



Couplage entre recherche expérimentale et modélisation pour l'optimisation des procédés de pulvérisation agricole

Carole Sinfort

► To cite this version:

Carole Sinfort. Couplage entre recherche expérimentale et modélisation pour l'optimisation des procédés de pulvérisation agricole. Génie des procédés. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2006. tel-00105765v2

HAL Id: tel-00105765

<https://theses.hal.science/tel-00105765v2>

Submitted on 12 Oct 2006

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.

ACADÉMIE DE MONTPELLIER
Université de Montpellier II

Mémoire d'Habilitation à Diriger des
Recherches

Section 62
Energétique et Génie des Procédés

présenté par

Carole SINFORT

*Couplage entre recherche expérimentale et
modélisation pour l'optimisation des procédés de
pulvérisation agricole*

Jury proposé

Marie-France DESTAIN	Professeur, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux	Rapporteur
Denis FLICK	Professeur, INA Paris-Grignon,	Rapporteur
Henri WORTHAM	Professeur, Université de Provence	Rapporteur
Yves BRUNET	Directeur de Recherche, INRA Bordeaux	Examineur
Alain GRASMICK	Professeur, Université de Montpellier II	Examineur
Francis SEVILA	Professeur, ENSA de Toulouse	Examineur

Remerciements

Le travail que je présente ici m'a fourni l'opportunité de rencontrer une multitude de collaborateurs, de collègues. Tous m'ont apporté, de l'aide, des conseils, des encouragements, des compétences, de la complicité, du soutien matériel, des connaissances... La liste des noms et de l'objet de mes reconnaissances serait bien trop longue à dresser pour figurer ici de manière exhaustive. Bien consciente de faire d'importants oublis, je tiens cependant à exprimer ce qui suit :

Je veux d'abord remercier « mes » thésards. Pour leurs idées, pour nos échanges, pour leur énergie et bien sûr pour leur travail. Sans eux, ce document n'aurait jamais vu le jour.

J'ai une dette immense envers tous ceux qui m'ont aidée à mes débuts, qui m'ont formée, qui m'ont transféré de leur expérience. André Miralles et Bernard Bonicelli en tout premier lieu, ils furent mes maîtres de stage et accompagnèrent ma thèse. Avec Paul Goffre, dont je garde un souvenir ému, ils m'ont fait découvrir le milieu des traitements phytosanitaires. Beaucoup de connaissances sur la filière m'ont plus tard été apportées par Vincent Polvêche dont le réseau professionnel paraît ne pas avoir de limites.

Merci à tous ceux qui m'ont accompagnée sur le terrain, qui ont été de tous les essais, de toutes les « galères » et en particulier Gérard Alvarez, Pierre Maniaci, Paul Oullier, Xavier Ribeyrolles, Daniel Virgile.

Je n'aurais pu mener à bien cette rédaction sans la complicité et le soutien de l'Unité de Génie Rural de l'Agro. Merci à mes collègues enseignants, Bruno Tisseyre et Gilles Belaud, pour tout ce que nous avons conçu ensemble, pour m'avoir déchargée d'une partie de mon travail, pour leur solidarité et leurs avis éclairés. Merci à Catherine, Flo, Helene, pour contribuer à faire de notre Unité un lieu où il fait bon vivre. A tous, merci d'exister !

L'équipe « Pulvérisation » du Cemagref est le berceau de mes recherches et ce lien a été consolidé par la création de l'UMR ITAP. Merci donc à tous ceux qui y participent, qui m'accueillent et qui collaborent à mon travail, notamment Bernadette Ruelle qui a pris la responsabilité de l'équipe et qui nous fait bénéficier de sa capacité à monter des projets d'envergure s'appuyant sur un riche partenariat local, ainsi qu'Ariane Vallet et ses inestimables conseils en mécanique des fluides.

Plusieurs partenaires scientifiques extérieurs, Yves Brunet, Serge Huberson, Bijan Mohammadi, ont accepté de co-diriger les thèses qui sont décrites dans ce mémoire : ce travail leur doit beaucoup. Je remercie aussi vivement Marie-France Destain, Denis Flick, Alain Grasmick et Henri Wortham pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux en acceptant d'en être rapporteurs.

Je me dois bien sûr d'afficher ma plus grande reconnaissance aux responsables qui m'ont apporté leur confiance, qui m'ont prêté leur écoute, qui m'ont conseillée et qui ont bien voulu mettre en œuvre les moyens nécessaires à l'aboutissement de cette démarche : Georges Manière, au début de ma carrière, Véronique Bellon-Maurel maintenant, et bien sûr Francis Sévila qui, après avoir dirigé ma thèse et encouragé la plupart de mes recherches, m'a, le premier, persuadée de me lancer dans l'aventure de l'habilitation.

Enfin, un dernier clin d'œil sera pour mes proches et ma famille, pour leur soutien et même leur contribution à ce travail (merci maman pour les fautes de français !)

Table des matières

1	Construction de la démarche	8
1.1	Positionnement de la thématique	8
1.2	L'étude de la stabilité des rampes : une illustration de la démarche de recherche	10
1.2.1	Approche proposée pour simuler les répartitions	11
1.2.2	Etude expérimentale pour l'analyse des comportements	12
1.2.3	Principes retenus pour le modèle	12
1.2.4	Développement du modèle	13
1.2.5	Étapes de validation	13
1.2.6	Développement d'une méthode d'essai et transfert	15
1.2.7	Conclusion pour l'élaboration d'une méthodologie	15
1.3	Identification des thèmes de recherche développés et enjeux scientifiques	16
2	Pénétration dans la végétation	19
2.1	Présentation de la démarche	19
2.2	Analyse expérimentale	20
2.2.1	Essais au champ	20
2.2.2	Essais sur végétation artificielle	20
2.2.3	Choix pour la modélisation	21
2.3	Modélisation du flux d'air	22
2.3.1	Principe	22
2.3.2	Représentation retenue	23
2.3.3	Résultats	23
2.4	Modélisation du transport de la pulvérisation	24
2.4.1	Modèle aux concentrations	24
2.4.2	Modèle Lagrangien	26
2.5	Modélisation des dépôts	28
2.5.1	Utilisation d'un coefficient d'efficacité	28
2.5.2	Détermination du coefficient d'efficacité	28
2.6	Résultats du modèle	32
2.7	Conclusion	33
3	Contamination atmosphérique	35
3.1	Présentation de la démarche	35
3.2	Quantification des émissions	36
3.2.1	Evaluation des collecteurs	36
3.2.2	Mise en place de la méthode d'essai	36
3.2.3	Profils de dérive verticale	38
3.2.4	Effet des conditions ambiantes	39
3.3	Modèle mécaniste	39
3.4	Développements en cours	41
3.4.1	Estimation des pertes	41
3.4.2	Dispersion atmosphérique	42

4 Conclusion	43
4.1 Le couplage modèle-expérimentation : une complémentarité indispensable	43
4.2 L'utilisation de la modélisation pour l'étude de l'application des produits phyto-sanitaires	44
4.3 Objectifs atteints et perspectives	45
4.3.1 Bilan des avancées scientifiques	45
4.3.2 Points à approfondir et perspectives	46
Bibliographie	48

Préambule

Ce mémoire décrit mes activités de recherche, développées au Cemagref depuis bientôt vingt ans, sur la thématique des applications de traitements phytosanitaires. La première partie décrit les enjeux et justifie les orientations thématiques ainsi que l'approche méthodologique. Les deux parties suivantes détaillent mes travaux de recherche actuels, l'une sur l'étude de la pénétration de la pulvérisation dans la végétation et l'autre sur la contamination atmosphérique par les produits phytosanitaires pendant les applications.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il me paraît nécessaire de lever une ambiguïté qui pourrait surgir à la lecture du titre de ce mémoire : si le terme « approche expérimentale » est sûrement à peu près clair (je veux désigner par là l'étude d'un phénomène à partir d'observations réalisées à l'aide d'un protocole conçu à cet effet), il n'en va pas du tout de même du terme « modélisation ». Modéliser un phénomène, c'est le représenter par un schéma théorique qui met en évidence les relations entre les différents éléments du système qui le constitue. Cela ne présage en rien de la méthode utilisée et d'ailleurs, l'approche expérimentale a le plus souvent pour objectif de réaliser une modélisation. Pour aller plus loin on peut s'interroger sur ce que représente un modèle réduit : un outil d'approche expérimentale ou un modèle ? Dans mon titre, il faut comprendre « modélisation numérique », ce qui signifie qu'il s'agit du développement de logiciels ou de l'utilisation de plateformes de calcul pour approcher le fonctionnement des phénomènes étudiés à partir de relations mathématiques. Il est très difficile de s'appuyer sur une classification des modèles : leur utilisation est si vaste que, dans le meilleur des cas, les vocables utilisés n'ont de sens que dans un contexte, une thématique bien particulière. Par exemple, pour certains, un modèle physique est un modèle numérique construit à partir de lois physiques quand, pour d'autres, cette expression désigne un modèle réduit. Disons simplement que les modèles que je vais décrire s'appuient les uns sur des lois et des théories de la physique et les autres sur des résultats d'analyse statistique.

*« Tout ce qui est simple est faux,
mais tout ce qui ne l'est pas est inutilisable. »*

Paul Valéry

Nomenclature

Les vecteurs sont représentés en gras

La notation des équations en 3D suit la convention d'Einstein

A	densité surfacique de la canopée	$[\text{m}^2.\text{m}^{-3}]$
c_l	concentration de produit affectée à la trajectoire moyenne l	$[\text{kg}.\text{m}^{-3}]$
C	concentration de matière pulvérisée dans l'air	$[\text{kg}.\text{m}^{-3}]$
C_d	coefficient de traînée global de la végétation	$[]$
C_{ds}	coefficient de traînée d'une goutte	$[]$
C_{ef}	coefficient d'efficacité	$[]$
C_s	concentration de matière pulvérisée dans l'air au niveau de référence	$[\text{kg}.\text{m}^{-3}]$
C_μ	constante	$[]$
d_c	taille caractéristique d'un obstacle	$[\text{m}]$
D	diamètre de la goutte	$[\text{m}]$
D_l	coefficient de diffusion moléculaire du produit	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
D_T	diffusion turbulente	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
Dep	dépôt	$[\text{m}^3.\text{s}^{-1}]$
Dep_i	quantité de produit déposée dans le VER i	$[\text{kg}]$
E_{imp}	coefficient d'impact	$[]$
$\mathbf{F}_{ts}$	force massique de traînée sur une sphère	$[\text{N}.\text{kg}^{-1}]$
F_{tv}	force volumique de traînée globale	$[\text{N}.\text{m}^{-3}]$
Fr	Nombre de Froude	$[]$
I	intensité turbulente	$[]$
K	énergie cinétique turbulente (par unité de masse)	$[\text{m}^2.\text{s}^{-2}]$
M_i	masse de produit entrant dans le VER i	$[\text{kg}]$
$\mathbf{n}$	vecteur unité normal à la section d'entrée d'un VER	$[]$
N	nombre de feuilles	$[]$
Pr_l	nombre de Prandtl du produit pulvérisé	$[]$
Re_d	nombre de Reynolds particulaire	$[]$
S	surface	$[\text{m}^2]$
S_C, S_k, S_ε	termes source dans les équations de bilan	
St	Nombre de Stokes	$[]$
t	temps	$[\text{s}]$
T'	fluctuation de la température autour de la valeur moyenne	$[\text{K}]$
T_s	température absolue au niveau de référence	$[\text{K}]$
u	composante horizontale de la vitesse du vent	$[\text{m}.\text{s}^{-1}]$
u'	fluctuation de u autour de sa valeur moyenne	$[\text{m}.\text{s}^{-1}]$
$\mathbf{u}$	vecteur vitesse pour l'air	$[\text{m}.\text{s}^{-1}]$
u_i	$i^{\text{ème}}$ composante du vecteur vitesse pour l'air	$[\text{m}.\text{s}^{-1}]$
u^*	vitesse de friction	$[\text{m}.\text{s}^{-1}]$

U	vitesse moyenne du flux d'air	$[\text{m.s}^{-1}]$
v	composante horizontale de la vitesse du vent	$[\text{m.s}^{-1}]$
v'	fluctuation de v autour de sa valeur moyenne	$[\text{m.s}^{-1}]$
$\mathbf{v}$	vecteur vitesse pour une goutte	$[\text{m.s}^{-1}]$
V_{frac}	fraction d'un nuage de gouttes entrant dans un VER	$[]$
V_s	vitesse de sédimentation d'une particule	$[\text{m.s}^{-1}]$
w	composante verticale de la vitesse du vent	$[\text{m.s}^{-1}]$
w'	fluctuation de w autour de sa valeur moyenne	$[\text{m.s}^{-1}]$
x_0	position à l'entrée de la végétation	$[\text{m}]$
$\mathbf{x}$	vecteur position	$[\text{m}]$
x_i	$i^{\text{ème}}$ composante du vecteur position	$[\text{m}]$
z	altitude	$[\text{m}]$
z_s	altitude de référence	$[\text{m}]$

Lettres grecques

α_c	coefficient de correction pour la dispersion du nuage de gouttes	$[]$
$\beta, \beta_1, \beta_2, \beta_3$	coefficients	$[\text{m}^{-1}]$
β_p, β_d	coefficients	$[]$
χ_l	vecteur position de la particule lagrangienne l	$[\text{m}]$
ε	taux de dissipation turbulente	$[\text{m}^2.\text{s}^{-3}]$
Γ_l	coefficient de diffusion global du produit pulvérisé	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
κ	constante de von Kármán	$[]$
ρ_a	masse volumique de l'air	$[\text{kg.m}^{-3}]$
ρ_l	masse volumique du liquide de la goutte	$[\text{kg.m}^{-3}]$
σ	variance	$[\text{m}]$
σ_T	nombre de Prandtl turbulent	$[]$
τ_a	temps de relaxation de l'air	$[\text{s}]$
τ_d	temps de relaxation d'une goutte	$[\text{s}]$
ν_a	viscosité cinématique de l'air	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$
ν_t	viscosité turbulente	$[\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$

Indices

i, j, k	$i^{\text{ème}}$ (respectivement $j^{\text{ème}}$, $k^{\text{ème}}$) composante d'une entité donnée
-----------	--

Chapitre 1

Construction de la démarche

Au cours des deux dernières décennies, le contexte des applications de traitements phytosanitaires a fortement évolué et les objectifs de mes travaux de recherche ont suivi cette évolution. Ainsi, il m'a d'abord paru important de resituer les principaux enjeux de cette opération agricole. J'ai ensuite choisi de résumer, dans cette partie de présentation, une première approche qui a été menée pendant la première moitié de ma carrière et qui m'a permis de mettre en place les principales directions méthodologiques de mon travail. Je discuterai finalement des éléments qui ont conduit à l'identification de mes deux principales thématiques de recherche.

1.1 Positionnement de la thématique

Les traitements phytosanitaires se sont développés rapidement à partir de la fin de la seconde guerre mondiale. Dans le contexte d'une recherche d'autosuffisance alimentaire, la France, comme de nombreux autres pays industrialisés, a cherché à augmenter les rendements des cultures et à diminuer les risques liés aux aléas climatiques ou aux attaques de parasites. Le secteur de l'agrochimie s'est ainsi rapidement développé et a mis en place d'importants moyens de recherche et de développement. Les molécules proposées pour les traitements se sont ainsi rapidement multipliées et diversifiées. Actuellement, 100 000 tonnes de produits phytosanitaires sont consommées tous les ans en France. Ces produits sont essentiellement des herbicides, des insecticides (et acaricides) ou des anti-fongiques.

Les techniques d'application doivent s'adapter d'une part aux cibles, qui peuvent être physiquement très différentes, et d'autre part aux modes d'action des molécules. Dans certains cas, le liquide doit pénétrer dans le sol (herbicides en pré-levée), d'autres fois il doit atteindre les feuilles et plus spécifiquement leur face intérieure (fongicides de contact) ou d'autres organes de la plante (fruits, épis), dans d'autres cas encore, ce sont des animaux mobiles (acariens, larves) ou fixes (œufs, formes enkystées) qui sont visés. Pour les produits systémiques, l'objectif du traitement est simplement d'obtenir une concentration efficace dans la plante car les molécules sont véhiculées par la sève ; c'est aussi le cas des produits destinés à être ingérés par des animaux mobiles. Dans les autres cas, les produits agissent par contact direct et il est alors nécessaire de réaliser une « barrière continue » visant à recouvrir de manière uniforme toutes les parties à traiter. Quelle que soit la molécule et son mode d'action, il faut aussi veiller à ce qu'elle n'atteigne pas des cibles pour lesquelles elle serait toxique ; ce point concerne la faune auxiliaire et de manière plus large l'écosystème dans lequel se développe la culture à protéger.

Différents types d'équipements ont ainsi été développés pour s'adapter à l'échelle du parcelaire, aux différentes cultures (cultures basses ou cultures arborescentes), aux différentes cibles (adventices, pathogènes, animaux) ou encore aux différents modes d'action des matières actives (produits systémiques ou de contact). On trouve ainsi une grande diversité de technologies et, pour une même machine, les différents réglages permettent de répondre aux différentes indications. Dans la majorité des cas, les traitements se font sous forme de pulvérisations. La matière

active est en général mise en suspension dans de l'eau contenue dans une cuve de taille variable (de quelques centaines de litres jusqu'à 2000 litres ou plus) pour former ce qu'il est commun d'appeler une « bouillie ». Cette bouillie est pulvérisée en gouttes d'un diamètre variant de quelques microns à quelques millimètres. Le transport de ces gouttes jusqu'à la cible est réalisé le plus souvent grâce à l'énergie cinétique communiquée aux gouttes lors du procédé de pulvérisation. Pour certaines cultures, telle l'arboriculture, la vigne ou d'autres cultures à port érigé, un flux d'air vient assister le transport des gouttes et favorise la pénétration de la pulvérisation dans le feuillage. Pour des traitements de contact, on cherche à obtenir une pulvérisation la plus fine possible car l'efficacité dépend du nombre d'impacts et car les grosses gouttes, trop lourdes, ont tendance à ruisseler sans rester sur la cible. Au contraire, pour limiter les risques de dérive, il est nécessaire que les gouttes aient une masse suffisante pour ne pas être transportées par le moindre flux d'air ni évaporées avant d'atteindre les cibles.

Les quantités de bouillie pulvérisées sont en constante diminution : de plus de 1000 l/ha après-guerre, elles sont de nos jours de l'ordre de 100 l/ha pour les cultures basses, 200 à 400 l/ha pour les cultures arborescentes. Parallèlement, on observe dans certains cas des concentrations très faibles en matière active : des produits tels que certains inhibiteurs de la bio-synthèse des stérols¹ s'appliquent à des doses de l'ordre de 10 g/ha. Les bouillies sont ainsi de plus en plus actives et donc, dans certains cas, dangereuses ; le besoin de précision dans l'application n'en est que plus accru.

La maîtrise d'une application précise est difficile du fait des conditions qui sont celles d'un travail agricole : le véhicule se déplace sur un terrain qui n'est pas plat ce qui entraîne des sollicitations mécaniques variables et modifie le référentiel géométrique, la culture évolue au cours de la saison (géométrie, densité) et enfin les conditions climatiques sont extrêmement fluctuantes. Parmi ces dernières, le vent, la température, l'hygrométrie et la stabilité atmosphérique constituent des facteurs déterminants par rapport aux pertes de produit dans l'atmosphère. Faute de disposer de méthodes d'applications suffisamment précises, l'agriculteur se trouve souvent face à un compromis entre efficacité du traitement sur la parcelle et respect de l'environnement. Un raisonnement optimal de l'application requiert ainsi une bonne expertise (quelles molécules appliquer et à quel moment) et une grande technicité. Dans la pratique, l'agriculteur, confronté à des impératifs tels que la planification des travaux agricoles, la gestion du risque et la maximisation du revenu, privilégie souvent des modes d'application garantissant la sauvegarde de la production.

Depuis une vingtaine d'années, la nécessité de maîtriser les coûts de production dans un contexte de concurrence accrue des échanges à l'échelle mondiale ainsi que la nécessité de réduire les pollutions environnementales et de promouvoir un développement durable ont fait évoluer la thématique dans un contexte plus large. La problématique générale s'est ainsi progressivement déportée de la recherche d'une efficacité maximale au niveau de la seule culture vers des enjeux de sécurité. Cette sécurité concerne en premier lieu les applicateurs, puis les riverains et enfin les populations ainsi que tout l'écosystème concerné par les problèmes de pollution de l'eau et de l'air.

Cette évolution s'est ressentie dans les objectifs de tous les organismes de recherche du secteur agricole et en particulier du Cemagref qui est devenu « l'institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement ». Son plan stratégique indique qu'il mène des actions de recherche finalisée sur la gestion des eaux et des territoires, orientées vers la production de connaissances nouvelles et d'innovations techniques utilisées par les gestionnaires, les décideurs et les entreprises (Cemagref, 2004). Dans le cadre des applications de produits phytosanitaires, il est précisé que le rôle du Cemagref est d'apporter des solutions pour **améliorer les procédés** et gérer leur utilisation d'une manière compatible avec le concept d'agriculture durable mais aussi de **fournir des outils de quantification des pollutions diffuses** pour la prévision de leur répartition temporelle et spatiale. Les thématiques de recherche qui sont décrites dans ce mé-

¹IBS : produits fongicides.

moire s'intègrent dans ces objectifs. Les problèmes « périphériques » à l'application (remplissage, gestion des fonds de cuve, rinçage et nettoyage) bien que sûrement responsables des pollutions les plus importantes ne seront cependant pas considérés dans ce travail : ils relèvent en effet surtout d'actions de formation et d'information pour l'adaptation des pratiques, voire de réglementation.

Les recherches du Cemagref sont très étroitement liées à l'évolution de la demande sociale. Ainsi, au début de ma carrière dans cet institut, à la fin des années 80, la principale préoccupation était centrée sur l'efficacité des traitements et l'optimisation des pulvérisateurs. En liaison avec les besoins des industriels, d'importants moyens avaient alors été développés pour étudier les pulvérisateurs pour les grandes cultures. Ces pulvérisateurs sont équipés de rampes de longueur variable (en général entre 12 et 36m) et les conditions de travail de la machine en terrain agricole entraînent des sollicitations physiques importantes induisant fatigue mécanique et instabilité de ces rampes. Mon travail de recherche avait alors consisté à développer une méthode d'essai pour évaluer ces comportements. Je vais ici résumer les principales étapes de cette étude afin d'en dégager une démarche méthodologique. C'est en effet cette démarche générique qui est reproduite pour chaque nouvelle thématique abordée.

1.2 L'étude de la stabilité des rampes : une illustration de la démarche de recherche

Cette thématique a été développée au cours de ma thèse (Sinfort, 1991)[1988–1991] puis de celle d'Yvan Lardoux (Lardoux, 2002)[1995–1998]. La plupart des travaux ont également fait l'objet d'un programme Européen de recherche, le projet SPECS « European system for field sprayer inspection at the farm level » (SPECS, 1998)[1994–1998].

Au départ, la demande émanait des industriels français qui désiraient améliorer le comportement mécanique de leur rampe par rapport à des problèmes d'usure accélérée et de rupture. Cette demande avait conduit à la création d'un groupe de travail au sein de l'ISO (International Standard Organization)² qui avait pour objectif de définir une méthode d'essai normalisée au niveau international pour l'évaluation de la stabilité des rampes. Désignée animatrice de ce groupe, j'ai commencé à étudier différentes méthodes pour la caractérisation dynamique des structures (Sinfort, 1987). Lorsque j'ai exposé mes propositions aux experts du groupe de travail international, il m'est apparu que le besoin pouvait être élargi à l'étude de l'uniformité de la répartition au sol : c'est en effet l'objectif majeur pour un traitement de qualité et il passe nécessairement par le maintien de la stabilité de la rampe. Il s'avérait ainsi fortement intéressant d'évaluer le comportement des pulvérisateurs sous cet angle et de définir une méthode d'essai pouvant être utilisée dans tous les pays sans requérir des moyens trop sophistiqués.

L'étude mécanique avait été envisagée de manière purement expérimentale, à partir d'un simulateur de pistes générant des sollicitations sous les roues du tracteur, de mesures accélérométriques et de techniques d'analyse modale. Elle avait permis de caractériser les mouvements des rampes en fonction des différentes sollicitations et des composantes de la machine. L'étude de la relation entre les mouvements de la rampe et l'uniformité de la distribution était trop complexe et faisait intervenir trop de variables pour pouvoir envisager une méthode d'essai de qualité (sensible, répétable, fiable, robuste). C'est ainsi qu'il a été proposé de travailler à l'élaboration d'un modèle de répartition qui pourrait directement traduire le comportement d'une rampe dans des conditions données en terme d'efficacité de traitement. L'évaluation du comportement de la rampe se ferait ainsi en deux étapes : évaluation des mouvements dans des conditions normalisées puis simulation de la répartition.

²TC23/SC6/WG3 : boom steadiness.

1.2.1 Approche proposée pour simuler les répartitions

Même en ne considérant que le cas des sols nus, la répartition de produit sanitaire sous un pulvérisateur à rampes est un processus complexe. A priori, on peut considérer que les phénomènes suivants interviennent :

- **système mécanique** : les irrégularités du sol sont transmises au tracteur par l'intermédiaire des pneus puis à la rampe et donc aux buses par l'intermédiaire du châssis et du système de suspension. Les variables sont la nature du sol (rugosité, compressibilité), les pneus (sculptures, dimension, pression de gonflage), la vitesse d'avancement, la structure dynamique³ du châssis, la localisation de la cuve sur l'appareil et son taux de remplissage, la structure dynamique du système de suspension, celle de la rampe et de ses articulations.
- **système hydraulique** : le produit contenu dans la cuve est amené sous pression aux buses où il est pulvérisé. Ici les variables sont la nature rhéologique du produit, la pression à la sortie de la pompe, les pertes de charge dans le circuit, la nature et le calibre des buses. La fragmentation au niveau de la buse représente à elle seule un phénomène physique de grande complexité.
- **transport des gouttes** : le produit pulvérisé se dissipe dans l'air. Les trajectoires des gouttes dépendent de la hauteur et de l'angle d'émission par rapport au sol (qui n'est toujours pas plat), de leur énergie cinétique à la sortie de la buse, de leurs interactions et des conditions extérieures (vent réel et vent apparent, température, hygrométrie). Pendant leur trajet, elles sont susceptibles de s'évaporer.
- **impact** : les gouttes qui touchent le sol peuvent encore rebondir et/ou se fractionner.

En premier temps, j'ai défini les limites du modèle grâce à une analyse des fonctionnalités attendues. Ici, il s'agissait de réaliser des simulations dans des conditions normalisées pour évaluer les systèmes de suspension de rampes. Le comportement mécanique n'était pas intégré : le rôle du modèle était seulement de prévoir la répartition au sol en fonction des mouvements de la rampe. A ce niveau, j'ai proposé deux simplifications majeures : j'ai supposé que la rampe était rigide et que, du point de vue de la répartition, le sol était plat. La première simplification est justifiée car on ne voulait évaluer que les systèmes de suspension des rampes et non leur rigidité. La deuxième simplification est liée aux objectifs du modèle : la qualité de la rampe ne dépend pas de l'interaction entre sol et pulvérisation. En d'autres termes, si la rampe bouge beaucoup, la répartition sera mauvaise quelle que soit la surface du sol. Il a par ailleurs été décidé de ne pas prendre en compte le système hydraulique ni le phénomène de fragmentation mais de travailler à partir de répartitions de buses mesurées sur un banc d'essai normalisé.

L'étape suivante visait à définir la représentation des phénomènes de transport entre les buses, déplacées par la rampe rigide, et un sol plat. Pour ce faire, il a été choisi d'observer ces comportements dans des conditions expérimentales maîtrisées. C'est ainsi qu'un dispositif de mesure des répartitions sous une rampe rigide en mouvement a été mis en place dans des conditions de laboratoire. L'étude s'est alors déroulée en 5 étapes :

1. une étude expérimentale générale pour identifier les comportements (1.2.2),
2. une étude expérimentale plus détaillée pour choisir les méthodes de calcul des répartitions (1.2.3),
3. le développement du modèle (1.2.4),
4. la validation expérimentale 1.2.5,
5. le développement de la méthode d'essai 1.2.6.

Les publications suivantes donnent le détail de ce travail : Lardoux *et al.* (2006a) pour la partie expérimentale, Sinfort *et al.* (1994) pour le développement du modèle, Lardoux *et al.* (2006b)

³la structure dynamique comprend la structure géométrique, la répartition des masses, des raideurs et des amortissements, le comportement des articulations.

pour sa validation et [Sinfort et Herbst \(1996\)](#) pour le développement de la méthode d'essai.

1.2.2 Etude expérimentale pour l'analyse des comportements

Le dispositif construit au Cemagref est constitué d'un convoyeur monté sur un rail. Le convoyeur est doté de vérins pneumatiques qui permettent de générer des mouvements de roulis (plan vertical) ou de lacet (plan horizontal). La mesure des répartitions sous la rampe a fait l'objet d'une étude bibliographique qui a débouché sur le choix d'une méthode d'analyse d'image : les buses pulvérisent de l'encre noire et le sol est recouvert de bandes de papier qui sont ensuite analysées par sections carrées de 5cm de côté. La dimension de 5cm correspond à la définition des mesures normalisées de répartition. C'est à la fois une précision importante par rapport à l'échelle du processus (pulvérisation d'un champ pouvant faire plusieurs hectares) et une dimension facile à manipuler pour la prise d'images. Les quantités d'encre pulvérisées sont corrélées au niveau de gris de l'image numérisée. La figure 1.1 montre le dispositif expérimental.

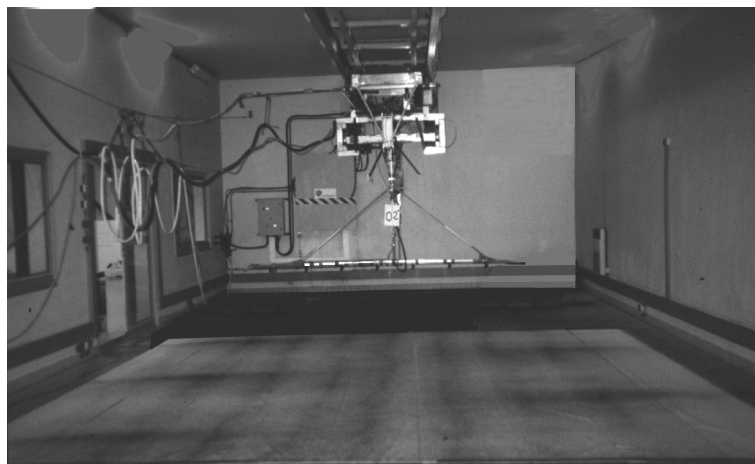


FIG. 1.1 – Dispositif de mesure des répartitions sous une rampe en mouvement

Les premiers essais visaient à mettre en évidence l'influence des phénomènes perturbant la répartition individuelle des buses pendant une translation simple. A priori, deux phénomènes pouvaient intervenir : l'interaction entre les jets et les effets de déport liés au vent apparent. On a donc comparé les répartitions mesurées sous la rampe en translation avec des répartitions théoriques, calculées à partir des mesures des répartitions individuelles des buses. Des outils de comparaison des répartitions ont été proposés à partir de méthodes statistiques pour les données bi-dimensionnelles et de méthodes d'analyse d'images. Il s'est finalement avéré que les répartitions étaient suffisamment similaires pour négliger ces effets perturbateurs.

Dans un deuxième temps, l'influence des mouvements découplés de roulis (oscillations dans le plan vertical) et de lacet (oscillations dans le plan horizontal) a été analysée. Là encore les résultats obtenus ne montrent d'influence de phénomènes perturbateurs : pour les mouvements de roulis, les sur-dosages s'observent dans les zones où la rampe se rapproche du sol, pour les mouvements de lacet, ils se situent dans les zones au-dessus desquelles la vitesse des buses diminue. On en a donc conclu que les facteurs géométriques jouaient un rôle déterminant pour caractériser les répartitions des produits pulvérisés au sol. Pour confirmer ce point les répartitions au sol ont été analysées par des transformées de Fourier et les résultats ont confirmé que les fréquences des mouvements se retrouvaient parfaitement.

1.2.3 Principes retenus pour le modèle

Le choix a été fait de développer un modèle « géométrique », calculant les distributions à partir des répartitions individuelles des buses en considérant leurs variations en fonction de leur

hauteur et de l'angle de leur axe d'éjection par rapport au sol. Pour cela, des essais systématiques ont été réalisés sur un banc de répartition⁴. La répartition d'une buse à une hauteur donnée pourrait être grossièrement modélisée sur la base d'une fonction de distribution de loi normale. Néanmoins, les mesures de répartition sont très faciles à obtenir et, pour garder le maximum de détails, il a été choisi de garder des répartitions mesurées à différentes hauteurs, le calcul des répartitions à une hauteur quelconque pouvant se faire par interpolation. Ces essais ont également montré que l'angle de la buse dû au roulis se traduit par un déport de la répartition qui peut se déduire d'un calcul trigonométrique. On a ainsi choisi de baser le calcul sur des lois géométriques. Une approche analytique aurait présenté l'avantage de fournir les répartitions en n'importe quel point de la surface de sol étudiée mais ce niveau de précision n'a pas été jugé nécessaire pour les objectifs fixés.

1.2.4 Développement du modèle

Le modèle développé comporte deux types d'entrée :

- des répartitions de buses à plusieurs hauteurs (tous les 10 cm, par défaut)
- des positions de rampe, fonction du temps, définies par les hauteurs successives de la rampe et par les angles de roulis et de lacet. Le nombre de valeurs détermine la longueur de simulation.

La sortie est un tableau contenant les répartitions des volumes pulvérisés sur une surface divisée en cellules carrées de 5 cm de côté.

Le programme a été développé en langage C ; son principe est schématisé en figure 1.2. Le calcul se fait de manière itérative pour chaque position de rampe. A chaque itération, le calcul se déroule en deux temps :

1. en fonction de la hauteur et de l'angle de roulis de la rampe : calcul de la position et de l'angle de chaque buse, calcul de la répartition des débits sous chaque buse, calcul de la répartition des débits sous la rampe.
2. en fonction de la surface balayée par la rampe depuis l'itération précédente : incrémentation du dépôt dans chaque cellule carrée du sol. Ces dépôts sont obtenus en calculant la surface d'intersection entre une cellule du sol et le trapèze défini par deux positions successives d'un tronçon de rampe.

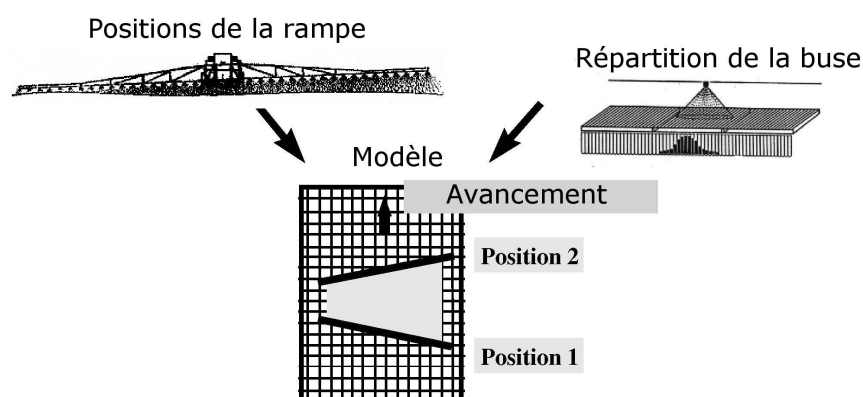


FIG. 1.2 – Schéma de principe du logiciel de calcul de la répartition

1.2.5 Étapes de validation

La validation du modèle s'est faite en deux étapes. Dans un premier temps les répartitions calculées ont été comparées aux résultats obtenus sous le convoyeur pour les mouvements de roulis

⁴Un tel banc est schématisé en haut à droite de la figure 1.2.

et de lacet. Dans la deuxième étape, le modèle a été validé pour des essais en conditions réelles, réalisés en conduisant le pulvérisateur sur un obstacle et sur une piste artificielle. Afin d'analyser les résultats, de nombreuses méthodes ont été envisagées (statistique, analyse d'image, analyse fréquentielle, ondelettes). Finalement l'homogénéité a été décrite par le coefficient de variation (CV) et les pourcentages de surface correctement dosée (dose attendue $\pm 15\%$), sur-dosée et sous-dosée. Pour comparer de manière plus détaillée les répartitions, un coefficient de corrélation a été défini à partir du produit scalaire de matrices normalisées.

Pour les mouvements isolés de roulis et de lacet, les répartitions mesurées et calculées montrent de grandes similitudes (cf. fig. 1.3) ; les coefficients de corrélation sont d'ailleurs tous supérieurs à 0,987. Les répartitions obtenues pour les essais en conditions réelles montrent plus de différences

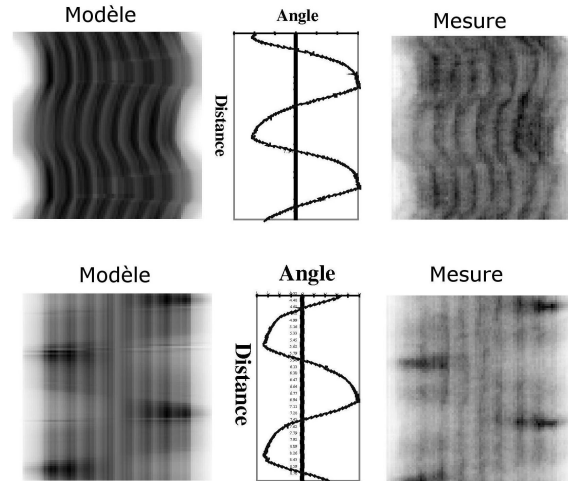


FIG. 1.3 – Répartitions obtenues par le modèle et par la mesure pour un mouvement de roulis (en haut) et de lacet (en bas). Fréquence des mouvements : 0,77 Hz, Vitesse d'avancement : 6 km/h, Hauteur de rampe : 50 cm. Angle : $-5^\circ - +5^\circ$, Distance parcourue par la rampe : 0 – 4,55m

avec les répartitions simulées (cf fig. 1.4⁵) mais les coefficients de corrélations sont généralement supérieurs à 0,90. Le modèle retrace à peu près correctement les zones de sur-dosage (et respectivement de sous-dosage). En général, le modèle surestime les coefficients de variation et sous-estime le pourcentage de zone correctement traitée. Etant donné que les résultats du modèle sont seulement des estimations qui doivent servir à évaluer la qualité de la suspension, sans prendre en compte les articulations de la rampe, les résultats ont été jugés tout à fait satisfaisants.

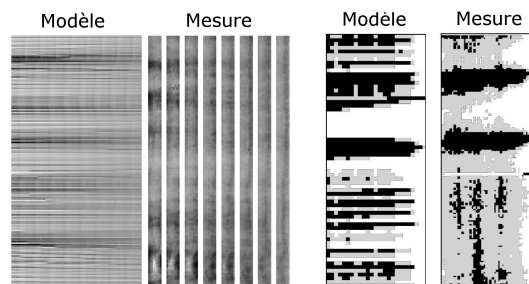


FIG. 1.4 – Répartitions obtenues par le modèle et par la mesure pour le passage sur une piste en béton (à gauche) et sur un obstacle (à droite). Hauteur de rampe : $H=50$ cm

⁵Dans la partie de droite de cette figure, les répartitions sont représentées par les zones correctement dosées (grises), sur-dosées (noires) et sous-dosées (blanches).

1.2.6 Développement d'une méthode d'essai et transfert

Les résultats de recherche ayant débouché sur une méthode de simulation validée, il était nécessaire, pour définir la méthode d'essai, de déterminer le moyen de générer des mouvements de rampe dans des conditions normalisées, de définir la méthode de mesure des mouvements de rampe, de fournir les outils d'analyse de la répartition et de proposer des plages de référence pour l'évaluation de la stabilité de la rampe.

Pour évaluer les mouvements de la rampe, j'ai proposé d'utiliser le passage du pulvérisateur sur un obstacle à une ou plusieurs vitesses données. D'un point de vue mécanique le choc créé par le passage sur l'obstacle engendre des sollicitations sur une large bande de fréquences, ce qui permet d'exciter toutes les fréquences propres de la machine testée. Ce système présente de plus l'avantage de ne pas être coûteux, d'être facilement transportable et d'être reproductible. Une méthode de mesure a été conçue pour mesurer les mouvements de l'extrémité de la rampe par rapport à son point de suspension. Elle est basée sur un suivi de cible par caméra complété par une étape d'analyse d'images.

Les positions successives de la rampe sont ensuite traitées par le modèle pour simuler des répartitions avec des buses à jet plat classiques. La qualité des répartitions est interprétée à l'aide du coefficient de variation et du pourcentage de surface mal dosée (plus de 15% de la dose moyenne ou moins de 15%).

Afin de tester la sensibilité de la méthode, de choisir les conditions d'essai et de définir les plages de résultats caractéristiques, des essais ont été réalisés sur plusieurs pulvérisateurs : 180 essais ont ainsi été analysés et ont permis de choisir la taille de l'obstacle, de définir les conditions de remplissage et de vitesse d'avancement et de préconiser des résultats à atteindre en terme de coefficient de variation.

Finalement, cette méthode a servi de base pour l'élaboration d'une norme internationale (ISO, 2005). Elle a également été transférée à des partenaires français (CTIFL⁶ et FNCUMA⁷) et étrangers (Allemagne et Argentine). Deux enveloppes Soleau ont aussi été déposées auprès de l'INPI⁸, l'une sur le logiciel de simulation des répartitions et l'autre sur la méthode d'essai sur obstacle. En plus des deux thèses qui se sont succédées, la partie scientifique a fait l'objet de 5 articles dans des revues scientifiques et de 15 présentations dans des conférences.

1.2.7 Conclusion pour l'élaboration d'une méthodologie

Le travail décrit dans cette partie avait pour objectif de définir une méthode d'essai. Cette méthode a été construite autour d'un modèle et la démarche suivie constitue une adaptation des méthodes générales de modélisation. L'apport méthodologique, pour chaque étape du processus, peut être résumé ici :

1. **Objectifs du modèle** : les objectifs du modèle ont été définis en partie grâce à l'étude mécanique menée au préalable.
2. **Limites du modèle et domaine d'application, identification des phénomènes à modéliser.** Cette étape comprend également la sélection des variables à prendre en compte et la délimitation des plages de variation de ces variables.

Dans notre cas, le modèle devait s'appliquer au mouvement des rampes et il a été fait l'hypothèse qu'elles étaient rigides. Les phénomènes et les variables influentes ont été identifiés à partir d'une expérimentation conçue à cet effet : les essais sous le convoyeur. On a ainsi déterminé que les effets d'interaction entre buses et les déports par dérive pouvaient être négligés. Des mesures complémentaires sur un banc de répartition ont permis de déterminer les effets de la hauteur et de l'angle des buses ainsi que les principes de superposition des répartitions sous la rampe. L'effet de la surface du sol sur la distribution elle-même n'a pas

⁶CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

⁷FNCUMA : Fédération Nationale des Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole

⁸INPI : Institut National de la Propriété Industrielle

été considéré (pas plus que les effets de rebond ou de ruissellement qui auraient pu y être associés).

3. **Choix des principes de calcul et développement du modèle.** La démarche retenue est de favoriser les méthodes de calcul les plus simples possibles.
Ici, des méthodes géométriques ont été sélectionnées pour calculer les effets de la hauteur et de l'angle des buses ainsi que la superposition des répartitions au sol.
4. **Validation du modèle pour les variables sélectionnées.** Cette validation se fait à partir d'essais en conditions maîtrisées. Elle valide les principes de calculs retenus, dans ces conditions et pour les variables en présence. Elle montre donc si la représentation des phénomènes considérés est correcte.
Dans cette étude, cette validation s'appuie sur les répartitions mesurées sous le convoyeur, avec une rampe rigide et un sol plat.
5. **Validation du modèle en conditions réelles.** Les variables qui ont été négligées auparavant sont intégrées dans l'expérimentation. Cette étape montre alors si les hypothèses relatives à ces variables (étape 2) étaient justifiées.

Pour toutes ces étapes, l'approche expérimentale joue ainsi un rôle majeur. Menée dans des objectifs clairement définis pour le modèle, elle permet d'identifier les phénomènes à considérer, de choisir leur représentation puis de valider les résultats. Etant donnée la complexité des phénomènes en jeu au cours d'une pulvérisation agricole, la modélisation peut donc ici être considérée comme un outil permettant de réaliser des évaluations systématiques, là où les méthodes d'essai ne seraient pas reproductibles et où leur mise en œuvre serait longue et coûteuse.

1.3 Identification des thèmes de recherche développés et enjeux scientifiques

L'évolution de la thématique de recherche a été conditionnée par trois principaux éléments. Le premier provient de la **demande sociale** qui, en évoluant vers les concepts d'agriculture durable et plus particulièrement de gestion de l'environnement, nous a amené à considérer plus particulièrement les problèmes de pollution liés à l'application de pesticides, tout en maintenant les objectifs d'efficacité du traitement au niveau de la culture.

En second lieu, les actions de recherche ont été réorientées vers le modèle des « **cultures méditerranéennes** » et **notamment la vigne**. En plus d'évidentes raisons d'orientations régionales du groupement du Cemagref de Montpellier, ce choix a été justifié par la forte consommation de produits phytosanitaires sur ces cultures (environ 40 % des produits épandus en France pour 10% des surfaces cultivées) ce qui entraîne une importante contamination de l'environnement : de nombreux aquifères du Languedoc-Roussillon (où la viticulture est de loin la culture dominante) sont affectés par la pollution par les pesticides.

Le troisième élément réside dans le maintien d'une **approche par modélisation** dont l'utilité avait été démontrée dans le travail sur la stabilité des rampes et qui devenait plus abordable au vu des avancées de la communauté scientifique et de la disponibilité de moyens de calcul de plus en plus performants : en particulier, la commercialisation de logiciels de CFD⁹ permettant de résoudre les équations de Navier-Stokes en 3D laissait entrevoir la possibilité d'une compréhension beaucoup plus poussée du comportement des jets de pulvérisation.

Hors désherbage, les technologies utilisées sur vigne sont essentiellement le jet porté (fragmentation du liquide au niveau de buses et assistance d'air) ou le pneumatique (fragmentation du liquide sur une veine d'air à grande vitesse qui sert également au transport). Ces technologies conditionnent à la fois les caractéristiques des gouttes et du flux d'air. L'enjeu scientifique est ainsi d'avoir une vision plus claire des phénomènes en présence pour **comprendre et modéliser le devenir des gouttes pulvérisées** à leur sortie de la machine. De cette compréhension

⁹Computational Fluid Dynamics

pourront être déduites des pistes pour l'optimisation des technologies et pour le développement d'outils de gestion des risques de pollution.

Avant d'impacter une cible, les gouttes peuvent évoluer dans deux milieux : l'air et, le plus souvent, la végétation. Le comportement dans chacun de ces milieux va différer pour plusieurs raisons :

1. Ces milieux n'ont pas la même structure : il est évident que l'air est un milieu continu et gazeux tandis que la végétation constitue un milieu discontinu à éléments mobiles et variables qui ne pourront donc être décrits que par des méthodes statistiques.
2. Les conditions ambiantes ne sont pas comparables : dans une végétation dense, par exemple, l'influence du vent extérieur est négligeable.
3. Les échelles ne sont pas les mêmes.

Ainsi, les questions scientifiques à étudier ne vont pas toujours présenter les mêmes aspects.

Dans la végétation, il est relativement facile de capter expérimentalement les dépôts sur les feuilles mais l'échantillonnage doit être optimisé pour aboutir à des protocoles robustes malgré les fluctuations des variables connexes. Du fait de ces variables incontrôlables en milieu extérieur, certains phénomènes doivent être étudiés au travers de méthodes spécifiques, en environnement maîtrisé.

Les enjeux de la modélisation sont par ailleurs nombreux :

- pour représenter la géométrie de la canopée (taille, position et orientation des feuilles, densité de végétation),
- pour représenter le grand nombre de gouttes en présence ainsi que leur diamètre et leur vitesse initiale,
- pour calculer les interactions flux-structure entre l'air et la végétation,
- pour représenter le comportement en interaction de l'air et des gouttes,
- pour prévoir l'impact des gouttes sur les cibles et calculer le dépôt.

Dans l'air, plusieurs échelles peuvent être considérées depuis les émissions au niveau du pulvérisateur jusqu'aux très grandes échelles (dans la région Languedoc-Roussillon, on retrouve dans l'air des molécules pulvérisées dans le Maghreb). Mes recherches étant étroitement liées à la machine, elles resteront limitées aux échelles de proximité : celle de la machine, puis celle de la parcelle et de ses proches environs.

Dans l'air, le problème métrologique constitue un réel verrou scientifique. Tout d'abord, on ne peut bénéficier de structures existantes pour piéger le produit pulvérisé et la mise en place de capteurs risque de modifier les flux. Ensuite, les gouttes vont rapidement évoluer : la bouillie qui forme la goutte peut changer d'état et s'évaporer partiellement ou en totalité. Le pesticide va de plus se disperser rapidement. Les quantités de produit à mesurer vont donc être très faibles et le choix de capteurs présente un enjeu certain. Enfin, le problème de l'échantillonnage est encore posé d'autant que le domaine étudié est vaste et non limité physiquement. De plus, localement, la turbulence de l'air introduit des fluctuations importantes qui peuvent perturber les mesures.

Du point de vue de la modélisation, la difficulté résidera essentiellement dans la prise en compte et l'interfaçage des échelles à considérer :

- celle des flux à la sortie du pulvérisateur,
- celle de l'interaction entre ces flux et la végétation (ce qui renvoie partiellement au problème du transport dans la végétation),
- celle de la dispersion dans l'air.

Mais dans les deux cas, le procédé de pulvérisation se déroule en milieu extérieur ce qui se traduit par la présence de variables à la fois nombreuses et fluctuantes. Certaines d'entre elles (liées à la végétation) évoluent de plus au cours de la saison. J'ai déjà évoqué les conséquences

de ce contexte pour le développement de protocoles de mesure robustes. Pour contourner cette difficulté, la démarche proposée consiste à coupler les observations expérimentales et le développement de modèles de manière à déterminer l'importance relative de ces variables dans des conditions données pour sélectionner les plus influentes puis, pour identifier et isoler les phénomènes principaux. D'une manière générale, les solutions sont alors recherchées pour une échelle globale : les échelles de détail ne sont abordées que si nécessaire. Une fois les phénomènes correctement représentés, l'enjeu est ensuite d'évaluer la capacité des modèles à expliquer les comportements observés dans des conditions réelles.

Ce mémoire montre comment ces principes sont appliqués à l'étude du transport des gouttes dans la végétation (Chapitre 2) et dans l'air (Chapitre 3).

Chapitre 2

Pénétration de la pulvérisation dans la végétation

Ce travail est centré sur la thèse d'Arthur Da Silva (Da Silva, 2003)[2000–2003], co-dirigée par le professeur Serge Huberson qui a apporté ses compétences dans le domaine de la mécanique des fluides. Il a aussi donné matière à plusieurs stages de fin d'études d'ingénieur (Druet, Koenen, Le, Vanhiesbecq), de DESS (Akrami, Sabatier) et de DEA ou Master (Akrami, Rebai, Zhang) ainsi qu'à des séjours de chercheurs étrangers (Hong - Chine, El Khalfi - Maroc, Panneton - Quebec).

La pénétration de la pulvérisation dans la végétation conditionne la qualité de la répartition dans le feuillage ainsi que les pertes de produit phytosanitaire dues aux gouttes qui ne sont pas interceptées. Dans ce contexte, l'objectif était de fournir un outil pour comprendre l'importance relative des différentes variables et plus précisément le rôle des caractéristiques du flux d'air et du jet de gouttes afin d'envisager une optimisation des réglages et éventuellement des technologies. L'utilisation de la modélisation s'est imposée pour limiter les essais au champ qui sont très lourds à mettre en œuvre : ils demandent beaucoup de main d'œuvre et les analyses sont coûteuses. De plus, ils sont difficilement reproductibles.

La modélisation du phénomène de pénétration met en jeu trois comportements : l'interaction du flux d'air avec la végétation, le transport de la pulvérisation et le dépôt des gouttes. Ce travail a permis de proposer des solutions pour représenter chacun de ces comportements.

2.1 Présentation de la démarche

La démarche générale reprend les grandes lignes qui ont été exposées dans la première partie. Dans un premier temps des essais ont été menés dans les vignes pour identifier les principaux phénomènes et caractériser les différentes variables. Ces essais ont été précisés par des mesures sur une végétation artificielle, en laboratoire, afin de limiter le nombre de variables, quantifier les grandeurs et permettre de « caler » les modèles par la suite. Un premier modèle, très général, a d'abord été testé. Le phénomène de dépôt a été étudié de manière plus détaillée, ce qui a demandé la mise en place de nouvelles expérimentations. Les détails sont donnés dans DaSilva *et al.* (2002) et DaSilva *et al.* (2001) pour la partie expérimentale et Da Silva *et al.* (2006) pour la démarche de modélisation.

2.2 Analyse expérimentale

2.2.1 Essais au champ

Méthode d'essai

La première étape de ce travail a consisté à mettre en place une méthode d'observation robuste et fiable pour quantifier les dépôts des gouttes dans la végétation et identifier les facteurs influents. La méthode classique pour évaluer la répartition de la pulvérisation dans la végétation consiste à utiliser des papiers hydro-sensibles agrafés sur des feuilles en différents points. D'autres pièges ont également été testés. Des expériences préliminaires avec mesure de traceur sur des feuilles échantillonnées dans la végétation ont montré une grande variabilité dans les résultats. L'analyse des causes de ces variations a permis de conclure que le recours à un échantillonnage dans la végétation, que ce soit sur des pièges ou directement sur les feuilles, ne pouvait pas être utilisé pour une observation des facteurs influents : pour cela, il est nécessaire d'analyser les dépôts sur toutes les feuilles du volume de végétation étudié. L'utilisation d'un traceur est une solution pertinente. Le traceur peut être un agent fluorescent (ce qui permet des analyses par spectrofluorimétrie, rapides et très sensibles) ou un métal qui peut ensuite être détecté et quantifié par spectrométrie d'absorption atomique. Parmi ces métaux, le cuivre présente l'avantage d'être couramment utilisé dans les traitements fongicides des vignes. Ces deux types de traceur ont été utilisés.

Une méthode d'essais détaillée a été définie sur ces bases ; elle précise, entre autres, les volumes de végétation à analyser, la méthode d'évaluation de la densité de végétation, le nombre de répétitions par essai, les conditions de récupération du traceur. Des essais ont ensuite été réalisés sur une parcelle de vigne à trois stades de développement différents, avec un pulvérisateur dont les réglages sont restés inchangés.

Résultats

Les surfaces de feuilles ayant été déterminées pour chaque volume de végétation prélevé, un recentrage géométrique des données a permis de mettre en évidence un pied de vigne « moyen » pour chacune des trois applications testées. Ce pied moyen est décrit par une juxtaposition de volumes élémentaires ($25\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 10\text{ cm}$) auxquels sont affectés les densités de végétation mesurées, caractérisées par leur LAD¹. Dix points de mesure ayant été mis en place pour chaque essai, il est apparu que les variations par rapport à ce pied moyen étaient relativement faibles.

Les mesures de dépôt de cuivre dans chaque volume élémentaire montrent une forte dépendance au LAD pour l'ensemble des données obtenues comme le montre la figure 2.1. Cette dépendance paraît quasi-linéaire mais l'affichage en coordonnées logarithmiques masque la dispersion des points pour les plus grandes valeurs.

2.2.2 Essais sur végétation artificielle

Les essais au champ ne permettaient que difficilement d'observer les phénomènes de manière plus détaillée. Des essais ont donc été mis en œuvre en laboratoire pour caractériser la granulométrie des gouttes ainsi que le flux d'air puis pour observer les interactions entre flux d'air et végétation. Pour l'étude de ces interactions, un rang de végétation artificielle a été aménagé. Le LAD a été déterminé en mesurant la surface de chaque feuille par des méthodes optiques. La valeur obtenue est de 7 m^{-1} .

Le spectre granulométrique des gouttes a été caractérisé à l'aide d'un granulomètre-vélocimètre laser à 40 cm du plan d'éjection, ce qui correspond au plan d'entrée dans la végétation. Le même dispositif a été utilisé pour déterminer les vitesses d'air devant et derrière le rang de végétation artificielle en ensemençant le flux d'air avec des particules de fumée. Ce dispositif permet d'avoir

¹LAD : Leaf Area Density, rapport de la surface de feuilles au volume de végétation considéré (encore baptisé surface volumique ou densité surfacique) [m^{-1}].

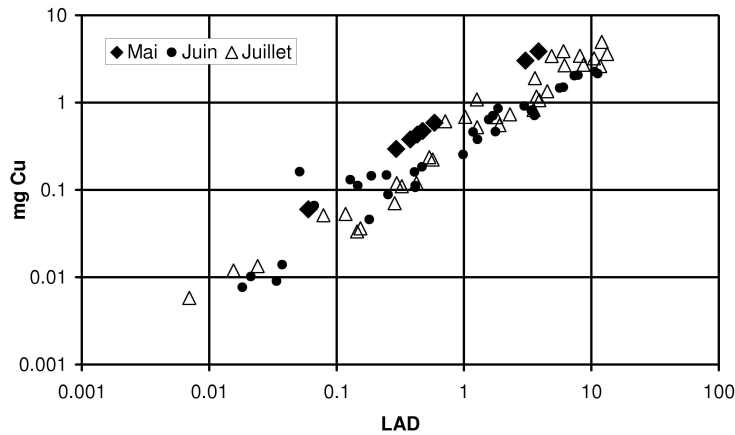


FIG. 2.1 – Relation entre dépôts de cuivre [mg] et LAD [m^{-1}] sur des volumes élémentaires de végétation analysés à trois stades de développement de la vigne

une visualisation très précise des vitesses instantanées sur les points de mesure. Le flux d'air à l'entrée de la végétation présente des vitesses proches de l'horizontale sur toute la hauteur de la vigne, avec une vitesse d'environ $7,2 \text{ m/s}$ et une énergie cinétique turbulente de $6,5 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ en moyenne sur toute la hauteur. A l'arrière de la végétation, les composantes verticales sont toujours négligeables mais la vitesse horizontale n'est plus que de $1,3 \text{ m/s}$ avec une énergie cinétique turbulente de $0,5 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$. A l'avant comme à l'arrière de la végétation, les vitesses sont à peu près constantes en fonction de la hauteur (cf. fig. 2.4).

Le dispositif optique du laser ne permettait pas de mesurer les vitesses à l'intérieur de la végétation. Pour cela, un simple anémomètre à turbine a été utilisé ; il donne seulement accès aux valeurs moyennes de vitesse. Les valeurs mesurées montrent une décroissance à allure exponentielle (cf. fig. 2.3).

2.2.3 Choix pour la modélisation

Limites pour la représentation

L'objectif du modèle est de mettre en évidence les facteurs qui conditionnent la pénétration de la pulvérisation dans la végétation pour, finalement, optimiser le dépôt sur les feuilles. Les essais au champ montrent que la densité de végétation influence fortement le dépôt et que, pour une parcelle donnée, on peut définir un pied moyen caractérisé par la répartition de cette densité dans un plan perpendiculaire au rang. Nous avons donc choisi de bâtir le modèle à partir de cette description de pied moyen. La linéarité observée sur la figure 2.1 n'a pas été retenue comme pouvant être une base du modèle. En effet, ces résultats ont été obtenus avec une application particulièrement soignée et ne concernent qu'un seul jeu de traitements (une seule parcelle et un seul pulvérisateur). De tels résultats n'ont par ailleurs pas été reportés dans la littérature scientifique. Il nous a donc semblé dangereux de généraliser cette observation.

Les essais en laboratoire fournissent le détail des caractéristiques du flux d'air ainsi que de la répartition granulométrique à l'entrée de la végétation. Nous avons donc choisi de ne pas prendre en compte le comportement du flux d'air dans le domaine qui sépare les sorties du pulvérisateur du rang de vigne pour ne représenter que le comportement dans la canopée. On peut alors considérer que l'évaporation est négligeable ainsi que l'influence du vent ou de la stabilité atmosphérique. Les autres conditions atmosphériques seront également négligées.

Pour les autres limites, le parti pris a été de tenter une modélisation la plus simple possible. Ainsi, il a été choisi de représenter la végétation de manière globale, en ne prenant en compte que

sa géométrie (ramenée à un parallélépipède) et la densité de feuillage. Les allures de décroissance du profil d'air observées sur la végétation artificielle laissent supposer que cette représentation est convenable. Par contre, il nous a paru important de considérer l'effet de la turbulence de l'air qui est supposée avoir une grande influence sur le dépôt (point qu'il n'était pas possible de mettre en évidence expérimentalement). Enfin, du fait de l'avancement du tracteur, il nous a paru nécessaire d'utiliser trois dimensions. La modélisation a été développée sur la base de ces hypothèses, à partir d'un logiciel de CFD du commerce : CFX 4.2 (© AEA Technologies ltd.).

Choix des méthodes

Pour modéliser le comportement de la pulvérisation assistée par air dans la végétation, deux types de modèles ont été retenus. Le premier, baptisé ici *modèle de transport scalaire* décrit l'évolution de la concentration dans le flux d'air. Le deuxième est basé sur une *méthode Lagrangienne* à l'aide de laquelle les trajectoires de gouttes sont calculées. Les deux approches sont décrites dans la partie 2.4. Au préalable, il était nécessaire de calculer le *comportement du flux d'air* ; le modèle utilisé est décrit dans la partie suivante (2.3). Le *calcul du dépôt* a été considéré de manière séparée et sera détaillé en dernier (2.5).

2.3 Modélisation du flux d'air

2.3.1 Principe

Le comportement du flux d'air peut être déterminé de manière empirique ou par des modèles mécanistes. La méthode empirique décrit la décroissance exponentielle de la vitesse du flux d'air généralement observée au sein d'une végétation. Cette relation a été reprise par Walklate *et al.* (1996) sous la forme :

$$U(x) = U(x_0) \cdot \exp[-\beta(x - x_0)] \quad (2.1)$$

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 \quad (2.2)$$

Dans la relation (2.2), β_1 est un facteur représentant l'expansion du jet dans la végétation, β_2 représente l'influence de la densité de la végétation et β_3 est un facteur qui prend en compte un accroissement apparent de la densité de végétation du fait du mouvement des feuilles. En général, seul β_2 est pris en compte et son expression est :

$$\beta_2 = C_d \times A \quad (2.3)$$

où C_d désigne le coefficient de traînée global de la plante et A la densité surfacique de la plante (LAD) en m^2/m^3 . Dans cette relation, le terme C_d est parfois corrigé par un coefficient de masquage pour prendre en compte la superposition des feuilles. Cette relation ne donne que l'expression de la vitesse moyenne du flux ; les vitesses instantanées et donc les caractéristiques de turbulence ne peuvent pas être obtenues. Toutefois elle présente l'avantage de fournir un outil de validation simple à utiliser.

Les modèles mécanistes sont basés sur la résolution des équations du mouvement, habituellement obtenues à l'aide des équations de Navier-Stokes moyennées ou RANS². Ces équations font apparaître le tenseur de Reynolds, lequel, suivant l'hypothèse de Boussinesq, peut être déterminé à l'aide de la viscosité turbulente, notée, ν_t . La détermination de cette viscosité turbulente se fait à l'aide de zéro, une ou deux équations de transport. Le modèle le plus utilisé dans les applications d'ingénierie est un modèle à deux équations, le modèle $K - \varepsilon$, dans lequel on écrit les

²RANS : Reynolds Averaged Navier Stokes

équations de transport de l'énergie cinétique turbulente, K , et du taux de dissipation turbulente, ε . Ce modèle repose sur l'hypothèse que la viscosité turbulente peut s'écrire sous la forme :

$$\nu_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

C_μ étant une constante habituellement égale à 0,03. Le calcul de l'écoulement repose ainsi sur six équations : une équation pour la conservation de la masse (appelée équation de continuité), trois équations de conservation de la quantité de mouvement (une par dimension) et les deux équations de transport des variables K et ε .

L'effet de la végétation est pris en compte en ajoutant un terme source dans l'équation de transport de la quantité de mouvement. Ce terme source est la force de traînée créée par la végétation sur le flux d'air. Son expression algébrique (par unité de volume) est :

$$F_{tv} = \frac{1}{2} \rho_a C_d A U^2 \quad (2.5)$$

où ρ_a désigne la masse volumique de l'air, et U , la vitesse moyenne du vent.

Dans les modèles à deux équations, l'effet de la végétation se traduit également par l'ajout d'un terme source au bilan de K , S_K , et d'un autre dans le bilan de ε , S_ε . L'expression de S_K est donnée par [Sanz \(2003\)](#) :

$$S_K = C_d A (\beta_p U^3 - \beta_d U K) \quad (2.6)$$

Le premier coefficient, β_p , représente la part d'énergie cinétique du flux convertie en énergie cinétique turbulente ; le second, β_d , représente la part d'énergie cinétique turbulente perdue du fait que les tourbillons se dissipent très vite dans la végétation. D'après [Walklate *et al.* \(1996\)](#), dans le cas de végétations denses, le premier terme peut-être négligé devant le second. Ainsi, en prenant $\beta_d = 1$, il propose la relation :

$$S_K = -C_d A U K \quad (2.7)$$

D'après [Katul \(2004\)](#), le terme source S_ε est plus mal connu, les formulations proposées reposant sur une simple analyse dimensionnelle. Par analogie, nous avons choisi d'utiliser l'expression :

$$S_\varepsilon = -C_d A U \varepsilon \quad (2.8)$$

2.3.2 Représentation retenue

Le logiciel CFX, qui permet de résoudre les équations de Navier-Stokes par la méthode des volumes finis, a été utilisé pour calculer le flux d'air dans un volume parallélépipédique à l'intérieur duquel un sous-domaine représente l'effet d'une portion de rang de vigne. Le domaine est maillé à l'aide de cubes de 5 cm de côté. Les conditions aux limites sont des conditions de pression constante sauf au niveau du sol, où la surface est définie comme une paroi. Les dimensions principales de la géométrie sont indiquées en figure 2.2. Nous avons choisi d'utiliser un modèle $K - \varepsilon$ qui a prouvé son intérêt et sa robustesse dans de nombreuses applications d'ingénierie et notamment dans le domaine de la pulvérisation.

2.3.3 Résultats

Pour tester la validité du modèle, le coefficient de traînée de la végétation artificielle a été calculé à partir des relations de Walklate (eq. (2.1) à (2.3)) et des mesures de vitesse d'air qui avaient été réalisées devant et derrière la végétation artificielle, ce qui conduit à une valeur de $C_d = 0.3$. Cette valeur correspond bien aux grandeurs citées dans la littérature scientifique puisque, en général, les valeurs de C_d varient entre 0.1 et 0.5, la valeur de 0.5 correspondant à la traînée créée par une feuille isolée et perpendiculaire à l'écoulement. Les feuilles environnantes créent un effet de masquage qui explique la valeur de 0.3 obtenue.

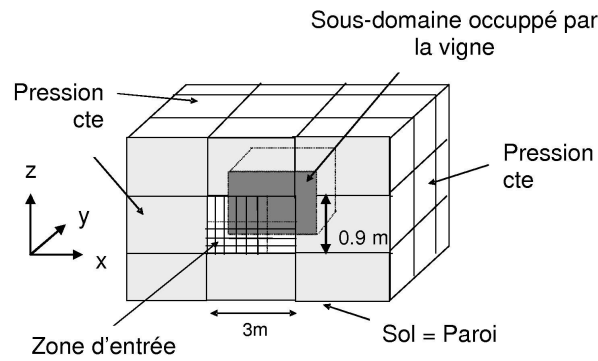


FIG. 2.2 – Schéma du domaine de calcul

Les vitesses mesurées à l'intérieur de la végétation à l'aide de l'anémomètre à turbine, bien que peu précises, confirment que l'expression de décroissance exponentielle est tout à fait correcte (cf. fig. 2.3).

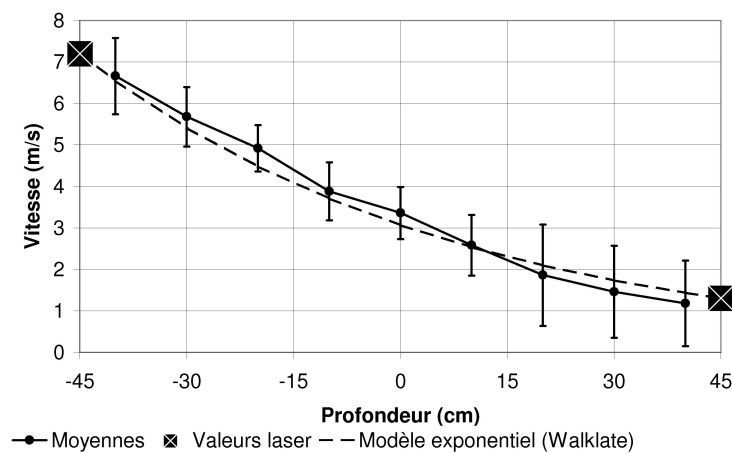


FIG. 2.3 – Comparaison des mesures de vitesses d'air moyennées dans le temps et sur la hauteur avec la loi de décroissance exponentielle. Moyennes (et écart-types) de 5 séries de mesures réparties sur la hauteur de la végétation. $x=0$ correspond à l'axe du rang.

La simulation a été conduite en imposant en entrée la vitesse moyenne mesurée devant la végétation artificielle (les fluctuations suivant la hauteur n'ont pas été prises en compte) et il a été vérifié que le profil de vitesse calculé en sortie correspondait aux valeurs mesurées et ce, sur toute la hauteur (cf. fig. 2.4 pour les vitesses moyennes.)

2.4 Modélisation du transport de la pulvérisation

Les deux principes de modélisation retenus, c'est-à-dire le modèle de transport scalaire et le modèle Lagrangien ont été successivement testés.

2.4.1 Modèle aux concentrations

Principe

Dans ce type de modèle, utilisé par exemple par Raupach *et al.* (2001a,b) ou Farooq et Salyani (2004), on suppose que le spray pulvérisé diffuse comme un gaz et que cette diffusion peut être

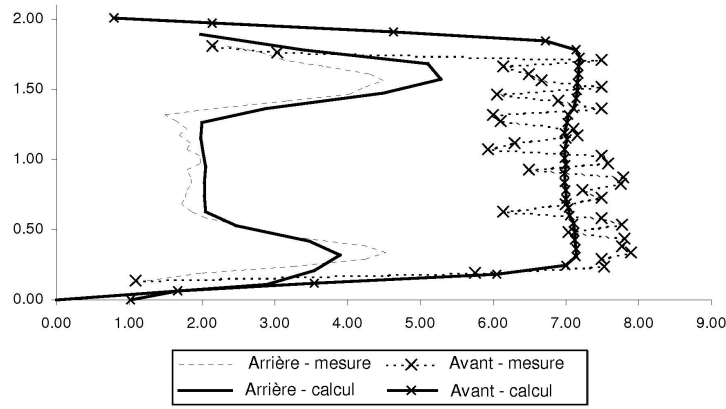


FIG. 2.4 – Comparaison des vitesses d'air moyennes (moyennes temporelles) obtenues par calcul et par mesure, à l'avant et à l'arrière de la végétation. Abscisses : vitesses (m/s), Ordonnées : hauteur (m).

exprimée à l'aide d'un coefficient, Γ_l . L'équation générale de gradient-diffusion s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(C.u_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_l \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) = S_C \quad (2.9)$$

Γ_l représente la somme de la diffusion moléculaire et de la diffusion turbulente :

$$\Gamma_l = D_l + \frac{\nu_t}{Pr_l} \quad (2.10)$$

S_C est un terme source qui permet de représenter le piégeage du produit par la végétation. Ce type de modèle permet donc de calculer en même temps le transport et le dépôt de produit. Son application requiert seulement la définition du terme source, S_C .

Calage du modèle

Afin de caler le modèle, les mesures de dépôt au champ ont été utilisées. D'après les résultats obtenus (cf. Fig 2.1), on pouvait s'attendre à ce que le coefficient S_C dépende des valeurs du LAD. Les mesures permettent de définir 5 zones de LAD perpendiculairement au flux émis. On a donc cherché à optimiser les valeurs de S_C dans chacune de ces zones de manière à ce que les simulations avec CFX permettent de retrouver les dépôts effectivement mesurés sur un pied moyen. Un calcul transitoire a été mené, de manière à prendre en compte le déplacement du tracteur devant la végétation et à pouvoir calculer les dépôts en masse de produit par unité de volume de végétation. Pour les cinq zones de densité différentes, les valeurs optimisées de S_C sont données dans le tableau 2.1.

	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	zone 5
LAD	0.09	3.34	3.06	1.93	0.32
S_C	-0.2	-15	-18	-30	-100

TAB. 2.1 – Valeurs obtenues pour le terme puits de concentration par rapport au LAD

On voit que le coefficient S_C ne varie pas linéairement avec le LAD. De plus, dans la dernière zone, où le LAD redevient très faible, il a fallu considérablement augmenter la valeur de S_C pour retrouver la valeur de dépôt mesurée. Le mécanisme de dépôt semble donc trop complexe pour pouvoir être expliqué par cette méthode. C'est la raison pour laquelle le modèle Lagrangien a ensuite été utilisé.

2.4.2 Modèle Lagrangien

Principe général

L'utilisation des modèles lagrangiens pour la simulation des pulvérisations a débuté dans les années 70 (par exemple, [Goering et al., 1972](#) ; [Miles et al., 1975](#) ; [Marchant, 1977](#) ; [Barker et al., 1978](#)). C'est aussi le principe utilisé dans les modèles AGDISP et AGDRIFT développés aux Etats-Unis pour prédire respectivement la dispersion et la dérive des produits pulvérisés par avion ([Bilanin et al., 1989](#) ; [Teske et al., 2003](#)).

Dans ces modèles, le flux d'air est calculé comme décrit dans le chapitre 2.3.1 puis les trajectoires de gouttes dans ce flux d'air sont obtenues à partir du bilan des forces qui s'exercent sur elles : la gravité et les forces aérodynamiques (traînée, portance). Les codes commerciaux ajoutent d'autres forces de moindre importance dans notre cas : force de Tchen, force d'histoire, force de masse ajoutée. Les gouttes sont en général considérées comme sphériques et de masse volumique constante.

La somme des forces de gravité et de portance, ramenée à l'unité de masse, a pour expression :

$$\frac{\rho_l - \rho_a}{\rho_l} \mathbf{g} \quad (2.11)$$

La force de traînée par unité de masse est donnée par la relation :

$$\mathbf{F}_{ts} = \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{v})}{\tau_d} \quad \text{avec} \quad \tau_d = \frac{4\rho_l D}{3\rho_a C_{ds} \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\|} \quad (2.12)$$

où τ_d est le temps de relaxation de la goutte (supposée sphérique). La trajectoire de la goutte est donc décrite par le système d'équation ³ :

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{v}}{\tau_d} + \frac{\rho_l - \rho_a}{\rho_l} \mathbf{g} \\ \mathbf{v} = \frac{d\chi_1}{dt} \end{cases} \quad (2.13)$$

De nombreuses expressions sont proposées pour le calcul du coefficient de traînée. Elles sont généralement obtenues par des méthodes de régression à partir de résultats expérimentaux observés sur des sphères. La relation utilisée dans CFX est :

$$C_{ds} = \frac{24}{Re_d} \times (1 + 0.15 Re_d^{0.685}) \quad (2.14)$$

$$\text{avec } Re_d = \frac{\|\mathbf{u} - \mathbf{v}\| D}{\nu_a} \quad (2.15)$$

Cette relation donne des valeurs tout à fait correctes pour des nombres de Reynolds particuliers pas trop élevés ce qui est bien notre cas étant donné le faible diamètre des gouttes et les valeurs qui peuvent être attendues pour les vitesses relatives.

Prise en compte de la turbulence

L'effet de la turbulence de l'air sur les trajectoires des gouttes doit être calculé alors que les résolutions de type $K - \epsilon$ ne permettent d'obtenir que des données statistiques sur cette turbulence. [Reichard et al. \(1992\)](#) ainsi que [Brown et Sidhamed \(2001\)](#) utilisent une méthode qualifiée de suivi aléatoire (« stochastic droplet tracking ») suivant laquelle les fluctuations des vitesses de l'air sont supposées suivre une fonction de probabilité gaussienne. D'autres méthodes utilisent des modèles de marche aléatoire (« random walk models ») basés sur la théorie des chaînes de

³Certains auteurs négligent la portance et la gravité et on a alors seulement : $\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{v}}{\tau_d}$

Markov pour décrire de manière itérative les positions instantanées de la particule (Miller et Hadfield, 1989 ; Walklate, 1992 ; Holterman *et al.*, 1997 ; Mokeba *et al.*, 1997 ; Cox *et al.*, 2000). Dans ces deux types de solutions, on simule les trajectoires de manière unitaire et, de ce fait, il est impossible de représenter le grand nombre de gouttes présentes dans un spray. On choisit en général de simuler un nombre limité de gouttes pour une classe de diamètre donné. Les résultats pour l'ensemble du jet sont ensuite extrapolés par de simples lois de proportionnalité. Pour une bonne estimation, le nombre de trajectoires à simuler reste cependant très important (par exemple, Miller et Hadfield, 1989, simulent 500 à 5000 trajectoires pour 6 classes de diamètre). Xu *et al.* (1998) ont évalué le comportement de ces deux méthodes pour prédire la dispersion d'une pulvérisation sur verger et la comparaison des simulations aux résultats observés sur végétation artificielle et en conditions réelles montrent que les deux approches donnent des résultats satisfaisants.

Bilanin *et al.* (1989) estiment l'effet des fluctuations de la vitesse de l'air (u'_i) sur celles de la position de la goutte (x'_i) en calculant la variance $\overline{x'_i x'_i}$. Cette variance permet d'estimer la dispersion autour de la trajectoire moyenne. Elle est estimée à l'aide de modèles, à partir de l'énergie cinétique turbulente et du temps de séjour de la goutte.

Représentations choisies

Afin de limiter le nombre de trajectoires à simuler (pour limiter le temps de calcul) nous avons choisi une méthode proche de celle de Bilanin, en représentant le comportement de nuages de gouttes par une trajectoire moyenne et une loi d'expansion autour de cette trajectoire. Les trajectoires moyennes ont ainsi été calculées pour quatre points d'éjection (buses) situés 30 cm sous le vent de la végétation. Pour chacun de ces points d'éjection, cinq trajectoires moyennes sont calculées, correspondant à cinq classes de diamètre. Le débit de chaque classe de diamètre est déduit des mesures granulométriques réalisées au préalable (cf. 2.2.2). Pour prendre en compte l'avancement du pulvérisateur, le calcul de $5 \times 4 = 20$ nouvelles trajectoires est initié tous les 5 cm dans la direction du rang. 60 positions successives sont ainsi simulées pour reproduire 3m d'avancement. Dans ce calcul, les forces de gravité et de portance sur les gouttes ont été négligées. Les trajectoires moyennes sont obtenues à l'aide de CFX avec la précision du maillage défini pour modéliser le flux d'air (5 cm dans les trois directions).

Nous avons ensuite défini des « Volumes Élémentaires Représentatifs », ou VER, de 30cm de côté. Pour chaque VER, les résultats de CFX donnent accès aux caractéristiques moyennes de l'écoulement. L'expansion du nuage est alors déterminée en faisant l'hypothèse qu'elle peut être représentée par un modèle de comportement Brownien. A partir de cette hypothèse, la dispersion autour de la trajectoire moyenne à un instant t peut être estimée par une fonction de probabilité gaussienne dont la variance est :

$$\sigma_i^2 = 2D_{T_i}t = 2 \left(\frac{C_\mu K^2}{3\sigma_T \varepsilon} \right) t \quad (2.16)$$

où K, ε et σ_T sont les valeurs moyennes obtenues sur le VER considéré.

Cependant, l'hypothèse du comportement Brownien n'est pas valide pour des particules de taille supérieure à un micron. Nous avons donc introduit un facteur de correction, α_c , qui prend en compte le temps de relaxation des gouttes. Ainsi, en un point donné, la concentration en produit du nuage associé à une trajectoire moyenne l est obtenue par la relation :

$$c(\mathbf{x}, t) = \prod_{i=1}^3 \frac{c_l}{(2\sqrt{\pi}\sigma_i(t))} \exp \left(-\frac{(x_i - \chi_{l,i}(t))^2}{\alpha_c^2 \sigma_i^2(t)} \right) \quad (2.17)$$

Ce calcul a fait l'objet d'un code développé indépendamment de CFX. Il permet de calculer les quantités de produit à l'entrée de chaque VER, en prenant en compte le recouvrement éventuel

de plusieurs nuages. Dans cette représentation, le dépôt n'est pas pris en compte et la végétation n'est considérée que pour ses effets sur le champ de vitesse et sur la turbulence de l'air (qui à leur tour conditionnent la trajectoire des gouttes et l'expansion du nuage).

2.5 Modélisation des dépôts

2.5.1 Utilisation d'un coefficient d'efficacité

Le dépôt des gouttes est un phénomène complexe. D'une part, en fonction de leur inertie, les gouttes vont soit impacter la cible, soit suivre le flux d'air qui contourne l'obstacle. D'autre part, seule une certaine partie des gouttes qui impactent vont être retenues. Concernant ce second point, la goutte peut rebondir, se fractionner ou ruisseler sur la feuille. La nature de la feuille et son état de surface jouent un rôle important, et [Smith *et al.* \(2000\)](#), après avoir réalisé une synthèse des études dans ce domaine, ont observé une grande variabilité de résultats. A l'échelle de ce phénomène, il faudrait également considérer le mouvement des feuilles qui sont agitées par le flux d'air fortement turbulent du pulvérisateur. Le mécanisme de rétention reste de fait encore très mal connu et les modèles de dépôt développés jusqu'ici prennent seulement en compte l'impact proprement dit. Nous avons également fait ce choix.

Dans notre approche, nous avons modélisé des nuages de gouttes et nous pouvons simuler les quantités de produit entrant dans chaque VER. La méthode la plus simple pour calculer le dépôt dans un VER donné est donc de considérer qu'il est proportionnel à un coefficient d'efficacité dépendant des variables locales. Nous avons ainsi écrit que la masse déposée dans le VER i est :

$$Dep_i = V_{frac} \times C_{ef} \times M_i \times \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}}{\|\mathbf{v}\|} \quad (2.18)$$

où V_{frac} représente la portion de nuage qui rentre dans le VER (V_{frac} s'obtient par double intégration de la fonction gaussienne). M_i correspond à la masse de produit contenue dans le nuage et C_{ef} est le coefficient d'efficacité.

2.5.2 Détermination du coefficient d'efficacité

Principe

Pour des gouttes d'un diamètre supérieur à plusieurs microns, l'impact d'une goutte face à un obstacle isolé de taille caractéristique d_c est lié à son inertie. On peut le caractériser par son nombre de Stokes :

$$St = \frac{\tau_d}{\tau_a} = \frac{\rho_l D^2}{18 \rho_a \nu_a} \times \frac{U}{d_c} \quad (2.19)$$

τ_d et τ_a sont les temps de relaxation des gouttes et de l'air respectivement ($\tau_a = d_c/U$). Ainsi, quand le nombre de Stokes est très inférieur à 1, les gouttes suivent le flux d'air alors que des valeurs importantes de St représentent une forte inertie qui permet aux gouttes d'impacter la cible.

De manière classique, en considérant un flux d'air portant une concentration C de produit, on détermine le dépôt, en kg/s, par :

$$Dep = E_{imp} \times S \times U \times C \quad (2.20)$$

où S désigne la surface projetée de l'obstacle dans le plan perpendiculaire à l'écoulement. Le coefficient d'impact, E_{imp} , peut-être directement calculé à partir du nombre de Stokes. Par exemple [Raupach *et al.* \(2001b\)](#), proposent la relation :

$$E_{imp} = \left(\frac{St}{St + p} \right)^q \quad (2.21)$$

avec $p = 0.8$ et $q = 2$. On obtient bien $E_{imp} \rightarrow 0$ quand $St \rightarrow 0$ et $E_{imp} \approx 1$ pour $St \gg 1$. Dans cette démarche, conçue pour une représentation Eulérienne, le concept utilisé est différent du nôtre puisque, pour calculer le dépôt nous ne prenons pas en compte de manière explicite la surface des obstacles, ni la vitesse de l'air : l'influence de ces grandeurs doit donc être intégrée dans notre coefficient d'efficacité. De plus, l'approche décrite ci-dessus est indépendante de la turbulence de l'air et n'est valable que pour des obstacles isolés.

Pour prendre en compte la turbulence de l'air, d'autres auteurs ont proposé de travailler à partir de simulations. Notamment, [Zhu et al. \(1996\)](#) ont simulé des trajectoires de gouttes émises en face d'une bande verticale de 5 cm de large et infiniment longue pour calculer un coefficient d'efficacité en le définissant comme le pourcentage de trajectoires interceptées par la bande verticale. Cette étude leur a permis d'écrire une relation analytique permettant de déterminer ce coefficient d'efficacité en fonction du nombre de Froude, $Fr = U/\sqrt{g \times d_c}$, et du nombre de Reynolds particulaire, $Re_d = UD/\nu_a$:

$$C_{ef} = 100 \exp \left(0.5 \times (0.00065 \ln I - 0.0045) \times (N - 9 \ln I - 30)^2 \right) \quad (2.22)$$

avec $N = \left(\ln \frac{Re_d^3}{Fr^2} \right)^{5/3}$

où I désigne l'intensité turbulente, c'est-à-dire le pourcentage : $100 \times \sqrt{2K}/U$. Cette relation est validée par des essais en tunnel.

L'approche de Zhu nous a paru bien correspondre à notre problématique pour peu qu'elle soit adaptée à plusieurs feuilles. Nous avons donc mis en place des simulations (sous Fluent 3D) pour calculer le pourcentage de gouttelettes piégées par un ensemble de feuilles carrées et rigides en fonction de la taille des gouttes, des caractéristiques du flux d'air, mais aussi de la disposition des feuilles, ceci afin de tenir compte d'éventuels phénomènes de masquage. Un intérêt certain de cette démarche était de pouvoir construire un dispositif expérimental (tunnel) pour valider les résultats.

Modélisation du phénomène

Nous avons conçu en parallèle le modèle et le dispositif expérimental de manière à obtenir des résultats comparables dans les deux cas⁴. Les variables d'entrée (champ de vitesse de l'air, granulométrie du jet pulvérisé et débit de liquide) ont été mesurées sur le dispositif expérimental. Les conditions de calcul (maillage, ordre de calcul, choix des lois de parois) ont fait l'objet d'études d'optimisation par rapport à la norme de la vitesse de l'air, à la pression, à l'énergie cinétique turbulente et au taux de dissipation de la turbulence (ces grandeurs ont été observées sur les axes de symétrie de la géométrie). Le nombre de trajectoires à simuler a également fait l'objet d'une optimisation.

La figure 2.5 montre la géométrie développée pour les simulations. Elle est construite autour d'un VER de 30 cm de côté tel que ceux constituant le modèle global. Pour représenter les effets de la végétation en amont sur le flux d'air, deux VER ont été représentés. Une fois le flux d'air calculé les trajectoires sont simulées uniquement sur le deuxième VER⁵. Un volume vide de 60 cm de long prolonge ces deux VER pour représenter les phénomènes de recirculation du flux et pouvoir définir les conditions aux limites en sortie. Les feuilles sont représentées par des parois verticales et carrées, de 10 cm de côté. En un premier temps, les parois du tunnel ont été définies avec des conditions de symétrie (correspondant à la situation à l'intérieur d'un rang de vigne) puis on a vérifié que le nombre d'impacts n'était pas modifié en utilisant des conditions de paroi.

⁴Par exemple, le modèle devait être capable de représenter les trajectoires des gouttes d'une buse, à large spectre granulométrique. De la même manière, les conditions aux limites périodiques qui, a priori, représentent bien les conditions d'un VER, ont dû être écartées car difficiles à reproduire expérimentalement.

⁵Le premier VER est conservé mais les feuilles en sont retirées.

Les étapes d'optimisation ont conduit à choisir un maillage de 7,5 mm de côté. On a aussi vérifié qu'un maillage resserré près des feuilles ne modifiait pas les résultats. Près des parois (y compris les feuilles), le flux est représenté par une loi de comportement logarithmique. Pour calculer le pourcentage d'impact, une trajectoire est émise à partir de chaque nœud d'une grille 1 cm×1 cm dans le domaine d'entrée, soit 900 trajectoires par classe de diamètre. Ce nombre de trajectoires a été optimisé pour stabiliser la solution (pourcentage de gouttes piégées).

Pour valider ce modèle, un tunnel aux mêmes dimensions a été construit (cf. fig 2.5). Les gouttes

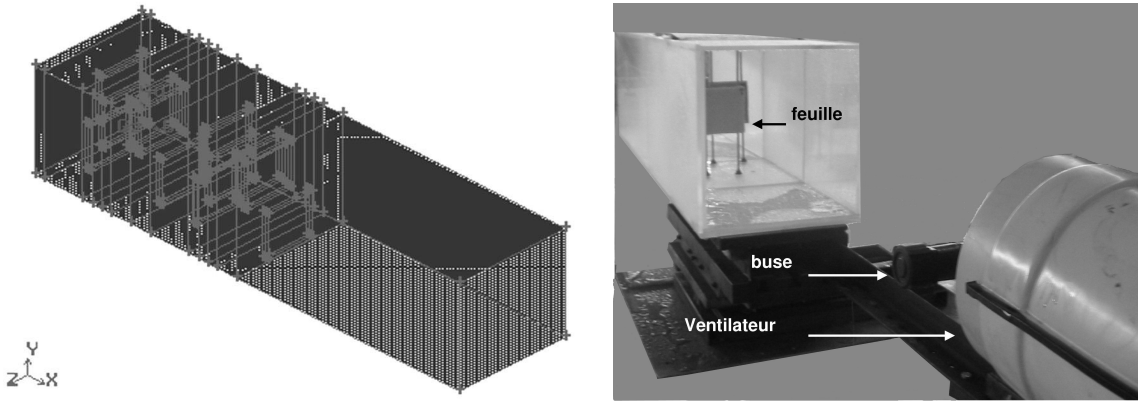


FIG. 2.5 – Modèle développé pour la simulation du phénomène d'impact. A gauche, géométrie du modèle numérique. A droite, dispositif expérimental de validation

sont générées par une buse à cône creux (ATR Albuz 11002) alimentée avec une pression régulée de 2 bars pour un débit théorique de 0.47 l/min. Le flux d'air est généré par un ventilateur placé derrière la buse. Le granulomètre-vélocimètre laser a été utilisé pour mesurer les vitesses d'entrée d'air et la granulométrie des gouttes sur un maillage 2 cm×2 cm. Le débit de liquide entrant dans le tunnel a été mesuré sur une période assez longue pour obtenir une précision suffisante (une heure). Des plaques carrées maintenues en position par des tiges métalliques jouent le rôle des feuilles. Sur ces plaques, le liquide est piégé par un absorbant en polyacrylate de sodium d'1 cm d'épaisseur. Ce dispositif peut piéger quelques dizaines de grammes d'eau sur chaque feuille ce qui correspond à environ deux minutes d'essai sans ruissellement.

Les essais ont été simulés avec le modèle décrit plus haut. Le profil des vitesses d'air en entrée a été reproduit. La population des gouttes a été partagée en 5 classes de diamètre et une simulation a été conduite pour chacune de ces classes. Le premier VER était maintenu exempt de feuilles pour simuler le flux d'air et les trajectoires de gouttes.

Résultats

Les vitesses d'air derrière une « feuille » ont été mesurées à l'aide d'un anémomètre à fil chaud : on a vérifié que les profils des vitesses moyennes et des énergies cinétiques turbulentes avaient des allures comparables à ceux des simulations. Ces mesures ont également montré que, conformément aux propositions de Walklate (cf. eq. 2.7, p. 23), l'énergie cinétique turbulente décroît très rapidement derrière les feuilles.

Les dépôts simulés et mesurés avec la buse ont été comparés pour plusieurs configurations. Avec une seule feuille, on obtient un pourcentage d'impact de 17% avec le modèle et de 19%⁶ à partir des mesures. Lorsqu'on augmente le nombre de feuilles, les résultats sont moins bons : le pourcentage de liquide retenu sur la première feuille est de l'ordre de 25% avec les mesures, alors qu'il reste aux environs de 17% par simulation. Cette différence s'explique sûrement du fait des tiges qui maintiennent les plaques car elles sont assez épaisses et modifient nécessairement le flux en générant de la turbulence. Le choix du modèle de turbulence utilisé dans les simulations peut également être discuté. Bien conscients de ces limites, la similitude des résultats obtenus sur

⁶Moyenne de 10 répétitions.

une seule feuille nous a parue suffisante pour accepter d'utiliser ce modèle dans une première approche.

Des simulations ont ensuite été menées pour évaluer l'influence du diamètre des gouttes, de la vitesse d'air, du diamètre des gouttes et du nombre de feuilles à partir d'un plan factoriel complet à 2 niveaux⁷. Les valeurs minimales et maximales correspondent aux valeurs couramment observées lors des mesures pour la taille des gouttes et les vitesses d'air. Les intensités turbulentes ont été choisies de manière plus extrême pour mieux mettre en évidence l'influence de ce paramètre. Les nombres de feuilles simulées ont été fixées à 6 et à 12, ce qui correspond à des LAD de 2,2 et 4,5 m⁻¹ respectivement⁸. La figure 2.6 montre les valeurs obtenues pour le coefficient d'efficacité (ces valeurs correspondent au pourcentage de gouttes interceptées). Ces valeurs sont comparées avec le coefficient d'efficacité calculé par la relation de Zhu et également avec le coefficient d'impact proposé par Raupach, même si ce dernier n'est pas utilisé exactement de la même manière pour calculer le dépôt. Comme par définition les coefficients de Zhu et de Raupach ne dépendent pas du nombre de feuilles mais que leur utilisation suppose la prise en compte de la surface de l'obstacle, ils sont ici pondérés par la surface projetée des feuilles sur la section d'entrée. Globalement, tous les coefficients augmentent avec le nombre de Stokes. Les

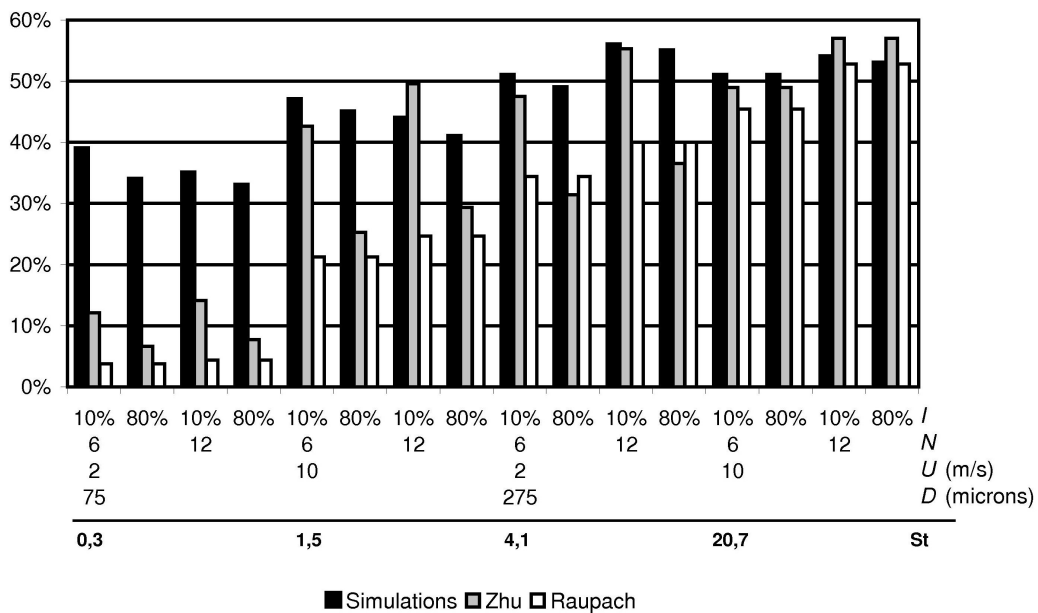


FIG. 2.6 – Comparaison des efficacités obtenues par simulation avec les coefficients de Raupach et Zhu pondérés par la surface projetée des feuilles. I : intensité turbulente, N : nombre de feuilles, U : vitesse moyenne de l'air, D : diamètre des gouttes, St : nombre de Stokes

efficacités que nous obtenons par simulation varient dans des plages plus faibles que les autres ; elles sont notamment plus importantes pour les faibles valeur du nombre de Stokes. Le coefficient de Zhu est très influencé par l'intensité turbulente, ce qui n'est pas le cas pour nos simulations. Ceci montre probablement la différence de comportement liée au nombre d'obstacles. Dans nos simulations, la turbulence est très modifiée derrière la première feuille ; l'intensité turbulente ne dépend d'ailleurs quasiment pas de la turbulence à l'entrée. Globalement, l'influence de la turbulence du flux entrant sur le dépôt est donc beaucoup plus faible.

Des simulations complémentaires ont été réalisées pour juger de l'effet combiné de la surface

⁷Un plan factoriel complet représente l'ensemble des combinaisons des valeurs des différents facteurs. A 2 niveaux signifie que chaque facteur prend deux valeurs : une haute (valeur maximale) et une basse (valeur minimale). Pour k facteurs on a donc k^2 combinaisons à tester

⁸Dans les vignes, les LAD observés peuvent atteindre localement des valeurs de l'ordre de 10 m⁻¹ mais il était difficile de mailler la géométrie avec plus de 12 feuilles.

projetée des feuilles dans le plan perpendiculaire à l'écoulement et du nombre de feuilles. Pour une même surface projetée (49% de la surface d'entrée), le tableau 2.2, montre les pourcentages de volume piégé, pour une vitesse d'air de 2 m/s. Dans tous les cas, un plus grand nombre de gouttes sont piégés lorsqu'il y a six feuilles. Cette différence de comportement, peu sensible pour les gouttes de 275 microns, devient prépondérante pour celles de 75 microns. Avec six feuilles, le pourcentage de volume piégé reste supérieur à 40%. Ces résultats montrent que, dans notre approche, il ne serait pas pertinent de calculer l'efficacité d'impact à partir d'observations réalisées sur des obstacles isolés. Dans le modèle de calcul des dépôts nous avons donc utilisé les coefficients d'efficacité issus des simulations décrites dans ce chapitre. Nous avons pour cela utilisé une méthode de plans d'expériences qui permet de définir les coefficients d'une combinaison linéaire des différents facteurs. Cette première proposition n'a pas été validée pour l'ensemble des valeurs et devra, comme il sera discuté plus loin, être révisée par la suite.

On peut quand même noter que les résultats des simulations sont longs à obtenir (une dizaine

	I=10%		I=80%	
d	1 feuille	6 feuilles	1 feuille	6 feuilles
275	46%	49%	45%	49%
75	17%	40%	13%	44%

TAB. 2.2 – Pourcentage de volume piégé pour une même section projetée de feuilles (49% de la surface d'entrée) en fonction de l'intensité turbulente, I . $U=2\text{m/s}$.

d'heures) quand la réalisation des essais sur le tunnel prend à peine quelques minutes. Par contre, les simulations ont permis d'explorer le champ de variables ce qui n'aurait pas été possible avec le modèle réduit qui ne permet pas de réaliser des gouttes d'un seul diamètre ni un flux d'air à vitesse et turbulence contrôlés. Le nombre de « feuilles » dans le tunnel est aussi beaucoup plus limité que dans le modèle et on a vu que les liaisons mécaniques utilisées perturbaient les résultats.

2.6 Résultats du modèle

Des simulations de dépôt ont été réalisées pour plusieurs LAD. La figure 2.7 montre les résultats obtenus pour des LAD constants de 4, 7 et 10 m^{-1} . L'essai à LAD variable correspond aux mesures réalisées sur des vignes réelles⁹ (cf. chapitre 2.4.1). Les dépôts sont exprimés pour un mètre de largeur du rang de vigne. Les mesures obtenues en conditions réelles ont également été reportées.

Pour toutes les simulations, le dépôt suit une décroissance à allure exponentielle. Ce type de comportement a déjà été proposé par Walklate *et al.* (1996) et Raupach *et al.* (2001b) qui calculent cette décroissance à partir du même coefficient que pour les vitesses d'air (cf. eq. (2.1), p. 22). Raupach propose également de relier ce coefficient à la porosité optique de la végétation. Pour les LAD simulés (4, 7 et 10 m^{-1}), le taux de décroissance prédit par nos simulations vaut respectivement : 3.6, 3.8 et 4.3 quand le coefficient β_2 de Walklate vaut 1.2, 2.1 et 3. La différence entre ces valeurs peut s'expliquer par la prise en compte de la turbulence sur la dispersion du jet (coefficient β_1 de la relation (2.2)).

Les valeurs mesurées au champ montrent une même allure de décroissance si on exclut la première mesure où le LAD est très faible (0.1 m^{-1}). Sur cette première valeur, les valeurs prévues par les simulations ne sont pas du tout correctes. Cela est dû à une mauvaise estimation du coefficient d'efficacité qui a été calé sur une gamme de valeurs trop étroite (les valeurs calculées ne deviennent jamais suffisamment faibles). Ainsi, la décroissance exponentielle qui s'observe pour la simulation à LAD variable n'est pas justifiée. De plus, cela ne serait pas conforme à nos essais

⁹La vigne est représentée par 5 colonnes dont les LAD respectifs sont : 0.1, 3.3, 3.1, 1.9 et 0.3.

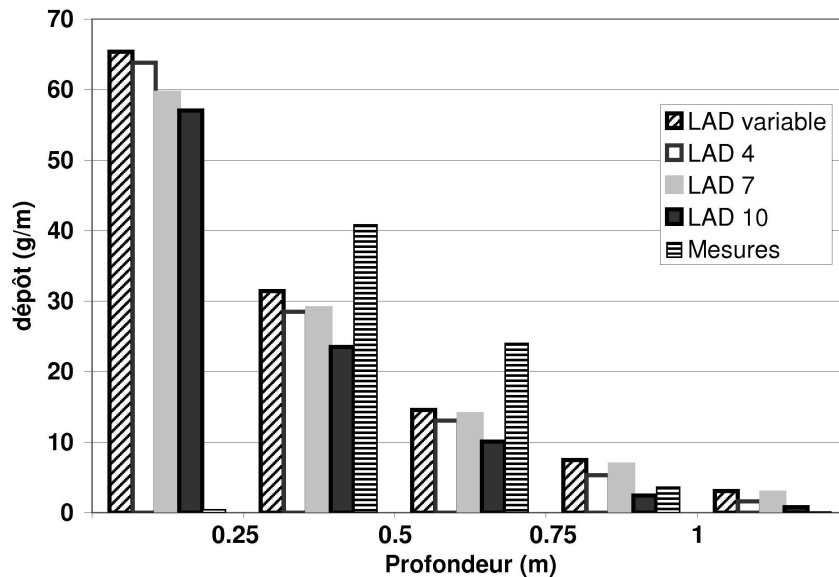


FIG. 2.7 – Résultats des simulations pour plusieurs LAD.

préliminaires qui montrent un dépôt proportionnel au LAD (cf. fig. 2.1).

Le modèle de comportement exponentiel pourrait donc être retenu tant que le LAD est constant. Pour répondre à un objectif d'optimisation des flux pour la limitation des pertes et l'accroissement de l'homogénéité, il faut donc approfondir notre démarche notamment sur l'étude du coefficient d'impact pour les faibles valeurs de LAD. Un autre facteur à considérer est le mouvement des feuilles. Cette étude montre en effet une faible influence de la turbulence sur l'impact des gouttes alors que l'observation de pulvérisations en conditions réelles laisse supposer que ce facteur est très influent. La représentation du feuillage par des feuilles fixes est sûrement responsable de cette incohérence et l'effet croisé de la turbulence du flux d'air et du mouvement des feuilles doit être envisagé pour parfaire cette étude à l'échelle du pied de vigne.

2.7 Conclusion

En plus des diplômes qui ont été obtenus par les étudiants que j'ai encadrés dans ce travail de recherche (voir la liste en introduction de ce chapitre), 3 articles ont été publiés dans des revues scientifiques et 5 conférences ont été présentées.

Pour résumer, la démarche de modélisation de la pénétration de la pulvérisation dans la vigne présentée dans cette partie repose sur la représentation de plusieurs comportements (flux d'air, trajectoire des gouttes, expansion du nuage de gouttes, impact) considérés à deux différentes échelles (celle de la végétation dans sa globalité et celle d'une feuille). Le développement du modèle est basé sur l'utilisation d'un logiciel commercial de CFD pour le calcul du flux d'air et des trajectoires des gouttes. Des modules complémentaires ont été développés en post-traitement pour calculer l'expansion d'un nuage de gouttes autour d'une trajectoire représentative puis l'impact de ce nuage sur les feuilles ce qui permet finalement de calculer la répartition des dépôts dans la végétation. Les mécanismes d'impact des gouttes sur les feuilles ont été obtenus grâce à des simulations. Ces simulations permettent de calculer un coefficient d'efficacité d'impact en fonction des conditions locales. Des moyens d'essai adaptés ont été conçus et mis en œuvre pour valider cette dernière approche. Le modèle développé permet d'explicitier un certain nombre de comportements mais il serait utile de compléter cette approche afin d'aboutir à une validation expérimentale plus complète.

L'étude du coefficient d'impact doit pour cela être élargie sur une plus grande plage d'étude. En effet, la comparaison des simulations avec des mesures de dépôt montre que l'expression que nous avons établie à partir d'un nombre limité de combinaisons des variables, doit être revue pour s'adapter à d'autres conditions (notamment faible densité de végétation). Le calcul du coefficient d'impact pour un grand nombre de combinaisons de variables pourrait présenter un apport méthodologique mais les résultats sont trop longs à obtenir avec le modèle d'impact actuel pour envisager une telle démarche. Le recours à un logiciel de CFD s'avère long et fastidieux à utiliser : le développement d'un modèle dédié constitue une autre voie à envisager.

Dans cette approche, un phénomène important a été négligé : il s'agit du **mouvement des feuilles**. Or, si à dire d'experts, l'intensité turbulente modifie de façon sensible le dépôt, nos résultats de simulations ne sont pas influencés par cette variable. Le choix qui a été fait de travailler à partir de feuilles fixes doit donc être reconsidéré.

Il faut enfin garder en mémoire que le modèle qui a été développé a été calé à partir de mesures réalisées sur un seul pulvérisateur. L'utilisation de l'outil sur **d'autres types de machines** demandera des adaptations qui réclameront une identification expérimentale des valeurs des variables d'entrée (et éventuellement une modification de leur représentation dans le modèle) puis ensuite une validation sur des mesures en conditions réelles.

L'aboutissement de ces recherches fournira un outil pour quantifier les dépôts dans la végétation de manière détaillée, ce qui est indispensable pour optimiser les procédés. **A une échelle spatiale plus importante** (celle d'une parcelle), on peut considérer une approche plus simple basée sur une végétation à LAD constant sur la profondeur. Notre étude confirme qu'on peut alors représenter l'évolution du dépôt dans la végétation par une loi de décroissance exponentielle. Or, c'est cette échelle qui est intéressante dans une approche de gestion des risques. Cette représentation peut donc être retenue pour l'étude des contaminations atmosphériques qui constitue la partie suivante.

Chapitre 3

Contamination atmosphérique au cours des applications

Ces dernières années, la mise en cause des produits phytosanitaires sur la contamination des milieux a amené les pouvoirs publics et l'ensemble de la société à s'interroger sur les risques potentiels encourus par la population dans son ensemble. Au-delà des problèmes de contamination d'eau et des résidus dans les aliments, l'exposition par voie aérienne des populations qui résident autour de surfaces agricoles traitées doit être évaluée. Ainsi, il y a deux ans, le Cemagref a décidé d'étudier la pollution atmosphérique au cours des applications. Le développement de ce travail est principalement construit autour de deux thèses : celle d'Yvan Gil-Pinto, commencée en Janvier 2004, pour les approches expérimentales et celle de Jean-Marc Brun, débutée en Novembre 2004, pour le développement d'un modèle. Suite au travail précédemment mené sur la pénétration dans la végétation, il est en effet apparu que les logiciels de CFD sont lourds à mettre en œuvre et relèvent, sur certains points, d'une complexité qui n'est pas justifiée, ce qui alourdit la mise en œuvre et ralentit les temps de calcul. Ainsi, le développement de modèles à complexité réduite fait l'objet d'une collaboration avec le professeur Bijan Mohammadi, de l'Institut de Mathématiques et de Modélisation de l'Université de Montpellier II. Co-directeur de la thèse de Mr Brun, c'est lui qui donne les orientations et fournit les outils pour les développements numériques. La thèse de Mr Pinto est, elle, co-dirigée par Mr Yves Brunet qui nous apporte son soutien et son savoir-faire dans le domaine de la bio-climatologie.

Les contaminations atmosphériques sont très sensibles aux conditions météorologiques. Dans le cas de la vigne et des autres cultures à port érigé, il faut également prendre en compte l'orientation des jets¹ et l'effet d'écran de la végétation. Dans l'optique de gestion des risques qui a justifié l'exploration de ce thème de recherche, l'objectif de ce travail est double : d'une part, il faut *quantifier les émissions* vers l'atmosphère pendant les applications et d'autre part, il faut *prévoir leur dispersion* géographique (et temporelle).

3.1 Présentation de la démarche

Une étude bibliographique complète (Gil et Sinfort, 2005) a permis de faire le point sur les connaissances concernant la détermination et la modélisation des émissions de pesticides vers l'atmosphère pendant les applications. Suite à cette étude, une méthode expérimentale basée sur le piégeage d'un traceur fluorescent sur des collecteurs a été sélectionnée (d'autant que la maîtrise des traceurs fluorescents a été acquise au cours de l'étude précédente). Cette méthode a fait l'objet de tests préliminaires en conditions contrôlées (soufflerie).

L'étape de quantification des émissions a été menée par une approche expérimentale à partir d'essais sur vigne artificielle, en conditions extérieures. Dans un premier temps, l'objectif était

¹En viticulture, les jets sont souvent orientés de manière à traiter deux rangs - ou plus - de chaque côté, en un seul passage.

de bâtir un protocole permettant de mettre en évidence les émissions et de montrer l'effet des différentes variables (machine et conditions météorologiques). Dans une deuxième étape, les essais ont été répétés d'abord avec un seul réglage pour chaque buse en essayant de travailler dans les mêmes conditions météorologiques puis avec différentes conditions extérieures afin d'évaluer les effets de la taille des gouttes et des conditions ambiantes. Les résultats de ces essais ont été analysés pour tenter une modélisation statistique. Ces travaux sont décrits dans [Gil *et al.* \(2006\)](#). En parallèle un modèle à complexité réduite a été bâti par Mr Brun pour prévoir les dispersions de produit. S'appuyant sur la décroissance exponentielle de la concentration de produit dans la végétation, il calcule les flux verticaux (vers l'atmosphère) puis la dispersion horizontale de ces flux dans un plan horizontal, en fonction des conditions de vent et de la topographie du terrain. Les entrées du modèle sont alimentées par les données expérimentales provenant de l'étude sur la pénétration de la pulvérisation dans la végétation. Ces travaux n'ont pas encore été publiés. L'étape suivante, en cours de réalisation, consiste à caler le modèle à partir des émissions mesurées sur la parcelle artificielle.

3.2 Quantification des émissions

3.2.1 Evaluation des collecteurs

Les collecteurs choisis sont des fils de 2mm de diamètre, couramment référencés dans la littérature. Placés au dessus de la parcelle, ils doivent piéger les émissions de la solution de traceur fluorescent pulvérisée au dessus de la parcelle².

Afin d'évaluer l'efficacité de collecte de ces fils un essai en soufflerie a été mis en place. Différents écartements de fils ont été testés pour plusieurs vitesses moyennes et énergies turbulentes de vent ainsi que pour deux calibres de buse (pour obtenir plusieurs granulométries). Les résultats montrent que la seule variable significative qui affecte l'efficacité de collecte est la vitesse du vent. Dans les conditions normales d'application (avec un vent inférieur à 3,5 m/s) l'efficacité de collecte obtenue est supérieure à 77% (cf. fig. 3.1). La granulométrie de la buse n'influence pas beaucoup cette efficacité.

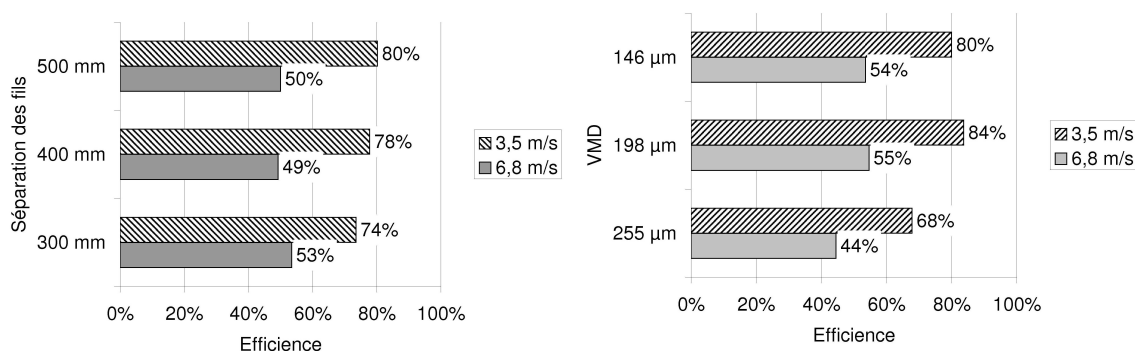


FIG. 3.1 – Efficacité de collecte des fils en fonction de l'espacement entre fils (à gauche) et du VMD (à droite), pour deux vitesses d'air.

3.2.2 Mise en place de la méthode d'essai

Matériel et méthode

Pour mettre en évidence les phénomènes de transfert vers l'atmosphère, il était nécessaire de réaliser des mesures à l'extérieur ce qui rend difficile la maîtrise de la plupart des facteurs.

²Une solution aqueuse de Brilliant Sulphoflavine (C₁₉H₁₃N₂O₅SNa) diluée à 0,1% et d'un surfactant (Nonylphenoxy polyéthoxyethanol, « Agral^R »), dilué aussi à 0,1%.

Une vigne artificielle de 5 rangs de 10 m a été installée de manière à nous affranchir des variabilités spatiales et temporelles de la végétation. Cette vigne artificielle est constituée d'un filet tendu sur des structures métalliques. Il avait été vérifié au préalable que le comportement aérodynamique du filet est proche de celui d'une vigne réelle (Roux *et al.*, 2006). Les rangs sont placés perpendiculairement au vent dominant. Les fils collecteurs ont été disposés autour de la microparcelle de manière à constituer une structure de « boîte » de 15 m de côté et de 5 m de haut.

Pour ces essais on a choisi un pulvérisateur à jet porté de type radial dont les réglages sont faciles à référencer et à conserver. Dix buses sont placées en arc de cercle autour du ventilateur. L'orientation des buses et des déflecteurs a été réglée en laboratoire avec des mesures anémométriques pour obtenir la meilleure symétrie possible. Les variables testées pendant ces essais ont été :

- la vitesse d'air émise par le pulvérisateur (3 vitesses de rotation du ventilateur)
- la buse : deux types de buses à cône creux, alimentées à 10 bar, caractérisées par leur débit - 3,8 et 10 l/min - et par leur VMD³ - 65 et 225 μm
- le nombre de buses alimentées : 5 ou 10
- la vitesse d'avancement du tracteur : 3,75 et 5 km/h.

Trois anémomètres ultrasoniques placés sur un mât permettent d'enregistrer le profil de température et de vent pendant les essais. Les fils sont rincés entre chaque essai et les quantités piégées sont évaluées par fluorimétrie.

Résultats

Les mesures permettent de calculer les profils de dérive sur chaque côté de la « boîte » (dérive horizontale) et de calculer les pertes par le haut (dérive verticale). Les résultats montrent que le flux de dérive est essentiellement influencé par la vitesse du vent et par le VMD des buses (cf. fig. 3.2). Pour des faibles vitesses de vent, les pertes verticales deviennent plus importantes que la dérive horizontale. Les résultats des essais montrent une bonne sensibilité aux différentes

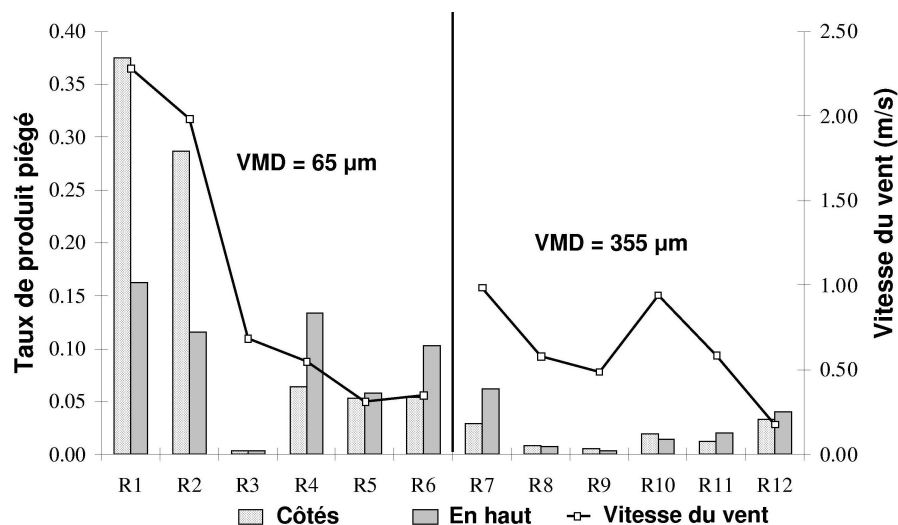


FIG. 3.2 – Taux de dérive horizontale et verticale et vitesse de vent pour les essais réalisés.

variables et mettent en évidence les observations généralement reportées dans les communications scientifiques.

³VMD : Volume Median Diameter, correspond au diamètre médian pour la répartition volumique du spectre granulométrique.

3.2.3 Profils de dérive verticale

Matériel et méthodes

Nous avons ensuite conduit une deuxième série d'essais visant à mesurer les profils verticaux de concentration pour chaque buse, dans des conditions aussi peu variables que possible. Pour cette étude, la disposition des fils a été modifiée : ils ont été placés au dessus des inter-rangs et forment quatre plans horizontaux (cf. fig. 3.3). 10 essais ont été réalisés avec chaque buse, les autres réglages étant maintenus constants. Le pulvérisateur était conduit uniquement dans le rang central, mais effectuait quatre passages. Les essais ont été menés uniquement le matin et sur une période la plus courte possible (4 jours) de manière à limiter les variations de conditions météorologiques. Pour tous les essais les conditions atmosphériques sont instables ou proches de la neutralité.

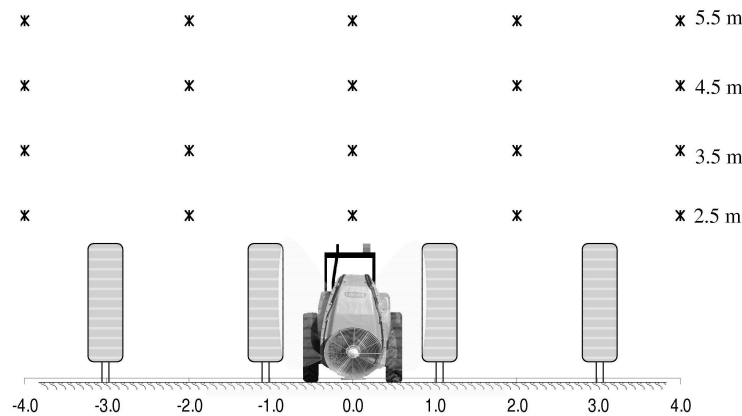


FIG. 3.3 – Dispositif expérimental pour la mesure des profils de dérive verticale. Les croix représentent les positions des fils.

Résultats

La figure 3.4 montre les médianes et les principaux percentiles des résultats obtenus. Sur le premier plan, à 2m50 du sol, les pertes sont de l'ordre de 10% et on voit que les variations sont beaucoup plus importantes lorsque le diamètre des gouttes est relativement faible. Pour les deux VMD, les quantités piégées décroissent avec la hauteur mais restent quand même non négligeables sur le plan le plus haut, à 5m50 (de l'ordre de 5%). Les vitesses instantanées de vent

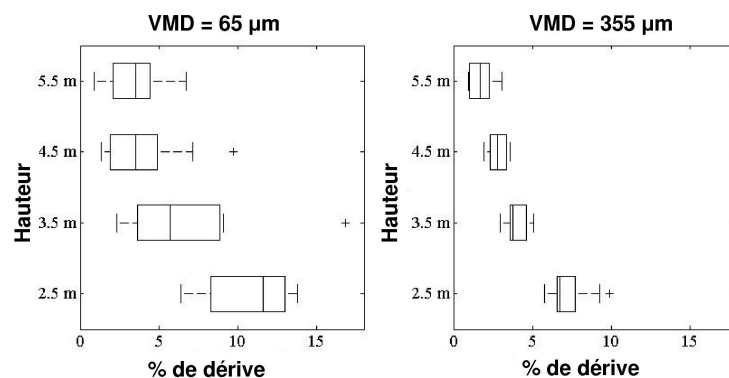


FIG. 3.4 – Pourcentages de dérive mesurés en fonction de la hauteur. Boîtes rectangulaires : médiane et percentiles d'ordre 25 et 75% - barres d'erreur : percentiles d'ordre 10 et 90%

permettent de calculer l'intensité turbulente ainsi que la vitesse de friction⁴, u^* . Sur la dimension verticale, on peut ainsi facilement vérifier que la vitesse du vent suit un profil logarithmique. Il peut donc être estimé à partir de deux valeurs seulement. Les profils de concentration peuvent, en moyenne, être représentés par une loi de transport de particules au dessus d'une végétation :

$$\frac{C}{C_s} = \left(\frac{z}{z_s} \right)^{-\left(\frac{V_s}{\kappa u^*} \right)} \quad (3.1)$$

où κ est la constante de Von Karman (0,4), u^* , la vitesse de friction, et V_s la vitesse de sédimentation d'une particule de diamètre D . En régime de Stokes ($Re_d < 1$) :

$$V_s = \frac{g \cdot D^2}{18} \times \frac{(\rho_a - \rho_l)}{\rho_a \nu_a} \quad (3.2)$$

Dans le détail, quelques écarts existent entre cette relation et les valeurs mesurées : il faudra éventuellement considérer l'évaporation des gouttes au cours de leur ascension.

3.2.4 Effet des conditions ambiantes

Matériel et méthodes

Les observations précédentes nous permettent de simplifier le protocole pour ne conserver que deux hauteurs de mesure pour le vent et pour les concentrations en traceur. On a ainsi seulement maintenu les cinq fils du premier plan (à 2m50) et trois fils à 5m50. Les essais ont été réalisés pendant toute la saison de traitement des vignes et les dates ont été choisies pour maximiser la diversité des conditions météorologiques pendant cette période. Les essais ont tous fait l'objet de trois répétitions dans la même heure.

Les données météorologiques recueillies sont les vitesses de vent en trois dimensions (échantillonnées à 10 Hz), l'humidité relative et la température. La stabilité atmosphérique est évaluée à partir du rapport z/L où $z = 4m$ et L désigne la longueur de Monin-Obukhov :

$$L = \frac{u^*{}^3 T_s}{\kappa \cdot g \cdot \overline{T'w'}} \quad (3.3)$$

Résultats

Les quantités collectées varient entre 5 et 10% à 2m50 et entre 0,5 et 2% à 5m50. Elles sont environ deux fois plus importantes pour la buse à faible VMD. La conduite des essais autorise une analyse de l'influence des différents facteurs. En un premier temps, nous avons choisi de réaliser une régression multiple. Pour les mesures à 2m50, la régression conduit à un modèle statistique permettant d'estimer les pertes avec un bon coefficient de régression ($R^2 = 0.84$, cf. fig. 3.5). Les facteurs les plus influents sont, dans l'ordre : le VMD, la vitesse du vent, la température de l'air, la stabilité atmosphérique et l'humidité relative. Par contre, à 5m50, aucun modèle n'a pu être mis en évidence. Cette observation justifie le recours à un modèle mécaniste.

3.3 Modèle mécaniste

La modélisation de la contamination atmosphérique doit représenter le devenir du flux émis par le pulvérisateur au sein de la vigne, puis la dispersion atmosphérique qu'on limitera à quelques kilomètres (échelle « méso »). L'objectif de fournir des outils pour le diagnostic et/ou la gestion des risques écarte de fait le recours à des logiciels de CFD tels que nous les avons utilisés dans la partie précédente. Il est en effet nécessaire d'obtenir des temps de calcul rapides utilisant des

⁴ $u^* = \left(\overline{u'w'^2} + \overline{v'w'^2} \right)^{1/2}$

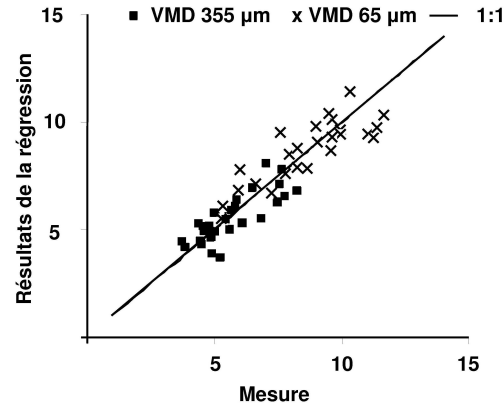


FIG. 3.5 – Pourcentages de dérive à 2m50 : corrélation entre les estimations par régression et les valeurs mesurées.

données minimales sur un support léger. Pour cela, Mr Mohammadi nous a proposé de développer un Modèle à Complexité Réduite s'appuyant sur les connaissances acquises au préalable sur la pénétration du jet dans la vigne et sur nos données expérimentales décrivant les flux d'air et les profils de concentration. Ce modèle s'appuie sur des fonctions analytiques. Aucun maillage n'est réalisé, ce qui permet d'obtenir les solutions en quelques secondes.

Ce sont ces objectifs qui sont poursuivis dans la thèse de Mr Brun. Les solutions numériques qui sont proposées relèvent des compétences de l'équipe de mathématiciens : j'en donnerai juste ici une description rapide afin de pouvoir discuter de l'adaptation de ces outils à nos besoins.

Le modèle comprend trois niveaux qui correspondent à trois échelles : celle du pulvérisateur, celle de la végétation et celle du transport dans l'atmosphère. Le premier niveau décrit les flux d'air et de concentration émis par le pulvérisateur à l'aide de deux fonctions analytiques g_1 et g_2 . Le deuxième niveau représente le devenir du jet pulvérisé dans l'air et dans la végétation ce qui fournit les champs de vitesse et de concentration en trois dimensions dans la parcelle traitée. Les composantes verticales de ces deux champs permettent de calculer les quantités de produit transportées vers l'atmosphère. Ces quantités sont ensuite intégrées dans le temps pour alimenter le troisième niveau du modèle qui simule la dispersion du produit dans l'air. Ce troisième niveau calcule les répartitions de concentration de pesticide dans un plan horizontal. Partant du principe que le temps d'injection est très court par rapport au temps de déplacement du tracteur sur toute la parcelle, la concentration est transportée comme un scalaire passif et la description du jet est indépendante du temps.

Dans les deux premiers niveaux du modèle, le champ de vitesse d'air émis par le pulvérisateur est défini par une représentation en coordonnées cylindriques utilisant la distance au pulvérisateur, r , et l'angle, θ , dans le plan perpendiculaire à l'avancement du véhicule. Le modèle repose sur l'hypothèse que l'on peut exprimer les champs de vitesses $\mathbf{u}$ et de concentration C par un produit de fonctions à variables séparées. L'expression de ces champs est alors de la forme :

$$\mathbf{u} \sim f_1(r)g_1(\theta)h_1(z)\mathbf{R} \text{ et } C \sim f_2(r)g_2(\theta)h_2(z)\mathbf{R} \quad (3.4)$$

$f_1(r)$ et $f_2(r)$ décrivent l'allure du profil de vitesse et de concentration lorsqu'on s'éloigne du pulvérisateur sur le rayon r . Ces fonctions prennent en compte l'effet du passage du flux dans la végétation. Leur expression peut être obtenue à partir des résultats expérimentaux ou par résolution de l'équation de conservation du mouvement et de transport scalaire en une dimension. $g_1(\theta)$ et $g_2(\theta)$ modifient les fonctions $f_1(r)$ et $f_2(r)$ en fonction de l'angle θ : elles découlent des caractéristiques du jet à l'émission (et donc des buses) et font l'objet du premier niveau du modèle. La forme analytique de ces fonctions est déterminée par assimilation des données expérimentales. $h_1(z)$ et $h_2(z)$ sont deux fonctions de répartition gaussiennes qui représentent l'allure des profils

(de vitesse et de concentration) suivant la direction de l'avancement du tracteur. $\mathbf{R}$ est un vecteur unité qui décrit la sphère centrée sur le point d'émission. La solution doit vérifier les équations de la mécanique des fluides (conservation de la masse, de la quantité de mouvement et du scalaire représentant la concentration), ce qui rajoute des conditions permettant la fermeture des équations.

La dispersion des polluants dans l'air est un problème traité depuis les années 1930 et qui a donné lieu au développement de nombreux modèles dont certains font partie du domaine public. En général, ces modèles sont basés sur le principe d'une dispersion Gaussienne et requièrent la saisie de données météorologiques précises (vent, turbulence, stabilité atmosphérique) ainsi que de données concernant la source et la description du milieu dans lequel s'opère la dispersion (topographie, présence d'obstacles).

Le troisième niveau du modèle est basé sur ce principe. Son originalité est de définir une nouvelle métrique : les distances entre deux points donnés sont calculées à partir du temps mis au flux pour parcourir la distance entre ces deux points.

3.4 Développements en cours

L'étude de la contamination de l'atmosphère a été envisagée à deux niveaux : la quantification des pertes et la dispersion atmosphérique. Les approches expérimentales ne concernent pour l'instant que le premier niveau. Elles ont fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique (plus une autre, en cours d'évaluation) et de trois communications dans des congrès.

3.4.1 Estimation des pertes

Approche expérimentale

L'approche expérimentale décrite ici montre comment, à partir d'étapes successives, il a été possible de définir un protocole pour estimer les quantités émises au dessus de la parcelle. L'analyse statistique des résultats montre ici toute son importance. Une méthode d'analyse par multi-régression a fourni un premier modèle de calcul des pertes pour le pulvérisateur étudié sur vigne artificielle. Des essais sont prévus pour évaluer les pertes vers l'air d'une quinzaine de pulvérisateurs différents, à l'aide de notre dispositif. Les résultats permettront de valider ou de compléter la modélisation statistique proposée. Etant donné que l'utilisation de ce travail est de fournir des outils de diagnostic, d'autres méthodes d'analyse pourront être envisagées. Par exemple, les outils de logique floue sont actuellement en cours d'étude : ils permettent de définir des règles d'inférence pour prédire des niveaux de pertes vers l'air à partir de données sémantiques (par exemple, pour la taille des gouttes, diamètre faible, moyen ou grossier). L'avantage de cette approche est de fournir un outil de type expert qui prend en compte les interactions entre toutes les variables.

Calage et validation du modèle

Le calage du modèle pour l'estimation des pertes (niveaux 1 et 2) vise à donner une forme aux fonctions f_1 , f_2 , g_1 et g_2 de l'équation (3.4). Les fonctions f_1 et f_2 peuvent être déduites des comportements de loi exponentielle mis en évidence dans le chapitre 2. g_1 et g_2 seront obtenues par une modélisation des mesures de la répartition des vitesses d'air et de la concentration autour du pulvérisateur. En un premier temps ces modèles seront obtenus pour le pulvérisateur utilisé pour les mesures sur la vigne artificielle. Il sera également nécessaire de paramétrer les fonctions gaussiennes h_1 et h_2 .

Pour valider cette partie du modèle, on calculera la quantité globale de pesticide émise au-dessus de la parcelle et on la comparera aux données expérimentales décrites en 3.2.3. Le modèle ne prenant pas en compte les conditions météorologiques autres que le vent, un résultat attendu de la validation est de confirmer que cette simplification est pertinente.

Utilisation du modèle

L'objectif de ce modèle est d'alimenter le modèle de niveau 3 qui prévoit la dispersion atmosphérique. Il sera également intéressant de l'utiliser pour comparer les émissions à partir de différents types de traitements. On pourra ainsi explorer les plages de quantités émises dans des conditions combinant un traitement, une conduite de vigne, un type de machine et un type de réglage. Ce travail demande sûrement un travail approfondi sur la caractérisation des flux autour des pulvérisateurs ainsi que sur l'influence des réglages. L'extension à d'autres cultures (arboriculture) est également à envisager.

Parallèlement, l'utilisation de ce modèle pourra être élargie pour réaliser des bilans dans les trois compartiments : plante-sol-air. Pour réaliser ces bilans, une modélisation simplifiée, telle que celle qui est proposée dans ce chapitre devrait se révéler suffisante. Le modèle détaillé de pénétration dans la végétation pourra éventuellement servir à optimiser la prévision des dépôts dans la plante. Les dépôts directs au sol sont a priori peu compliqués à expliquer : ils résultent essentiellement de l'orientation des jets. Les quantités émises dans l'air pourront donc aussi s'obtenir par bilan (quantité émise – quantité déposée dans la végétation et au sol). Le croisement des deux approches constituera en cela une autre possibilité de validation.

3.4.2 Dispersion atmosphérique

Les phénomènes de dispersion atmosphérique des polluants ont fait l'objet de très nombreuses études par des équipes spécialisées et requièrent des compétences importantes pour caractériser les conditions ambiantes ainsi que le devenir des pesticides dans l'air. Dans le cadre de nos approches, le modèle à complexité réduite de niveau 3 peut s'avérer extrêmement utile pour visualiser les contaminations sur des échelles relativement faibles. Le modèle étant, par choix, très simplifié, il sera important, au niveau de l'équipe, de trouver des voies de validation. Des essais sont d'ores et déjà prévus dans un projet associant des partenaires locaux, dont des spécialistes des mesures des pollutions atmosphériques. Dans ce projet, il est prévu de mesurer la qualité de l'air à proximité de zones de pulvérisation pendant la campagne de traitements viticoles. Les quantités de produit pulvérisées seront estimées à l'aide d'enquêtes ce qui ne permettra pas une validation précise mais fournira des ordres de grandeur, pour l'instant encore inconnus. La mise en place de protocoles de validation plus spécifiques ne pourra se faire qu'à l'aide d'importants moyens. Le modèle présente l'avantage de fournir des résultats pour une première évaluation (a priori) des risques. Il a par ailleurs déjà permis de délimiter les zones à enquêter pour évaluer les émissions susceptibles d'être détectées sur les points de mesures en fonction des vents dominants.

Chapitre 4

Conclusion

Dans ce mémoire, j’ai montré comment ma thématique de recherche avait évolué pour répondre à la demande sociale. J’ai expliqué comment l’utilisation d’un premier modèle, géométrique, avait été conçu comme un outil de simulation pour évaluer des performances matérielles (celles des rampes des pulvérisateurs pour grandes cultures) puis comment la modélisation était devenu un outil central pour mettre en évidence les phénomènes en jeu dans un système complexe (ici, la pénétration de la pulvérisation dans la végétation). Dans l’étude des pollutions atmosphériques, j’ai montré la complémentarité entre une approche expérimentale et des modèles à complexité réduite pour fournir des outils d’aide à la décision à destination des experts et des décideurs.

A travers ces développements, mon objectif était de mettre en évidence comment j’avais couplé approche expérimentale et modélisation pour fournir des résultats à la fois scientifiquement validés et utilisables en pratique pour l’étude de phénomènes aussi difficiles à modéliser (car complexes) qu’à caractériser (car variables dans le temps et dans l’espace). Dans cette conclusion, je vais tout d’abord (4.1) reprendre les aspects génériques de cette démarche sur les différentes problématiques que j’ai étudiées. Je me propose ensuite (4.2) de revenir sur les différents types de modèles qui ont été développés pour montrer leur spécificité ainsi que leur complémentarité. Je conclurai finalement (4.3) sur les objectifs atteints et sur les perspectives que j’envisage pour ce travail de recherche.

4.1 Le couplage modèle-expérimentation : une complémentarité indispensable

J’ai détaillé dans la première partie l’intérêt du couplage entre approche expérimentale et modélisation. Les cas d’application qui ont été traités par la suite ont confirmé la nécessité de ce couplage :

- pour analyser les situations, mettre en évidence la complexité, déterminer les variables influentes : ces points ont été soulignés dans chaque application (effet des mouvements de la rampe sur la répartition, effet de la densité de végétation sur le dépôt, effet de la granulométrie des buses et des conditions climatiques sur les contaminations atmosphériques).
- pour formuler les hypothèses de comportement : les résultats expérimentaux ont par exemple conduit à choisir une représentation géométrique pour le modèle de répartition au sol ou encore à représenter la végétation comme un milieu homogène.
- pour choisir les formulations du modèle et définir leurs paramètres : ces opérations se sont avérées particulièrement délicates lors de l’utilisation de logiciels de CFD qui auraient pu, sans la comparaison aux résultats expérimentaux, conduire à des résultats peu cohérents. Dans certains cas, cette étape a fait l’objet de nombreux « aller-retours » entre approche expérimentale et modèle : ce fut notamment le cas pour l’étude de l’impact des gouttes sur les feuilles.
- pour valider les modèles ou les parties de modèle : dans certains cas, la confrontation

aux résultats expérimentaux a conduit à complexifier le modèle (passage d'un modèle aux concentrations à un modèle lagrangien) ; dans d'autres cas, les limites du champ d'application ont été mises en évidence (calcul du coefficient d'impact sur une plage trop faible de densité de végétation) ainsi que la limite de validité des résultats (décroissance exponentielle du dépôt).

J'ai voulu ainsi montrer que dans ma démarche de modélisation, l'approche expérimentale est présente à toutes les étapes. Sans elle, la modélisation n'aurait guère de sens, d'autant, que des outils tels que des logiciels de CFD délivrent systématiquement des résultats, qu'ils soient cohérents ou non.

Ce travail a également montré les difficultés de mise en place d'une démarche expérimentale pour l'étude des pulvérisations agricoles. L'étude des pertes atmosphériques sur une parcelle artificielle montre bien comment, par étapes successives on a abouti à une méthodologie pertinente pour la mise en évidence d'un comportement. Sans que cela n'ait été décrit de manière détaillée, le même type d'approche a dû être mené pour mettre en place les méthodes de caractérisation du dépôt à l'échelle d'une parcelle, de mesure des flux de part et d'autre d'une végétation ou pour la conception du modèle réduit pour la mesure du coefficient d'efficacité lors de l'étude sur le dépôt. De plus, du fait de la complexité du système, les essais sont lourds à mettre en oeuvre et sont surtout très spécifiques du phénomène étudié. Aussi il est rare que l'on puisse réutiliser les résultats d'expérience à différentes étapes de développement ou pour plusieurs modèles ou sous-modèles. Comme les observations sont également limitées dans le temps, du fait de l'évolution saisonnière du support végétal, il est souvent difficile d'obtenir toutes les données nécessaires.

4.2 L'utilisation de la modélisation pour l'étude de l'application des produits phytosanitaires

Au travers des différents développements qui ont été décrits, différents concepts de modélisation ont été balayés. On a en général eu recours à plusieurs modèles couplés, agissant à différents niveaux d'échelle. Ainsi, ils diffèrent tant pour l'objet auquel ils s'appliquent, que pour le formalisme choisi et pour l'utilisation qui en est faite.

L'*objet* principal des modèles développés est de représenter des phénomènes physiques. On peut cependant considérer que la représentation spatiale de la végétation ou celle des flux (air et gouttes) à la sortie des pulvérisateurs fait également l'objet de modèles qui résultent eux aussi d'hypothèses et de choix. Les étapes de conception géométrique et de maillage font partie de cette modélisation.

Pour représenter les phénomènes physiques, le *formalisme* suivi passe par des modèles déterministes s'appuyant pour beaucoup sur la résolution des équations de la mécanique des fluides, soit à l'aide de plateformes de calcul généralistes (CFX, Fluent), soit par des logiciels dédiés (modèle de calcul des pertes atmosphériques). Les logiciels de CFD font par ailleurs déjà appel à des modèles, notamment pour la représentation de la turbulence. D'autres représentations mathématiques ont été utilisées (dispersion du nuage de gouttes dans la végétation, dispersion atmosphérique du polluant). On a également eu recours à un modèle basé sur des lois géométriques et à des modèles de type statistiques basés, l'un sur des résultats de simulations et l'autre sur des résultats expérimentaux. Dans ces deux derniers cas, le nombre limité de cas étudiés a orienté le choix des outils statistiques.

Enfin, les modèles développés diffèrent par leur *utilisation*. Tout d'abord, dans les deux applications qui ont été traitées, on a eu recours à au moins deux échelles de modélisation : une échelle de détail à laquelle certains phénomènes sont décrits précisément et une échelle plus globale qui correspond à celle des résultats attendus. Pour l'étude de la pénétration, le modèle global avait

pour objectif d'améliorer la compréhension des phénomènes : la modélisation nous a ainsi permis de tester plusieurs hypothèses. Le modèle de dispersion atmosphérique est conçu pour être un outil de prédiction, dans le cadre de la gestion des risques. On a vu qu'il avait également été utilisé avec des méthodes inverses pour délimiter une zone d'enquête. Une même démarche inverse pourra par exemple être utilisée pour optimiser les flux vis à vis des dépôts dans la végétation.

Chaque modèle ou partie de modèle qui a été conçu a donc des spécificités et des objectifs qui lui sont propres. On ne saurait les utiliser dans un autre contexte. On peut par ailleurs remarquer que, sur certains aspects, approche expérimentale et modélisation se confondent en cela que les modèles peuvent être considérés comme des outils d'expérimentation virtuelle. C'est en effet la complexité des phénomènes qui a rendu nécessaire le développement de ces modèles et, comme je l'ai déjà souligné, la démarche de modélisation a fourni des solutions là où la démarche expérimentale aurait atteint ses limites du fait de la difficulté à maîtriser l'ensemble des variables.

4.3 Objectifs atteints et perspectives

Au delà de la démarche mise en place, je vais ici faire le bilan des avancées scientifiques proposées dans ce travail. Je reviendrai enfin sur les principaux points à approfondir pour envisager quelques perspectives.

4.3.1 Bilan des avancées scientifiques

Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire propose des solutions à la fois au niveau expérimental et au niveau de la modélisation du transport des gouttes et ce, dans les deux compartiments « air » et « végétation ».

Dans la végétation, des protocoles ont été développés pour mesurer les dépôts sur les feuilles. Malgré les fluctuations des variables dues à un travail en milieu extérieur, les solutions sélectionnées pour le traceur, la méthode de piégeage et l'échantillonnage fournissent des résultats qui mettent en évidence l'effet de la densité de végétation sur le dépôt à l'échelle du rang de vigne.

Un modèle réduit a de plus été conçu pour étudier l'impact sur les feuilles dans des conditions contrôlées. La conception de ce modèle a évolué par étapes jusqu'à fournir des résultats similaires à ceux obtenus par simulation.

Deux modèles ont été proposés : le modèle d'impact (à l'échelle de la feuille) et le modèle global de dépôt (à l'échelle du pied de vigne). Ce choix permet de répondre aux enjeux qui avaient été identifiés par les solutions suivantes :

- La **géométrie** de la canopée est représentée comme un milieu homogène au niveau global. La présence des feuilles est détaillée au niveau local, à l'aide de plaques verticales, carrées, fixes et rigides.
- A l'échelle globale, la représentation de **la population de gouttes** est faite à partir de quelques trajectoires représentatives d'un point d'émission et d'une classe de diamètre. L'ensemble de la population est décrit par un modèle de dispersion de nuage autour de ces quelques trajectoires. Pour le modèle d'impact, la représentation est plus détaillée et on a simulé un très grand nombre de trajectoires.
- **Les interactions entre l'air et la végétation** sont simplifiées dans le modèle global puisque le milieu est supposé homogène : l'action de la végétation sur l'air est décrit par des termes « source » pour la quantité de mouvement et les termes de turbulence. Ces termes sont calculés à partir de la densité de végétation dans des Volumes Élémentaires Représentatifs (VER). Dans le modèle local, la modélisation est menée de manière plus fine et repose sur l'ajout de lois de paroi au voisinage des feuilles.

- **L’interaction entre l’air et les gouttes** est décrite dans les deux modèles par une représentation lagrangienne.
- Enfin **l’impact des gouttes** est estimé à l’aide d’un « coefficient d’efficacité » obtenu à l’aide du modèle local. Une approche par plans d’expériences a été proposée pour expliciter le calcul de ce coefficient. Le dépôt est finalement calculé par le modèle global pour chaque trajectoire et dans chaque VER .

Dans l’air, une méthode de mesure a été choisie et des protocoles ont été conçus pour mesurer les émissions en phase liquide au dessus de la parcelle. La méthode sélectionnée a été validée en soufflerie. Les résultats obtenus en terme de quantité de produit piégé montrent une sensibilité importante aux conditions atmosphériques, en cohérence avec les phénomènes connus. Une étude par multi-régression a permis d’établir une relation explicite entre les pertes mesurées et des variables sélectionnées pour décrire les conditions atmosphériques. Dans nos conditions d’étude, cette relation permet de calculer les pertes au dessus de la parcelle avec une faible probabilité d’erreur.

Du point de vue de la modélisation, l’utilisation d’un modèle à complexité réduite a été retenue. Elle permet la prise en compte des différentes échelles de manière couplée mais indépendante. Elle est basée sur la définition de fonctions analytiques dont la forme est fixée a priori. Les résultats capitalisés dans les précédentes études fournissent les moyens de formaliser et de paramétrer ces fonctions analytiques.

4.3.2 Points à approfondir et perspectives

Les points à approfondir ont été détaillées dans les conclusions des chapitres 2 et 3. Je ne reviendrai donc dessus que dans la mesure où ils alimentent de nouvelles perspectives.

Par rapport à l’étude du transport dans la végétation, les résultats décrits dans ce mémoire montrent qu’un aspect important à approfondir est celui de la prise en compte du **couplage flux/structure** pour son influence sur l’impact des gouttes. Le premier enjeu de cette démarche est de représenter le mouvement de la végétation face à un flux turbulent. Des essais préliminaires ont déjà montré que le comportement des branches pouvait être assimilé à celui d’un oscillateur mécanique. Les feuilles, elles, montrent un mouvement d’oscillation autour de leur pétiole. Une étude expérimentale doit être menée en soufflerie pour mettre en évidence l’influence des caractéristiques du flux d’air sur les paramètres de ces mouvements. Le second enjeu est de déterminer le rôle du mouvement des feuilles dans le piégeage des gouttes. A priori, on peut penser que ce mouvement augmente le dépôt car l’inertie des gouttes n’est plus le seul phénomène en jeu. L’approche expérimentale permettra là encore de mettre en évidence les principaux comportements. Une étude sur une seule feuille, dans le modèle réduit développé pour l’étude du coefficient d’impact peut fournir les premiers éléments de compréhension avant de passer à une étude sur une branche, puis un pied, dans la soufflerie. Le recours à un logiciel de CFD peut permettre de détailler les différents phénomènes à partir de maillages adaptatifs. Toutefois, si les principaux comportements peuvent être identifiés et isolés par la méthode expérimentale, le recours à des modèles à complexité réduite tels que celui développé pour la dispersion atmosphérique sera d’abord à rechercher. Les résultats de cette étude fourniront assurément des pistes intéressantes pour l’amélioration des technologies existantes.

Pour l’étude des pertes vers l’air et de la dispersion atmosphérique, **le modèle à complexité réduite** réalisé grâce à la collaboration avec Mr Mohammadi fournit un outil qui sera précieux dans le cadre de la gestion des risques. Les démarches de calage et de validation sont en cours, à partir des données expérimentales collectées par Mr Gil. Il sera ensuite nécessaire de proposer des descriptions analytiques ou de paramétrer les fonctions déjà proposées à l’intérieur du modèle pour diverses technologies et différents réglages. Ce travail pourra s’appuyer sur des données

descriptives des flux de différents types de pulvérisateurs : un tel jeu de données est en cours de constitution sur tout le parc de machines d'un bassin versant. Le travail devra mettre en évidence des fonctions génériques de description des flux émis soit pour toutes les machines soit pour les différentes technologies. Le modèle pourra alors être proposé pour calculer les pertes au niveau d'une parcelle dans différentes configurations.

Comme il est par ailleurs prévu de coupler le deuxième niveau du modèle (dispersion atmosphérique) avec des Modèles Numériques de Terrain pour assimiler les données topographiques, une autre perspective à ce travail peut être de proposer l'établissement de scénarii en fonction des données descriptives des répartitions spatio-temporelles des applications (quel produit, sur quelle parcelle, à quel moment) ce qui constituerait finalement un outil de prédiction des contaminations à l'échelle d'une petite région. On peut aussi envisager d'utiliser cet outil pour tester l'influence de différents aménagements ou l'exposition de divers milieux à risque.

Dans cette étude des pertes vers l'air, ni la méthode expérimentale ni le modèle ne prennent en compte **l'évaporation des gouttes**. Or, l'analyse des derniers résultats expérimentaux, montrent que dans des conditions favorisant l'évaporation, les quantités piégées sur les fils sont anormalement faibles. Il faut donc envisager de compléter la validation du protocole expérimental pour intégrer ce phénomène. Par ailleurs, la prise en compte de l'évaporation permettrait d'approfondir les approches classiques de calcul des quantités déportées par dérive (celles qui se déposent à proximité de la parcelle traitée). En effet, l'évaporation n'est en général pas prise en compte alors que ce phénomène joue probablement un rôle important, surtout dans les régions où les traitements se font dans des conditions relativement chaudes et sèches comme c'est le cas dans les pays du pourtour méditerranéen. La soufflerie du Cemagref étant maintenant équipée d'un système de climatisation, cette étude pourra être abordée par une approche expérimentale en conditions contrôlées. Cette étude est déjà amorcée dans le cadre d'une nouvelle thèse, montée en partenariat avec la Tunisie.

Enfin, de **nouvelles approches** peuvent être envisagées pour développer des technologies innovantes pour limiter les pertes environnementales. Les méthodes mises en œuvre à ce jour reposent soit sur des systèmes de panneaux récupérateurs soit sur la mise en place de boucliers ou de déflecteurs. Le recours à l'assistance d'air à l'extérieur du jet ou en périphérie de la machine pour protéger l'environnement n'a pas encore été proposé à ce jour. Les outils et les méthodes décrits dans ce mémoire fournissent des moyens pour analyser les aspects scientifiques de tels développements.

Bibliographie

- Barker, G. L., Thompson, J. F., Threadgill, E. D., 1978. Spray droplet deposition on a three-dimensional object. Transactions of the ASAE 21 (5), 806–812.
- Bilanin, A. J., Teske, M. E., Barry, J. W., Ekblad, R. B., 1989. AGDISP : the aircraft spray dispersion model, code, development and experimental validation. Transactions of the ASAE 32 (1), 327–334.
- Brown, R. B., Sidhamed, M. M., 2001. Simulation of spray dispersal and deposition from a forest airblast sprayer - part II : Droplet trajectory model. Transactions of the ASAE 44 (1), 11–17.
- Cemagref, 2004. Plan stratégique 2004-2008.
URL http://www.cemagref.fr/Informations/Presentation/PS_projet_web.pdf
- Cox, S. J., Salt, D. W., Lee, B. E., Ford, M. G., 2000. A model for the capture of aeri ally sprayed pesticide by barley. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 87, 217–230.
- Da Silva, A., 2003. Modélisation numérique des dépôts de produits phytosanitaires. Doctorat en énergétique et génie des procédés, Université de Montpellier II.
- Da Silva, A., Sinfort, C., Tinet, C., Pierrat, D., Huberson, S., 2006. A lagrangian model for spray behaviour within vine canopies. Journal of Aerosol Science 37(5), 658–674.
- DaSilva, A., Sinfort, C., Bonicelli, B., Voltz, M., Huberson, S., 2002. Spray penetration within vine canopies at different vegetative stages. Aspects of applied biology 66, 331–339.
- DaSilva, A., Sinfort, C., Vanhiesbecq, S., Polvêche, V., Huberson, S., 2001. Simulation of spray pesticide deposits within a vineyard. Parasitica 57(1-2-3), 195–204, ISSN 0031-1812.
- Farooq, M., Salyani, M., 2004. Modelling of spray penetration and deposition on citrus tree canopies. Transactions of the ASAE 47 (3), 619–627.
- Gil, Y., Sinfort, C., 2005. Emission of pesticides to the air during sprayer application. A bibliographic review. Atmospheric environment 39(28), 5183–5193.
- Gil, Y., Sinfort, C., Brunet, Y., Polveche, V., Bonicelli, B., 2006. Assesment of pesticide air losses during air assisted spraying. Atmospheric Environment X, soumis en mai.
- Goering, C. E., Bode, L. E., Gebhardt, M. R., 1972. Mathematical modelling of spray droplet deceleration and evaporation. Transactions of the ASAE 15 (2), 220–225.
- Holterman, H. J., Van de Zande, J. C., Porskamp, H. A. J., Huijmans, J. F. M., 1997. Modelling spray drift from boom sprayers. Computers and electronics in agriculture 19, 1–22.
- ISO, 2005. ISO 14131. Equipment for crop protection - boom steadiness - test methods. ISO, Geneva, Switzerland.
- Katul, G. G., 2004. One and two equations models for canopy turbulence. Boundary-Layer Meteorology 113 (1), 81–109.

- Lardoux, Y., 2002. Etude de la répartition au sol des produits phytosanitaires sous une rampe en mouvement à partir d'une modélisation dynamique - application à la définition de méthodes d'évaluation des pulvérisateurs à jets projetés. Doctorat en sciences agronomiques, ENSA Montpellier.
- Lardoux, Y., Sinfort, C., Enfält, P., Sevilla, F., 2006a. Test method for boom suspension influence on spray distribution. Part A : Experimental study of pesticide application under a moving boom. *BioSystems Engineering* soumis.
- Lardoux, Y., Sinfort, C., Enfält, P., Sevilla, F., 2006b. Test method for boom suspension influence on spray distribution. Part B : Validation and use of a spray distribution model. *BioSystems Engineering* soumis.
- Marchant, J. A., 1977. Calculation of spray droplet trajectory in a moving air stream. *Journal of Agricultural Engineering Research* 22 (1), 93–96.
- Miles, G. E., Threadgill, E. D., Thompson, J. F., Williamson, R. E., 1975. Simulation of droplet deposition on bodies with rectangular boundaries. *Transactions of the ASAE* 18 (1), 74–78.
- Miller, P. C. H., Hadfield, D. J., 1989. A simulation model of the spray drift from hydraulic nozzles. *Journal of Agricultural Engineering Research* 42 (2), 135–147.
- Mokeba, M. L., Salt, D. W., Lee, B. E., Ford, M. G., 1997. Simulating the dynamics of spray droplets in the atmosphere using ballistic and random-walk models combined. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 67-68, 923–933.
- Raupach, M. R., Briggs, P., Ahmad, N., Edge, V. E., 2001a. Endosulfan transport II : Modeling airborne dispersal and deposition by spray and vapor. *Journal of Environmental Quality* 30, 729–740.
- Raupach, M. R., Woods, N., Dorr, G., Leys, J. F., Cleugh, H. A., 2001b. The entrapment of particles by windbreaks. *Atmospheric environment* 8, 1–11.
- Reichard, D. L., Zhu, H., Fox, R. D., Brazee, R. D., 1992. Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift. *Transactions of the ASAE* 35 (3), 755–758.
- Roux, P., Herbst, A., Richardson, G., Delpech, P., 2006. Full-scale measurement of spray-drift from a vineyard sprayer in a controlled wind-tunnel environment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* submitted.
- Sanz, C., 2003. A note on k-epsilon modelling of vegetation canopy air-flow. *Boundary Layer Meteorology* 108, 191–197.
- Sinfort, C., 1987. Etude et mise en œuvre d'une méthode d'essais pour les rampes de pulvérisateurs sur un simulateur de pistes. Mémoire de fin d'études, ENITRTS.
- Sinfort, C., 1991. Contribution à la définition d'une méthodologie d'évaluation des rampes de traitements phytosanitaires à l'aide d'un simulateur de pistes. Doctorat en sciences agronomiques, ENSA Montpellier.
- Sinfort, C., Herbst, A., 1996. Evaluation of the quality of spray distribution from boom sprayers in practical conditions. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 26, 27–36.
- Sinfort, C., Miralles, A., Sevilla, F., Maniere, G., 1994. Study and development of a test method for spray boom suspensions. *Journal of agricultural engineering research* 59, 245–252.
- Smith, D. B., Askew, S. D., Morris, W. H., Shaw, D. R., Boyette, M., 2000. Droplet size and leaf morphology effects on pesticide spray deposition. *Transactions of the ASAE* 43 (2), 255–259.

- SPECS, 1998. European system for field sprayer inspection at the farm level. Project final report (nov.1, 1994 - apr. 30, 1998) - AIR3-CT94-1170. Laboratory of Agro-Machinery and Processing, Kasteelpark Arenberg 30, 3001 Heverlee, Belgium.
- Teske, M. E., Thistle, H. W., Ice, G. G., 2003. Technical advances in modelling aerially applied sprays. Transactions of the ASAE 46 (4), 985–996.
- Walklate, P. J., 1992. A simulated study of pesticide drift from air assisted orchard sprayer. Journal of Agricultural Engineering Research 51, 263–283.
- Walklate, P. J., Weiner, K. L., Parkin, C. S., 1996. Analysis of and experimental measurements made on a moving air-assisted sprayer with two dimensionnal air-jets penetrating a uniform crop canopy. Journal of Agricultural Engineering Research 63, 365–378.
- Xu, X. G., Walklate, P. J., Rigby, S. G., Richardson, G. M., 1998. Stochastic modelling of turbulent spray dispersion in the near-field of orchard sprayers. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74–76, 295–304.
- Zhu, H., Reichard, D. L., Fox, R. D., Brazee, R. D., Ozkan, H. E., 1996. Collection efficiency of spray droplets on vertical targets. Transactions of ASAE 39 (2), 415–422.

Résumé

La première partie de ce mémoire décrit le contexte et justifie les orientations scientifiques de mon travail en tâchant de mettre en évidence comment les travaux réalisés au début de carrière (ma thèse et les travaux qui en ont découlé) m'avaient aidé à définir les méthodologies mises en place par la suite. Ce travail était basé sur le développement, la validation puis le transfert d'un modèle géométrique pour calculer la répartition des dépôts au sol, pour des pulvérisateurs à rampe.

La deuxième partie traite de l'étude de la pénétration de la pulvérisation dans la vigne. Un modèle a été développé à l'aide d'outils commerciaux de CFD (CFX puis Fluent) pour la représentation du flux d'air dans la végétation et le calcul de trajectoires représentatives de gouttes. Le modèle est calé à partir de mesures de vitesses d'air de part et d'autre de la végétation. Le comportement des nuages de gouttes et la proportion de produit retenue par la végétation a été développée de manière plus détaillée : le modèle s'appuie sur un coefficient d'efficacité obtenu à partir d'autres simulations réalisées avec le logiciel de CFD. Les simulations ont été conçues de manière à permettre une validation expérimentale. Les mesures de dépôt réalisées en conditions réelles ont ensuite permis de discuter des résultats du modèle global ainsi que des limites de l'approche.

La troisième partie est consacrée à l'étude des contaminations atmosphériques pendant les applications. Une démarche expérimentale a été mise en place et permet de mettre en évidence une relation entre les variables météorologiques, la granulométrie de la pulvérisation et les quantités de produit émises vers le compartiment air. Un modèle dédié a par ailleurs été développé pour simuler la dispersion atmosphérique de ces quantités.

MOTS CLÉS : Pulvérisateurs, Pulvérisation, Rampes, Dérive, Impact de gouttes, Dépôt de pesticides, Diffusion atmosphérique, CFD, Turbulence, Multi-régression