

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.

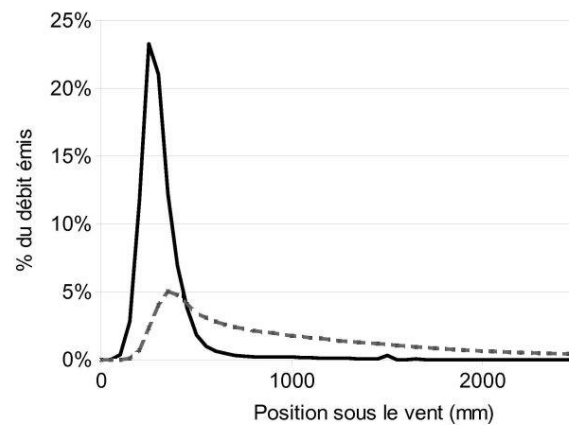


FIGURE 7.1 – Répartitions observées en soufflerie pour un jet de buse à fente perpendiculaire au vent pour les configurations D+ (courbe discontinue) et D- (courbe continue).

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 2008 ¹.

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 :

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

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 :

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

α_e est défini par :

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

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 :

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

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

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

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 lmn^{-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 déport 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 ($2,1 \text{ m.s}^{-1}$).

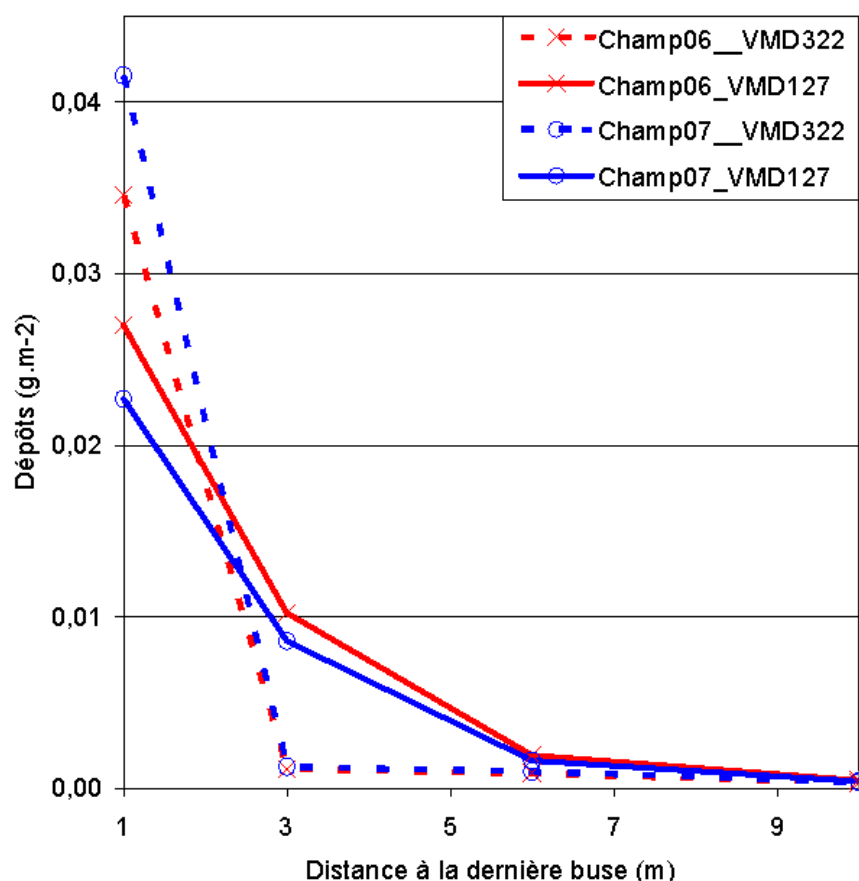


FIGURE 7.2 – Dépôts mesurés au champ pour deux VMD (127 et $322 \mu\text{m}$) sous différentes conditions météorologiques et rampe parallèle au vent : campagnes 2006 et 2007.

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

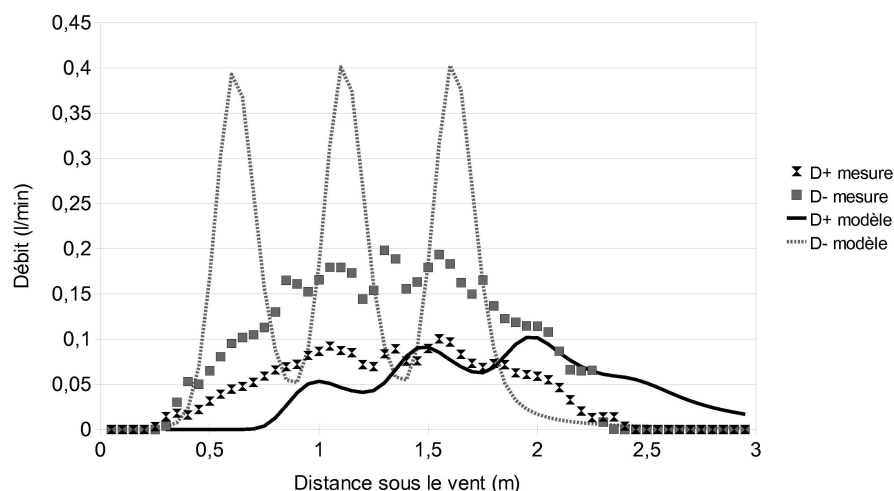


FIGURE 7.3 – Comparaison des résultats de DriftL aux répartitions observées en soufflerie pour une rampe de 3 buses et un vent latéral avec les configurations D+ et D-.

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

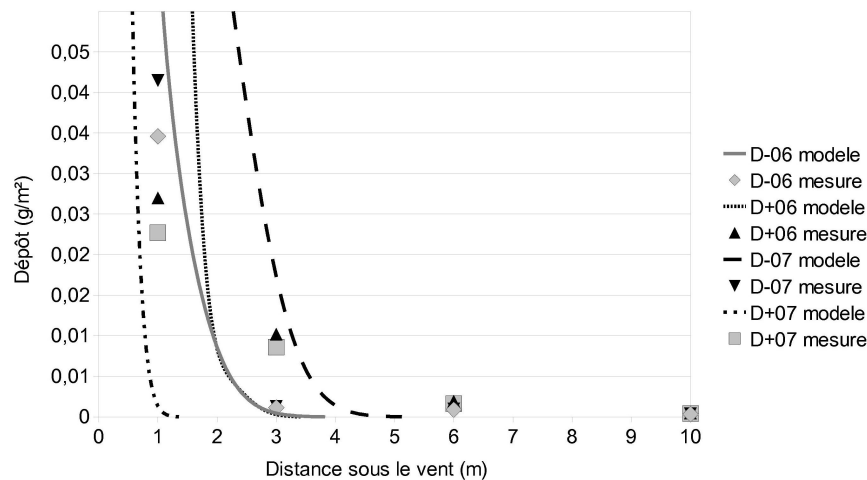


FIGURE 7.4 – Comparaison des résultats du modèle aux répartitions mesurées au champ pour les pulvérisations à VMD127 et 322 μm .

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

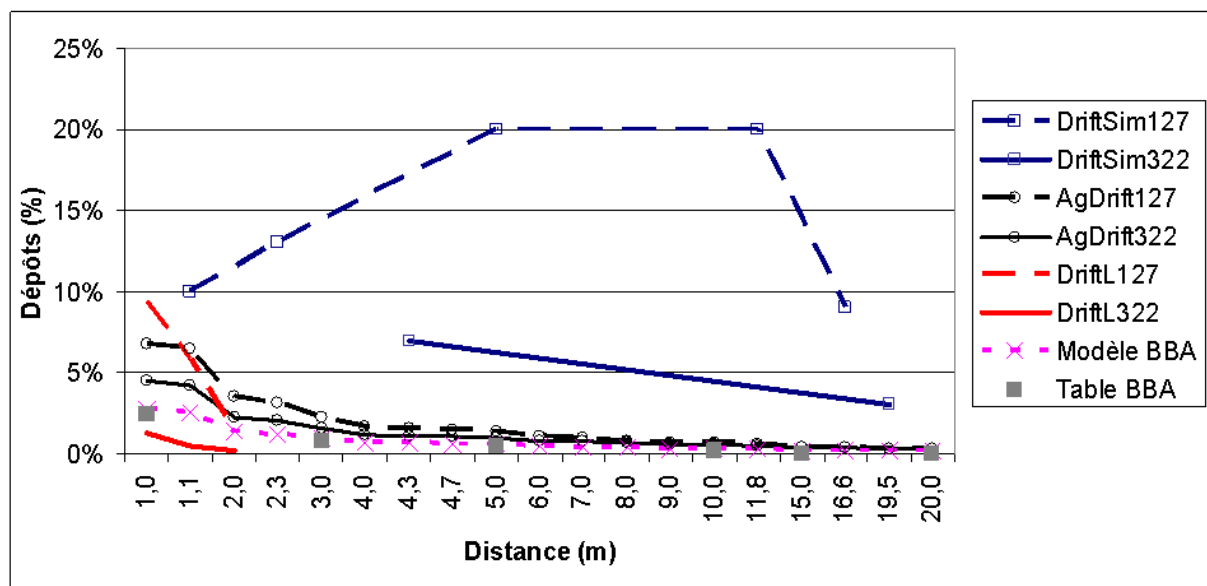


FIGURE 7.5 – Comparaison des résultats des modèles de dérive *DriftSim*, *AgDrift* et du groupe *FOCUS* aux valeurs estimées par les *tables de la BBA* à différentes distances, en % du débit initial.

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

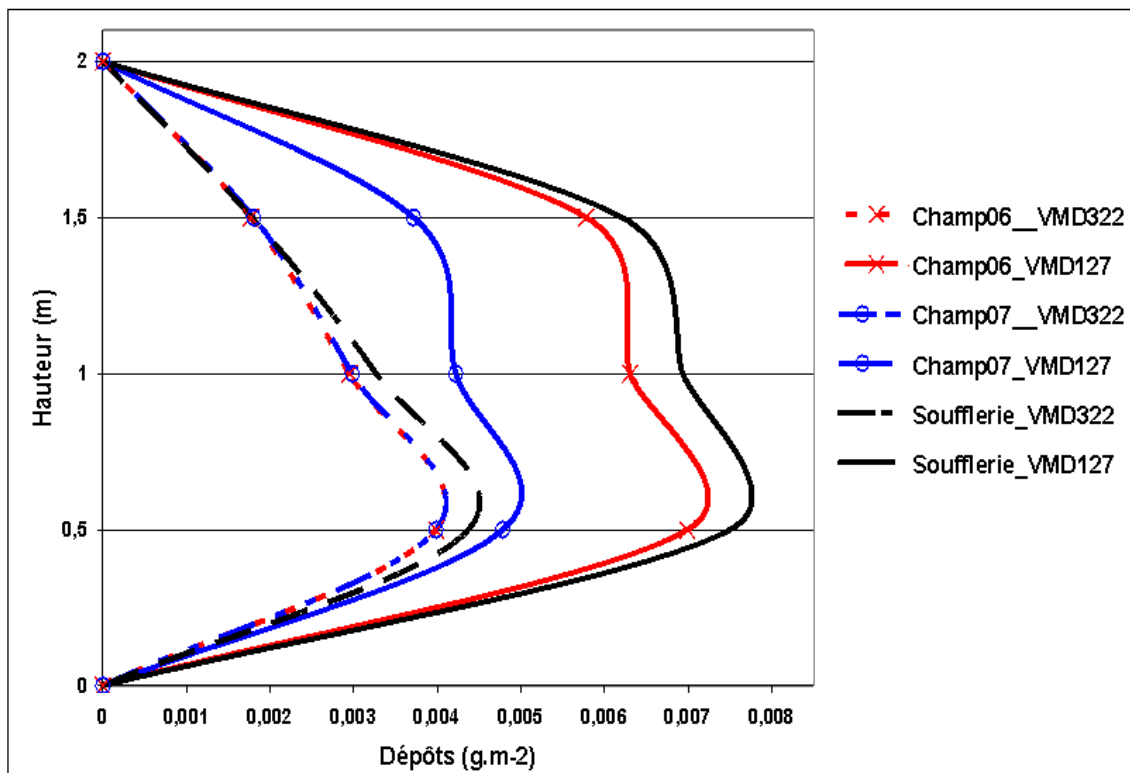


FIGURE 7.6 – Comparaison entre les émissions vers l'air mesurées au champ (campagnes 2006 et 2007) et en soufflerie pour deux VMD (127 et 322 μm), avec la rampe parallèle au vent.

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 $D_{ss} - D_{sm}$	Calculée par DriftL
	D_{ss}	D_{sm}		
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 Carlier, 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. Entrainement 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 ; Gyldenkerne *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.

Brazee *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).

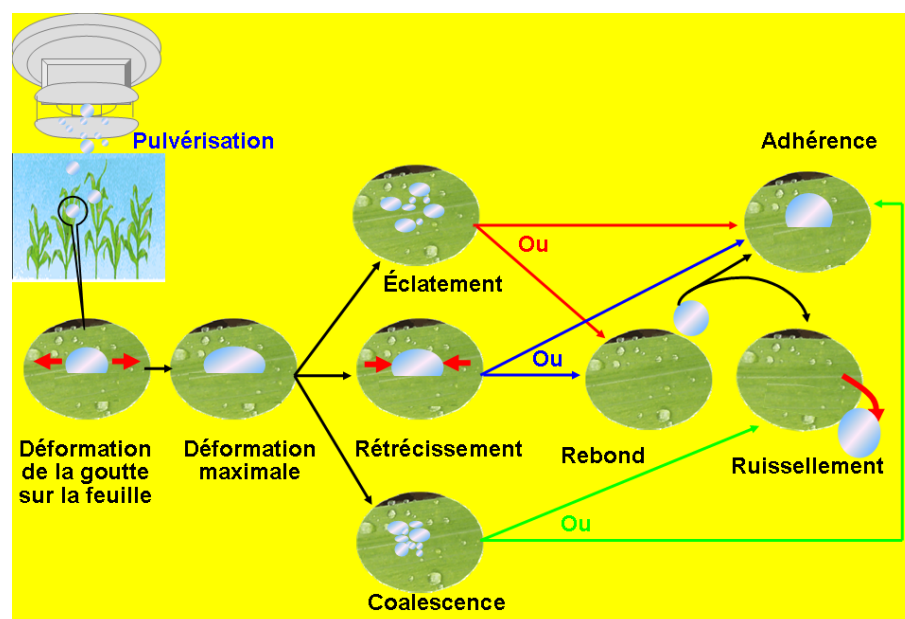


FIGURE 8.1 – Schéma de déformation d'une gouttelette montrant les scénarios possibles.

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.

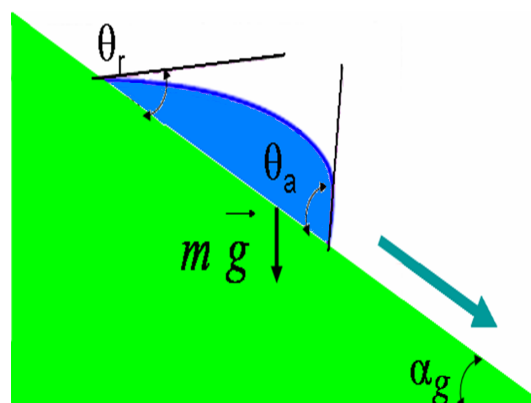


FIGURE 8.2 – Phénomène de glissement d'une gouttelette sur une surface inclinée, montrant les angles de contact, avant, (θ_a) et arrière, (θ_r) ainsi que l'angle de glissement, (α_g).

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 (m²),
- 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.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 (m² de feuilles .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, (Gyldenkerne *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 m² de surface de feuilles par m² 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 μ m, 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 μ m.

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 μm) et de 12,75 pour des gouttelettes plus petites (au voisinage de 650 μm).

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 : $D_s/D = \exp(-K_R \times LAI)$.