley & Sons.
- Pimentel, D., 2002. Silent spring revisited - have things changed since 1962. *Pesticide Outlook* 13, 205–206.
- Ramel, M., 2003. Synthèse des travaux 2002 de l'inéris, laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air, direction des risques chroniques. Tech. rep., INERIS.
- Ranz, W. E., Marhsall Jr., W. R., 1952a. Evaporation from drops, part I. *Chemical Engineering Progress* 48 (3), 141–146.
- Ranz, W. E., Marhsall Jr., W. R., 1952b. Evaporation from drops, part II. *Chemical Engineering Progress* 48 (4), 173–180.
- Raupach, M. R., Briggs, P., Ahmad, N., Edge, V. E., 2001a. Endosulfan transport II : Modeling airborne dispersal and deposition by spray and vapor. *Journal of Environmental Quality* 30, 729–740.
- Raupach, M. R., Woods, N., Dorr, G., Leys, J. F., Cleugh, H. A., 2001b. The entrapment of particles by windbreaks. *Atmospheric environment* 8, 1–11.
- Reichard, D., Zhu, H., Fox, R., Brazee, R., 1992a. Computer simulation of variables that influence spray drift. *Transactions of the ASAE* 35, 1401–1407.
- Reichard, D., Zhu, H., Fox, R. D., Brazee, R. D., 1992b. Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift. *Transactions of the ASAE* 35 (3), 755–758.
- Richardson, B., Newton, M., 2000. Spray deposition within plant canopies. *New Zealand Plant Protection* 53, 248–252.
- Richardson, B., Thistle, H. W., 2003. Measured and predicted aerial spray interception by a young pinus radiata canopy. In : *ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, 27-30 July 2003*. Paper 031092.
- RIVM, 1998. Uniform system for the evaluation of substances 2.0 (uses 2.0). report no. 679102044. Tech. rep., National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), Ministry of Health, Welfare and Sport (VWS) - Netherlands.
- Salyani, M., Withney, J. D., 1988. Evaluation of methodologies for field studies of spray deposition. *Transactions of the ASAE* 31(2), 390–395.
- Sarker, K., Parkin, C., 1995. Hydraulic nozzles using dimensional analysis. pp. 529–534.
- Sidahmed, M., 1996. A theory for predicting the size and velocity of droplets from pressure nozzles. *Transactions of the ASAE* 39(2), 385–391.
- Sidahmed, M. M., Brown, R. B., 2002. Computer simulation of factors affecting drift from a forestry airblast sprayer. *Canadian biosystems engineering* 44, 2.27–2.34.
- Sinfort, C., 2006. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches : Couplage entre recherche expérimentale et modélisation pour l'optimisation des procédés de pulvérisation agricole. Ph.D. thesis, Académie de Montpellier - Université de Montpellier II.
- Sinfort, C., Miralles, A., Sevilla, F., Maniere, G., 1994. Study and development of a test method for spray boom suspensions. *Journal of agricultural engineering research* 59, 245–252.

- Smith, R. W., Miller, P. C. H., 1994. Drift predictions in the near nozzle region of a flat fan sprayer. *Journal of Agricultural Engineering Research* 59, 111–120.
- Southcombe, E. S. E., Miller, P. C. H., Ganzelmeier, H., Vand de Zande, J. C., Miralles, A., Hewitt, A. J., 1997. The international (BCPC) spray classification system including a drift potential factor. In : Brighton Crop Protection Conference - Weeds. Paper 5A1.
- Speelman, L., 1971. A fluorescent tracer technique for determination of the liquid distribution of field crop sprayers. *Journal of Agricultural Engineering Research* 16(3), 6p.
- Spillman, J. J., 1984. Spray impaction, retention and adhesion : an introduction to basic characteristics. *Pesticide Science* 15, 97–106.
- Stermer, R., Bouse, L., Carlton, J., Kirk, I., Bode, L., 1988. Comparisons of various techniques for measuring spray deposition. In : Paper No. AA88-001 - ASAE, St. Joseph, Michigan. Vol. Paper No. AA88-001.
- Stevens, P., Forster, W. A., Murphy, D.S. Policello, G., Murphy, G., 1992. Surfactants and physical factors affecting adhesion of spray droplets on leaf surfaces. In : In Proc. Southern Weed Science Society, Champaign, Ill. : Southern Weed Science Society. pp. 354–358.
- Stevens, P. J. G., Kimberley, M. O., Murphy, D. S., Policello, G. A., 1993. Adhesion of spray droplets to foliage : The role of dynamic surface tension and advantages of organosilicone surfactants. *Pestic. Sci.* 38(2), 237–245.
- Sundaram, A., Sundaram, K., 1992. Use of a fluorescent pigment dye and a chemical tracer to quantify aerial spray deposits on collection surfaces. *J. Environ. Sci. Health B27(2)*, 165–184.
- Taylor, W., Andersen, P., Cooper, S., 1989. The use of air-assistance in a field crop sprayer to reduce drift and modify trajectories. In : Proceedings Brighton Crop Protection Conference - Weeds, 631-639.
- Teske, M. E., Bird, S. L., Esterly, D. M., Curbishley, T. B., Rey, S. L., Perry, S. G., 2002. Ag-DRIFT : a model for estimating near-field spray drift from aerial applications. *Environmental Toxicology and Chemistry* 21 (3), 659–671.
- Teske, M. E., Valcore, D. L., Hewitt, A., 2001. An analytical ground sprayer model. ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE 01-1051.
- Thistle, H., 2000. The role of stability in fine pesticide droplet dispersion in the atmosphere : a review of physical concepts. *Transactions of the ASAE* 46, 1409–1413.
- Thom, A. S., 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. Vol. 1 of Vegetation and the atmosphere. Academic Press.
- Thompson, N., Ley, A. J., 1983. Estimating spray drift using a random-walk model of evaporating drops. *Journal of Agricultural Engineering Research* 28 (5), 419–435.
- Trayford, R. S., Welch, L. W., 1977. Aerial spraying : A simulation of factors influencing the distribution and recovery of liquid droplets. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22, 183–196.
- Turbelin, G., 2000. Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent. Ph.D. thesis, Université d'Evry Val d'Essonne.
- Unsworth, J. B., Wauchope, R. D., Klein, A. W., Dorn, E., Zeeh, B., Yeh, S. M., Akerblom, M., Racke, K. D., Rubin, B., 1999. Significance of the long range transport of pesticides in the atmosphere. *Pure and applied chemistry* 71 (7), 1359–1383.

- USEPA, 1977. Waste disposal practices and their effects on groundwater. In : Report to Congress, USEPA, Washington, DC, USA.
- Van de Zande, J., Porskamp, H., Holterman, H., 1999. Spray deposition in crop protection. Tech. rep., Environmental Planning Bureau Series No. 8, IMAG-DLO, Wageningen.
- Van Der Werf, H. M., 1996. Assessing the impact on the environment. *Ecosystems and Environment* 60, 81–96.
- Walklate, P. J., 1992. A simulated study of pesticide drift from air assisted orchard sprayer. *Journal of Agricultural Engineering Research* 51, 263–283.
- Walklate, P. J., Weiner, K. L., Parkin, C. S., 1996. Analysis of and experimental measurements made on a moving air-assisted sprayer with two dimensionnal air-jets penetrating a uniform crop canopy. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63, 365–378.
- Webb, D. A., Western, N. M., Holloway, P. J., 2000. Modelling the impaction behaviour of agricultural sprays using monosized droplets. *Aspects of Applied Biology* 57, 147–154.
- Whitney, R., Roth, L., 1985. String collectors for spray pattern analysis. *Transactions of the ASAE* 28(6), 1749–1753.
- Williamson, R. E., Threadgill, E. D., 1974. A simulation for the dynamics of evaporating spray droplets in agricultural spraying. *Transactions of the ASAE* 17, 254–261.
- Wolters, A., 2003. Pesticide volatilization from soil and plant surfaces : Measurements at different scales versus model predictions vorgelegt von dipl.-chem. aus schwalmtal (nordrhein-westfalen) berichter : Univ.-prof. dr. rer. nat. andreas schäffer univ.-prof. dr. agr. harry vereecken. Tech. rep., Tag der mündlichen Prüfung.
- Xu, X. G., Walklate, P. J., Rigby, S. G., Richardson, G. M., 1998. Stochastic modelling of turbulent spray dispersion in the near-field of orchard sprayers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74–76, 295–304.
- Yoon, S., DesJardin, P., Presser, C., Hewson, J., Avedisian, C., 2006. Numerical modeling and experimental measurements of water spray impact and transport over a cylinder. *International Journal of Multiphase Flow* 32, 132–157.
- Zabkiewicz, J., 2007. Spray formulation efficacy-holistic and futuristic perspectives plant protection. *Crop Protection* 26, 312–319.
- Zalay, A., Bouse, L., Carlton, J., Crookshank, H., Eberle, W., Howle, R., Shrider, K., 1980. Measurement of airborne spray with a laser droplet velocimeter. *Transactions of the ASAE* 23, 548–552.
- Zhu, H., Reichard, D. L., Fox, R. D., Brazee, R. D., Ozkan, H. E., 1994. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. *Transactions of the ASAE* 37 (5), 1401–1407.
- Zhu, H., Reichard, D. L., Fox, R. D., Brazee, R. D., Ozkan, H. E., 1996. Collection efficiency of spray droplets on vertical targets. *Transactions of ASAE* 39 (2), 415–422.

ملخص

في تونس، كما في العديد من بلدان البحر الأبيض المتوسط، تعدّ الحبوب من أكثر الزراعات استهلاكاً للمبيدات (63 ٪ من الاستهلاك الكلي للفلاحة التونسية). لهذا، تحتمت علينا دراسة مصير المبيدات المستعملة في هذا الميدان للحدّ من الكميات الضائعة في البيئة مع المحافظة على مستوى مقبول من نجاعة عمليّة المداواة. فقد بينت عدّة دراسات أنّ قطرات خليط الدّواء، بعد خروجها من فوهة البخاخ (buse) هي عرضة للانحراف (dérive) و الضياع في مستوى سطح الأرض أثناء المداواة.

الجزء الرئيسي من هذا العمل يعتمد على نموذج قادر على حساب التعويضات والتبخّر في الرياح ، والمحاصيل الحقلية. DriftL النموذج ثم تم بناؤها في إطار برنامج Scilab ، الإصدار 5.03. فقد تعثرت من القياسات التي أجريت تحت ظروف خاضعة للرقابة في نفق الرياح وتلقى التحقّق التجريبي. والجزء الثاني درس تجريبي الخسائر المباشرة للاحتفاظ التربة والنباتات تحت ظروف المختبر. كما أن الأعمال التي اضطلع بها في نفق الرياح ، وسلطت الضوء على وجود علاقة بين حجم فوهة الرذاذ الارتفاع ، والودائع microclimatic قياس المتغيرات في المقصورات المعنية.

ويستند الجزء الرئيسي من هذا العمل على تطوير و اعتماد نموذج للانحراف قادر على احتساب الكميات المترسّبة في الأرض و المتبخّرة في الهواء أثناء مداواة الزّراعات الكبرى. و قد وقع تطوير النّموذج (DriftL)، بالاعتماد على البرنامج Scilab ، الإصدار 5.03. وقد اعتمدنا في هذا العمل على جملة من القياسات التي أجريت تحت ظروف خاضعة للرقابة وسط نفق للرياح بفرنسا، مكّنتنا من التّحقّق بطريقة تجريبية من النّتائج المتحصّل عليها.

أمّا الجزء الثاني، فيتناول بالدّرس و بشكل تجريبي في ظروف مختبرية كمّيات المبيد الضّائعة مباشرة في التربة و الكمّيات التي ترسّبت على أوراق النّباتات.

و قد تمّ تحديد العلاقة الرّابطة بين حجم القطرات، ارتفاع البخاخات، العوامل المناخية، كمّيات المبيد الضّائعة و الكمّيات التي تحتفظ بها النّباتات.

للحصول على هذه القياسات ، تم تنفيذ نهج تجريبيّ مكّتنا من اختيار طريقة العمل الأنسب للظروف المتوسّطية. فبعد العديد من التجارب ، تم اختيار جامع لكلّ خانة مستهدفة بهذه القياسات. كما تمّ تصنيع آلة متحرّكة (rampe mobile) للعب دور مرذاذ في ظروف المختبر. واستخدمت القياسات الميدانية للتحقّق من صحّة النّتائج المتحصّل عليها بواسطة النّموذج DriftL و المعطيات التي تمّ الحصول عليها في المختبر.

الكلمات المفتاحية : المرذاذ، البخاخ، الانحراف، تبخّر المبيدات في الهواء، ترسّب المبيدات في الأرض، النمذجة ، حجم قطرات الخليط ، العوامل المناخية

Résumé

En Tunisie, comme dans plusieurs pays méditerranéens, la céréaliculture est une activité très consommatrice de pesticides (63% de la consommation totale de l'agriculture tunisienne). Par conséquent, il est nécessaire d'étudier le devenir des pesticides appliqués afin de réduire les quantités perdues dans l'environnement tout en maintenant un niveau acceptable de l'efficacité des traitements. Plusieurs études ont montré qu'après leur éjection par la buse, les gouttelettes sont plus ou moins soumises aux phénomènes de dérive et de perte au sol pendant le traitement.

La partie principale de ce travail est basée sur le développement et la validation d'un modèle capable de calculer les dépôts, la volatilisation (évaporation et pertes vers l'air) sous le vent, en grandes cultures. Le modèle DriftL, modèle de dérive à complexité réduite, a été alors construit sous le logiciel SciLab, version 5,03. Il a été paramétré à partir de mesures réalisées sous des conditions contrôlées en soufflerie et a bénéficié d'une validation expérimentale. Une deuxième partie étudie expérimentalement les pertes directes au sol et la rétention sur les plantes en conditions de laboratoire. Comme pour le travail mené en soufflerie, il a été possible de mettre en évidence une relation entre la granulométrie des gouttelettes, la hauteur des buses, les variables microclimatiques et les dépôts mesurés dans les compartiments air, sol et plante.

Pour effectuer ces mesures, une démarche expérimentale a été mise en place afin de choisir la méthode de travail la mieux adaptée. Après de nombreux tests, un collecteur a été sélectionné pour chaque compartiment. Une rampe mobile a été également fabriquée pour jouer le rôle du pulvérisateur dans les conditions de laboratoire. Les mesures effectuées au champ ont permis de valider certains des calculs de DriftL ainsi que les résultats obtenus au laboratoire.

MOTS CLÉS : Pulvérisateur, Buse, Dérive, Déport, Émissions vers l'air, Dépôts au sol, Modélisation, VMD, Facteurs microclimatiques.

Abstract

In Tunisia, as in many Mediterranean countries, cereal is a very pesticide intensive crop (63% of overall Tunisian agriculture consumption). It is consequently necessary to study the fate of applied pesticides to reduce their release in the environment and maintain an acceptable effectiveness of treatments. Several studies have demonstrated that after their ejection from the nozzle, drops are subject to drift and ground losses during their applications.

The main part of this work is based on the development and validation of a model, "DriftL" that calculate drift in field crops. It was developed under Scilab (version 5,03). It has been calibrated using controlled condition measurements in a wind tunnel and received experimental validation. A second part of this work studied experimentally the direct soil loss and plant retention under laboratory conditions. As for the wind tunnel results, it showed a relationship between the drop size VMD, the microclimatic variables and deposits in the concerned compartments.

To measure deposits, an experimental approach was setup to choose the best method. After many tests, one collector was selected for each compartment. A device was also built to replace the sprayer in laboratory conditions. The field measurements were used to validate not only DriftL calculations but also to compare with laboratory results.

KEY WORDS : Sprayer, Nozzle, Drift, Air emissions, Ground deposits, Modeling, VMD, Microclimatic factors.