



HAL
open science

Un modèle de dérive simplifié adapté aux cultures basses en Tunisie

H. Bahrouni, C. Sinfort, E. Hamza

► **To cite this version:**

H. Bahrouni, C. Sinfort, E. Hamza. Un modèle de dérive simplifié adapté aux cultures basses en Tunisie. STIC & Environnement, Jun 2009, Calais, France. 13 p. hal-00468862

HAL Id: hal-00468862

<https://hal.science/hal-00468862>

Submitted on 31 Mar 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.

Un modèle de dérive simplifié adapté aux cultures basses en Tunisie

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

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.

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 developed 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.

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

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

1. Introduction

La Tunisie importe tous les ans 3 750 tonnes de pesticides utilisés principalement en agriculture (autour de 95%) pour une superficie traitée d'environ 761 000 ha/an soit près de 5 kg/ha (données du Ministère de l'Agriculture de Tunisie). À titre de comparaison, la consommation française s'élève à 110 000 t/an pour une SAU de 295 000 km² (soit 3,7 kg/ha en moyenne). Les quantités de bouillie pulvérisées à l'hectare sont en constante diminution un peu partout dans le monde mais en Tunisie la moyenne reste de l'ordre de 300 L/ha pour les cultures basses (contre 100L/ha en France) et de 300 à 500 L/ha pour l'arboriculture (contre 200 à 300L/ha en France). Les superficies traitées sont à 73% des céréales. Le désherbage représente 91% de cette superficie avec une part de 99% dans le Nord du pays.

Ces applications s'accompagnent de pertes de pesticides vers l'environnement, soit vers le sol, directement sous la culture ou à son voisinage, soit vers l'air. L'étude de ces pertes s'avère particulièrement complexe et, dans la pratique, il est très difficile de quantifier les différents types de transferts dans les conditions de terrain (problème de coût et de fiabilité) ([SIN 03]). Cette problématique génère un fort besoin en outils de quantification des pollutions diffuses et des niveaux d'exposition, et donc une évaluation propre des concentrations aériennes et des dépôts au sol. L'approche par modélisation s'impose donc dans la mesure où elle permet de multiplier le nombre de scénarios, d'isoler les phénomènes et de reproduire des conditions atmosphériques variables. C'est ainsi que le long des dernières décennies, il a souvent été fait appel à différents types de modèles de transfert des pesticides.

Un état de l'art concernant la connaissance des mécanismes de pertes vers l'air pendant les applications a été publié dans [GIL 05]. Cet article décrit également les principaux modèles de dérive déjà développés tout en signalant que ces modèles ne permettaient pas d'évaluer les pertes atmosphériques à l'échelle de la parcelle. Globalement, ces modèles sont de deux types : les modèles basés sur le calcul de la dispersion d'un nuage (plume models) et les modèles basés sur le calcul de la trajectoire des gouttes.

Les modèles de dispersion ont été développés pour évaluer la dérive des pulvérisations aériennes (voir par exemple, [DEL 00, RAU 01, TES 01, CRA 04]). 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. Ce sont donc des modèles analytiques extrêmement simples. Ils fournissent de bonnes estimations moyennes à des échelles de 0,5 à 10 km [THI 00]. Il est cependant nécessaire de définir correctement la source d'émission. On peut également souligner que les méthodes de validation sont difficiles à mettre en place.

Les modèles décrivant la trajectoire des particules sont plus ou moins complexes. La trajectoire des gouttes est calculée à partir du bilan des forces [REI 92] en prenant en compte la turbulence de l'air (le plus souvent à partir de modèles de marche aléatoire, voir par exemple [THO 83, MIL 89, WAL 92, HOB 93, HOL 97] ou à partir de représentations de Fourier, comme dans [TES 02]) et sont parfois développés à l'aide de

logiciels de CFD¹ [BAE 07]. Certains auteurs proposent d'inclure une équation décrivant l'évaporation pour prendre en compte le changement de diamètre de la goutte pendant son transport [GOE 72, WIL 74, HOL 97, TES 02].

Dans le contexte de l'étude menée en Tunisie, le besoin identifié est un modèle pour calculer les dépôts et les pertes vers l'air pour des applications terrestres sur cultures basses (notamment désherbage). Ce modèle, dont la vocation est essentiellement pédagogique, doit être facile à mettre en œuvre - si possible analytique - et prendre en compte l'évaporation. Aucun des modèles décrits dans la littérature ne répondant à cette demande, une démarche de modélisation a été initialisée. Pour cela des observations préliminaires ont été menées dans la soufflerie du Cemagref de Montpellier. A partir de l'expérience acquise par la communauté scientifique au travers du développement des modèles de dérive cités ci-dessus, une nouvelle formulation a été proposée. Le modèle a ensuite été calé à partir d'essais systématiques dans une soufflerie. Les résultats du modèle en matière de dépôt ont ensuite été confrontés à des mesures de terrain. Cet article décrit les différentes étapes de cette démarche.

2. Observations préliminaires et choix d'un formalisme

Des essais préliminaires ont été mis en oeuvre dans la soufflerie du Cemagref de Montpellier. Cette soufflerie est constituée d'une veine fermée en boucle de section $1,95 \text{ m} \times 2,95 \text{ m}$, équipée de 6 ventilateurs. Pour ces essais préliminaires, deux configurations ont été choisies. La première, D+, favorise la dérive : la buse est de petit calibre (02), la pression est élevée (4 bars) et la vitesse du vent est de (7 km/h). La seconde, D-, représente les conditions de moindre sensibilité (calibre 06, pression 2 bars, vent 4 km/h). Les VMD (Volume Median Diameter) sont respectivement $127 \mu\text{m}$ en D+ et $322 \mu\text{m}$ en D-. Les vitesses de vent ont été choisies à partir des moyennes journalières enregistrées à la station de Cherfech, dans la zone céréalière au Nord de la Tunisie.

Les essais ont été menés pour une seule buse perpendiculaire au flux d'air. En effet, même si la norme de mesure de la dérive ne considère que les dépôts latéraux, 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.

L'allure des courbes obtenues (cf. Fig.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 l'approche de [TES 02] pour son modèle de dérive aérienne, nous avons choisi de caractériser les jets sous les buses par leur décomposition en classes granulométriques et d'appliquer pour chaque classe de diamètre un modèle d'advection-diffusion. Cette approche a aussi été dernièrement choisie par [BAE 09]. La répartition granulométrique des jets est facile à modéliser à partir

1. Computational Fluid Dynamics

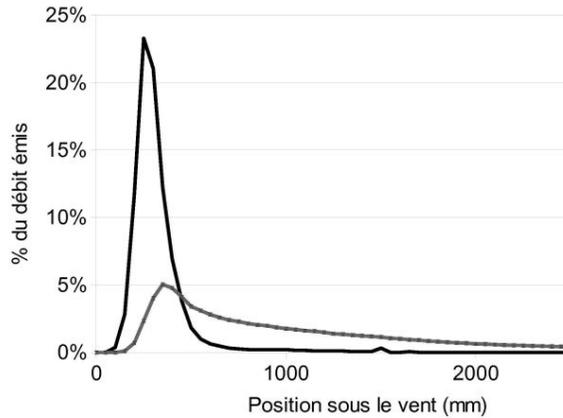


Figure 1. Répartitions observées en soufflerie pour un jet de buse à fente perpendiculaire au vent pour les configurations D+ (courbe grise- symbole ×) et D- (courbe noire).

des DV10, DV50 et DV90 (respectivement 10^{ième}, 50^{ième} et 90^{ième} percentiles). Nous avons également considéré que les gouttes 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 [HOL 97] qui se base sur l'hypothèse de [ELL 83] : les pesticides étant le plus souvent mis en suspension dans l'eau, on considère que seule l'eau s'évapore ce qui entraîne une diminution du diamètre et une augmentation de la concentration dans la goutte. Lorsque le diamètre devient nul, on considère que le produit est perdu dans l'air. Dès lors, l'évaporation de la goutte est calculée par une classique loi en D^2 (comme également dans [TES 01], par exemple) : $X_{ev} = -dD^2/dt$ (X_{ev} , taux d'évaporation de la goutte en $m^2.s^{-1}$; D diamètre de la goutte). Le développement du modèle devra permettre de faire évoluer ce calcul au cours des études à venir.

Enfin, la vitesse du vent est supposée horizontale et 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 optimisé lors de la conception de la veine.

3. Développement

Le calcul se déroule en trois temps : i. reconstitution du spectre granulométrique et calcul du diamètre de chaque classe, ii. pour chaque classe de diamètre calcul de la trajectoire et du point d'impact, iii. diffusion autour du point d'impact.

La répartition granulométrique n'étant pas tout à fait symétrique, il a été choisi de la représenter par deux demi-distributions gaussiennes paramétrées par les valeurs (DV10 et DV50) pour la première moitié et (DV90 et DV50) pour la deuxième. La

vitesse d'éjection est supposée constante pour toutes les classes de diamètre et est obtenue à partir de la relation : $V_{eject} = -b \times \sqrt{2P/\rho_l}$, le paramètre b devant être calé pour chaque buse.

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

$$\mathbf{A} = -\frac{3}{4} \times C_D \times \frac{\rho_{air}}{D \times \rho_l} \|(\mathbf{V} - \mathbf{U})\| (\mathbf{V} - \mathbf{U}) \quad (1)$$

où \mathbf{A} , désigne l'accélération de la goutte ; C_D , le coefficient de traînée ; ρ_{air} et ρ_l les masses volumiques de l'air et de l'eau respectivement ; \mathbf{V} et \mathbf{U} , les vitesses de la goutte et de l'air.

L'équation 1 est intégrée deux fois par une méthode de Newton avec un pas de temps variable, pour obtenir la trajectoire de la goutte. A chaque pas de temps, le diamètre de la goutte est ré-évalué en calculant la masse évaporée à partir de la relation proposée par [HOL 97] après validation à partir des diamètres observées expérimentalement par [WIL 74] :

$$X_{ev} = q_0 \Delta T_v (1 + q_1 D) \quad (2)$$

où q_0 et q_1 sont des paramètres calculés à partir des caractéristiques physiques de l'air et des gouttes et ΔT_v représente la différence entre température de bulbe humide et température sèche.

Si la goutte 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 normale dont la médiane est la coordonnée horizontale du point d'impact et l'écart-type, σ_d , est donné par les travaux de [DAS 05] qui corrigent l'écart-type d'un mouvement brownien pour des gouttes pulvérisées :

$$\sigma_d^2 = 2\alpha_c D_t t_d \quad (3)$$

où t_d désigne le temps de diffusion, c'est-à-dire la durée du déplacement de la goutte entre l'éjection et l'impact au sol, D_t représente le coefficient de diffusion turbulente et α_c est un coefficient correcteur qui dépend du diamètre et prend en compte l'inertie de la goutte. Dans le modèle, 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 gouttes. α_c est défini par :

$$\alpha_c = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} \frac{v'}{u'} dt$$

où v' représente la vitesse de déplacement de la goutte réelle lorsqu'elle est soumise à une fluctuation de vitesse u' .

En écrivant que cette vitesse peut s'écrire sous la forme :

$$v'(t) = u' \times \left(1 - e^{-t/\tau_p}\right) \quad (4)$$

où τ_p désigne le temps de relaxation de la goutte, il obtient :

$$\alpha_c = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} (1 - e^{-t/\tau_p}) dt \quad (5)$$

Les valeurs de τ_p 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 [DAS 05].

4. Calage des paramètres

Les deux paramètres, b et c_{dif} ont été calés avec une méthode de moindres carrés à partir de mesures en soufflerie pour 4 buses (trois buses à fente de calibre 02, 03 et 06 et une buse à injection d'air de calibre 03), deux pressions (2 et 4 bars), deux hauteurs d'éjection (0,5 et 0,8m), deux vitesses de vent (4 et 7 km/h) 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 la buse (dispersion lors de l'éjection), de la hauteur d'éjection et de la vitesse du vent. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le tableau 1. On observe 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 [SIN 94] et est donc tout à fait acceptable.

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

Tableau 1. Coefficients b et c_{dif} calés à partir des répartitions mesurées en soufflerie.

5. Résultats du modèle

Le modèle développé a pour objectif de prévoir les dépôts et les pertes vers l'air. Les résultats du modèle ont été comparés à des mesures au champ pour les deux configurations de buse définies pour les conditions D+ et D- : buse de calibre 02 avec une pression de 4 bars donnant un VMD de 127 μm et buse de calibre 04 avec une pression de 2 bars donnant un VMD de 322 μm . Les conditions de terrain n'ont pas permis de reproduire exactement les conditions pour lesquelles le modèle a été développé. On a donc tout d'abord comparé les résultats du modèle avec les dépôts mesurés en soufflerie pour les conditions de l'essai.

5.1. Description des essais au champ

La méthodologie utilisée pour les essais est basée sur la capture d'un traceur fluorescent (de la Brillant Sulfo-Flavine) sur des collecteurs passifs. Cette méthodologie est détaillée et discutée dans [GIL 07] pour l'utilisation des collecteurs et [BAH 08] pour les essais en grandes cultures.

Deux séries d'essais ont été réalisés aux mois d'Octobre 2006 et 2007 avec un vent latéral. Les conditions météorologiques observées pour les deux types de pulvérisation (VMD 127 et VMD 322 μm), sont résumées dans le tableau 2. Elles ont été mesurées sur le bord de la parcelle, à proximité du passage de la rampe et à la hauteur de la rampe. La pulvérisation était réalisée par un pulvérisateur porté équipé d'une rampe de 12m portant 24 buses espacées de 0,5m entre elles. La vitesse de traitement était de 7 km/h. Les dépôts au sol ont été mesurés sur des collecteurs rectangulaires (0,2m

	2006		2007	
VMD (μm)	127	322	127	322
<i>V</i> (m/s)	4,1	2,1	1,8	4,6
<i>Temp</i> ($^{\circ}\text{C}$)	32	30	29	24,5
<i>HR</i> (%)	54	55	46	50,5

Tableau 2. Conditions météorologiques des essais au champ. *V* : vitesse du vent, *Temp* : température, *HR* : humidité relative.

$\times 0,3\text{m}$) situés dans la zone de pulvérisation et à 1, 3, 6 et 10m du passage de l'extrémité de la rampe. Les pertes vers l'air ont été calculées à partir de la différence entre le débit émis et les quantités déposées au sol. Les résultats sont la moyenne de dix répétitions.

5.2. Comparaison des résultats du modèle aux dépôts latéraux en soufflerie

Les configurations des essais au champ diffèrent des conditions de développement du modèle sur deux points : 1. la direction du vent (latéral dans les essais et perpendiculaire aux jets 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). Des essais supplémentaires ont donc été réalisés en soufflerie pour tester l'influence d'un vent plus élevé (3 m/s pour D- et 6 m/s pour D+) et orthogonal. Les répartitions ont été mesurées avec une rampe de 3 buses placée dans le sens du vent à l'intérieur de la veine d'air. La figure 2 représente les distributions obtenues par le modèle et mesurées dans la soufflerie. Dans la configuration D+, on observe que le modèle exagère le déport. Dans la configuration D-, les pics sont à peu près bien positionnés mais la dispersion est très sous-évaluée.

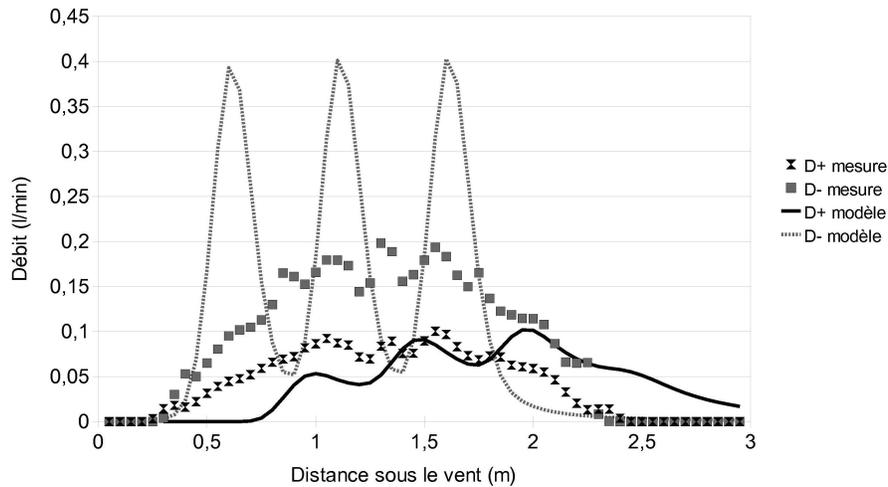


Figure 2. Comparaison des résultats du modèle aux répartitions observées en soufflerie pour une rampe de 3 buses parallèle au vent et pour les configurations D+ et D-.

5.3. Comparaison aux mesures au champ

Les essais précédents conduisent à émettre des réserves quant à l'utilisation du modèle pour l'évaluation des dépôts dans les conditions mesurées au champ. De fait, la comparaison des dépôts mesurés et calculés montre des écarts de comportement (cf. fig.3). 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). Lorsqu'on s'éloigne de la rampe, les ordres de grandeur sont à peu près corrects même si on mesure encore des (très faibles) quantités au delà de la zone prédite par le modèle.

La tableau 3 montre les que le modèle estime correctement les pertes vers l'air. Les tendances sont bien respectées. La valeur obtenue dans les conditions les plus critiques (VMD 127 μm , vent de 4 m/s) est toutefois surestimée par le modèle.

	2006		2007	
	Mesure	Modèle	Mesure	Modèle
VMD 127 μm	12%	17%	8%	9%
VMD 322 μm	2%	2%	2%	2%

Tableau 3. Pertes vers l'air (en pourcentage du débit émis) observées au champ et estimées par le modèle.

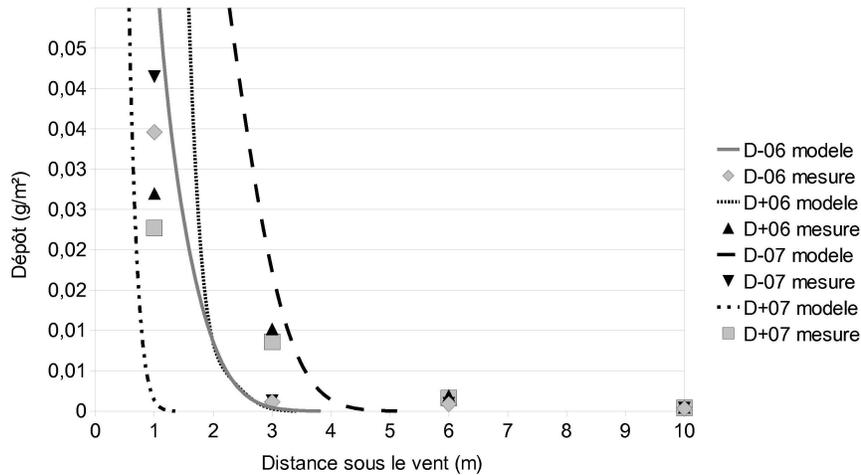


Figure 3. Comparaison des résultats du modèle aux répartitions mesurées au champ pour les pulvérisations à VMD 137 et 322 μm .

6. 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 1m ou même 1m20). Les vitesses de vent que nous avons choisies sont également trop faibles. En France, la vitesse maximale autorisée est de 5m/s (20 km/h) : il faut au moins atteindre cette valeur qui s'est révélée être courante sur le terrain. On pourra 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 frottements) 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.

L'utilisation du modèle pour des dépôts latéraux, qui n'avait pas été envisagée dans le cahier des charges au départ, semble finalement nécessaire pour permettre de comparer les résultats du modèles 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 gouttes 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 dépôt) laisse penser que l'hypothèse du vent constant en tout point est à revoir. La prise en compte d'un profil logarithmique permettrait sûrement d'améliorer ce point.

Les mesures réalisées sur le terrain montre des ordres de grandeurs corrects. Contrairement à ce qui a été observé en soufflerie, dans les conditions testées le modèle ne permet pas de prévoir les dépôts au-delà de 5m qui ont été mesurés. Il est possible que ces dépôts aient été dûs à des rafales de vent pendant les essais. Les pertes vers l'air sont estimées avec une bonne tendance et de bons ordres de grandeur. Ces pertes n'ont cependant été évaluées que pour de l'eau et il sera nécessaire de compléter le modèle en décrivant l'évaporation de produits réels.

7. Conclusion

L'étude des pertes de pesticides pendant les applications nécessite la mise en place d'un modèle pour prédire les pertes par dépôt et les dépôts vers l'air. L'observation du phénomène de dépôt 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 constante en tous points). L'évaporation a été prise en compte en considérant uniquement l'évaporation de l'eau.

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 souffleries avec un vent perpendiculaire au jet. Dans la plage des conditions testées le modèle prédit des pertes pouvant atteindre 19% des quantités pulvérisées (contre 12% mesurées).

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 dépôt, ce qui nécessitera l'approfondissement du calage. Les comparaisons des dépôts estimés et mesurés dans des conditions réelles montre que les ordres de grandeur sont corrects et les tendances respectées.

Ce modèle constitue ainsi un outil de base pour l'étude des pertes vers l'air et servira de support pour l'approfondissement des études concernant l'évaporation.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le CMCU (Comité Mixte Franco-Tunisien pour la Coopération Universitaire) qui a financé le programme d'échange scientifique entre la France et la Tunisie concernant l'étude des pertes de pesticides pendant les appli-

cations (programme 06/11G37). Ce travail a aussi bénéficié du soutien de la Région Picardie, au travers du programme PHAR (Pesticides : Hiérarchisation pour les Agro-Ressources), piloté par l'INERIS.

8. Bibliographie

- [BAE 07] BAETENS K., NUYTENS D., VERBOVEN P., DE SCHAMPHELEIRE M., NICOLAÏ B., RAMON H., « Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 56, n° 2, 2007, p. 161–173.
- [BAE 09] BAETENS K., HO Q., NUYTENS D., DE SCHAMPHELEIRE M., MELESE EN-DALEW A., HERTOÏ M., NICOLAÏ B., RAMON H., VERBOVEN P., « A validated 2-D diffusion-advection model for prediction of drift from ground boom sprayers », *Atmospheric Environment*, vol. 43, 2009, p. 1674-1682.
- [BAH 08] BAHROUNI H., SINFORT C., HAMZA E., « Evaluation of pesticide losses during cereal crop spraying in Tunisian conditions », *10th International Congress on Mechanisation and Energy in Agriculture, Antalya (Turkey), 14-17 October, 2008*.
- [CRA 04] CRAIG I. P., « The GDS model – a rapid computational technique for the calculation of aircraft spray drift buffer distances », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 43, 2004, p. 235–250.
- [DAS 05] DA SILVA A., SINFORT C., TINET C., PIERRAT D., HUBERSON S., « A Lagrangian model for spray behaviour within vine canopies », *Journal of Aerosol Science*, vol. AS3921, 2005, p. 1-17.
- [DEL 00] DE-LEEUEW F. A. A. M., VAN PUL W., VAN DER BERG F., GILBERT A. J., « The use of atmospheric dispersion models in risk assessment decision support systems for pesticides », *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 62, 2000, p. 133–145.
- [ELL 83] ELLIOTT J. G., WILSON B. J., Eds., « *The influence of weather on the efficiency and safety of pesticide application - the drift of herbicides* », page 135, Occasional Publication No.3, British Crop Protection Council, Croydon, UK, 1983.
- [GIL 05] GIL Y., SINFORT C., « Emission of pesticides to the air during sprayer application : a bibliographic review », *Atmospheric Environment*, vol. 39, 2005, p. 2183-5193.
- [GIL 07] GIL Y., SINFORT C., BRUNET Y., POLVECHE V., BONICELLI B., « Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying », *Atmospheric Environment*, vol. 41, 2007, p. 2945–2957.
- [GOE 72] GOERING C. E., BODE L. E., GEBHARDT M. R., « Mathematical modelling of spray droplet deceleration and evaporation », *Transactions of the ASAE*, vol. 15, n° 2, 1972, p. 220-225.
- [HOB 93] HOBSON P. A., MILLER P. C. H., WALKLATE P. J., TUCK C. R., WESTERN N. M., « Spray drift from hydraulic spray nozzles : the use of a computer simulation model to examine factors influencing drift », *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 54, 1993, p. 293-305.
- [HOL 97] HOLTERMAN H. J., VAN DE ZANDE J. C., PORSKAMP H. A. J., HUIJMANS J. F. M., « Modelling spray drift from boom sprayers », *Computers and electronics in agriculture*, vol. 19, 1997, p. 1-22.

- [MIL 89] MILLER P. C. H., HADFIELD D. J., « A simulation model of the spray drift from hydraulic nozzles », *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 42, n° 2, 1989, p. 135-147.
- [RAU 01] RAUPACH M. R., BRIGGS P., AHMAD N., EDGE V. E., « Endosulfan transport II : Modeling airborne dispersal and deposition by spray and vapor », *Journal of Environmental Quality*, vol. 30, 2001, p. 729-740.
- [REI 92] REICHARD D. L., ZHU H., FOX R. D., BRAZEE R. D., « Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift », *Transactions of the ASAE*, vol. 35, n° 3, 1992, p. 755-758.
- [SIN 94] SINFORT C., MIRALLES A., SEVILA F., MANIERE G., « Study and development of a test method for spray boom suspensions », *Journal of agricultural engineering research*, vol. 59, 1994, p. 245-252.
- [SIN 03] SINFORT C., VALLET A., « Modélisation de la dispersion des pesticides pendant les applications », *Ingénieries EAT-N° spécial*, vol. Spécial Technologies pour les agrosystèmes durables, 2003, p. pp. 85-94.
- [TES 01] TESKE M. E., VALCORE D. L., HEWITT A., « An analytical ground sprayer model », *ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE*, vol. Paper Number : 01-1051, 2001.
- [TES 02] TESKE M. E., BIRD S. L., ESTERLY D. M., CURBISHLEY T. B., REY S. L., PERRY S. G., « AgDRIFT : a model for estimating near-field spray drift from aerial applications », *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 21, n° 3, 2002, p. 659-671.
- [THI 00] THISTLE H., « The role of stability in fine pesticide droplet dispersion in the atmosphere : a review of physical concepts », *Transactions of the ASAE*, vol. 46, 2000, p. 1409-1413.
- [THO 83] THOMPSON N., LEY A. J., « Estimating spray drift using a random-walk model of evaporating drops », *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 28, n° 5, 1983, p. 419-435.
- [WAL 92] WALKLATE P., « A simulation study of pesticide drift from an air-assisted orchard sprayer chemical application group », *J. agric. Engng Res.*, vol. Vol. 51, 1992, p. pp. 263-283.
- [WIL 74] WILLIAMSON R. E., THREADGILL E. D., « A simulation for the dynamics of evaporating spray droplets in agricultural spraying », *Transactions of the ASAE*, vol. 17, 1974, p. 254-261.