

# 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, ( $4 \text{ km.h}^{-1}$ ) 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, ( $7 \text{ km.h}^{-1}$  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 ( $\mu\text{m}$ )	Vitesse ( $\text{km.h}^{-1}$ )	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  $\mu\text{m}$ ) les pertes au sol sont plus faibles qu'avec les buses classiques et les dépôts sur les plantes sont nettement améliorés.

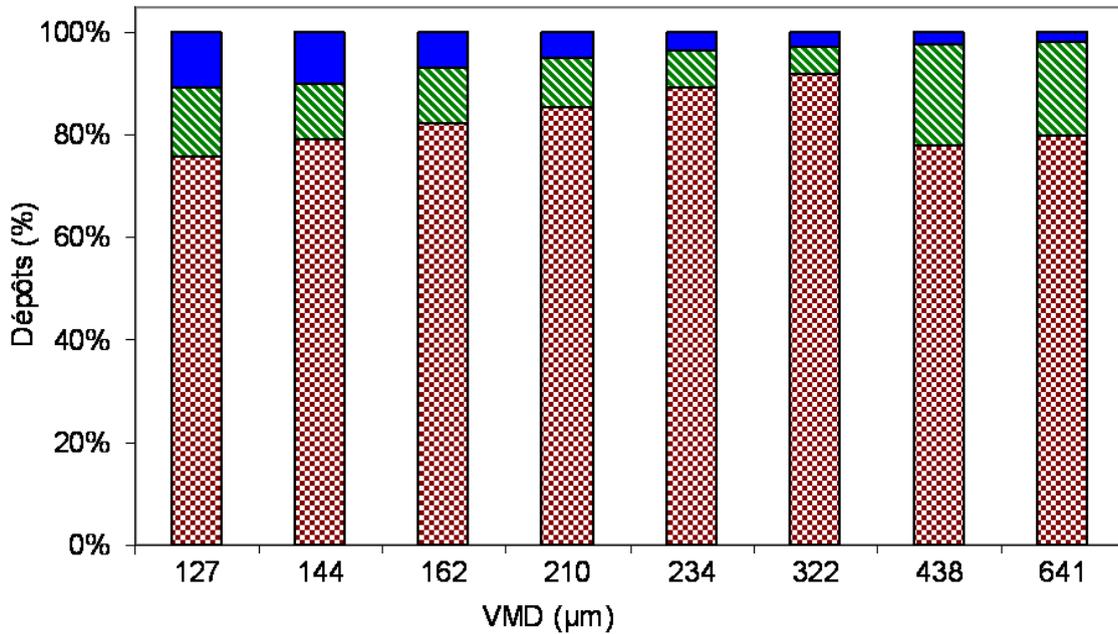


FIGURE 9.1 – Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD pour une vitesse  $V_a$  de  $4 \text{ km.h}^{-1}$  et une hauteur  $H$  de  $0,5 \text{ m}$ . Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.

### 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  $\mu\text{m}$  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  $7 \text{ km.h}^{-1}$  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  $10 \text{ km.h}^{-1}$ , 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  $7 \text{ km.h}^{-1}$ , 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

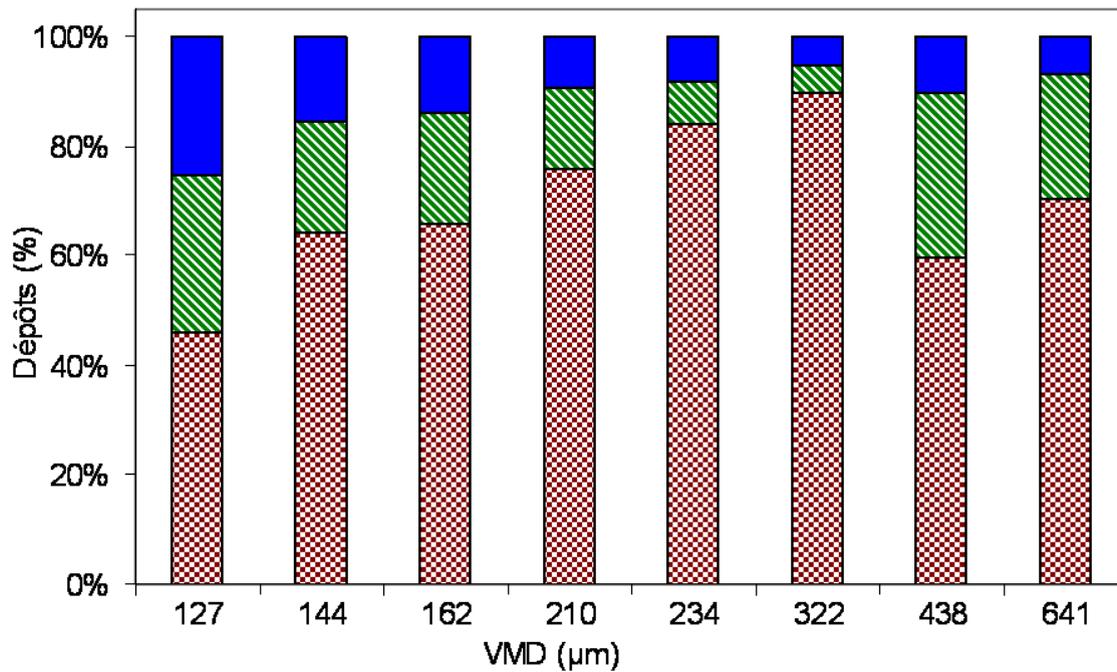


FIGURE 9.2 – Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD pour une vitesse  $V_a$  de  $7 \text{ km.h}^{-1}$  et une hauteur  $H$  de  $0,8 \text{ m}$ . Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.

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.

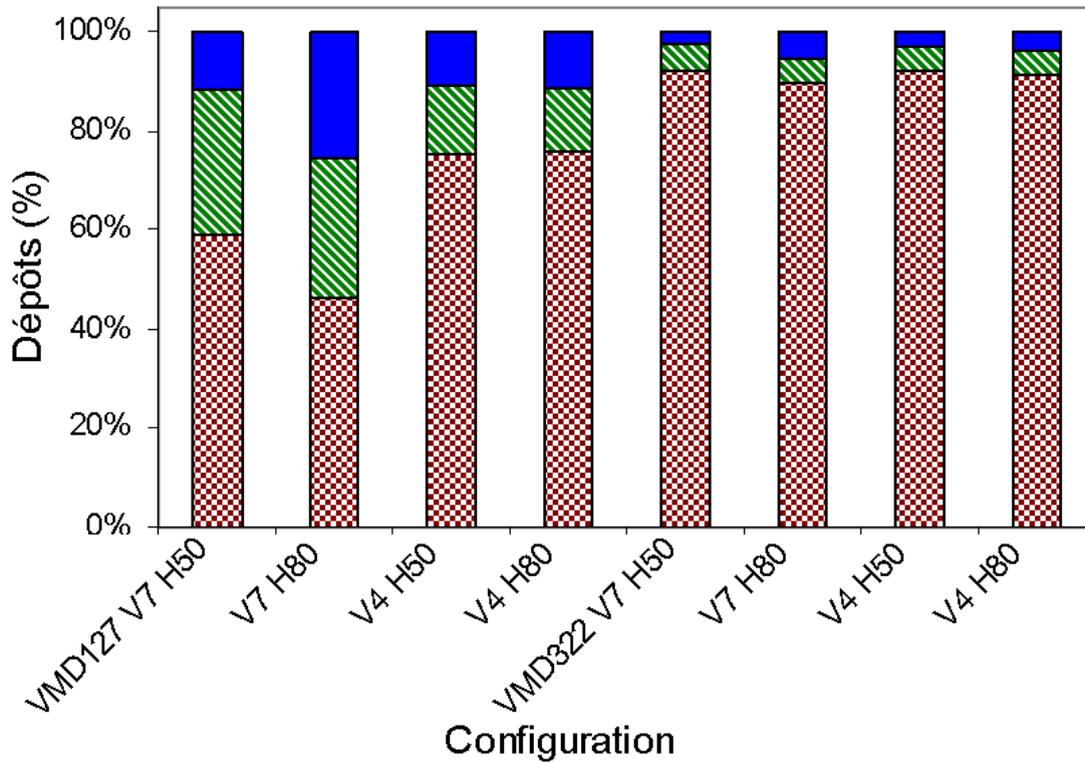


FIGURE 9.3 – Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction du VMD, de la vitesse d’avancement de la rampe et de la hauteur des buses. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.

### 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 <sup>-1</sup> )	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).

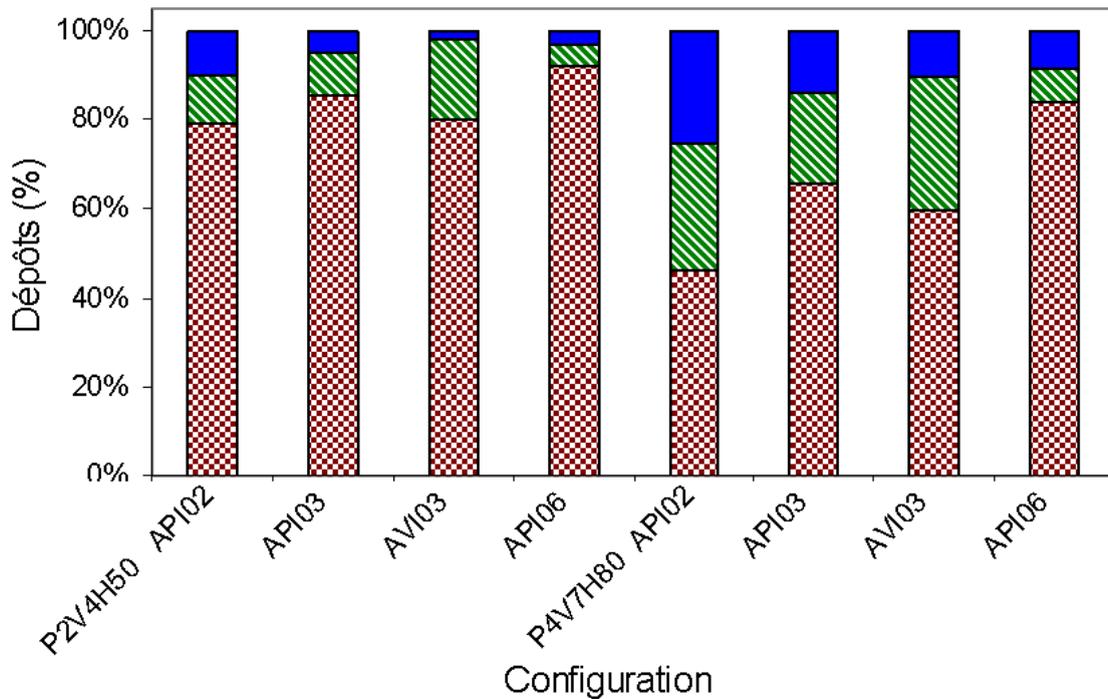


FIGURE 9.4 – Dépôts sous la rampe mobile et volatilisation en fonction de la buse pour une pression de 4 bar, une vitesse d'avancement de la rampe de  $7 \text{ km.h}^{-1}$  et une hauteur des buses de 0,8 m. Marron pointillé : dépôts au sol ; vert hachuré : rétention sur les plantes ; bleu plein : volatilisation.

### 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<sup>(1)</sup>, E. HAMZA<sup>(1)</sup>, C. SINFORT<sup>1</sup>, B. PALAGOSS<sup>1</sup>

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.

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

<sup>1</sup> Institut National Agronomique de Tunisie, 43 Avenue Charles Nicolle, Tunis 1082, Tunisie

<sup>1</sup> SupAgro - UMR ITAP 2 pl. Viala F-34060 Montpellier

<sup>1</sup> 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.

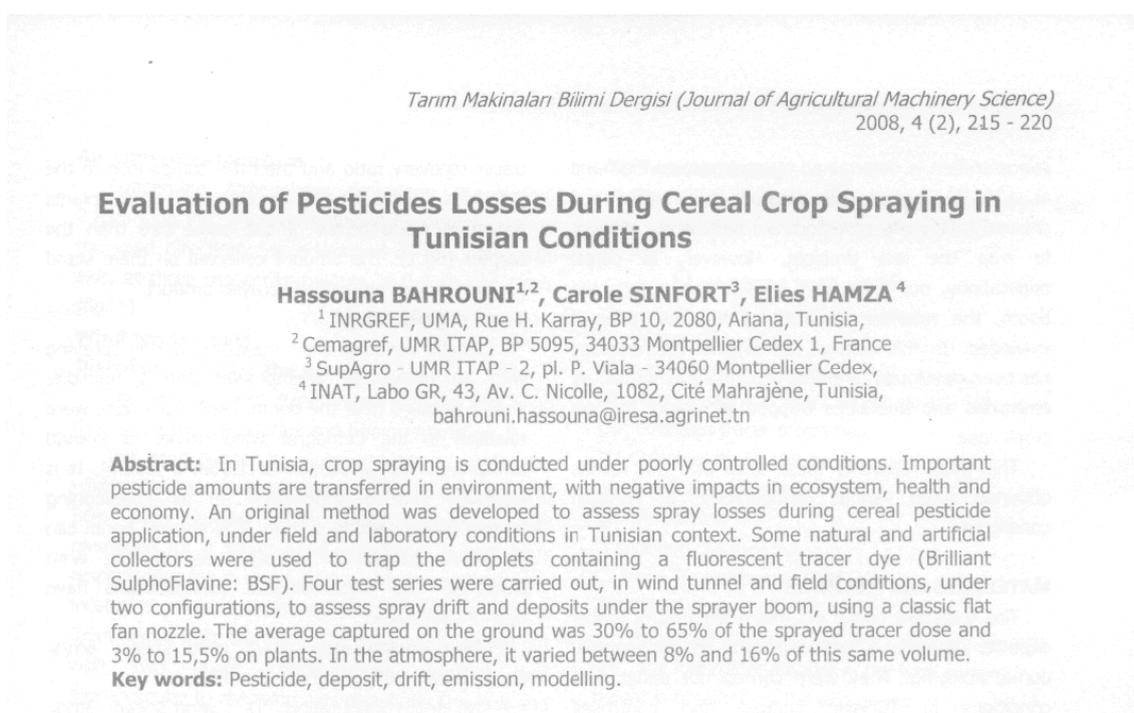


FIGURE A.2 – Article de la revue : Journal of Agricultural Machinery Science - Turquie, 2008

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

H. Bahrouni<sup>1</sup>, C. Sinfort<sup>2</sup>, E. Hamza<sup>3</sup>, B. Bonicelli<sup>4</sup>, E. Cotteux<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Montpellier SupAgro - UMR ITAP, 2 pl. Viala, 34060 Montpellier

<sup>3</sup> INAT - 43, Avenue Charles Nicolle, cité Mahrajène - Tunisia

<sup>4</sup> 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.

FIGURE A.3 – Conférence des Journées Scientifiques de l'IRESA - Tunisie, 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<sup>1,2</sup>, E. Hamza<sup>3</sup>, C. Sinfort<sup>4</sup>

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

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

<sup>3</sup> INAT, Labo GR, 43, Av. C. Nicolle, 1082, Cité Mahrajène, TUNISIE (h\_ellies@yahoo.fr)

<sup>4</sup> 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 dérive

### B.1 Tables de dérive 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 dérive								
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 dérive								
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 dérive 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)