

Modélisation de la dispersion des pesticides pendant les applications

Carole Sinfort^a et Ariane Vallet^b

L'équipe Techniques d'application pour la protection des végétaux (TAPV) du Cemagref de Montpellier étudie les moyens à mettre en œuvre pour réduire les pollutions agricoles d'origine phytosanitaire par l'étude des pulvérisateurs et des phénomènes qu'ils mettent en jeu.

Les pulvérisateurs sont adaptés au type de traitement à appliquer – herbicide, fongicide ou insecticide (les produits pouvant agir par contact ou par action systémique) et au type de végétation à protéger – grandes cultures, viticulture, arboriculture notamment (encadré 1).

L'application de pesticides consiste généralement en la pulvérisation d'une bouillie liquide constituée d'eau, de produits actifs et d'adjuvants.

Les pollutions environnementales engendrées par l'application de pesticides concernent l'air, le sol et l'eau dans des proportions très variables suivant les cultures, les technologies et les produits utilisées. Pour donner un exemple, sur une application de cuivre sur vigne, on a mesuré des pertes de 63 %, dont 41 % au sol, 4 % du produit étant ensuite entraîné par ruissellement (programme concerté INRA-Cemagref AQUAE, 2001).

La pollution de l'air est notamment liée à la présence de petites gouttes (indispensables à une bonne couverture du végétal) détournées de la cible par le vent ou évaporées lors de l'application ; ce phénomène est appelé « dérive ». Une autre forme de pollution aérienne, la volatilisation du produit après traitement, n'est pas abordée dans notre programme actuel.

Encadré 1

Rappel des principaux mode de fonctionnement des pulvérisateurs

Les pulvérisateur à jet projeté : la fragmentation de la bouillie est obtenue par injection, à travers une buse, avec une vitesse non nulle. L'énergie cinétique permet le transport des gouttes produites (grandes cultures, arbres palissés).

Les pulvérisateurs à jet porté : même procédé de fragmentation, mais le transport est réalisé par un courant d'air (surtout en arboriculture, sauf cultures palissées, et parfois en viticulture).

Les pulvérisateurs pneumatiques : le film liquide de bouillie, amené avec une vitesse pratiquement nulle, est fragmenté par un courant d'air de forte vitesse. Cet air sert également au transport des particules liquides (surtout viticulture, parfois arboriculture).

Pour les 2 derniers types, notons que l'air sert également à agiter la végétation, améliorant ainsi d'une part la pénétration du produit au sein de la végétation et d'autre part son dépôt sur la cible.

Les contacts

a. ENSAM,
2, place Viala,
34060 Montpellier
b. Cemagref, UR Technologie et équipements des agro-procédés,
361 rue J.-F Breton,
34033 Montpellier

La pollution du sol est liée à la contamination directe par le jet ou à la présence de grosses gouttes qui s'écoulent le long de la végétation. Il peut ainsi en résulter une pollution directe des eaux par ruissellement ou indirecte par infiltration. L'étude de la quantité de produit sur le sol ne fait pas l'objet de recherche particulière, mais sa mesure peut contribuer à valider les résultats sur les compartiments plante et air par des méthodes de bilan.

Afin de mieux comprendre les interactions pesticides/environnement dans les trois compartiments – air, cible (végétation, adventices), sols – et au niveau du transfert d'un compartiment à l'autre, l'équipe s'est orientée vers une démarche de modélisation de la dispersion des pesticides, et pour commencer, par l'étude des phénomènes à l'origine de cette dispersion : les interactions pesticides/cible et la dérive atmosphérique.

Après un état de l'art sur ce type de démarche, les principales méthodes expérimentales portant sur les dépôts de produit sur la végétation ainsi que sur la caractérisation de buses en terme de granulométrie ou vélocimétrie seront présentées. Les études théoriques et numériques conduites depuis 5 ans sur le calcul du dépôt au sein de la végétation à l'aide de codes de calculs de mécanique des fluides seront ensuite détaillées. Enfin, nous exposerons une approche développée depuis 2003 pour appréhender le transport du produit de la buse à la cible et la fragmentation du jet liquide en gouttes à partir des équations de la mécanique des fluides diphasiques et turbulents.

Modèles théoriques et travaux expérimentaux : l'état de l'art

En ce qui concerne la modélisation des interactions produit/végétation, Raupach s'est attaché à décrire finement la turbulence au sein et autour de la végétation (Raupach, Thom, 1981 ; Raupach, Finnigan, *et al.*, 1996). Il a étudié la couche de mélange formée au-dessus de la végétation et a en particulier mis en évidence les structures cohérentes turbulentes responsables du transfert vertical au-dessus de la végétation.

L'équipe de Salyani a proposé un modèle pour estimer le dépôt de produit pour différentes profondeurs de vergers (Farooq, Salyani, 2003). Fondé sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (angle d'étalement du spray donné

a priori, turbulence négligée notamment), les auteurs ont fait une étude de sensibilité du dépôt en fonction de plusieurs paramètres tels que le débit d'injection ou la densité de surface foliaire.

Walklate, quant à lui, a proposé un modèle théorique décrivant la décroissance exponentielle, sur l'axe du jet, de la quantité de mouvement et de la turbulence d'un jet porté à travers une végétation uniforme, pour différentes densités de surface foliaire (Walklate, 1992). Les résultats du modèle ont été comparés à des résultats expérimentaux sur végétation artificielle.

Enfin, Brown et Sidahmed ont proposé un modèle de dépôt de gouttes, issues d'un pulvérisateur pneumatique, au sein d'une végétation arboricole à l'aide d'un code de calculs commercial (Brown, Sidahmed, 2001)

En ce qui concerne l'état de l'art sur la dérive des pesticides, il existe différents niveaux de modèles.

Ganzelmeier a proposé un outil, issu de grandes campagnes de mesures de dérive sur différents types de culture (grandes cultures, viticulture, arboriculture et culture de houblon), permettant par exemple de calculer la longueur d'une zone non traitée autour d'une parcelle agricole à respecter en fonction des buses ou du produit considéré(es) (Ganzelmeier, Rautmann, *et al.*, 1995). Teske et son équipe ont créé un logiciel permettant d'estimer les trajectoires de gouttes dans le cadre de la pulvérisation aérienne souvent utilisée aux Etats-Unis et au Canada (Teske, Thistle, 1999). Ils se sont notamment attachés à l'étude de l'évaporation des gouttes et à l'impact des conditions atmosphériques sur la dérive. Ces modèles, ambitieux et complets, sont fondés sur des hypothèses simplificatrices concernant le suivi des particules et le couplage avec l'air environnant (gouttes isolées, traînée fonction de la différence de vitesse moyenne des deux phases, etc).

Par ailleurs, Smith et Miller ont proposé un modèle stochastique pour modéliser les trajectoires de particules des jets projetés (Smith, Miller, 1994).

Walklate a développé un autre type de modèle stochastique pour évaluer la dispersion de gouttes, lequel a fait l'objet d'une validation appliquée au jet porté (Walklate, 1992).

Zhu et Reichard ont également mené des études numériques utilisant un code de calculs commercial de mécanique des fluides : les particules discrètes, supposées ne pas interagir entre elles et ne pas influencer l'air environnant (*one-way coupling*), sont suivies de façon Lagrangienne ; l'air est, quant à lui, calculé de façon Eulerienne. L'influence de plusieurs paramètres (température, hygrométrie, vitesse de vent latéral, vitesse initiale des gouttes...) sur la dérive a ainsi été estimée dans le cadre d'un jet projeté (Zhu, Reichard, *et al.*, 1994).

Méthodes expérimentales

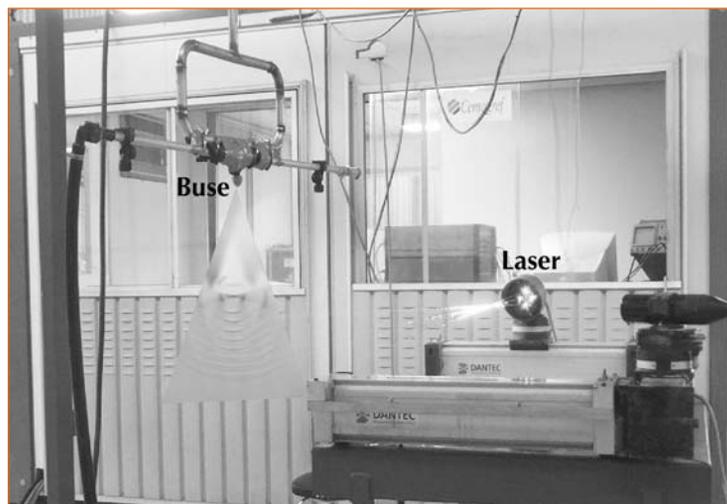
Dans l'approche de modélisation qui est proposée, le recours aux méthodes expérimentales est nécessaire à la fois pour caractériser les paramètres physiques du modèle, mais aussi pour obtenir des grandeurs de validation. Les paramètres physiques sont principalement établis à partir de la caractérisation des jets de pulvérisation (taille et vitesse des particules, vitesse d'air le cas échéant) ainsi que de la végétation (géométrie et densité de feuillage). Pour valider les résultats, il faut estimer les bilans de masse dans les compartiments : masses de produit déposées sur la végétation et au sol ainsi que quantités volatilisées dans l'air. Les méthodes concernant ce dernier compartiment (l'air) sont encore à l'étude. Les quantités de produit sont donc mesurées sur le sol et le végétal, les quantités perdues dans l'air sont estimées par bilan.

Les caractérisations de jet sont des mesures réalisées en laboratoire à l'aide d'un granulomètre-velocimètre laser. Des dispositifs spécifiques ont été mis en œuvre afin d'adapter cette technologie désormais classique au matériel étudié.

Les mesures au champ doivent être adaptées en fonction de l'objectif visé. Plusieurs méthodes de mesures de dépôt ont été analysées et testées. Sur vigne, des méthodologies particulières ont été mises en place afin d'obtenir des résultats robustes, malgré les fluctuations des conditions naturelles.

Mesures de taille et de vitesse de particules

Le granulomètre-velocimètre laser PDA (*Particle Doppler Analyser*) permet de mesurer les vitesses et les diamètres des gouttes en différents points par des techniques non intrusives (figure 1). Pour simplifier, un émetteur envoie un double faisceau



laser et un détecteur mesure la vitesse au point de convergence de ces deux faisceaux par effet Doppler. Un déphasage entre les deux rayons incidents permet de déterminer le sens de la vitesse. Le diamètre est obtenu par adjonction d'un deuxième détecteur : le déphasage du signal entre les deux détecteurs est en effet proportionnel au diamètre.

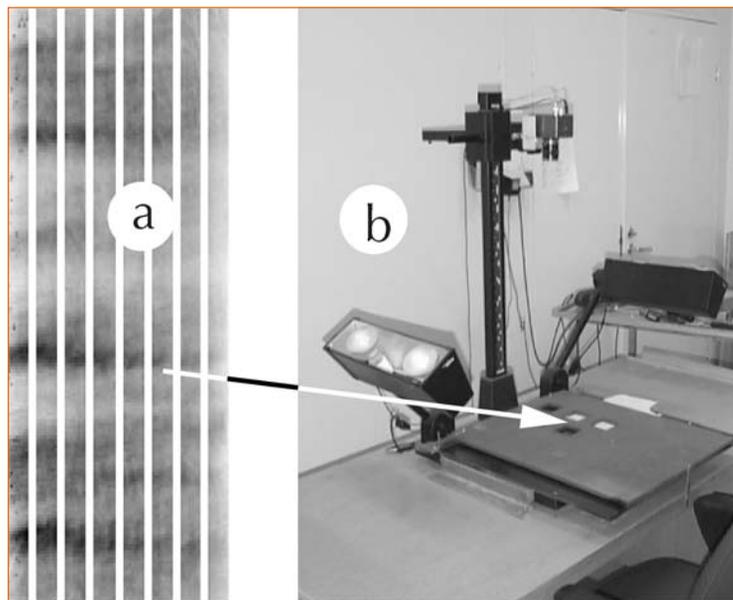
▲ Figure 1 – Mesures laser sous une buse.

Ce dispositif est également utilisé pour mesurer les vitesses du flux d'air. Pour cela, l'aspiration d'air (au niveau de la turbine du pulvérisateur) est ensencée par des particules de fumée, l'alimentation en liquide est fermée et les vitesses de ces particules de fumées sont mesurées.

Mesures de dépôt

Les mesures de dépôt constituent un enjeu majeur pour déterminer la qualité de la répartition en pulvérisation. Dans le cas de cultures « verticales » telles que la vigne, les dépôts sont très hétérogènes et les très nombreux essais réalisés dans l'équipe depuis plus de 20 ans ont montré que les techniques consistant à prélever seulement quelques feuilles ou bien à disposer quelques pièges dans la végétation ne permettaient pas de réaliser un échantillonnage correct. Il est donc fondamental de mesurer les dépôts de manière extensive dans toute la zone d'étude. La nature des collecteurs est variable en fonction du traceur utilisé et du compartiment étudié. Ainsi, la mesure des dépôts requiert deux approches complémentaires : celle du choix des zones de mesure et celle du couple collecteur-traceur. Seules les techniques utilisées dans les programmes développés au Cemagref sont décrites ici.

Les traceurs couramment utilisés sont l'eau sur du papier hydrosensible, l'encre noire (nigrosine) sur du papier pré-encollé, le cuivre sur un support broyable, la rhodamine B (traceur fluorescent) sur un support rinçable. Les deux premières méthodes font appel à des capteurs optiques. Dans le premier cas (papier hydrosensible), une chaîne d'acquisition et d'analyse d'image mesure directement la taille des impacts. Ce système pré-



▲ Figure 2 – Mesure des dépôts par pulvérisation de Nigrosine sur du papier pré-encollé.

- a) Pulvérisation obtenue (8 bandes de 0,5 m x 10 m).
b) Mesure du niveau de gris sur des carrés de 5 cm.

▼ Figure 3 – Mesure du dépôt au sol pendant un traitement sur sol nu.



sente l'inconvénient majeur de ne pas détecter les gouttes les plus fines qui, suivant les cas, peuvent représenter une partie non négligeable du jet. De plus, l'étalement de la goutte sur le papier est mal connu et ajoute une incertitude quant au diamètre des gouttes et donc aux quantités de matière déposées. Cette méthode est donc réservée à des analyses préliminaires qualitatives. Lorsque la nigrosine est le traceur pulvérisé, c'est le niveau de gris moyen sur une surface élémentaire qui est analysé. Il a en effet été montré que cette valeur pouvait être reliée de manière linéaire avec la concentration en nigrosine présente (Enfält, Engqvist, *et al.*, 1997). Des courbes d'étalonnage sont donc pré-établies et le papier pulvérisé est découpé en éléments carrés sur lesquels les quantités de produit sont déterminées (figure 2a et 2b). Bien que très pratique cette méthode a par la suite été critiquée, car il semblerait que la hauteur d'impact influence aussi le niveau de gris moyen de l'échantillon. Les deux autres techniques fournissent des résultats beaucoup plus rigoureux. Dans le cas du cuivre, le collecteur est séché, puis broyé et attaqué à l'acide, pour analyser l'extrait sec avec un spectromètre de masse. Dans le cas du traceur fluorescent, le choix s'est porté sur de la rhodamine B diluée à 2 g/l. Les échantillons sont rincés dans de l'eau tamponnée et analysés à l'aide d'un spectro-fluorimètre. Ces deux méthodes donnent des résultats très précis. Leur principal défaut est le temps de traitement des échantillons et l'importance des moyens d'analyse requis (spectromètres). Il faut également se situer dans un milieu où la pulvérisation du traceur est possible : les essais en intérieur demandent ainsi des équipements spécifiques. Dans le cas de la fluorimétrie, les mesures sont par ailleurs très sensibles à la dégradation du traceur (lumière, eau non tamponnée) et requièrent donc un soin tout particulier.

Le choix d'une méthodologie de mesure du dépôt diffère ensuite suivant le type d'essai réalisé. Pour mesurer les dépôts au sol lorsqu'il s'agit d'évaluer la régularité du traitement (cas de la pulvérisation d'herbicides en prélevée sur des grandes cultures), la méthodologie retenue est de recouvrir intégralement la surface d'étude de papier pré-encollé (figure 3). Afin de détecter les fluctuations de répartition, de larges surfaces doivent être analysées (10 m x 6 m) (Lardoux, Sinfort *et al.*, 1998).

Lorsqu'il s'agit de mesurer les pertes au sol au cours de pulvérisations sur des cultures verticales, il faut doser la quantité avec une grande précision

(d'autant plus que des méthodes de bilan vont être appliquées par la suite). On utilise du cuivre sur des bandes de papier filtre qui sont ensuite découpées.

La mesure de la distribution de produit dans la végétation a été essentiellement menée sur de la vigne. La méthodologie proposée consiste à prélever toutes les feuilles d'une « tranche » de vigne (d'une largeur de 10 cm et sur toute la profondeur du rang – figure 4) et de répéter cette opération en plusieurs points de la parcelle étudiée, afin de pouvoir analyser un effet moyen. Cuivre et rhodamine ont été utilisés puisque les feuilles sont à la fois rinçables et broyables. Dans le cas du rinçage de la rhodamine, on ne peut pas rigoureusement exclure qu'une certaine quantité de traceur soit adsorbée à la surface des feuilles. La méthode de prélèvement s'est avérée particulièrement robuste et a permis, lorsqu'elle était utilisée, de mettre en évidence des corrélations entre différents paramètres (Da Silva, Sinfort, *et al.*, 2002). Son adaptation à d'autres types de cultures dont la conduite ne présente pas la structure géométrique de la vigne (cultures non palissées) est en ce moment à l'étude.

Finalement, la problématique des méthodes expérimentales pour la mesure de la dispersion des dépôts se heurte à de nombreux obstacles liés principalement aux nombreuses fluctuations imprévisibles du milieu vivant et environnemen-

▼ Figure 4 – Tranche de végétation prélevée dans un rang de vigne pour mesurer la distribution de produit sur les feuilles.



tal, lesquelles obligent à avoir recours à des méthodes globales permettant de les moyenner. Malgré le très grand nombre d'études menées au Cemagref comme dans tous les laboratoires à l'échelle internationale, les méthodes disponibles restent longues et coûteuses. Elles sont très lourdes à utiliser dès que rigueur et précision s'avèrent nécessaires et ne permettent pas d'analyser les phénomènes en jeu avec suffisamment de fiabilité et de « répétabilité » pour pouvoir prétendre les optimiser. C'est une des principales raisons du développement de modèles numériques pour réaliser des simulations dont on attend qu'elles permettront de faire varier un grand nombre de facteurs et de fournir des résultats rapides.

Développement de modèles pour la simulation de la pénétration dans la végétation

À ce jour, les travaux se sont concentrés sur la modélisation de la dispersion des gouttes à l'intérieur de la végétation, notamment dans le cas du traitement de la vigne par des pulvérisateurs à assistance d'air. Les modèles sont réalisés à partir de logiciels de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) commerciaux et de codes développés spécifiquement pour le sujet d'étude. Un certain nombre de phénomènes sont pour l'instant négligés : le fluide a les propriétés rhéologiques de l'eau dans des conditions atmosphériques standard, les phénomènes de coalescence des gouttes ne sont pas pris en compte pas plus que le transfert de masse entre les gouttes et l'air (évaporation). Une approche Euler-Lagrange a été choisie. La fragmentation des gouttes n'est pas prise en compte : les trajectoires sont calculées à partir des caractéristiques du flux mesurées à l'entrée de la végétation. Ces caractéristiques sont mesurées pour l'air et pour les gouttes à l'aide du granulomètre-vélocimètre laser. Les simulations utilisent le modèle k-ε et sont conduites en écoulement instationnaire pour prendre en compte le déplacement du pulvérisateur. S'appuyant sur les travaux développés par Zhu (Zhu, Reichard, *et al.*, 1996) et Walklate (Walklate, Weiner *et al.*, 1996), les premières étapes ont consisté d'une part à quantifier l'efficacité d'impact devant des cibles rigides et fixes afin de calculer la proportion de gouttes retenues par la végétation, et d'autre part à étudier l'effet global des caractéristiques morphologiques de la végétation sur le flux pulvérisé. Ces deux premiers modèles ont ensuite été couplés pour développer un outil de

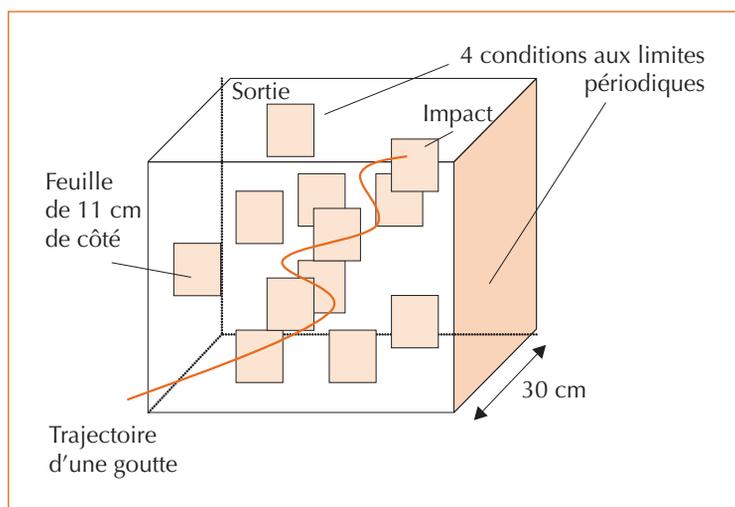
simulation du dépôt à l'intérieur d'un rang de vigne, permettant d'étudier l'effet des facteurs qui pourraient être optimisés comme par exemple la turbulence du flux d'air. Cette approche, qui a été menée sur des feuilles rigides et fixes, est également complétée par une analyse du rôle de la mobilité des feuilles.

Étude de l'efficacité d'impact

Basée sur une méthode d'analyse des données par plans d'expérience (Schimmerling, Sisson, *et al.*, 1998), cette étude a pour but de déterminer par simulations le nombre de trajectoires impactant des cibles fixes, rigides, de surface constante (11 cm x 11 cm), de position aléatoire et en nombre variable de manière à faire varier la densité du feuillage. Les autres variables sont la vitesse initiale des gouttes (égale à celle de l'air), l'intensité turbulente du flux d'air et le diamètre des gouttes. De nombreuses simulations sont ainsi réalisées sur un cube représentatif de végétation de 30 cm de côté (figure 5), les gouttes (toutes de même diamètre et de même vitesse) étant « lancées » depuis chaque maille de l'entrée du cube.

Cette étude a permis d'analyser l'importance relative des différentes variables étudiées. Les premiers résultats montrent que la turbulence n'aurait pas un effet majeur (la trajectoire de la goutte n'a pas le temps d'être influencée pendant son parcours dans le cube) mais que le coefficient de masquage des feuilles (surface projetée) jouerait un rôle déterminant. Une approche expérimentale est en cours de développement afin de valider les résultats de ce modèle.

▼ Figure 5 – Schématisation des simulations d'impact des gouttes dans un volume représentatif de végétation.



Effet global de la végétation sur le flux pulvérisé

Pour représenter l'effet global de la végétation les approches courantes développées, par exemple pour les brise-vent, ont été utilisées. La végétation est alors considérée comme un milieu poreux homogène. Son action sur le flux d'air se traduit par l'ajout d'un terme source négatif dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial P}{\partial x_i} - R_{ij} U_i \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique de l'air et μ_e la viscosité effective ($\mu_e = \mu_t + \mu_l$) avec μ_t , viscosité turbulente du modèle k- ϵ et viscosité turbulente du modèle k- μ_l , viscosité laminaire de l'air. D'après Walklate (Walklate, Weiner, *et al.*, 1996), R_{ij} , le tenseur de résistance, a pour expression :

$$R_{ij} = \rho a C_n (U_k U_k)^{1/2} \quad (2)$$

avec $R_{ij} = 0$ pour $i \neq j$ (résistance isotrope),

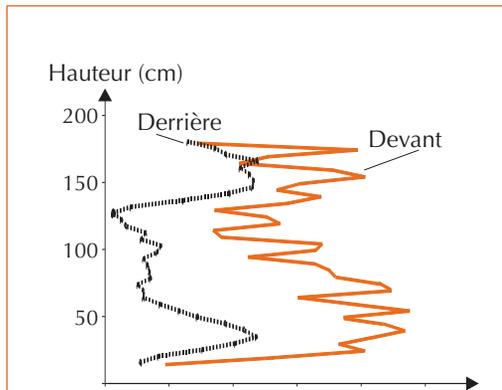
où « a » est la densité surfacique de végétation, en m^{-1} , et C_n , le coefficient de traînée.

Des termes sources doivent également être rajoutés dans les équations de conservation de l'énergie. On introduit ainsi un terme source d'énergie cinétique turbulente et un terme source de dissipation turbulente, respectivement :

$$S_\epsilon = C_n \cdot a \cdot \|\bar{U}\| \cdot \epsilon \text{ et } S_k = C_n \cdot a \cdot \|\bar{U}\| \cdot k \quad (3)$$

Pour caler ce modèle, des mesures du flux d'air ont été réalisées à l'aide du PDA devant et derrière une végétation artificielle dont la densité surfacique de feuillage a été mesurée (figure 6). En introduisant dans le modèle les conditions initiales moyennes de vitesse et de turbulence, il a été possible de caler le coefficient de traînée C_n et de valider cette approche pour le flux du pulvérisateur.

Le flux d'air ayant été modélisé, les trajectoires des particules sont calculées à partir des différents points d'injection pour différentes classes de diamètres représentées chacune par leur diamètre médian. Chaque trajectoire représente donc un ensemble de gouttes et est affectée de la masse de cet ensemble. Le déplacement du



▲ Figure 6 – Mesures des vitesses horizontales moyennes de l'air (en m/s) devant et derrière la végétation.

pulvérisateur face à la végétation est également pris en compte.

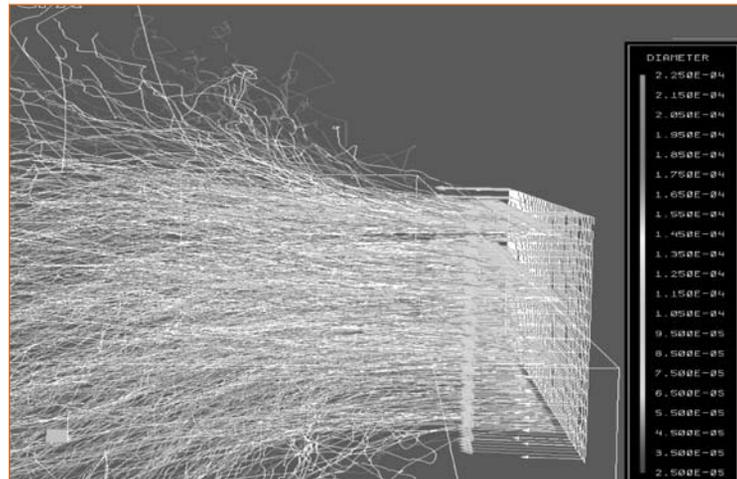
La figure 7 montre l'ensemble des trajectoires moyennes calculées, à la fin d'une simulation. Les flèches horizontales à droite du schéma représentent les vitesses d'émission. Les trajectoires sont colorées en fonction du diamètre de la classe de gouttes représentée.

Couplage des deux modèles pour le calcul du dépôt

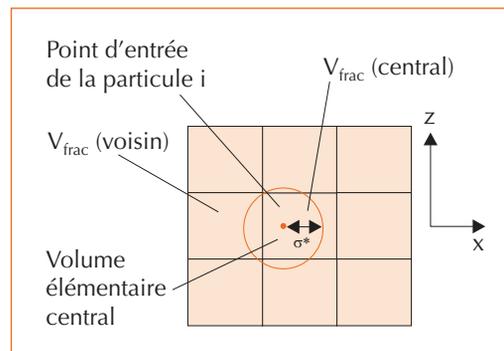
Le couplage des deux modèles est réalisé sur des volumes élémentaires (cubes de 30 cm de côté) découpant le volume poreux qui représente la végétation. Pour chacun de ces volumes, les trajectoires moyennes entrantes sont repérées et la dispersion du nuage de gouttes autour de cette trajectoire est calculée en supposant que celui-ci suit un comportement brownien. La dispersion est ainsi représentée par une loi gaussienne dont l'intégrale représente la masse portée par toutes les gouttes de la classe. L'écart-type de la loi gaussienne est calculé en fonction de l'intensité turbulente moyenne dans le volume considéré et du temps de réponse des gouttes. À ce stade, un calcul intégral permet de calculer la fraction du nuage qui se situe dans le volume considéré, $V_{frac}(central)$, ainsi que celle qui recouvre des volumes voisins, $V_{frac}(voisins)$ (figure 8).

Finalement le dépôt est obtenu en appliquant le taux d_{Eff} :

$$\text{Dépôt} = V_{frac} \times E_{Eff} \times \text{Vol_porté} \times \cos \alpha_{entrée} \quad (4)$$



▲ Figure 7 – Vue de profil des trajectoires des classes de particules modélisées pendant le déplacement du pulvérisateur.



◀ Figure 8 – Représentation de la dispersion du nuage de gouttes autour d'une trajectoire moyenne.

$\alpha_{entrée}$ est l'angle d'entrée du jet dans le volume considéré.

Vol_porté correspond au volume porté par la trajectoire moyenne.

E_{eff} est calculé à l'aide du premier modèle à partir de la densité surfacique de feuillage et de l'intensité turbulente moyenne dans le volume étudié, du diamètre représentatif de la classe de goutte et de la vitesse d'entrée dans le volume.

Avant l'entrée dans le volume suivant, les dépôts sont retranchés du volume porté par la trajectoire moyenne et au final ces dépôts sont sommés sur chacun des volumes élémentaires.

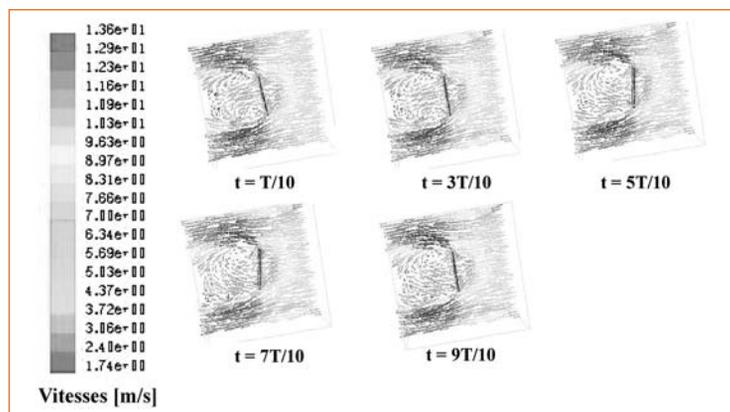
Ainsi, le couplage de ces deux modèles permet de représenter l'effet de la densité de végétation et celui de la dispersion des gouttes à l'intérieur de celle-ci. L'intérêt de cette approche sera d'approfondir le rôle des variables maîtrisables, notamment la turbulence, sur la quantité de

dépôt dans la végétation. En effet, dans le premier modèle, la turbulence du flux ne joue pas un rôle prédominant dans la faculté d'une goutte à éviter une feuille, alors que dans le deuxième modèle, cette turbulence joue un rôle significatif sur la dispersion du nuage. Par ailleurs, un facteur fondamental a été négligé : il s'agit du rôle des mouvements des feuilles et de leur couplage avec la turbulence. Ce point fait donc l'objet d'un troisième volet de travail dans l'étude de la dispersion des produits dans la végétation.

Étude du mouvement des feuilles

Là encore, le travail s'appuie sur deux axes : la modélisation du mouvement des rameaux et des feuilles placées dans le flux pulvérisé et l'effet de ce mouvement sur le dépôt précédemment étudié. Concernant le mouvement des rameaux et des feuilles, de premières études ont visé à caractériser le mouvement d'une vigne face à un pulvérisateur. Des essais préliminaires ont été mis en place pour enregistrer le mouvement de repères placés dans la végétation face à un pulvérisateur à poste fixe dont le flux d'air était variable. Les essais menés sur une vigne à un stade végétatif précoce (et donc non attachée au palissage) montrent que deux mouvements sont combinés : le rameau se couche et oscille dans un plan perpendiculaire à la direction générale de l'air, à une fréquence faible (environ 1 Hz), indépendante du flux d'air, et les feuilles oscillent à une fréquence rapide avec un déplacement très faible. Il s'est avéré possible de représenter le comportement des rameaux comme un oscillateur harmonique amorti. La modélisation du comportement des feuilles est encore à l'étude.

▼ Figure 9 – Évolution du champ de vitesse de l'air autour d'une feuille animée d'un mouvement sinusoïdal de période T . L'entrée d'air se fait par la droite, à 10 m/s.



Pour comprendre l'effet du mouvement des feuilles sur la dispersion de produit dans la végétation, de premières simulations ont été conduites pour étudier la faisabilité d'un modèle calculant la turbulence derrière la feuille en simulation directe (figure 9).

Ces simulations ayant été menées à bien grâce à la mise en œuvre d'un maillage élastique, les étapes suivantes consisteront donc à étudier l'influence réciproque du mouvement de la feuille et des tourbillons du flux d'air, et également à étudier le rôle combiné de deux puis de plusieurs feuilles. Ces modèles étant relativement sophistiqués, une validation expérimentale sera nécessaire, essentiellement pour vérifier par des mesures d'anémométrie que la turbulence simulée correspond bien aux phénomènes réels. Il est attendu de ce travail de mieux comprendre les phénomènes de masquage entre feuilles et de comprendre comment optimiser le flux d'air entrant en terme de vitesse, d'orientation et de turbulence, pour faciliter la pénétration entre les feuilles et améliorer le dépôt sur toute la surface végétative.

Perspectives d'étude pour la dispersion aérienne

Un projet de recherche concernant la compréhension et la modélisation du transport de particules liquides dans un flux d'air turbulent est en cours de montage. Ce projet concernera notamment les pulvérisateurs à jet porté dans lesquels les gouttes de bouillie sont transportées par un flux d'air concourant. Ce type de jet, utilisé principalement en arboriculture et en viticulture, est en effet peu étudié, et nécessite une description fine des interactions gouttes liquides/air turbulent. Ce projet est fondé sur un couplage entre des études théoriques et expérimentales. Les aspects théoriques sont basés sur les équations de la mécanique des fluides diphasiques et turbulents, et appliqués à une pulvérisation en environnement naturel et faiblement maîtrisé. L'interaction entre les deux fluides que sont l'air (phase gazeuse continue) et les gouttes (phase liquide dispersée) a lieu à plusieurs niveaux : l'évaporation des particules conduit premièrement à un transfert de masse d'une phase à l'autre ; de plus, les vitesses instantanées des particules et de l'air étant différentes (même si leur vitesse moyenne est identique, la turbulence de l'air implique une traînée non nulle sur les gouttes), il y a ainsi un transfert de quantité de mouvement entre les deux phases ; enfin, on étudiera attentivement le couplage entre la turbulence de l'air et les particules : celles-ci

doivent contribuer à dissiper l'énergie cinétique turbulente de l'air, et la turbulence de l'air doit influencer sur le taux de vaporisation des particules. Il y a bien un transfert d'énergie entre les phases.

Parallèlement à cette étude théorique, une étude expérimentale permettra de valider les hypothèses émises et de caler les constantes du modèle.

Outre ce modèle de transport, la fragmentation des jets pourra être également étudiée. La taille et la vitesse des particules issues d'une buse conditionnent fortement le transport de celles-ci. Un modèle, fondé sur une équation de transport pour l'aire de l'interface liquide/gaz, couplé à une équation de transport pour la phase liquide, permettrait d'obtenir la taille caractéristique des particules. Ce modèle, issu de travaux en injection automobile, devra être adapté au cas des pulvérisateurs agricoles, en insérant des modules spécifiques (modèles bas Reynolds et bas Weber par analogie avec les modèles de turbulence pour les pulvérisateurs pneumatiques). Ce modèle pourra tenir compte éventuellement des interactions particules/particules, comme les collisions, la coalescence ou le rebond.

Le but à long terme est de disposer d'un modèle de fragmentation et de transport de liquide qui soit généralisable à tout type de buse. Ce modèle, s'il veut être universel, devra être assez complexe, mais il sera en tout cas calé par des résultats expérimentaux.

Conclusion

Afin d'optimiser les procédés de pulvérisation et de limiter la contamination de l'environnement, il est nécessaire de caractériser le comportement des flux pulvérisés. Les méthodes expérimentales s'avérant lourdes et coûteuses, des méthodes numériques ont été mises en œuvre pour mieux comprendre les phénomènes en jeu et par suite, limiter le nombre d'essais nécessaires et analyser l'effet de variables impossible à reproduire (utilisation de produits toxiques, maîtrise totale des conditions environnementales...). Ainsi, la dispersion dans la végétation est modélisée par les effets de la densité de feuillage sur le flux d'air et sur le piégeage des gouttes. Ce modèle permettra à terme d'optimiser les caractéristiques du flux d'air (turbulence, vitesse, orientation) ainsi que la granulométrie des gouttes à créer afin d'obtenir une pénétration optimale accompagnée d'une répartition correcte.

La modélisation de la dispersion dans l'air sera abordée au travers de l'analyse des interactions gouttes/air. Ces travaux, dont la partie méthodologique a été initiée, contribueront à évaluer le risque environnemental compte tenu du matériel utilisé et des conditions de traitement, mais aussi à optimiser les procédés vis-à-vis du transport des gouttes jusqu'à leur cible.



Résumé

L'étude de la dispersion des pesticides est fondamentale pour diminuer les pollutions environnementales mais elle s'avère particulièrement complexe. Les méthodes expérimentales ne sont pas satisfaisantes par rapport à leur coût et leur fiabilité, respectivement à cause de la main d'œuvre nécessaire et de la variabilité des conditions environnementales.

L'approche par modélisation permet d'isoler les phénomènes, de faire varier les paramètres d'injection et d'environnement *via* des conditions aux limites adéquates, et de reproduire de nombreuses expériences en temps limité.

Les effets des caractéristiques de la végétation sur le flux d'air et sur la dispersion du nuage de gouttes ont été modélisés. L'analyse du mouvement des feuilles face à une assistance d'air a fait l'objet d'études préliminaires et finalisera cette démarche.

Enfin, les perspectives d'études appliquées à la dispersion des pesticides dans l'air à partir des interactions de l'air et des gouttes, sont présentées.

Abstract

Study of pesticide dispersion within the environment is very complex. Experimental methodologies are unsatisfactory from the point of view of cost and reliability due to the manpower require and the variability of environmental conditions.

Modelling approach allows phenomena to be separated, environmental and injection parameters to be varied through appropriate boundary conditions, and numerous experiences to be reproduced within limited time.

Modelling dispersion within canopies focused on the effect of the crop features on the airflow behaviour and droplet cloud dispersion. Preliminary studies of leave movement in front of the airflow of an air-assisted sprayer were conducted and will be improved.

Furthermore, pesticide dispersion within the air will be studied through air/droplet interactions.

Bibliographie

- BROWN, R.-D. ; SIDAHMED, M.-M., 2001, Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry air blast sprayer, *Transactions of ASAE*, vol. 44(1), p. 11-17.
- DA SILVA, A. ; SINFORT, C. ; BONICELLI, B., VOLTZ, M. ; HUBERSON, S., 2002, Spray penetration within vine canopies at different vegetative stages, *Aspects of applied Biology*, (66), p. 331-339.
- ENFÄLT, P. ; ENGQVIST, A. ; ALNESS, K., 1997, Assessment for the dynamic spray distribution on a flat surface using image analysis, *Aspects of Applied Biology, Optimising Pesticide applications*, Bristol, 48, p. 17-23.
- FAROOQ, M. ; SALYANI, M., 2003, Modeling of spray penetration into citrus canopies, *ASAE Florida Section Meeting*, Paper Number FL03-105.
- GANZELMEIER, H. ; RAUTMANN, D. ; SPANGENBERG, R. ; STRELOKE, M., 1995, *Studies on spray drift of plant protection products*, Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin Dahlem.
- LARDOUX, Y. ; SINFORT, C. ; ENFÄLT, P. ; BONICELLI, B. ; SEVILA, F., 1998, Ground spray coverage study under a field sprayer boom, *The 1998 Brighton Conference Pests and Diseases*, Paper n° 198, Brighton, UK, 16-19 November 1998.
- RAUPACH, M.-R. ; THOM, A.-S., 1981, Turbulence in and above plant canopy, *Ann. Rev. Fluid Mech*, 13, p. 97-129.
- RAUPACH, M.-R. ; FINNIGAN, J.-J. ; BRUNET, Y., 1996, Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy, *Boundary layer meteorology*, 78, p. 351-382.
- SCHIMMERLING, P. ; SISSON J.-C. ; ZAIDI A., 1998, *Pratique des plans d'expérience*, Lavoisier Technique et Documentations. 526 p.
- SMITH, R.-W. ; MILLER, P.-C.-H., 1994, Drift prediction in the near nozzle region of a flat fan spray, *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 59, p. 111-120.
- TESKE, M.-E. ; THISTLE, H.-W., 1999, A simulation of release height and wind speed effects for drift minimization, *Transactions of the ASAE*, 42 (3), p. 583-591.
- WALKLATE, P., 1992, A simulation study of pesticide drift from an air-assisted orchard sprayer, *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 51, p. 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-dimensional air-jets penetrating a uniform crop canopy, *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 63, p. 365-378.
- ZHU, H. ; REICHARD, D.-L. ; FOX, R.-D. ; BRAZEE, R.-D. ; OZKAN, H.-E., 1994, Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers, *Transactions of ASAE*, vol. 37(5), p. 1401-1407.
- ZHU, H. ; REICHARD, D.-L. ; FOX, R.-D. ; BRAZEE, R.-D. ; OZKAN, H.-E., 1996, Collection efficiency of spray droplets on vertical targets, *Transactions of ASAE*, vol. 39(2), p. 415-422.