



## **MODAPEX : MODELISATION DE LA DISPERSION AERIENNE DES PESTICIDES ET DES NIVEAUX D'EXPOSITION A L'ECHELLE DU PAYSAGE**

## **MODAPEX: MODELLING AERIAL PESTICIDE DISPERSAL AND EXPOSURE LEVELS AT THE LANDSCAPE SCALE**

Programme Evaluation et réduction des  
risques liés à l'utilisation des Pesticides  
APR 2009  
Rapport final – Mai 2013

Yves Brunet, INRA  
UR1263 Ephyse, Inra, 71 avenue Edouard Bourlaux  
CS 20032 33882 Villenave d'Ornon Cedex  
brunet@bordeaux.inra.fr

Date : 20 mai 2013

N° de contrat Ministère/ADEME/ONEMA : 1062C0014  
Date du contrat : 19 juillet 2010

## **RAPPORT SCIENTIFIQUE**

### **MODAPEX : MODELISATION DE LA DISPERSION AERIENNE DES PESTICIDES ET DES NIVEAUX D'EXPOSITION A L'ECHELLE DU PAYSAGE**

**PROGRAMME « EVALUATION ET REDUCTION DES RISQUES LIES A  
L'UTILISATION DES PESTICIDES »**

**Yves Brunet, Sylvain Dupont, Ali Chahine (UR Ephyse, INRA, Bordeaux)  
Carole Sinfort (UMR Itap, IRSTEA et SupAgro, Montpellier)**

## 1. Les enjeux

La pollution de l'air par les pesticides est un des grands problèmes environnementaux auxquels est confrontée l'agriculture, et la réversibilité de ses effets sur l'environnement et la santé est encore peu connue. Lors des traitements phytosanitaires, une partie relativement importante des produits pulvérisés est perdue dans l'environnement (Bedos *et al.*, 2002a). Or, si les conséquences sur la contamination des eaux (superficielles et souterraines) fait l'objet de nombreuses études, les connaissances sur la contamination aérienne sont plus limitées et, de fait, aucune norme n'a encore été établie pour l'air.

Une étude réalisée en 2006 par la CIRE LR à Montpellier et dans ses environs (Ricoux, 2009) a montré que des concentrations détectables de pesticides pouvaient être mesurées dans l'air pendant les périodes de traitement, mais aussi tout au long de l'année. De fait, des essais menés en 2007 par l'IRSTEA avec un groupe de viticulteurs de l'Hérault (cave coopérative de Neffies), dans le cadre d'un projet européen, ont montré des pertes vers l'air pouvant aller jusqu'à 40% des quantités pulvérisées (Sinfort *et al.*, 2009). A l'échelle nationale, des études métrologiques pilotes ont été mises en œuvre par l'InVS (Institut de Veille Sanitaire) dans plusieurs régions pour estimer les concentrations en pesticides dans l'air ambiant, connaître leur évolution au cours du temps et définir des pesticides traceurs, dans le but final de caractériser les expositions des populations vivant à proximité de zones traitées. Les résultats montrent que, quel que soit le site de mesure, on y décèle la présence d'un mélange de pesticides dans une large gamme de concentrations, avec des teneurs comprises entre le seuil de détection et plusieurs centaines de ng m<sup>-3</sup> (Bedos *et al.*, 2002b ; Coignard et Lorente, 2006). Sur le plan qualitatif, les concentrations observées dans chaque région présentent des profils différents, qui se manifestent comme une signature de l'activité agricole pendant la période de mesure. Sont notamment observables à la fois des périodes d'exposition, et la persistance d'un bruit de fond en dehors de tout traitement.

Potentiellement, cette présence de pesticides dans l'air est de nature à affecter non seulement la santé humaine mais, de manière plus générale, l'état des écosystèmes et la qualité alimentaire des produits récoltés. Cette problématique génère un fort besoin en outils de quantification des pollutions diffuses et des niveaux d'exposition, de l'homme comme des écosystèmes. Une évaluation correcte des concentrations aériennes et des dépôts étant ainsi requise, une modélisation de la dispersion atmosphérique s'avère indispensable pour mieux comprendre les phénomènes de contamination aérienne par les pesticides et alimenter les systèmes d'aide à la décision relatifs aux risques (De Leeuw *et al.*, 2000).

On trouve dans la littérature de nombreux exemples de modèles de dispersion (voir par exemple Derwent *et al.*, 1989 ; Mensink et Maes, 1997 ; Davakis et Degliannis, 2000), mais la plupart d'entre eux ont été développés dans l'optique de prédire la qualité de l'air à une échelle régionale, et souvent même continentale. Leur résolution est donc grossière et les flux de surface y sont représentés par des paramétrisations très simples des processus d'émission et de dépôt. Si ces modèles sont d'une utilité indéniable, ils n'en restent pas moins insuffisants dans la mesure où l'on a également besoin de travailler à des échelles beaucoup plus fines, et ce pour plusieurs raisons :

- une réduction des pertes aériennes peut s'opérer dès la source ; la géométrie du système pulvérisateur – couvert végétal, en relation avec les conditions microclimatiques et topographiques locales, a un impact fort sur les quantités de produit s'échappant par dérive ;
- plusieurs types d'aménagements ont été envisagés afin de limiter l'impact de la contamination aérienne (mise en place de zones non traitées, de zones tampons, de haies, pulvérisation sous filets, etc.) ; l'étude de leurs effets conduit à s'intéresser aux caractéristiques fines du paysage autour de la parcelle traitée ;
- les modèles de qualité de l'air évoqués plus haut prédisent des niveaux de pollution de fond, et donc des expositions essentiellement moyennes ; de façon

complémentaire, il est judicieux de s'intéresser à des pics de contamination pendant ou juste après un épandage, à des échelles spatiales beaucoup plus faibles mettant en jeu les populations voisines et les écosystèmes environnants.

Pour ces raisons, le cadre général de ce projet concerne la prévision des taux d'exposition des pesticides dans l'air et au sol à des échelles comprises entre celle de la parcelle et celle du paysage.

## 2. Un état de l'art sur la modélisation

La description du transport de pesticides dans l'air a tout d'abord été abordée par la communauté scientifique pour évaluer la dérive des nuages de pesticides émis lors de pulvérisations aériennes, notamment aux USA (voir par exemple De Leeuw *et al.*, 2000 ; Raupach *et al.*, 2001 ; Teske *et al.*, 2001 ; Craig, 2004). Sous les hypothèses fortes que la vitesse du vent et la diffusion turbulente ne présentent pas de variation spatiale ni temporelle, l'équation classique d'advection-diffusion sur laquelle reposent les modèles s'intègre en une loi gaussienne. On obtient ainsi des modèles analytiques très simples qui, à la condition de définir correctement le terme source (flux d'émission), fournissent des estimations moyennes pouvant être acceptables à des échelles de 0.5 à 10 km (Thistle, 2000). La validation de ces modèles est difficile à mettre en place.

A plus petite échelle, peu de travaux reposant sur une approche mécaniste fine ont été entrepris jusqu'à maintenant pour représenter la dérive au vent des gouttes de pesticides pulvérisées vers l'air. La plupart des modèles présentés dans la littérature se contentent de décrire le mouvement des gouttelettes de spray dans des champs de vitesse donnés (Fox *et al.*, 1985 ; Xu *et al.* 1998 ; Cross *et al.*, 2001). La turbulence est souvent prise en compte indirectement dans des modèles de marche aléatoire (voir par exemple Thompson et Ley, 1983 ; Miller et Hadfield, 1989 ; Walklate, 1992 ; Hobson *et al.*, 1993 ; Holterman *et al.*, 1997) ou à partir de représentations de Fourier comme dans Teske *et al.* (2002). Certains modèles ont été développés à l'aide de logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics), qui résolvent numériquement par la méthode RANS les équations moyennes de Navier-Stokes (Reichard, 1992 ; Da Silva *et al.*, 2001 et 2006 ; Baetens *et al.*, 2007).

Ce dernier type de modèle ne peut simuler que des champs moyennés dans le temps et ne permet pas de détailler la turbulence atmosphérique. Or la prise en compte de l'intermittence de l'écoulement peut s'avérer particulièrement cruciale pour un problème tel que l'épandage de pesticides, dans la mesure où les observations montrent que leur dispersion s'opère dans une large mesure sous l'effet de bouffées turbulentes, de rafales de vent. L'approche de « simulation des grandes échelles » (LES) permet, elle, de calculer les champs de vitesse et de concentration instantanés. Les structures turbulentes plus grandes que deux fois la taille des mailles sont en effet explicitement résolues, seules les structures turbulentes de sous-maille étant modélisées. Avec un maillage suffisamment fin, l'approche LES est ainsi capable de reproduire les structures tourbillonnaires et leur dynamique dans le couvert végétal et à proximité. Cette technique de simulation a été fortement développée ces dernières années pour des applications à la végétation, à des échelles allant de la parcelle au paysage : situations homogènes (Watanabe, 2004 ; Dupont et Brunet, 2008a), situations hétérogènes (Kanda et Hino, 1994 ; Dupont et Brunet 2008b, 2008c, 2009), présence d'obstacles (Patton *et al.*, 1998).

La dispersion des pesticides elle-même, dans le cadre de modèles LES, peut être traitée à l'aide d'une équation de conservation eulérienne comme pour tout autre scalaire passif (voir Dupont *et al.*, 2006, pour un modèle de dispersion de pollen), ou par un modèle lagrangien (Da Silva *et al.*, 2006).

Enfin, ce développement d'outils de modélisation s'est accompagné d'efforts visant à mettre au point des techniques expérimentales permettant l'évaluation au champ de la dérive aérienne de pesticides (Gil *et al.*, 2007 et 2008).

### 3. Les objectifs

Pour les raisons évoquées précédemment, l'objectif général de ce projet concerne la prévision des taux d'exposition des pesticides dans l'air et au sol, à des échelles comprises entre celle de la parcelle et celle du paysage. Nous poursuivons ainsi plusieurs buts :

- prévoir l'impact des conditions de pulvérisation sur les pertes aériennes par dérive au vent (structure de la vigne, type et réglage du pulvérisateur, conditions climatiques, etc.) ;
- permettre une étude optimisée des aménagements à mettre en place pour limiter ces pertes (localisation, structure, géométrie) ;
- établir des cartes de concentration des pesticides dans l'air et le dépôt au sol sur une gamme d'échelles allant du local à la petite région, permettant d'évaluer les indices d'exposition nécessaires au suivi épidémiologique et à la mise en place de mesures préventives.

L'étude est menée sur le modèle vigne, cette culture étant soumise à la pulvérisation de grandes quantités de pesticides (Aubertot *et al.*, 2005). Les problèmes de dérive sur vigne sont par ailleurs particulièrement importants dans la mesure où les appareils utilisent un flux d'air de forte énergie cinétique pour transporter les gouttes, et où la végétation constitue une « barrière » verticale qui détourne une partie de ces jets vers l'atmosphère. Le caractère générique de la modélisation développée devrait toutefois permettre facilement une extension ultérieure de l'approche à d'autres couverts (vergers, cultures basses, etc.). L'étude est limitée à la dérive au vent des pesticides, et n'aborde pas le déterminisme de la volatilisation. En supposant connu le flux de volatilisation (voir Bedos *et al.*, 2002a), on peut l'utiliser comme condition à la limite inférieure du domaine de calcul, et le code numérique pourra alors disperser les pesticides volatilisés de la même manière qu'il le fait avec les pesticides en cours de pulvérisation.

D'un point de vue méthodologique, l'objectif visé est le développement d'un outil générique de simulation de la dispersion aérienne de pesticides consécutive à une pulvérisation. Cet outil s'appuie en premier lieu sur les développements réalisés ces dernières années dans les deux équipes partenaires, aussi bien en matière de modélisation des écoulements turbulents (Dupont et Brunet, 2008a,b,c, 2009) et de la diffusion passive (Da Silva *et al.*, 2006 ; Dupont *et al.*, 2006), que de techniques de mesure des dérives de pesticides et de leur déterminisme microclimatique (Gil *et al.*, 2007 et 2008).

Le projet met ainsi en jeu une description détaillée du transport des pesticides par le flux d'air pulvérisé, puis par l'écoulement atmosphérique, une attention particulière étant apportée aux processus se déroulant à l'interface entre le flux d'air et les différents obstacles (végétation cible, brise-vents, etc.). Il repose sur le développement et la validation d'un modèle, puis sur son application :

- modélisation du phénomène :
  - o développement d'un code de simulation à échelle fine, reposant sur la technique de LES (Large-Eddy Simulation) qui permet de simuler les champs turbulents de manière dynamique, afin de pouvoir représenter la dispersion instantanée d'aérosols émis par un jet, jusqu'à des distances de l'ordre de quelques dizaines de mètres ;
  - o intégration des résultats de la modélisation précédente dans la plateforme de modélisation BatchDriftX, permettant de représenter le transport de polluants à des distances de plusieurs km ;
- validation des calculs : réalisation de campagnes expérimentales *in situ*, sur couvert artificiel et en parcelle de vigne ;
- réalisation de simulation à des fins applicatives :

- étude de l'impact des conditions de pulvérisation sur les pertes aériennes par dérive au vent (structure de la vigne, type et réglage du pulvérisateur, conditions climatiques, etc.) ;
- étude de l'impact d'hétérogénéités du paysage et d'aménagements réalisés dans le but de limiter la dispersion aérienne ;
- définition d'indices de niveaux d'exposition et de dépôt à partir des champs de concentration simulés dans diverses configurations.

Les aspects innovants du projet sont de plusieurs ordres :

- adaptation, pour la première fois, de la méthodologie LES au transport de pesticides ;
- mise en place d'une modélisation associant la méthodologie LES (à échelle fine) à une plateforme visant à simuler les transferts à plus grande échelle, l'ensemble permettant, d'une manière originale, de couvrir une gamme d'échelle pertinente ;
- étude, sur une base mécaniste, de l'impact d'aménagements du paysage sur la dispersion aérienne des pesticides ;
- mise au point d'une méthodologie de calculs de niveaux d'exposition, reposant là encore sur une base mécaniste, générique.

#### **4. Modélisation : développement du code LES à fine échelle**

C'est le modèle atmosphérique tridimensionnel non-hydrostatique ARPS (Advanced Regional Prediction System) qui a été choisi pour simuler la dynamique du vent dans un couvert de vigne. Ce modèle a été développé au CAPS (Center for Analysis and Prediction of Storms) pour simuler la thermodynamique de l'atmosphère aux échelles régionales. De manière à pouvoir étudier la turbulence atmosphérique à de plus fines échelles spatiales (échelles des couverts végétaux, parcelles de forêts), ce modèle a été modifié et validé ces dernières années pour des canopées homogènes et hétérogènes, en représentant l'action de la végétation sur le vent par une approche en « force de traînée » (Dupont et Brunet, 2008a,b,c, 2009 ; Dupont *et al.*, 2009).

Le modèle utilise des coordonnées spatiales  $x$ ,  $y$  et  $z$  suivant la topologie du terrain : le plan  $xy$  est parallèle au sol et l'axe  $z$  est orienté dans la direction normale au sol. Il utilise un état de base d'écoulement initialement homogène sur le plan horizontal avec une vitesse verticale nulle. Par opposition à la décomposition temporelle des variables proposée par Reynolds pour les modèles de turbulence de type RANS (Reynolds Averaging Navier-Stokes), ARPS repose sur la méthode de simulation des grandes échelles (LES : Large Eddy Simulation). Avec cette méthode, les tourbillons de tailles supérieures à deux fois la taille des mailles du domaine d'étude sont résolus alors que les tourbillons de taille plus petite sont modélisés. La LES permet ainsi de calculer les champs de vitesse instantanés, et de reproduire, avec un maillage suffisamment fin, les structures tourbillonnaires et leur dynamique dans le couvert végétal et à proximité.

La méthode LES repose ainsi sur un filtrage spatial des équations de Navier-Stokes, réalisé par l'application d'un filtre de taille inférieure à l'échelle des événements que l'on souhaite détecter. On trouvera dans les références précédentes tous les détails décrivant le modèle ainsi que les opérations de filtrage. Notons simplement ici que ces équations font apparaître un terme liée à la force de traînée qu'exerce le couvert sur le vent, et traduisant la dissipation de la quantité de mouvement autour des éléments végétaux, par effets de sillage et de viscosité. La force de traînée s'exprime en fonction de la densité foliaire frontale de la végétation  $A_f$  et du coefficient de traînée  $C_d$ . Le filtrage des équations de Navier-Stokes fait

apparaître un terme de sous-maille, modélisé ici par une fermeture à l'ordre 1 nécessitant le calcul de l'énergie cinétique turbulente de sous-maille.

La dispersion des gouttelettes de pesticides est modélisée par une approche lagrangienne. Après son émission du pulvérisateur, la gouttelette est soumise à une force de traînée exercée par l'air ambiant sur sa surface, ainsi qu'à la gravité. Sous l'hypothèse qu'il n'y a pas d'interaction entre les gouttes, et en négligeant la dispersion de sous-grille, le mouvement de chaque gouttelette est décrit par la seconde loi de Newton. Le modèle lagrangien utilisé repose sur celui qui a été développé par Vinkovic *et al.* (2006a,b) pour les particules solides. Dans le travail réalisé ici, la volatilisation des gouttelettes après émission n'est pas considérée.

La méthode des différences finies est utilisée dans ARPS pour la discrétisation spatiale des équations dans une grille de type Arakawa C à maillage décalé. Pour la discrétisation temporelle des équations, un schéma explicite est utilisé.

On trouvera en Annexe 1 une description des équations du modèle.

## 5. Les expérimentations réalisées

### 5.1 Dynamique du vent sur vigne réelle (Arbanats)

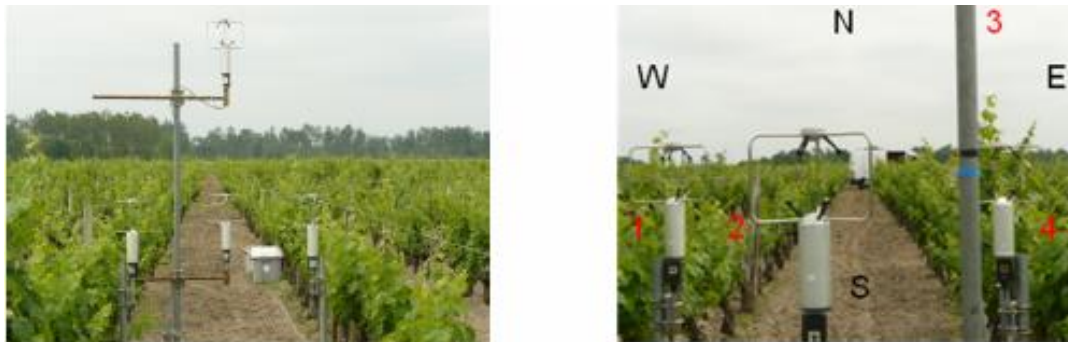
L'objectif de l'expérimentation était de caractériser les propriétés dynamiques de l'écoulement atmosphérique dans une parcelle de vigne, et de constituer une base de données permettant l'évaluation du code numérique. Il fallait pour cela entreprendre des mesures sur une durée suffisamment longue pour pouvoir disposer de plusieurs directions de vent par rapport à celle des rangs de vigne.

L'expérimentation s'est déroulée de mai à juillet 2010 sur une parcelle de vigne situés dans la région des Graves au sud de Bordeaux (domaine du Château Tourteau-Chollet, commune d'Arbanats). La parcelle de mesure est un terrain plat entouré de forêts situées à 300 m au Nord-Est et à 500 m au Sud et les rangs de vigne sont orientés dans la direction nord-sud (figure 1).

La hauteur des troncs était de 0,3 m, la distance inter-rang (pied à pied de vigne)  $L_x$  de 2 m, et la distance entre pieds sur le même rang de 1 m. Les caractéristiques foliaires de la vigne ont évolué aux cours de l'expérimentation : la hauteur moyenne du couvert de vigne  $h$  a varié de 0,7 m à 1,80 m, et la densité foliaire  $LAI$  de 0,71 à 1,34. Un système de quatre anémomètres ultrasoniques de type Gill a été monté entre deux rangs, permettant chacun la mesure des trois composantes de la vitesse de vent à une fréquence de 20 Hz. Les soniques numérotés 1, 2 et 4 ont été placés au sommet de la vigne à  $z = h$ , avec deux soniques sur le bord opposé du rang à 0,2 m des plants de vigne et le troisième au centre de l'inter-rang (voir figure 2). Le sonique 3 au centre du même inter-rang a été placé à  $z = 2h$ . Les statistiques sur les champs de vitesse du vent ont été calculées sur des périodes de 30 min. Le sonique 4 étant malheureusement tombé en panne, le peu de données collectées n'a pas été pris en compte dans le traitement statistique. De manière à travailler avec un couvert en rang suffisamment développé nous n'avons considéré que les données de la mi-juin à fin juillet, période au cours de laquelle la hauteur des rangs dépasse 1,5 m.

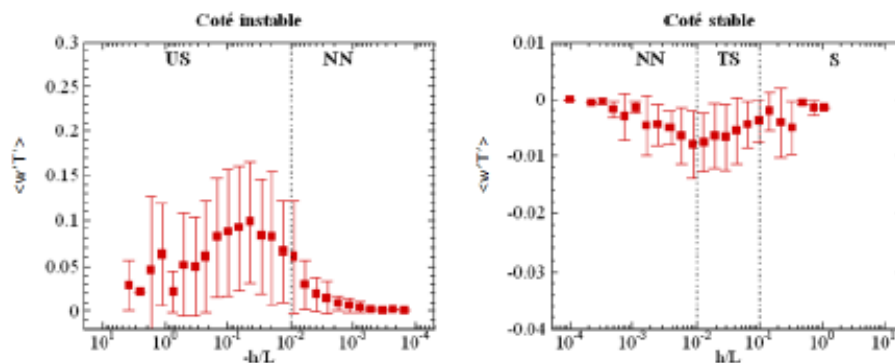


**Figure 1.** Site du déroulement de l'expérimentation sur la vigne (images Google Maps) : position du site (à gauche), zoom sur la parcelle (à droite).



**Figure 2.** Vue de la parcelle de vigne instrumentée et disposition des anémomètres soniques.

L'ensemble des données a été filtré et analysé en fonction de la stabilité de l'atmosphère et de la direction moyenne du vent. L'état de stratification de l'atmosphère est classé en cinq bandes, selon le signe et la valeur de la longueur d'Obukhov (figure 3). Seuls les cas de proche neutralité ont été traités, dans la mesure où le modèle est lui-même en mode neutre dans les simulations réalisées ici. La proche neutralité est définie par  $|h/L| < 0,01$ , comme le montre la figure (cas NN). Cette dernière, incidemment, montre la qualité des mesures réalisées.



**Figure 3.** Flux de chaleur à 3 m en fonction du paramètre de stabilité  $h/L$  permettant de définir les régimes de stabilité : quasi neutre (NN), instable (US), en transition vers la stabilité (TS), stable (S).



Pour chaque direction de vent, un angle de 15° autour de la direction moyenne est utilisé pour avoir un volume suffisant de données et réduire le poids des erreurs de mesure imprévisibles. La variabilité de la direction du vent durant toute la période de mesure est donnée par la rose des vents en figure 4. Le vent dominant était d'ouest, soufflant perpendiculairement aux rangs. Sous condition de neutralité de l'atmosphère, sont donnés dans le tableau 1 les nombres de demi-heures de mesure sur lesquelles a porté le traitement statistique, en fonction de la direction de vent.

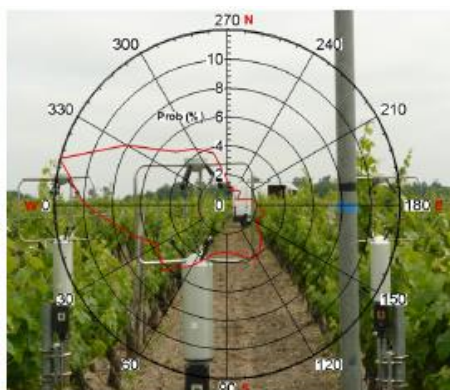


Figure 4. Distribution de la direction du vent durant l'expérimentation d'Arbanats.

Direction du vent		sonique 1	sonique 2	sonique 3
perpendiculaire aux rangs	$0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ $345^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$	75	75	75
parallèle aux rangs	$255^\circ \leq \theta \leq 285^\circ$	19	18	19
vent à 45°	$30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$	45	45	45
toutes directions	$0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$	252	253	257

Tableau 1. Nombre de demi-heures de mesure pour chaque direction de vent sous une atmosphère neutre et pour chaque sonique.

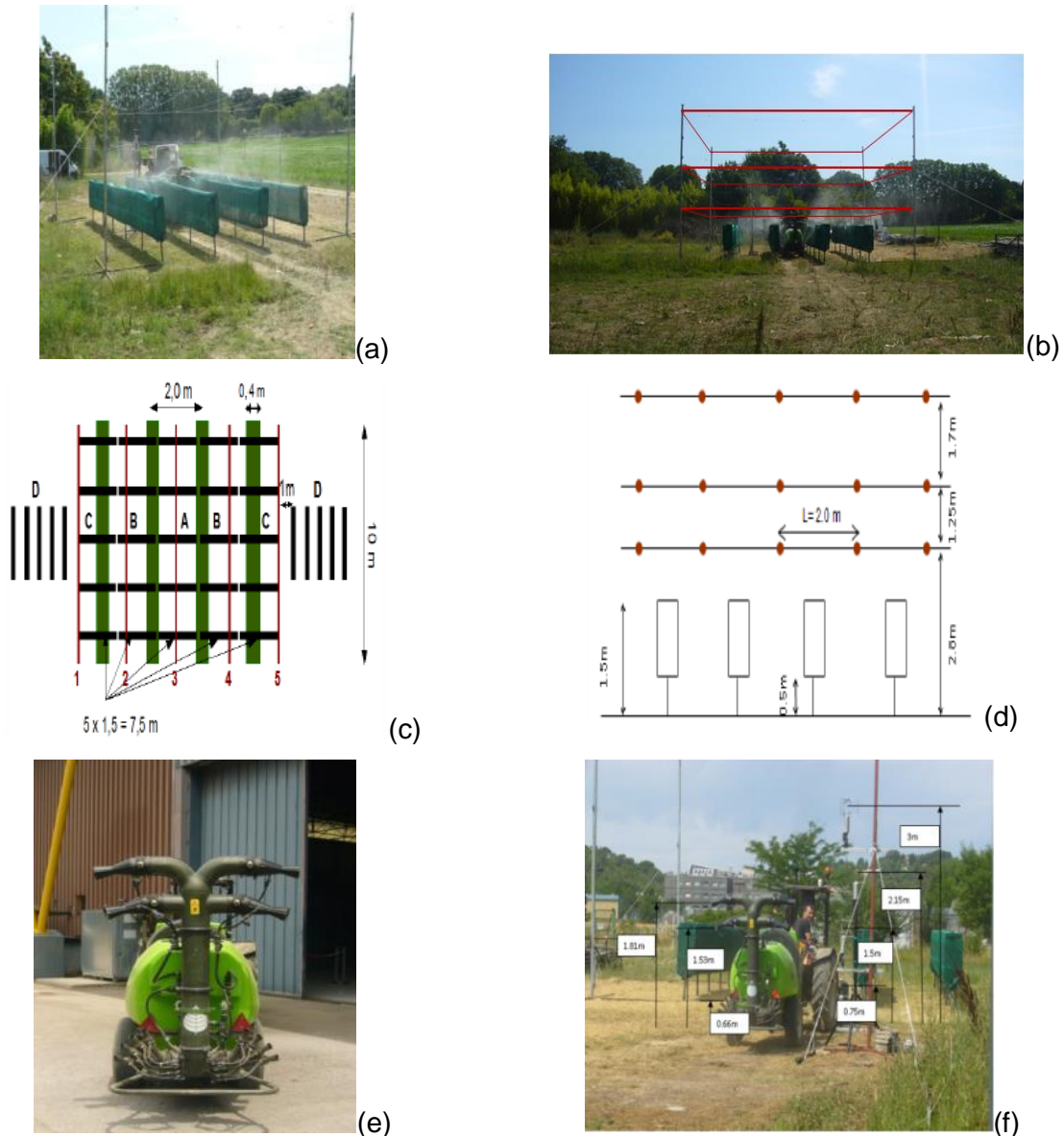
## 5.2 Dispersion de pesticides sur couvert artificiel (Montpellier)

L'expérimentation sur la dispersion de pesticide a été réalisée au centre IRSTEA de Montpellier, en reprenant la méthodologie de Gil *et al.* (2007). La parcelle expérimentale était constituée de quatre rangées de vigne artificielle de 1,5 m de haut et 10 m de long (Fig. 5a). L'épaisseur de chaque rangée était de 0,40 m et l'inter-rang était de 2 m. L'expérimentation a consisté à quantifier le dépôt au sol et la dispersion aérienne de pesticide pendant plusieurs séries de pulvérisation réalisées par un pulvérisateur tracté. A chaque passage, l'écoulement de vent était également caractérisé.

Le même traceur en solution que celui de Gil *et al.* (2007) a été utilisé à la place d'une véritable « bouillie » de pesticide. Pour estimer les pertes aériennes au-dessus et en aval de la parcelle, trois plans de fils PVC ont été installés à trois hauteurs : 2,8 m, 4 m et 5,7 m (Fig. 5b et 5d). La quantité de spray captée par les fils permet d'évaluer la quantité de pesticide soumise à la dérive atmosphérique (Gil *et al.*, 2007). Pour mesurer le dépôt au sol, des collecteurs en bandes ont été disposés sur le sol entre les rangs ainsi qu'à l'extérieur de la parcelle, à différentes distances de celle-ci (Fig. 5c). Le pulvérisateur utilisé était un pulvérisateur pneumatique Tecnomat Pulsar (Fig. 5e). La pulvérisation était réalisée à partir de l'inter-rang central, à une vitesse d'avancement de  $1,52 \text{ m s}^{-1}$  et un débit liquide de  $0,14 \text{ l s}^{-1}$ . Les dépôts sur les bandes et les fils étaient analysés au laboratoire quelques minutes après l'application en utilisant la technique de Gil *et al.* (2007).

Les principales caractéristiques de l'écoulement d'air induit par les jets du pulvérisateur ont été déterminées à partir de quatre anémomètres soniques montés à 0,75, 1,5, 2,15 m et 3 m sur un mât situé dans la rangée centrale (Fig. 5f). A l'extérieur de la parcelle, un autre anémomètre sonique placé à 3 m de haut enregistrait les conditions météorologiques ambiantes.

L'intensité du vent généré par le pulvérisateur a été déterminée dans une configuration statique où ce dernier était placé derrière un mât équipé de quatre soniques, à l'extérieur de la parcelle.

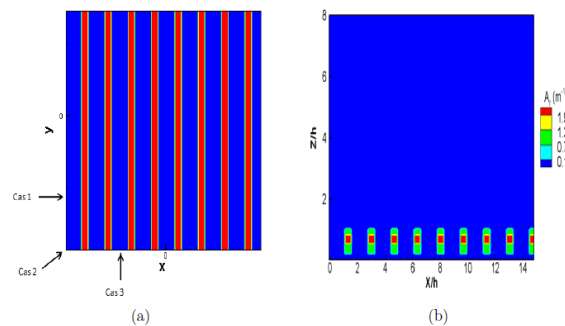


**Figure 5.** (a) Parcelle expérimentale avec ses quatre rangs de vigne artificielle, (b) vue des plans de fils collecteurs, (c) plan aérien du dispositif et des bandes collectrices au sol, (d) plan en coupe du dispositif et des fils de collecte, (e) pulvérisateur Tecnomax Pulsar, (f) mât d'anémomètres soniques utilisé pour les tests statiques.

## 6. Dynamique du vent en couvert de vigne

### 6.1 Evaluation du modèle

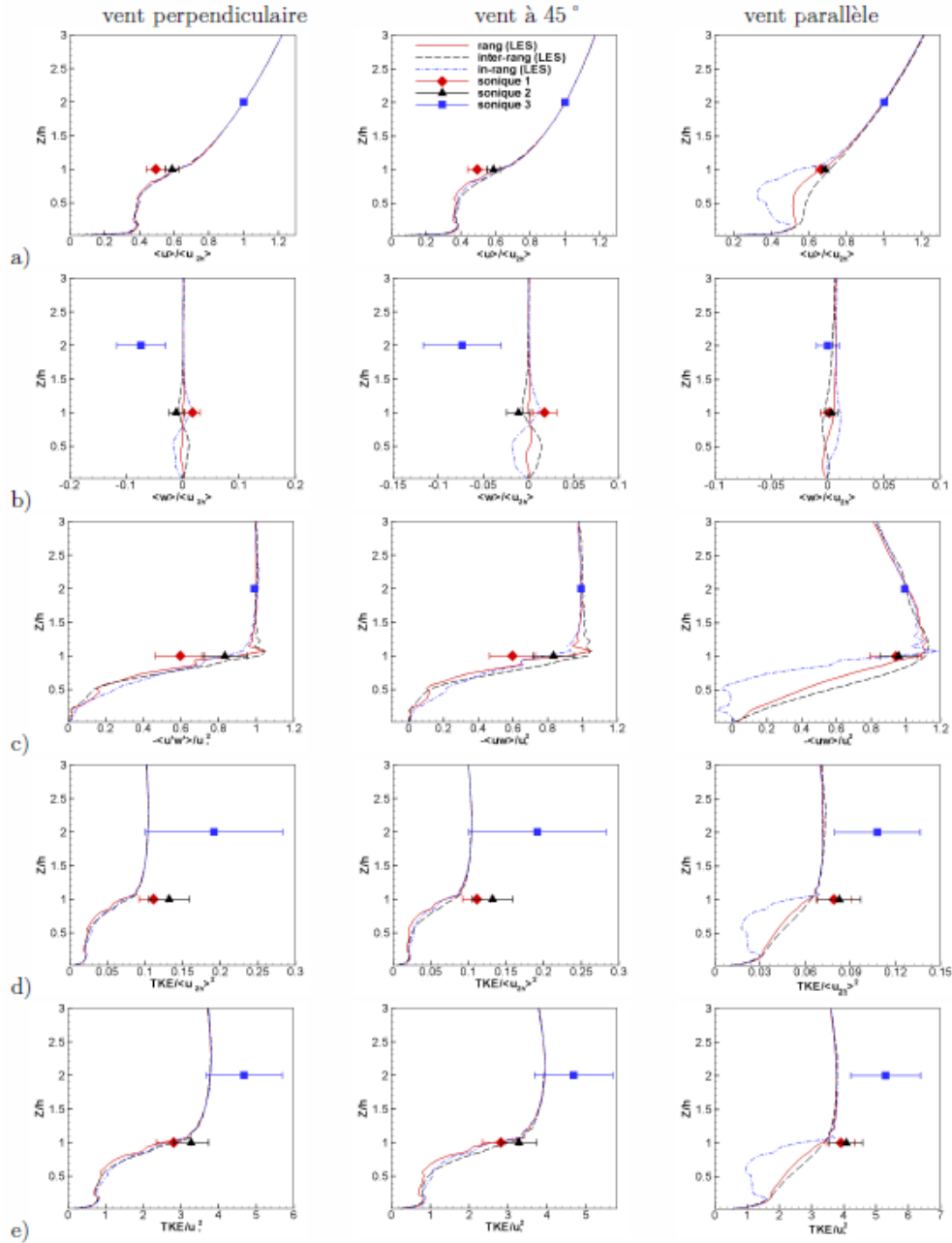
Afin de simuler la dynamique du vent dans des conditions similaires à celles du site expérimental d'Arbanats nous avons utilisé un domaine 3D de longueur et de largeur égales à 25 m et de hauteur 42 m. La taille des mailles sur le plan horizontal est uniforme et égale à 0,2 m, tandis que dans la direction verticale le maillage est étiré avec une taille minimale près du sol de 0,05 m. Les rangs de vigne sont représentés par des densités foliaires frontales  $A_f$  définies à la position des rangs, telles qu'elles sont illustrées sur la figure 6, et par un coefficient de traînée  $C_d$  fixé à 0,2. La densité frontale des éléments végétaux est choisie de façon à ce que le  $LAI$  ( $= \int A_f dz$ ) de la parcelle de vigne soit égal à celui de la parcelle d'Arbanats (1,88). Pour représenter l'inhomogénéité verticale de la densité foliaire de la vigne, sa hauteur est subdivisée en quatre niveaux de  $A_f$  : partie tronc de hauteur 0,3 m avec  $A_f$  égal à  $0,05 \text{ m}^{-1}$ , partie située entre 0,3 et 0,9 m avec  $A_f$  égal à  $1 \text{ m}^{-1}$ , partie située entre 0,9 et 1,4 m avec  $A_f$  maximal ( $A_f = 2 \text{ m}^{-1}$ ) et partie supérieure située entre 1,4 et 1,7 m avec  $A_f$  pris égal à  $1 \text{ m}^{-1}$ . La densité foliaire dans la direction des rangs est considérée uniforme. Cette hypothèse est valable sur la période de mi-juin à fin juillet dans la mesure où, une fois le feuillage développé, les pieds de vigne se touchent pour former une sorte de barrière continue au vent.



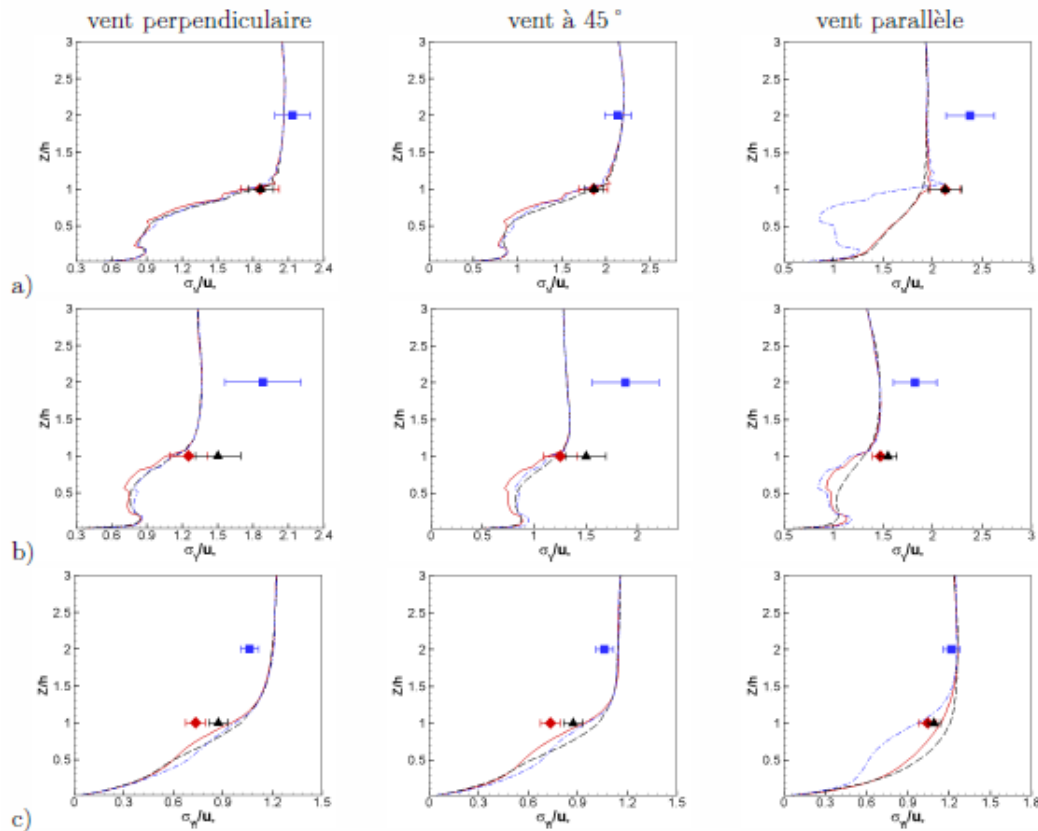
**Figure 6.** (a) Vue du domaine de calcul suivant la direction parallèle aux rangs, les flèches indiquant les trois cas de direction de vent (plan  $xy$ ). (b) Représentation schématique des rangs de vigne dans le plan  $xz$ .

Trois simulations ont été réalisées : (i) cas 1 où le vent est perpendiculaire aux rangs, (ii) cas 2 où le vent est à  $45^\circ$  par rapport aux rangs, (iii) cas 3 où le vent est parallèle aux rangs. Pour ces trois simulations, les conditions aux limites utilisées sont périodiques sur les frontières latérales du domaine, non glissantes au sol, et sous la forme d'une couche de Rayleigh au sommet du domaine. Les conditions latérales périodiques permettent de simuler un couvert infini horizontalement. Après une phase d'initialisation, lorsque le vent entre en équilibre avec le couvert les champs instantanés sont enregistrés à une cadence de 1 s pour les traitements statistiques ultérieurs. Pour déterminer les champs statistiques bidimensionnels, les variables turbulentes instantanées enregistrées durant 20 min sont moyennées en temps et en espace suivant  $y$ . Pour le calcul des profils verticaux locaux du vent, la moyenne arithmétique est effectuée sur toutes les lignes verticales du domaine ayant les mêmes positions relatives par rapport aux rangs. En ce qui concerne les profils verticaux des statistiques à l'échelle de la parcelle, les moyennes temporelle et spatiale suivant  $x$  et  $y$  sont effectuées sur les champs 3D instantanés. Comme pour les résultats expérimentaux, les champs 2D sont adimensionnés par la moyenne temporelle et spatiale sur le plan horizontal  $xy$ . Les profils verticaux sont adimensionnés par les moyennes spatiale et temporelle de la vitesse moyenne  $u$  ou de la vitesse de frottement  $u_*$  en  $z = 2h$ . Concernant les variables spatiales  $x$  et  $z$ , elles sont adimensionnées par la hauteur de la vigne  $h$ .

Sur les figures 7 et 8 sont représentés les profils statistiques du vent ainsi que les points expérimentaux. Les variables auxquelles nous nous intéressons ici sont les composantes moyennes de la vitesse  $\langle u \rangle$  et  $\langle w \rangle$ , l'énergie cinétique turbulente  $TKE$ , les écarts types  $\sigma_{u,v,w}$  (les skewness  $Sk_{u,v,w}$  et les kurtosis  $Kt_{u,v,w}$  ne sont pas montrées). Sur chaque figure, les mesures collectées des soniques 1, 2 et 3 sont représentées par les symboles carrés, avec une barre représentant l'écart-type des mesures autour de la moyenne. Les courbes en rouge sont des profils le long des lignes verticales passant par le sonique 1 près du rang et les courbes en noir sont des profils passant par les deux soniques 2 et 3 au milieu de l'inter-rang. Dans les rangs nous ne disposons pas de mesures mais nous avons inclus les profils simulés (lignes bleues) à titre de comparaison.



**Figure 7.** Profils verticaux simulés et mesurés des composantes horizontale et verticale (a et b), du flux de quantité de mouvement (c) et l'énergie cinétique turbulente adimensionnée par  $\langle u_{2h} \rangle$  (d) et  $u_{2h}^2$  (e).



**Figure 8.** Figure similaire à la figure 7 mais pour les écarts types des composantes longitudinale (a), latérale (b) et verticale (c) de la vitesse du vent.

L'action des rangs de vigne sur le vent est bien visible aussi bien sur les profils simulés que sur les points expérimentaux. Quelle que soit la direction du vent, le vent est décéléré dans le couvert à cause de l'absorption de la quantité de mouvement par les éléments végétaux (figure 7a). Sur la même figure on observe aussi une couche d'accélération d'air juste au-dessus du sol, qui doit être attribuée à l'effet de confinement de l'air entre le sol et la partie inférieure du couvert. Pour un vent parallèle aux rangs, la décélération du vent dans les rangs est plus forte que dans les cas de vent perpendiculaire aux rangs ou à 45°. La masse d'air qui passe par un rang reste en effet toujours dans le rang, donc longtemps soumise à la résistance de la vigne. Sur la figure 7b les profils de vitesse verticale montrent qu'au sommet des rangs la vitesse verticale  $\langle w \rangle$  est positive près des rangs et négative aux inter-rangs, alors que dans le couvert elle change de signe. Cela laisse présager la présence de structures tourbillonnaires à l'interface vigne-atmosphère et dans les cavités formées par les rangs de vigne. Au-dessus du sommet de la vigne, à  $z = 2h$ , les vitesses verticales mesurées sont relativement plus grandes que les valeurs simulées et elles sont négatives. La raison probable en est l'hétérogénéité de la parcelle aux échelles plus grandes. Les forêts entourant la parcelle de vigne sont plus hautes que la vigne, et il est possible que les masses d'air passant par les forêts soient projetées vers le sol à hauteur de la vigne. Pour le vent parallèle aux rangs, la vitesse verticale est quasiment nulle. Les profils simulés ainsi que les points expérimentaux de la figure 7c montrent que pour un vent perpendiculaire ou à 45° par rapport aux rangs le flux turbulent augmente avec la hauteur dans le couvert avant qu'il ne devienne constant dans la couche de surface. Pour un vent parallèle le flux présente un pic au sommet de la vigne puis décroît vite au-dessus. L'absence de couche à flux constant au-dessus du couvert est liée au faible gradient de vitesse au sommet de la vigne

lorsqu'on compare ce cas à ceux des vents perpendiculaire et à 45° par rapport aux rangs (figure 7a).

Les profils d'énergie cinétique turbulente (figure 7d,e), pour un vent perpendiculaire ou à 45°, présentent la même allure avec une forte dissipation dans la canopée. Lorsque le vent est parallèle aux rangs, la dissipation dans l'inter-rang et près des rangs est moins prononcée que dans les rangs. Cette tendance de l'énergie cinétique est en relation directe avec celle des profils d'écart types (figure 8a,b,c). Près du sol  $\sigma_u$  et  $\sigma_v$  présentent des pics dus à la production de turbulence par cisaillement dans la couche d'air confinée entre le sol et la partie basse du couvert. Pour un vent parallèle aux rangs, l'action du couvert sur la composante latérale de vitesse  $\sigma_v$  est moins importante que sur les deux autres composantes. Ceci doit être attribué au fait que les rangs ne sont pas assez épais pour freiner les fluctuations latérales de la vitesse.

Concernant la skewness  $Sk_u$ , non montrée ici, son profil de variation verticale montre un pic entre 0,8 et 1 dans le couvert à la hauteur  $3h/4$ , indiquant une dominance des phases de rafale. Pour le vent parallèle aux rangs ce pic n'est pas observé dans les inter-rangs et  $Sk_u$  tend rapidement vers zéro au-dessus du couvert. Le profil de  $Sk_w$  est négatif dans le couvert et tend vers 0, ce qui traduit aussi la dominance des phases de balayage ( $u > 0$ ,  $w < 0$ ) dans le couvert. Les kurtosis se comportent de la même manière que les skewness, avec un pic en  $z = 3h/4$ .

Pour les trois directions du vent, les statistiques turbulentes du vent mesurées sont reproduites assez fidèlement par ARPS. Les principales remarques à tirer des résultats des simulations sont :

- une faible variation horizontale de la vitesse horizontale du vent ainsi que de ses moments d'ordre 2 pour un vent perpendiculaire ou à 45° ; cette variation est plus importante lorsque le vent est parallèle aux rangs ;

- une bonne simulation des tourbillons détectés au sommet de la vigne dans les cas de vent perpendiculaire ou à 45°, comme le montre la variation de la vitesse verticale  $\langle w \rangle$  selon  $z$  (figure 6b) ;

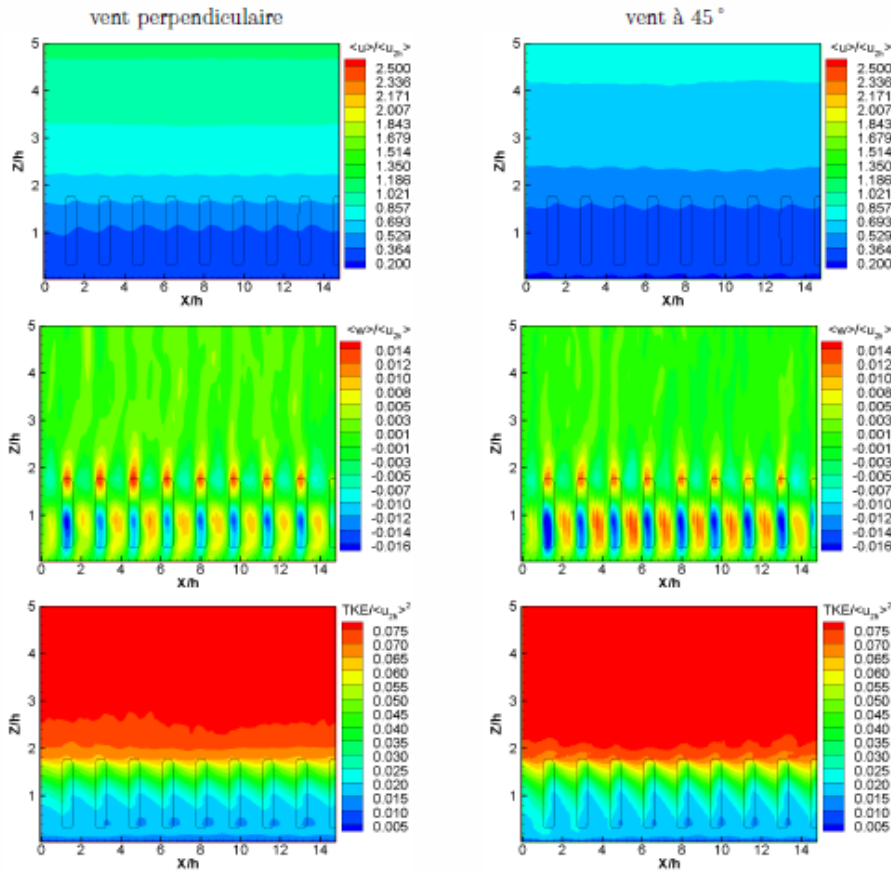
- pour un vent perpendiculaire ou à 45°, une bonne similitude des profils locaux des moments d'ordre 1, 2, 3 et 4 avec les profils habituellement mesurés dans des canopées homogènes ; en vent parallèle en revanche, les profils simulés près des rangs et à l'inter-rang sont similaires à ceux des écoulements atmosphériques sur sol nu, comme le montrent nombre de variables présentées ici.

## 6.2 Champs de vent à l'échelle des rangs de vigne

Le domaine de calcul étant carré pour toutes les directions de vent et les conditions aux limites étant prises périodiques, l'écoulement possède une symétrie statistique dans la direction des rangs (direction  $y$  en figure 6). Par les moyennes temporelle et spatiale dans la direction de symétrie, on obtient l'aspect moyen de l'écoulement dans la vigne. Les figures 9 et 10 représentent respectivement les champs moyens des vents perpendiculaire, oblique (45°) et parallèle aux rangs. Toutes les variables représentées dans les champs sont adimensionnées par la vitesse moyenne du vent à la hauteur  $2h$ .

Lorsque le vent est perpendiculaire aux rangs sa vitesse diminue dans ces derniers puis augmente dans l'inter-rang jusqu'au rang suivant (figure 9). Pour un rapport d'aspect  $L_x/h = 1,17$ , l'inter-rang se comporte comme une clairière vis-à-vis du rang suivant (voir Dupont et Brunet, 2008b) : par exemple, quand le vent aborde un rang la  $TKE$  diminue à travers le rang, avec un certain retard lié à la dissipation par le sillage, puis augmente dans l'inter-rang jusqu'au rang suivant. Concernant le mouvement vertical, on observe deux états de mouvement dominants : à l'intérieur du couvert, dans la cavité formée par deux rangs, se

forment des tourbillons, avec une partie ascendante dans l'inter-rang et une partie descendante dans le rang. Au sommet de la vigne se forment des tourbillons dont la partie montante est située juste au-dessus des rangs et la partie descendante dans les inter-rangs. Ces tourbillons sont à l'origine des vitesses verticales  $\langle w \rangle$  mesurées et simulées sur les profils verticaux de la figure 7b. Ces tourbillons présents sur chaque rang sont une conséquence de la déviation de l'air vers le haut par les rangs et sa descente dans les inter-rangs (conservation de la masse).



**Figure 9.** Champs moyens des vitesses horizontale et verticale, et de l'énergie cinétique turbulente pour les vents perpendiculaire et à 45° par rapport aux rangs.

Schématiquement, un vent à 45° par rapport aux rangs garde les mêmes variabilités et organisation qu'un vent perpendiculaire, comme on peut le voir sur la figure 9. Pour cette direction de vent, l'écoulement dans les rangs est freiné puis accélère dans les inter-rangs sans qu'il y ait canalisation de l'écoulement dans ceux-ci. Le passage du vent perpendiculaire au vent à 45° ne fait donc en quelque sorte qu'augmenter la distance parcourue par l'air dans les inter-rangs, d'un rapport  $\sqrt{2}$ .

Pour un vent parallèle aux rangs (figure 10), la variabilité horizontale est très prononcée, comme le montre la cartographie de la vitesse horizontale  $\langle u \rangle / \langle u_{2h} \rangle$  moyennée selon  $y$ . En effet, l'action des rangs dans ce cas est de créer des couloirs d'accélération et de décélération dans les inter-rangs et les rangs respectivement. En ce qui concerne le champ de  $TKE$ , contrairement aux cas d'un vent perpendiculaire ou à 45°, on n'observe pas de région continue de forte énergie cinétique turbulente au sommet de la vigne. La raison en est que le gradient de vitesse au sommet n'est pas suffisant pour générer de la  $TKE$  et la répartir d'une manière quasi-uniforme dans la couche à flux constant, comme il le fait pour un vent perpendiculaire ou à 45°. La zone séparée de la forte  $TKE$  située au-dessus des rangs centraux doit être associée aux grosses structures qui proviennent de plus hautes couches de l'atmosphère, comme l'illustre le champ de la vitesse verticale qui présente les phases

ascendantes et descendantes, connues communément comme des "updrafts" et "downdrafts". A l'intérieur du couvert, on observe une variabilité horizontale de la TKE, induite par la dissipation de la turbulence sous l'action des éléments végétaux de la vigne.

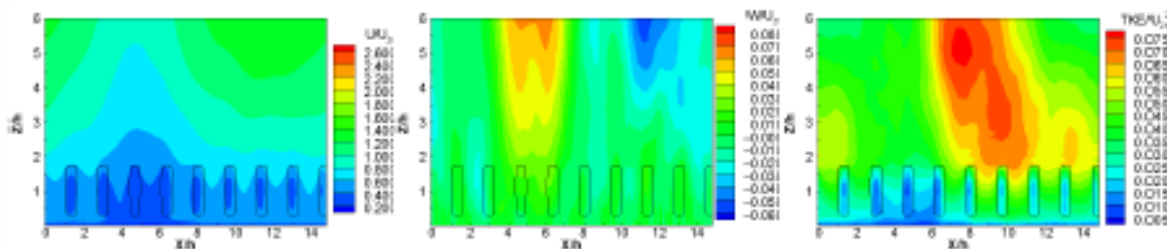


Figure 10. Champs moyens des vitesses horizontale et verticale, et de l'énergie cinétique turbulente pour le vent parallèle aux rangs.

### 6.3 Champs de vent à l'échelle de la parcelle

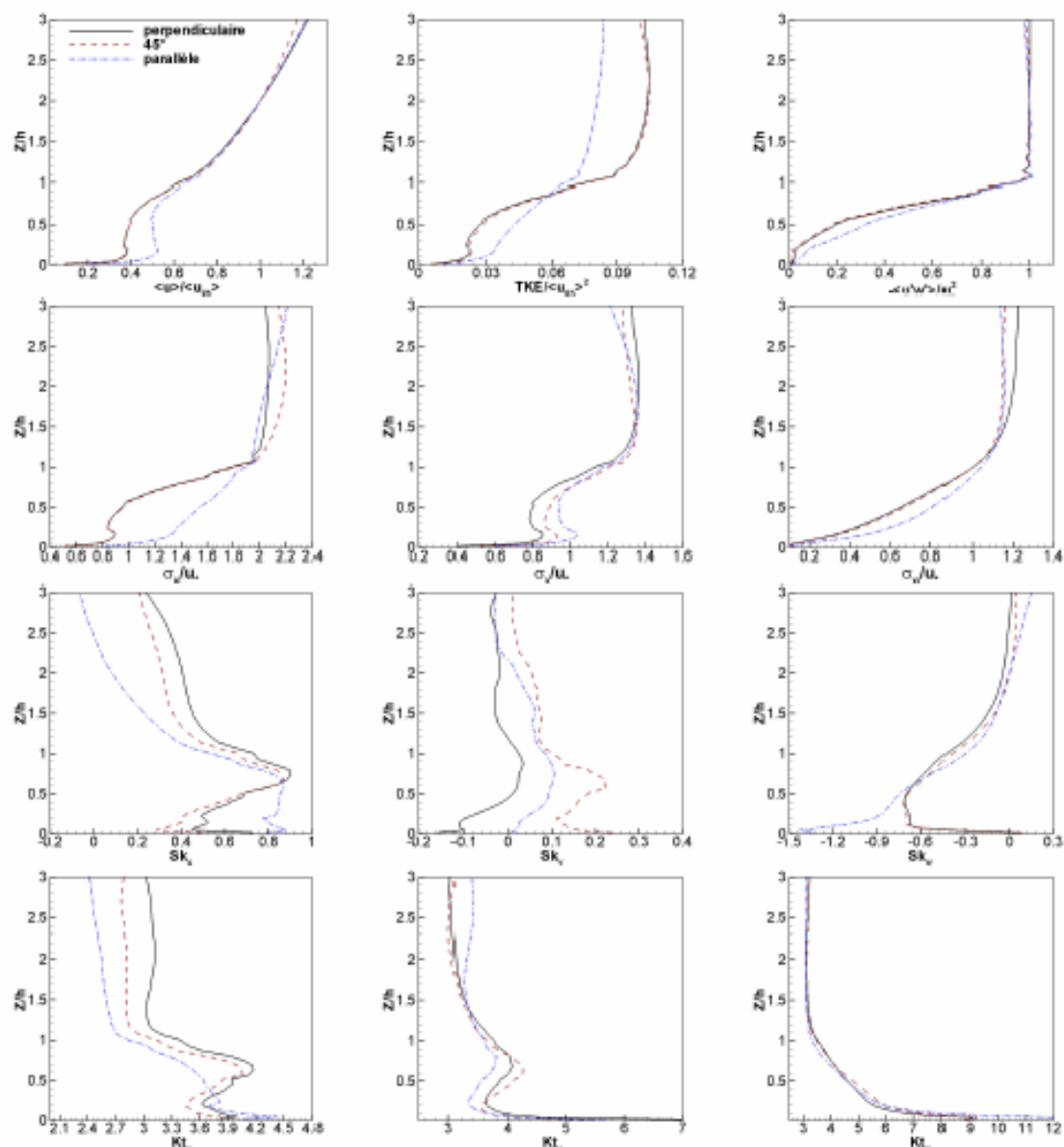
Les statistiques moyennes du vent à l'échelle de la parcelle sont obtenues par la moyenne temporelle et les moyennes spatiales suivant les deux directions horizontales. La figure 11 montre les profils verticaux des moments d'ordre 1 à 4 pour les trois directions du vent. A l'échelle de la parcelle, on observe que l'action du couvert sur le vent est très prononcée pour un vent perpendiculaire ou à 45° par rapport aux rangs. Lorsque le vent est parallèle aux rangs la vitesse horizontale, le flux turbulent, l'énergie cinétique turbulente et les écarts types sont moins atténués dans le couvert ( $z < h$ ) du fait que la masse importante d'air qui longe l'inter-rang est moins sujette à l'action des éléments végétaux ; pour un vent perpendiculaire ou à 45° par rapport aux rangs, le couvert en revanche exerce un rôle important dans l'absorption de la quantité de mouvement sous l'action du sillage. Quelle que soit la direction du vent les profils de  $\langle u'w \rangle$  montrent la présence d'une couche à flux constant qui s'étale sur une hauteur allant de  $h$  à  $3h$ . Pour des vents perpendiculaires ou à 45°, les profils de variation verticale des statistiques de moment 1 à 4 sont similaires aux profils observés dans des canopées homogènes horizontalement (Raupach *et al.*, 1996) : les écarts types  $\sigma_u/u_*$  et  $\sigma_w/u_*$  au sommet du couvert sont autour de 1,0 et 2,0, et  $Sk_u$  et  $Sk_w$  sont proches de 1,0 et - 0,6 respectivement.

Pour un vent parallèle aux rangs, certains profils statistiques s'écartent des profils usuels, comme les profils de  $TKE / \langle u_{2h} \rangle^2$ ,  $\sigma_u$ ,  $Sk_w$  et  $Kt_u$  qui ressemblent plutôt aux profils caractéristiques des couches limites turbulentes sur sol nu : les écarts types augmentent d'une façon monotone avec  $z$  et les skewness et kurtosis sont dépourvus de pics. Cet écart doit être attribué au fait que l'écoulement est en quelque sorte une superposition d'un écoulement sur couvert et d'un écoulement sur sol nu. Toutefois, on note que  $Sk_u$  est positif dans le couvert et tend vers zéro plus rapidement que pour un vent perpendiculaire ou à 45°. De même,  $Sk_w$  est négatif dans le couvert et tend vers zéro au-dessus. Même pour un vent parallèle aux rangs, l'écoulement à l'échelle de la parcelle est donc dominé par des rafales intermittentes dues aux structures cohérentes qui pénètrent dans le couvert. La présence de ces rafales est reflétée également par les profils de kurtosis, qui prennent dans le couvert des valeurs supérieures à leur valeur gaussienne 3.

Pour voir l'effet de la direction du vent sur les paramètres aérodynamiques du couvert, ces derniers ont été calculés par direction (tableau 2). Cet effet est notable. Comme on pouvait s'y attendre, la hauteur de déplacement  $d/h$  et la longueur de rugosité  $z_0/h$  sont maximales pour un vent perpendiculaire ou à 45°, avec des valeurs se situant dans la gamme courante, respectivement 0,7–0,8 pour  $d/h$  et 0,10 pour  $z_0/h$ . Ces valeurs sont typiques de couverts végétaux homogènes. Pour un vent parallèle aux rangs, en revanche, ces paramètres ont de plus faibles valeurs, révélant un caractère plus « ouvert » du couvert. Résultat plus original, la direction du vent a également un effet sur l'échelle de cisaillement  $L_s/h$  de l'écoulement :



elle est sensiblement plus grande en vent parallèle car le profil vertical de vitesse présente un gradient relativement faible par rapport aux autres directions de vent (figure 11).

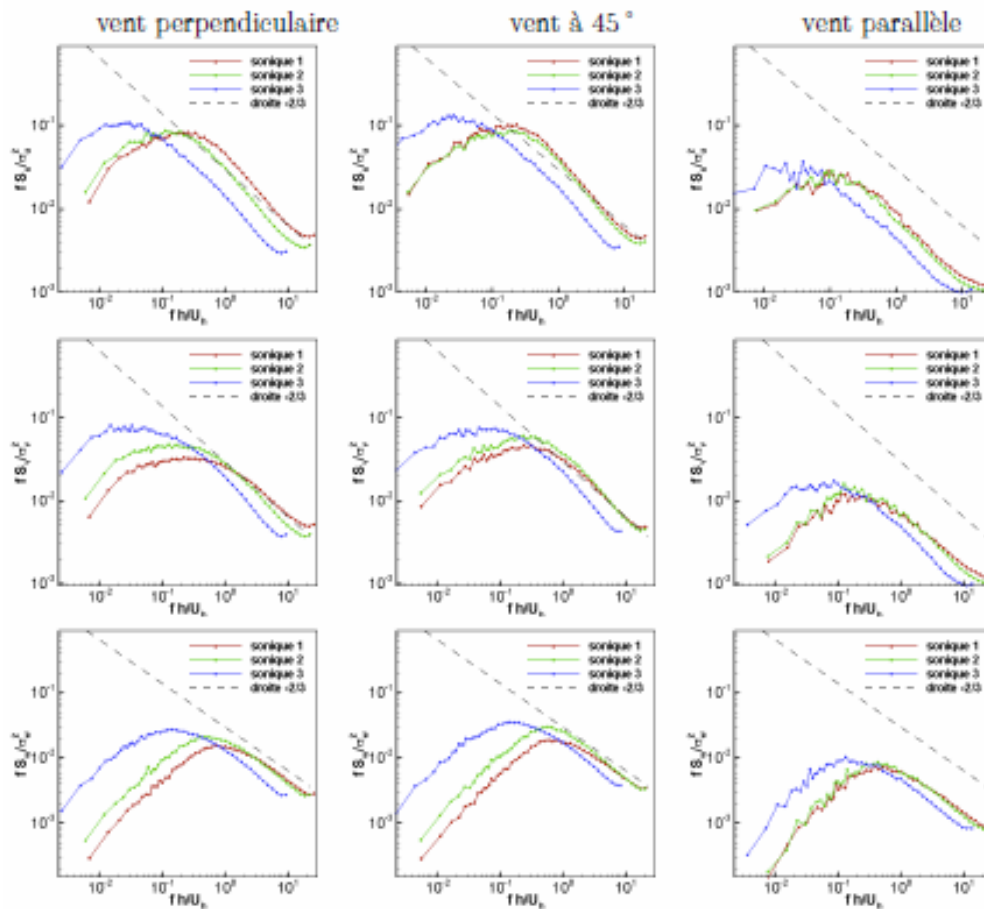


**Figure 11.** Profils moyens à l'échelle de la parcelle de la vitesse horizontale, de l'énergie cinétique turbulente, du flux de quantité de mouvement, des écarts types des trois composantes de vitesse, des skewness des trois composantes de vitesse et des kurtosis des trois composantes de vitesse pour une direction de vent perpendiculaire (ligne noire), à 45° (ligne rouge) et parallèle (ligne bleue) par rapport aux rangs.

Direction du vent	$z_0/h$	$d/h$	$L_s/h$
perpendiculaire	0.11	0.69	1.10
45°	0.10	0.70	1.08
parallèle	0.085	0.62	1.26

**Tableau 2.** Paramètres aérodynamiques de la vigne en fonction de la direction de vent.

Quelle que soit la direction du vent, les profils de vitesse à l'échelle de la parcelle possèdent un point d'inflexion au sommet de la vigne. L'écoulement est donc le siège d'instabilités donnant lieu à des structures cohérentes. Afin de caractériser les plus énergétiques d'entre elles, la figure 12 présente les spectres des trois composantes de la vitesse issues des mesures.



**Figure 12.** Spectres de puissance des composantes de la vitesse longitudinale  $u$ , latérale  $v$  et verticale  $w$  pour les trois directions de vent.

On peut noter les points suivants :

- dans tous les cas les pics des spectres de la composante  $u$  de la vitesse au sommet de la vigne apparaissent à la fréquence normalisée  $fh/U_h = 0,13$  pour un vent perpendiculaire ou à  $45^\circ$ . Cette fréquence est proche de la fréquence des structures cohérentes des canopées denses (0,15) rapportée par Raupach *et al.* (1996). Pour un vent parallèle aux rangs les pics spectraux apparaissent à plus basse fréquence (0,1) ;

- le pic du spectre de  $w$  mesuré à l'inter-rang pour un vent perpendiculaire aux rangs apparaît à la fréquence normalisée de 0,45, qui est une fréquence typique observée sur des canopées homogènes et denses (Raupach *et al.*, 1996). Pour des vents à  $45^\circ$  et parallèles aux rangs, les pics apparaissent à une fréquence plus élevée (0,7) ;

- l'énergie spectrale augmente avec la hauteur dans les basses fréquences, à cause de la contribution des grosses structures à l'écart-type total de la vitesse ;

- l'amplitude des spectres de  $v$  et  $w$  mesurés par des soniques situés au sommet de la vigne présente une variabilité horizontale pour des vents perpendiculaires et à  $45^\circ$  : le spectre est maximum au niveau du sonique situé à l'inter-rang, en raison de la dissipation de

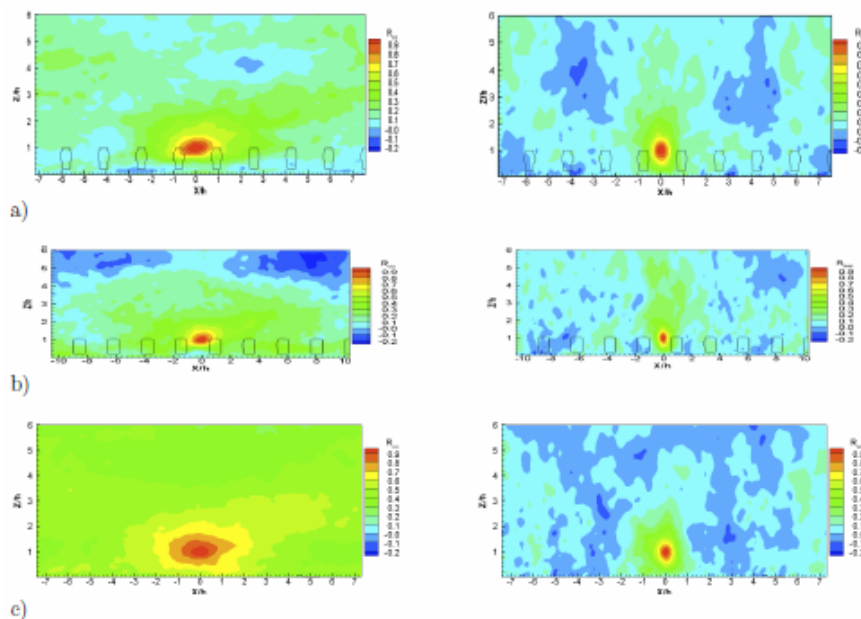
la *TKE* dans le sillage des éléments végétaux derrière le sonique 1. Ceci est en accord avec les champs de *TKE* obtenus en vent perpendiculaire ou à 45° (figure 9) ;

- pour un vent perpendiculaire ou à 45° les spectres de vitesse ne montrent pas de différence notable et présentent une plus grande amplitude que dans le cas du vent parallèle. Ceci doit être attribué à la turbulence qui est beaucoup plus active quand le vent est perpendiculaire ou à 45°, où des tourbillons se forment dans la cavité et au sommet de la vigne ;

- dans les échelles inertielles on voit bien l'effet de direction du vent sur la cascade de l'énergie cinétique turbulente. Pour un vent parallèle la pente du spectre de *u* est celle de la cascade de Kolmogorov en  $-2/3$ , alors que dans les deux autres cas elle est inférieure à  $-2/3$ , en raison de la dissipation rapide de la *TKE* dans les échelles inertielles due à l'action des éléments végétaux et le court-circuit de la cascade énergétique ;

- enfin, on observe que les spectres de *u* enregistrés par le sonique 3 à  $z = 2h$  ont une pente inférieure à  $-2/3$  pour un vent perpendiculaire ou à 45°, alors qu'en vent parallèle la pente du spectre est celle observée dans la couche de surface. Les effets dissipatifs du couvert se font donc sentir même à la hauteur  $2h$  pour un vent perpendiculaire ou à 45°, alors que ce n'est pas le cas quand ce dernier est parallèle aux rangs.

Afin d'étudier les caractéristiques spatiales des structures cohérentes à l'échelle de notre couvert, les champs d'auto-corrélations des composantes de la vitesse au sommet de la vigne sont donnés dans la figure 13 pour différentes directions de vent. Ils sont des indicateurs de la taille des structures cohérentes les plus énergiques contenues dans les spectres de puissance déjà discutés.

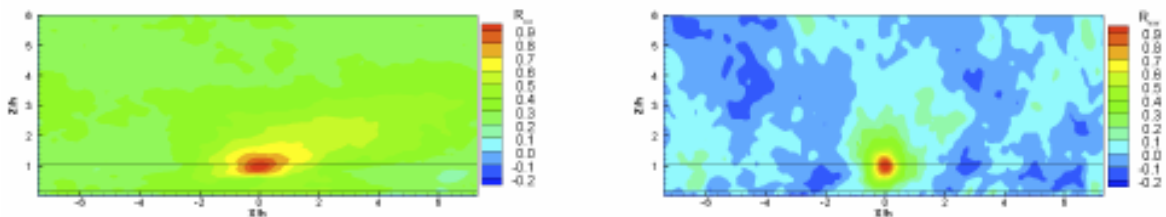


**Figure 13.** Auto-corrélation des composantes de vitesse suivant la direction moyenne *x* du vent *u* (à gauche) et *w* (à droite) pour les vents (a) perpendiculaire, (b) à 45° et (c) parallèle. Le point de référence est situé au sommet de la vigne, au milieu de l'inter-rang.

Pour toutes les directions de vent, les champs d'auto-corrélations  $R_{uu}$  et  $R_{ww}$  ressemblent à ceux observés sur des couverts homogènes denses (Shaw *et al.*, 1995). On observe par exemple sur les champs de  $R_{ww}$  des zones circulaires de forte corrélation et de diamètre environ  $2h$  pour toutes les directions de vent. L'extension de ces zones est identique à celle des structures cohérentes observées sur des couverts homogènes denses. Les échelles intégrales  $L_w/h$  déduites de ces zones valent 0,62, 0,41 et 0,48 respectivement pour un vent

perpendiculaire, à 45° et parallèle. En ce qui concerne la composante horizontale de la vitesse  $u$ , les champs d'auto-corrélation montrent une zone elliptique inclinée s'étalant (pour  $R_{uu} > 0.2$ ) sur des distances horizontale et verticale de  $8h$  et  $4h$ . L'existence de ces zones de corrélation en association avec la forme des spectres mesurés confirme que les couverts en rangs sont aussi le siège de structures cohérentes semblables à celles observées sur des couverts homogènes.

Comme on l'a rappelé, les structures cohérentes sont générées par la présence d'un point d'inflexion dans les profils verticaux de vitesse. Ces derniers présentent une variabilité horizontale maximale quand le vent est parallèle aux rangs (figure 7). Pour voir l'effet des rangs et l'ampleur de l'inflexion du profil de vitesse sur les champs d'auto-corrélation, la figure 14 montre les champs d'auto-corrélation de  $u$  et  $w$ , avec le point de référence situé maintenant au sommet d'un rang de vigne (vent parallèle aux rangs). La structure des champs d'auto-corrélation est morphologiquement identique au cas où le point de référence est situé dans l'inter-rang. Pour  $R_{ww}$ , la similitude est quasiment parfaite.  $R_{uu}$  quant à lui conserve la même forme elliptique inclinée, mais avec une zone de forte corrélation qui pénètre dans le couvert sur une couche plus petite qu'à l'inter-rang, comme montré dans la figure 13c. Cette pénétration réduite de la zone fortement corrélée est à attribuer à la résistance du rang au mouvement de pénétration des structures cohérentes dans le couvert. Hormis ce fait, il n'y a pas d'effet individuel notable du rang de vigne sur les structures cohérentes, dont on confirme ici la génération par la présence d'un point d'inflexion de vitesse au sommet du couvert.



**Figure 14.** Auto-corrélation des composantes de vitesse suivant la direction moyenne  $x$  du vent  $u$  (gauche) et  $w$  (droite) pour un vent parallèle. Le point de référence est situé au sommet de la vigne, au milieu du rang.

#### 6.4 Conclusion sur la dynamique de l'écoulement

L'écoulement du vent à l'intérieur et au-dessus du couvert de vigne a été étudié numériquement, en utilisant le modèle atmosphérique ARPS, et expérimentalement, en instrumentant une parcelle de vigne, pour trois directions de vent : perpendiculaire aux rangs, à 45° des rangs et parallèle aux rangs. Les principales conclusions qui en ressortent sont les suivantes :

- de manière générale, les mesures des statistiques de vent sur une parcelle expérimentale sont reproduites par le modèle ARPS d'une manière satisfaisante, quelle que soit la direction du vent. Les quelques écarts observés sont à associer soit à la variabilité verticale de la densité foliaire, seulement représentée dans nos simulations par quatre paliers de densité foliaire constante, soit au fait que l'analyse statistique des mesures n'a pas porté que sur des vents strictement perpendiculaire, à 45° et parallèle (une tolérance de  $\pm 15^\circ$  a été admise autour de chaque direction de manière à disposer d'un nombre suffisant de données) ;

- les principales caractéristiques géométriques de l'écoulement dans la vigne concordent bien avec les observations et les mesures effectuées par d'autres auteurs. Dans les cas d'un vent perpendiculaire ou à 45°, il y a prédominance des mouvements verticaux descendants dans les rangs et ascendants dans les inter-rangs, liés aux tourbillons

intermittents qui se forment dans les cavités formées par les rangs. Au sommet de la vigne, des tourbillons sont générés par l'action qu'exercent les rangs sur la masse d'air incidente en la défléchissant vers le haut avant qu'elle ne redescende au sommet de l'inter-rang. En vent parallèle aux rangs, de tels tourbillons ne sont pas observés ; l'air est plutôt accéléré dans les inter-rangs et décéléré dans les rangs à cause de l'effet de canalisation de l'air dans les inter-rangs ;

- les statistiques de vent présentent une certaine variabilité horizontale, notamment en vent parallèle où l'écoulement s'apparente à une superposition d'écoulement sur une canopée dense dans les rangs et d'écoulement sur sol nu dans les inter-rangs ;

- les caractéristiques aérodynamiques du couvert de vigne varient selon la direction du vent. En vent perpendiculaire ou à 45°, la hauteur de déplacement et la rugosité sont plus importantes qu'en vent parallèle ;

- les spectres des composantes de vitesse sont semblables aux spectres communément mesurés sur des canopées homogènes, avec cependant une pente dans les échelles inertielles plus grande pour un vent perpendiculaire ou à 45° que dans le cas parallèle.

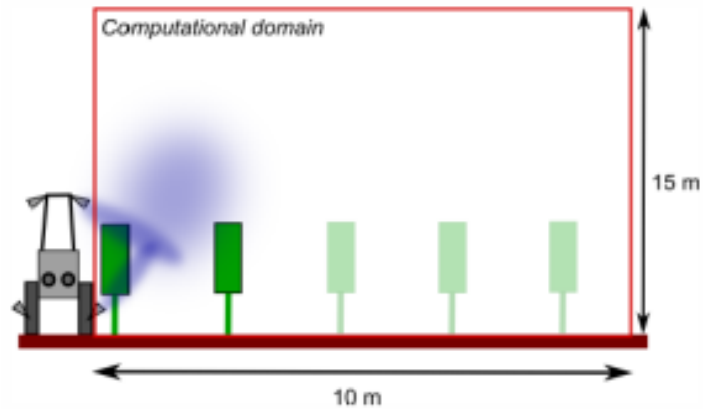
Globalement, le modèle ARPS est capable de résoudre la dynamique du vent dans des couverts en rangs aussi bien à l'échelle des rangs qu'à celle de la parcelle. Certes, la validation n'a été faite que sur quelques points de mesure, alors qu'il serait souhaitable de s'appuyer sur des profils verticaux expérimentaux avec plusieurs points de mesure dans et au-dessus du couvert, et avec un profil de variation de la densité foliaire continu. Mais les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants. Ils montrent que les écoulements atmosphériques sur des couverts en rangs ont finalement des propriétés similaires aux écoulements sur couverts homogènes en termes de structures cohérentes, comme on l'a vu sur les spectres de vitesses et les fonctions d'auto-corrélation.

## 7. Dispersion turbulente en couvert de vigne

La dynamique de l'écoulement à l'échelle des rangs étant simulée de façon satisfaisante, nous pouvons maintenant nous concentrer sur la dispersion scalaire. Comme évoqué en partie 4, c'est un modèle lagrangien qui a été introduit pour cela dans le code, de façon à pouvoir représenter le transport d'un nuage de pesticides à partir de son émission par un jet.

### 7.1 Traitement du jet

La pulvérisation s'effectuant au moyen de jets, et ces derniers ayant une influence notable sur le champ de vitesse local, il a été décidé de prendre en compte dans la modélisation le jet lui-même, en sortie de buse. Afin de simuler la dispersion de pesticide à l'échelle d'une petite parcelle de vigne au cours d'un traitement et dans des conditions proches de celles de l'expérimentation de Montpellier, nous avons utilisé un domaine de calcul 3D de dimensions 15×10×15 m<sup>3</sup> suivant les directions normale et parallèle aux rangs et la direction verticale z (figure 15). L'effet du pulvérisateur est pris en compte au niveau de la condition limite d'entrée ( $x = 0$ ) du domaine de calcul. La parcelle comporte cinq rangs de vigne afin de respecter initialement des conditions de périodicité. Bien que le nombre de rangs soit plus important ici que dans l'expérimentation (deux rangs de chaque côté du passage du pulvérisateur), les conditions de dispersion de pesticide ne devraient pas être modifiées, cette dispersion étant plus liée à la dynamique de jets d'air qu'à la dynamique du vent elle-même. La hauteur des rangs est  $h = 1,5$  m, avec des pieds de vigne qui mesurent 0,5 m de haut. L'espace inter-rang est de 2 m. La densité foliaire  $A_f$  des rangs de vigne est considérée constante entre 0,5 m et 1,5 m de haut et elle est prise égale à 2 m<sup>-1</sup> de telle sorte que son indice foliaire ( $LAI$ ) corresponde à celui de la vigne artificielle, soit  $LAI = 2$  (Brun, 2007).



**Figure 15.** Représentation géométrique du domaine de calcul comportant cinq rangs de vigne.

La figure 15 montre une vue de la parcelle sur une coupe verticale perpendiculaire aux rangs. Le premier rang se situe à 0,5 m de l'entrée du domaine ( $x = 0$ ). Cette distance correspond à celle séparant le pulvérisateur d'un rang de vigne. Une résolution spatiale horizontale de  $\Delta x = \Delta y = 0,1$  m a été choisie, permettant à la fois de tenir compte de la variabilité spatiale de l'écoulement dans la vigne et de suivre la dispersion à l'échelle des rangs. Concernant la direction verticale, un maillage très fin et étiré est utilisé, avec une taille minimale près du sol  $\Delta z_{min} = 0,005$  m, afin de résoudre finement les jets d'air émis par le pulvérisateur. La dynamique du vent est résolue avec un pas de temps  $\Delta t = 0,001$  s largement inférieur au temps de relaxation des particules  $\Delta p$ . Le mouvement des particules est ainsi résolu à l'échelle de leur temps de relaxation, ce qui permet de prendre en compte l'action des fluctuations turbulentes sur le mouvement des particules. La source de gouttelettes est caractérisée par des distributions diamétrales gaussiennes de moyenne  $130 \mu\text{m}$  avec des variances  $70 \mu\text{m}$ . A ces tailles de particules correspondent une échelle de temps caractéristique  $\Delta p$ , de l'ordre de 0,03 s, et une vitesse de sédimentation  $v_s$  de l'ordre de  $0,3 \text{ m s}^{-1}$ .

Trois types de sources sont étudiés pour un domaine de calcul identique :

(1) source fixe avec un jet droit. Dans ce cas le jet d'air est fixe et situé à une hauteur  $z = 1$  m du sol. Ce cas nous permet de tester la capacité du modèle à simuler les jets ;

(2) source mobile sans jet d'air. Dans ce cas la source est matérialisée par des aires circulaires représentant la section de sortie des diffuseurs du pulvérisateur en mouvement avec la vitesse du tracteur  $V_{tr}$  ( $1,52 \text{ m s}^{-1}$ ). On considère que la pulvérisation est effectuée par deux sources, une haute à  $z = 1,70$  m et une basse à  $z = 0,66$  m, afin d'être proche des caractéristiques du pulvérisateur utilisé lors de l'expérimentation de Montpellier (voir figure 5). Les deux sources sont en mouvement avec la vitesse du pulvérisateur, sans jet d'air. On suppose que les gouttelettes sont émises avec une vitesse initiale de  $20 \text{ m s}^{-1}$  et une orientation de  $20^\circ$  vers le sol pour la source haute et de  $45^\circ$  vers le haut pour la basse ;

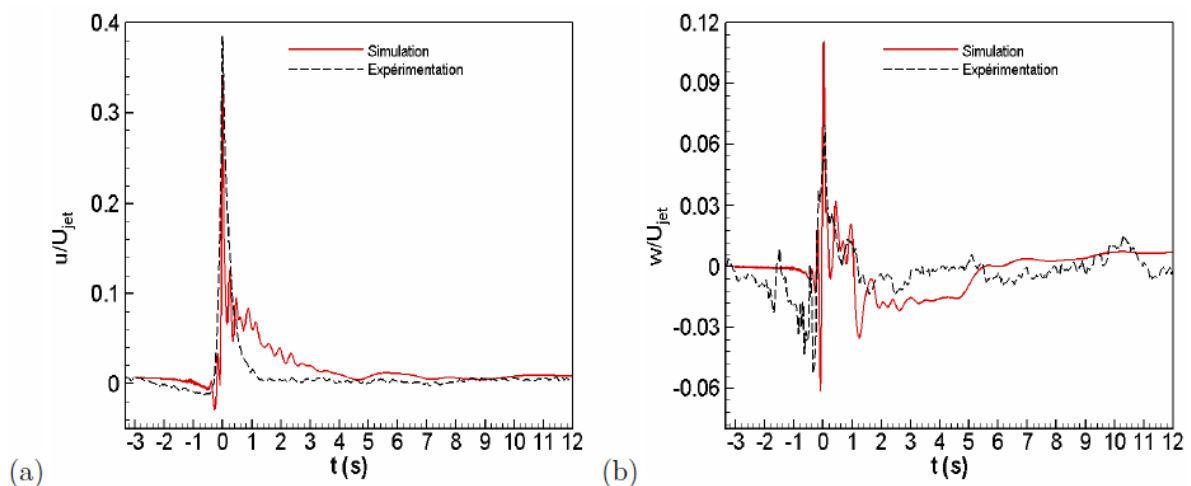
(3) source mobile avec deux jets d'air. La source est représentée de la même façon que dans le cas précédent, sauf que les gouttelettes sont transportées par les jets d'air du pulvérisateur. Ces jets émanent des aires circulaires situées à l'entrée du domaine, et la vitesse initiale des gouttelettes est la même que la vitesse locale des jets d'air à la sortie des diffuseurs du pulvérisateur. La vitesse des jets d'air du pulvérisateur est limitée à  $U_{jet} = 20 \text{ m s}^{-1}$  pour des raisons calculatoires. Dans tous les cas, la vitesse initiale des gouttelettes est superposée à une fluctuation de sous-maille dépendant de l'énergie cinétique sous-maille (voir Annexe 1).

Les conditions aux limites pour le vent appliquées à notre domaine de calcul diffèrent selon la nature de la source. Pour la source sans jet, elles sont prises périodiques. Pour les

sources avec jets, un pré-calcul est effectué sans jet et sans particules, en utilisant des conditions périodiques à l'entrée du domaine ; de ce calcul sont extraits les champs de vent sur un plan  $y-z$  avec une fréquence temporelle de 2 s, ensuite appliqués comme conditions d'entrée ( $x = 0$ ) au calcul avec jet. Cette approche permet d'avoir des conditions d'entrée les plus réalistes possibles. Le jet d'air lui-même est modélisé par une perturbation du champ de vent incident à la position de sortie de jet d'air du pulvérisateur de type  $u = U_{jet} \exp(-r^2/D^2)$ , où  $D$  est le diamètre du jet ( $D = 0,08$  m) et  $r$  la distance d'un point sur le plan d'entrée du domaine par rapport au centre du jet d'air. Dans le cas du jet mobile, le pulvérisateur en mouvement selon la direction  $y$  parallèle aux rangs est représenté par la variation de la position du centre du jet selon  $y$ , avec une vitesse correspondant à celle du tracteur ( $V_{tr} = 1,52$  m s<sup>-1</sup>).

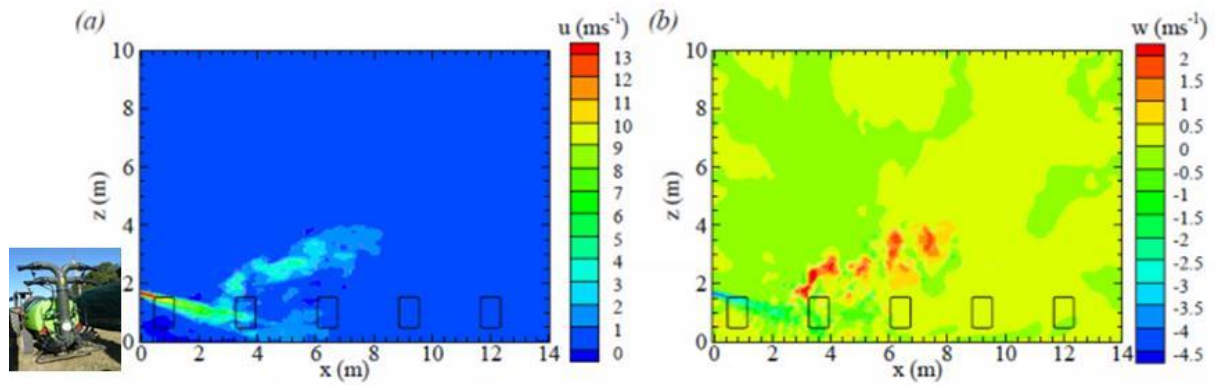
## 7.2 Dynamique du jet

La figure 16 montre une comparaison des vitesses instantanées mesurées et simulées, au moment du passage d'un pulvérisateur à deux jets. Le maximum de  $u$  provient de la composante horizontale du jet en provenance du canon supérieur, proche du sonique S2. Pour la vitesse verticale  $w$  la présence d'un pic négatif suivi d'un pic positif s'explique par le passage en premier du jet issu du canon haut, et orienté vers la bas, suivi du canon bas orienté vers le haut en direction de S2. La figure montre une bonne concordance entre mesures (moyenne d'ensemble sur 32 passages) et simulation ; les valeurs des pics en particulier sont très proches (par exemple,  $u/U_{jet} = 0.34$  et  $0.35$  pour les simulations et les mesures, respectivement).



**Figure 16.** Variations temporelles des composantes horizontale  $u$  (a) et verticale  $w$  (b) de la vitesse du vent, normalisées par la vitesse du jet  $U_{jet}$ . Ces composantes de vitesse sont obtenues expérimentalement (traits pointillés) et par simulation LES (traits pleins) à la position du sonique 2 de l'expérimentation de Montpellier lors du passage du pulvérisateur (voir figure 5).

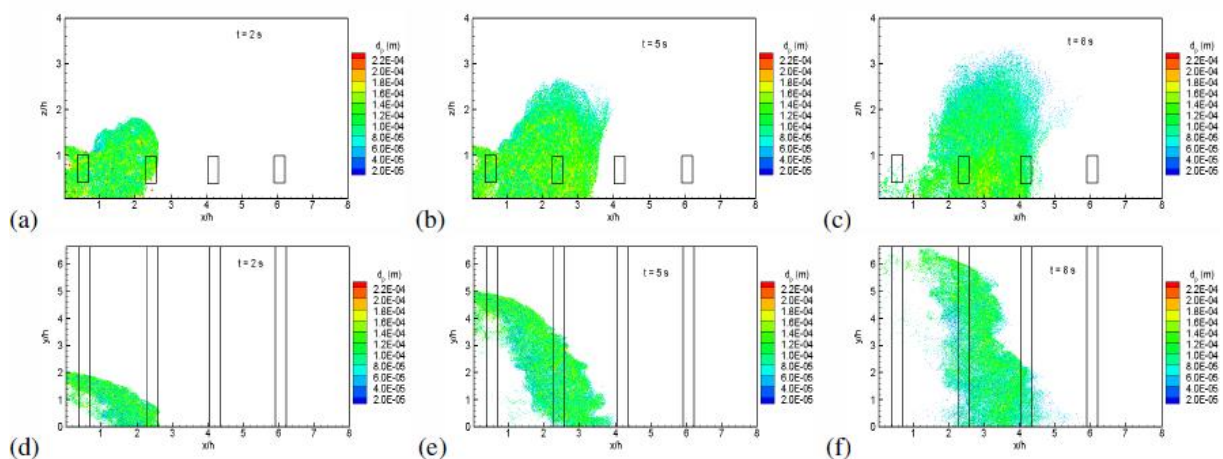
A titre d'illustration, la figure 17 montre une simulation d'un jet haut fixe. Sur la figure 17a ( $u$ ) on note à la fois la trace du jet en sortie de buse, mais aussi sa déflexion partielle vers le haut due au second rang de vigne, déflexion qui est également bien visible sur le graphe de vitesse verticale  $w$  (figure 17b).



**Figure 17.** Champs instantanés de vitesse horizontale  $u$  (a) et verticale  $w$  (b) sur un plan vertical passant par l'axe du jet haut, quelques secondes après le début de la pulvérisation.

### 7.3 Dispersion des gouttelettes par le jet

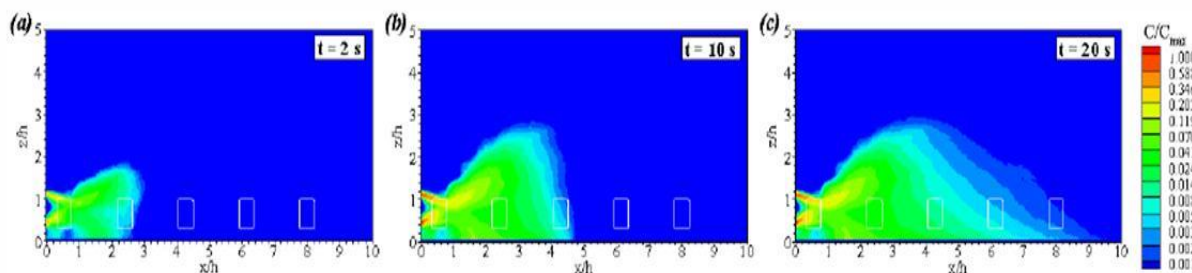
La figure 18 montre une vue instantanée du nuage de gouttelettes, représentées en fonction de leur taille, lors d'une pulvérisation mobile à deux sources. On distingue bien sur ces graphes l'expansion du nuage de gouttelettes, en hauteur comme dans la direction perpendiculaire à l'avancement. Le parcours du pulvérisateur le long de la parcelle expérimentale prenant 6,6 s, on voit qu'à  $t = 8$  s le panache est détaché et a commencé à migrer dans la direction du vent moyen ( $x$ ).



**Figure 18.** Vue instantanée du nuage de gouttelettes émis par un pulvérisateur à deux sources en mouvement, dans les plans  $x$ - $z$  (a, b, c, vue latérale dans le sens des rangs) et  $x$ - $y$  (d, e, f, vue de dessus) à trois instants après le début de la pulvérisation :  $t = 2$  s (a, d),  $t = 5$  s (b, e) et  $t = 8$  s (c, f). Le code couleur se réfère aux tailles de gouttelettes.

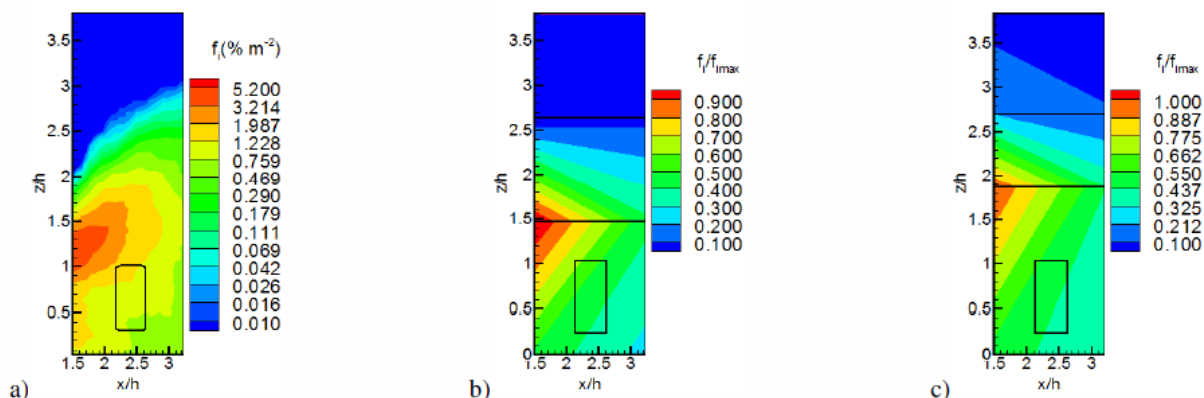
La figure 19 montre l'évolution du champ intégré de concentration normalisée, à trois instants (2, 10 et 20 s) après le démarrage d'une pulvérisation à deux jets. On remarque le fort impact de l'orientation du jet bas (et dans une moindre mesure celui de la déflexion du jet haut par la vigne) sur la dispersion verticale du nuage de pesticides.





**Figure 19.** Champs intégrés de concentration résultant d'une pulvérisation à deux jets, montrés sur un plan vertical passant par l'axe du jet haut, à 2, 10 et 20 s après le début de la pulvérisation.

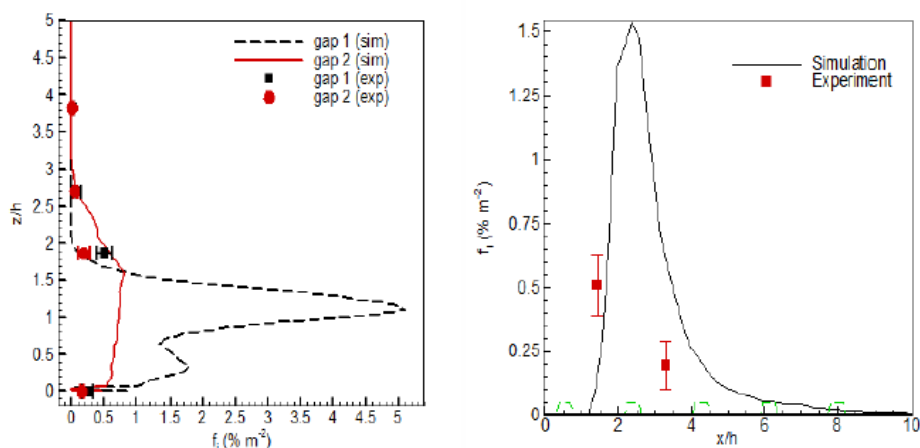
Enfin, la figure 20 montre la répartition spatiale du flux de pesticides autour du deuxième rang à droite du pulvérisateur (voir figure 15). On voit que le maximum de flux simulé (figure 20a) se situe à l'inter-rang, à une hauteur comprise entre 1 m et 1,5 m, soit entre les deux canons de pulvérisation (pris dans les calculs, comme on l'a vu, à 0,66 m et 1,70 m). Recalculé sur la grille des collecteurs et normalisée par sa valeur maximale (figure 20b), ce flux apparaît similaire à son équivalent mesuré – la hauteur de collecte expérimentale, soit  $z/h = 1,86$ , étant en réalité surestimée du fait d'un fléchissement des fils de collecte.



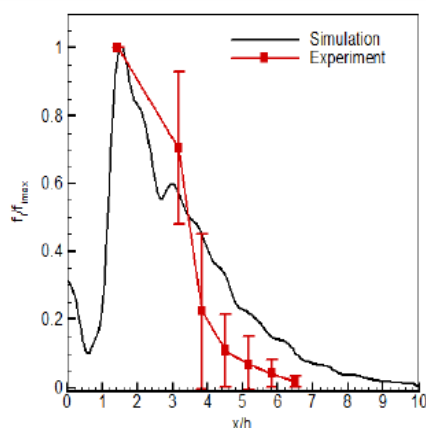
**Figure 20.** Structure spatiale du flux de pesticides, intégré dans le temps, sur le deuxième rang de pulvérisation (à droite du pulvérisateur, voir figure 15) : (a) valeurs continues simulées, exprimées en  $\% m^{-2}$  du flux total ; (b) valeurs relatives simulées sur la grille discrète des collecteurs ; (c) valeurs relatives mesurées sur cette grille de collecteurs.

Les variations verticales de flux (figure 21a) montrent un accord raisonnable, là où les mesures ont été effectuées. Il s'avère malheureusement que l'emplacement de ces dernières n'était pas optimal : il aurait fallu pouvoir les resserrer à la fois sur la verticale à l'intérieur du couvert de vigne, et sur un plan horizontal le long des rangs et inter-rangs. La courbe simulée montre en particulier deux maxima sur le premier inter-rang, l'un à  $z/h = 1,1$  correspondant à la hauteur où les deux jets se croisent, et un plus faible à  $z/h = 0,3$  que l'on peut attribuer à l'impact du canon supérieur. Sur le second inter-rang, un seul maximum est visible à une hauteur plus élevée ( $z/h = 1,6$ ). Les variations horizontales (figure 21b) ne sont pas, sur ce cas de figure, simulées avec une grande précision ; on peut invoquer le fait que la représentation du pulvérisateur par seulement deux jets n'est pas optimale (voir figure 5) ; par ailleurs, le modèle ne prend pas en compte, dans la version utilisée ici, l'instabilité thermique de l'atmosphère.

Ces faits, ainsi que l'absence de prise en compte de l'éventuelle évaporation de la solution après dépôt, peuvent également être à l'origine des écarts entre les flux de dépôt (figure 22). Si l'ordre de grandeur est bon, on constate en effet une surestimation pour des valeurs de  $x/h$  au-delà de 4 (le modèle semble trop diffuser). La courbe simulée montre bien sur les deux premiers rangs l'impact du feuillage, qui diminue localement le dépôt au sol.



**Figure 21.** Variation verticale des flux de pesticide simulés et mesurés à la verticale des premier et second inter-rangs, à l'emplacement des collecteurs (gauche). Variation horizontale du flux à la hauteur du premier plan de collecte,  $z/h = 1.86$  (droite).



**Figure 22.** Variation horizontale des flux de dépôt de pesticide simulés et mesurés sur les bandes de collecte, normalisés par les valeurs de flux à l'inter-rang.

#### 7.4 Conclusion sur la dispersion turbulente

Les principales conclusions à tirer du travail présenté dans cette partie sont les suivantes :

- bien que le nombre de points de mesure dans les inter-rangs ne soit pas élevé, la dispersion du nuage de gouttelettes à l'échelle des rangs paraît, dans ses grandes lignes, bien reproduite par le modèle numérique ;
- les variations spatiales des dépôts de pesticide simulés et modélisés au voisinage du pulvérisateur sont qualitativement proches ;
- l'action du couvert sur les jets d'air du pulvérisateur et la dispersion est bien détectée par le modèle. Les jets se dissipent en présence du couvert et les niveaux de concentration sont réduits à la traversée des rangs de vigne, ce qui induit une réduction locale de dépôt au sol ;
- afin de simuler correctement la dispersion de pesticide à l'échelle de quelques rangs, les jets d'air du pulvérisateur doivent être pris en compte dans les simulations. Ceci engendre une contrainte importante car ces jets n'ont pu être simulés qu'à travers les conditions aux limites du domaine de calcul.

Globalement, l'évaluation du modèle s'avère perfectible, les flux mesurés sur les fils collecteurs étant parfois sensiblement différents des flux simulés. Si les résultats sur la dispersion sont encourageants, certaines des hypothèses faites ne sont sans doute pas optimales (géométrie des jets, neutralité de l'atmosphère). De même, l'éventuelle évaporation rapide de la solution après dépôt, qui n'a pas été prise en compte, pourrait être responsable de l'apparente surestimation des dépôts au sol.

Par ailleurs, quelques résultats relatifs aux conditions de pulvérisation et à leur optimisation ont été obtenus :

- la méthode de forçage des conditions aux limites sous ARPS offre la possibilité d'optimiser les pulvérisateurs en ajustant leurs orientations, d'autant que les jets d'air sont suffisamment résolus avec ARPS et quantitativement validés d'une façon satisfaisante ;

- à travers cette étude, il paraît clair que les traitements phytosanitaires non assistés par l'air peuvent ne pas avoir une bonne efficacité si la pulvérisation n'est pas canalisée dans la végétation. Le mouvement du nuage de gouttelettes étant régi par la gravité sous des conditions de vent faible, la pulvérisation peut dans ce cas se déposer au sol avant qu'elle n'atteigne la végétation ;

- à courte distance, la dispersion de pesticide dans les rangs de vigne est fortement dominée par le jet du pulvérisateur plutôt que par le vent lui-même. Les pertes vers l'atmosphère semblent indépendantes des conditions météorologiques lorsque les mesures sont effectuées dans la zone perturbée par le passage du pulvérisateur ;

- les traitements assistés par l'air nécessitent une orientation optimale des diffuseurs de jets d'air, dans la mesure où les jets d'air sont des facteurs qui favorisent aussi la dérive.

## 8. Impact des conditions de pulvérisation sur la dispersion

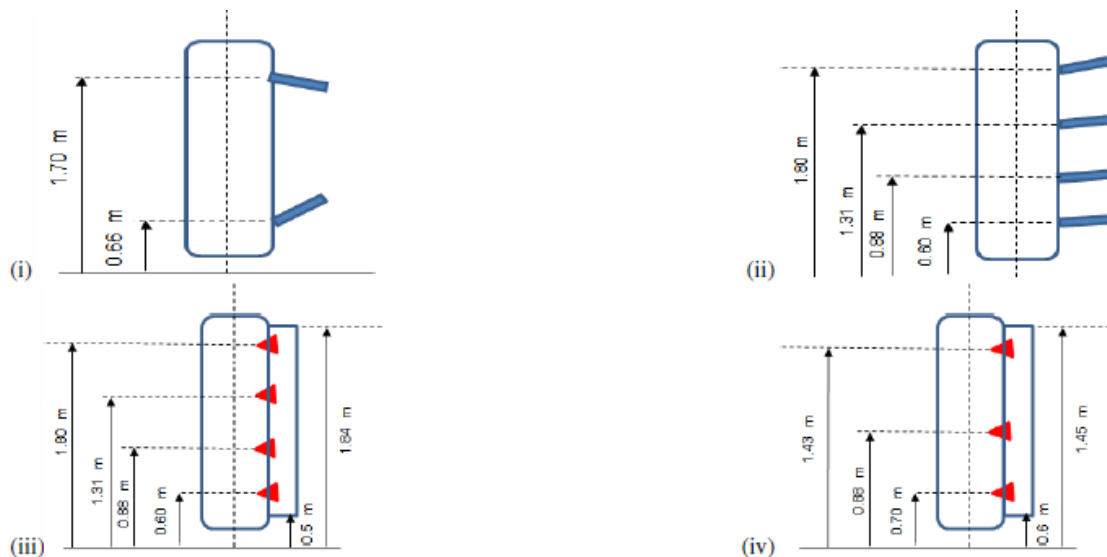
Une étude numérique a été entreprise sur l'influence de deux ensembles de facteurs, liés à la structure de la vigne et au type de pulvérisateur.

En ce qui concerne la vigne ont été considérés quatre cas typiques, représentatifs des régions bordelaise et languedocienne. Pour la région bordelaise ont été distingués le cas des Graves (Arbanats, voir partie 5.1) et celui de Saint-Emilion ; pour la région Languedoc ont été prises deux hypothèses de densité. Le tableau 3 donne les caractéristiques de ces quatre cas, définissant les conditions de simulation et différant avant tout par la densité du feuillage, ramenée à l'unité de surface de sol.

<b>Structure du vignoble</b>	<b>Graves</b>	<b>Saint-Emilion</b>	<b>Languedoc 1</b>	<b>Languedoc 2</b>
<b>LAD du rang (m<sup>-1</sup>)</b>	2,8	4	6	9
<b>Largeur des rangs (m)</b>	0,7	0,8	1,5	1,5
<b>Largeur de l'inter-rang (m)</b>	2	2	3	3
<b>Hauteur des rangs (m)</b>	1,5	2	2	2
<b>Hauteur des troncs (m)</b>	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>Densité du feuillage</b>	0,98 (très faible)	2,4 (faible)	4,5 (moyenne)	6,75 (haute)

*Tableau 3. Paramètres de structure des quatre cas de vignobles étudiés.*

En ce qui concerne la pulvérisation, deux matériels ont été considérés : un pulvérisateur de type pneumatique et un pulvérisateur de type jet porté (atomiseur), chacun présentant deux configurations différentes selon le nombre de jets pris en compte (deux ou trois canons pour le premier, trois ou quatre buses pour le second, conférant aux appareils différents degrés de performance). La figure 23 fournit une description détaillée des quatre cas.



**Figure 23.** Schéma des configurations adoptées pour les quatre pulvérisations : (i) pulvérisateur pneumatique à deux canons (PP2) ; pulvérisateur pneumatique à quatre canons (PP4) ; (iii) pulvérisateur à jet porté à quatre buses (PJ4) ; (iii) pulvérisateur à jet porté à trois buses (PJ3).

Dans chaque simulation, on quantifie les quantités respectives de pesticide qui se déposent au sol, qui sont interceptées par la végétation, et qui s'échappent par voie aérienne. Les pertes atmosphériques sont estimées à partir de la quantité de pesticide traversant le plan horizontal situé à  $z = 2.8$  m au-dessus des trois premiers rangs en aval de l'injection. Le tableau 4 présente les premiers résultats de l'étude.

Pulv.	Graves			Saint-Emilion			Languedoc 1		
	sol	vigne	air	sol	vigne	air	sol	vigne	air
PP2	29,5	40,5	29,6	14,3	53,8	10,6	-	-	-
PP4	-	-	-	24,5	57,4	0,26	18,1	60,1	0,034
PJ4	-	-	-	21,5	58,5	0,078	16,1	63,8	0,004
PJ3	36,5	41,6	1,6	-	-	-	-	-	-

**Tableau 4.** Résultats de l'étude numérique. Les chiffres indiqués expriment respectivement le pourcentage de flux déposé au sol, intercepté par la vigne, et entraîné par dérive atmosphérique. Pour chaque cas, la somme n'est pas égale à 100% car ces chiffres ne concernent que les trois premiers rangs en aval de la pulvérisation. Les cases sans chiffre indiquent que la simulation n'a pu être effectuée dans le temps imparti. Les codes des pulvérisateurs sont définis en figure 23.

Ces derniers mettent en évidence la grande variabilité des pertes aériennes, selon les conditions de simulation. Le premier facteur est la pulvérisation elle-même : au vu de ces résultats partiels, le PP2 semble entraîner une dérive au vent beaucoup plus forte que les autres, et le PJ4 est celui qui entraîne les plus faibles pertes. Il est intéressant de constater que la structure de la vigne a un effet qui peut être important : pour une pulvérisation par

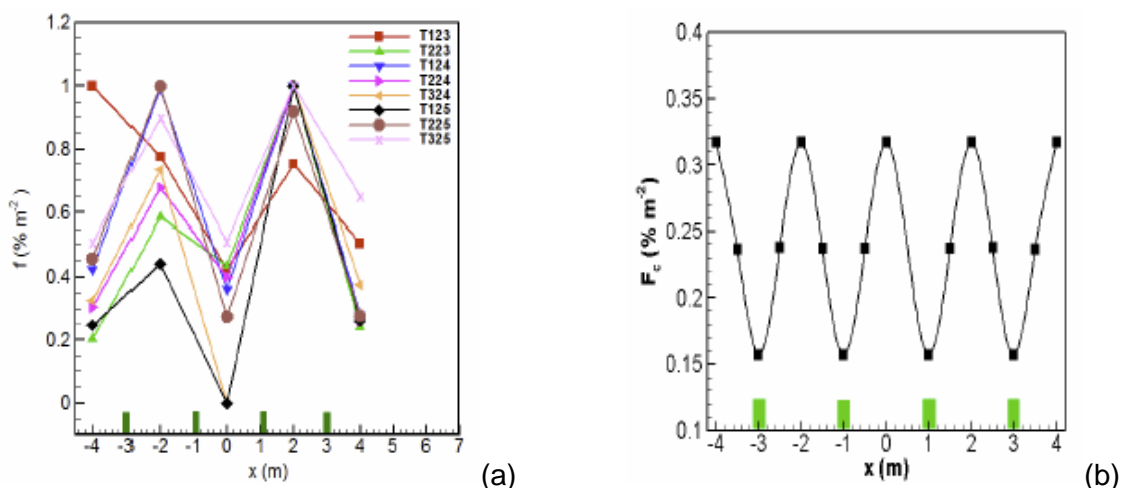
PP2, on observe des pertes trois fois plus importantes en Graves qu'en Saint-Emilion. Ces résultats demandent bien sûr à être complétés, et confirmés par des observations complémentaires : la différence essentielle entre Graves et Saint-Emilion réside ici dans la densité de feuillage qui est plus de deux fois plus forte dans le second cas, mais cette densité varie fortement pendant la saison.

En dépit de son caractère partiel, cette étude illustre l'utilisation qui peut être faite de l'outil de simulation développé pendant ce projet.

## 9. Impact d'aménagements sur la dispersion

Un des moyens potentiellement aptes à limiter la dérive au vent des pesticides consisterait à piéger le panache par une structure absorbante telle qu'un rideau d'arbres ou une haie, disposée en aval de la parcelle traitée. La modélisation développée ici fournit un outil permettant de tester ce genre de dispositif. Il n'est cependant pas concevable de mener les calculs à une résolution spatiale aussi fine que celle utilisée pour calculer les jets. Une résolution d'ordre décimétrique ne permet pas en effet de dépasser quelques rangs de vigne pour le domaine de calcul ; or il faut pouvoir traiter la parcelle dans son ensemble, ainsi que la zone aval, incluant les obstacles éventuellement présents.

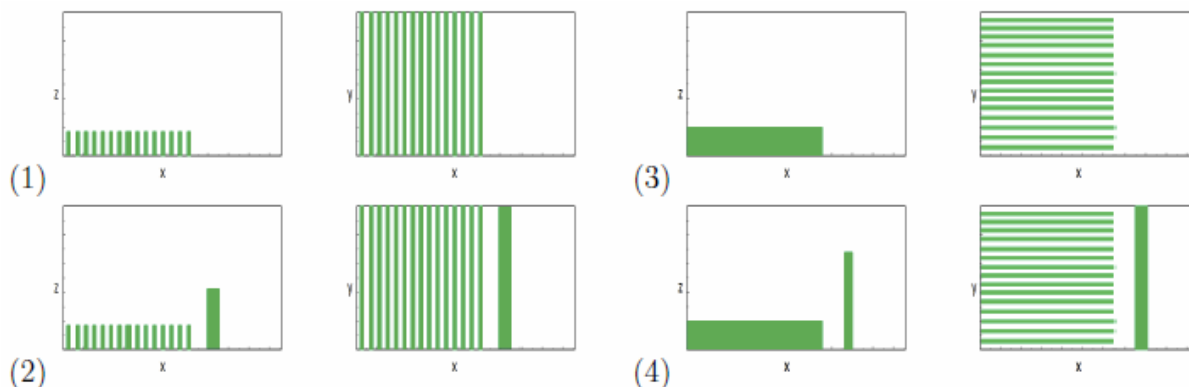
L'alternative choisie ici est de travailler à deux échelles : une première échelle fine qui permet, pour une configuration de pulvérisation donnée, d'estimer les pertes aériennes à un niveau de référence au-dessus de la vigne, comme on l'a fait dans ce qui précède (la source étant le jet) ; puis une échelle plus large, avec un plus grand domaine et une résolution moins fine, où ces pertes elles-mêmes sont prises comme condition de forçage (nouvelle source). L'idée pour cela est de partir de la constatation que lors d'un traitement le flux mesuré à un niveau de référence est une fonction symétrique dans la direction perpendiculaire à l'avancement (figure 24a), avec un minimum sur l'inter-rang de pulvérisation et un maximum sur les inter-rangs voisins ; de cette façon, en considérant l'ensemble des passages, la source dans la deuxième échelle peut être prise comme une fonction périodique (figure 24b).



**Figure 24.** Variation horizontale du flux de pesticide à un niveau de référence au-dessus de la vigne : (a) mesures effectuées à Montpellier sur vigne artificielle au niveau du premier plan de collecte ( $z = 2,8$  m) ; (b) fonction cumulée prise comme source pour la modélisation à l'échelle de la parcelle.

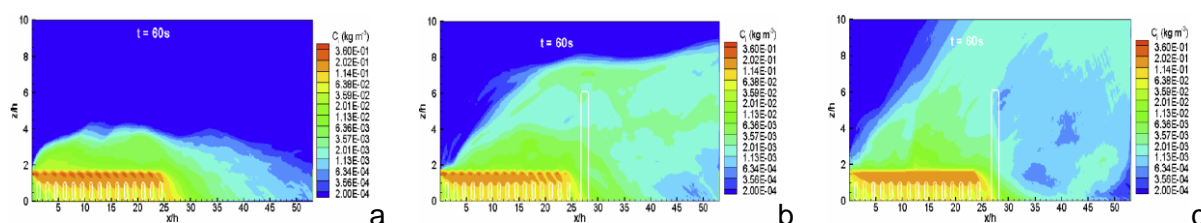
Une étude numérique a été conçue pour évaluer l'impact d'une haie brise-vent en aval d'une parcelle de vigne. Quatre configurations de base ont été choisies (figure 25), selon que le

vent souffle dans une direction parallèle ou perpendiculaire aux rangs de vigne, et selon la présence ou non d'une haie (le vent soufflant toujours perpendiculairement à la haie). Dans tous les cas la parcelle comporte 15 rangs, de longueur 40 m et de hauteur 0,7 m, avec une densité foliaire de 0,86. Lorsqu'une haie est présente, elle est toujours située à 4 m en aval de la parcelle ; elle fait 10 m de hauteur, 2 m de largeur, et deux valeurs de LAI sont considérées, 2 et 8.



**Figure 25.** Représentation schématique des quatre cas étudiés, en coupe verticale et en vue du dessus : (1) vent perpendiculaire aux rangs, sans haie ; (2) vent perpendiculaire aux rangs, avec haie ; (3) vent parallèle aux rangs, sans haie ; (4) vent parallèle aux rangs, avec haie.

La figure 26 illustre, dans le cas où le vent est perpendiculaire aux rangs, l'impact de la présence d'une haie et de sa densité. Comme prévu, compte tenu de la construction de la source, la concentration juste au-dessus de la parcelle de vigne présente un caractère périodique. En aval de la parcelle, les concentrations aériennes sont plus fortes en l'absence de haie ; l'effet de celle-ci est de bloquer une partie du nuage de pesticide, mais aussi de le dévier vers le haut et de l'entraîner plus loin, mais en faible quantité. Cet effet est d'autant plus marqué que la haie est dense.



**Figure 26.** Champs de concentration intégrée selon y et selon le temps, 60 s après la fin du traitement : (a) sans haie, (b) avec une haie de LAI = 2, (c) avec une haie de LAI = 8.

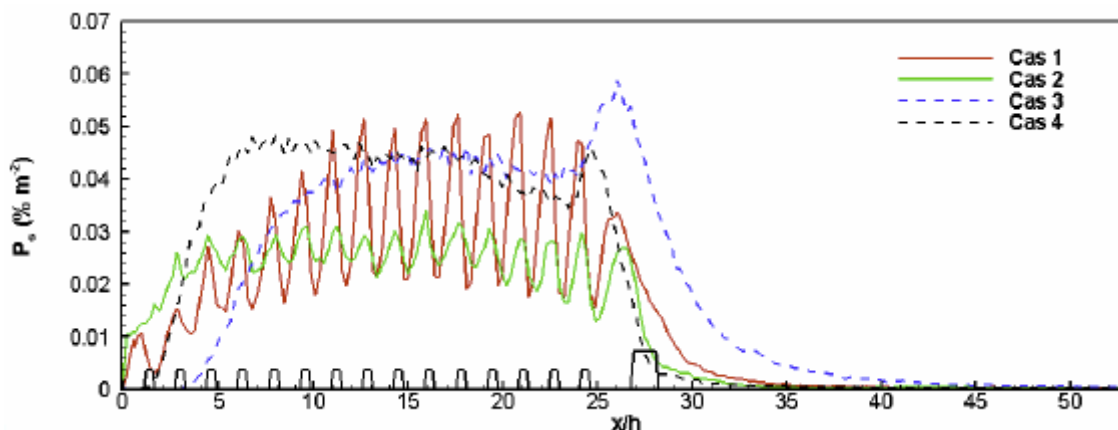
Les niveaux d'exposition ont été calculés à l'aval de la parcelle, dans les différents cas de figure, comme la concentration intégrée ( $g\ m^{-3}$ ) à hauteur de respiration de l'homme (1.5 m), suite à un traitement. Les résultats figurent dans le tableau 5.

On voit bien sur ce tableau l'effet des haies, les cas avec haie (2 et 4) générant des taux d'exposition moindres. En présence d'une haie, les résultats sont assez peu sensibles à l'orientation des rangs de vigne. En revanche, cette orientation a un impact certain en l'absence de haie : le cas d'un vent parallèle aux rangs, sans haie, s'avère être particulièrement défavorable, avec des niveaux nettement plus forts en sortie de parcelle que dans les autres cas.

$x/h$	30	40	50
<b>Cas 1</b>	7,1	1,2	0,6
<b>Cas 2</b>	2,6	0,7	0,6
<b>Cas 3</b>	35,0	5,8	2,3
<b>Cas 4</b>	3,2	0,8	0,3

**Tableau 5.** Niveaux de concentration intégrée ( $g\ m^{-3}$ ) à hauteur de respiration de l'homme (1.5 m), suite à un traitement (cas d'une haie de LAI 8). Les chiffres donnés correspondent à une concentration totale en gouttelettes pulvérisées, et non en principe actif.

Ce qui est vrai pour les niveaux d'exposition aériens l'est aussi pour la pollution des sols, comme le montre la figure 27 : là aussi les cas avec haie montrent une chute beaucoup plus rapide des dépôts, et le cas sans haie avec vent parallèle aux rangs entraîne des dépôts nettement plus forts à longue distance.



**Figure 27.** Variation horizontale des dépôts au sol, intégrés selon  $y$  et selon le temps, pour les quatre cas considérés (LAI = 8 pour les cas 2 et 4). L'emplacement des rangs et de la haie est représenté le long de l'axe  $x$ .

## 10. Dispersion régionale

### 10.1 Le modèle régional

La dispersion régionale a été modélisée à l'aide la plateforme BatchDriftX, fruit d'une collaboration entre l'IRSTEA et l'Université Montpellier 2. BatchDriftX a été construit à partir d'un code source (DriftX) qui a par la suite été couplé avec un Système d'Information Géographique (SIG) pour créer la plateforme DriftGIS.

DriftX est un modèle qui calcule la dispersion des quantités émises vers l'air pendant les traitements. Son principe est décrit dans Brun (2007) et Bozon *et al.* (2008). La première étape du calcul consiste à évaluer le champ de vent sur tous les points du domaine en prenant en compte la topographie et les points où la vitesse est connue (deux points suffisent). Ensuite, le modèle suppose que le tracteur parcourt la parcelle en un nombre prédéterminé de postes fixes (par défaut, dix par rang). Les positions successives du tracteur sont calculées à partir de l'orientation et de la longueur des rangs, de la largeur des inter-rangs et du nombre de passages (tous les rangs, un rang sur deux, etc.). Dans DriftX, la quantité émise vers l'air est arbitraire et fixée par défaut à  $0.001\ kg\ s^{-1}$ . Il s'agit d'un débit de matière pulvérisée (bouillie) et non pas de matière active. Cette valeur correspond à 30% d'un débit de  $2\ l\ min^{-1}$ , soit un volume-hectare de  $75\ l\ ha^{-1}$  pour une vitesse de  $4\ km\ h^{-1}$ , une largeur d'inter-rangs de 2 m et un traitement d'un rang sur deux par le pulvérisateur, le tout

correspondant à des conditions couramment observées sur le bassin versant pris comme support dans ce qui suit. Dans le cadre de ce projet, le code DriftX a été modifié pour pouvoir intégrer les émissions vers l'air obtenues par le code LES.

Pour chacun des postes occupés par le tracteur, la quantité de produit émis dans l'air est obtenue en prenant en compte le temps passé à ce poste ; sa dispersion est représentée par un panache gaussien prenant en compte la vitesse du vent sur la trajectoire d'une particule. Pour prendre en compte l'effet du champ de vent sur cette trajectoire, on remplace dans l'équation du panache gaussien les distances parcourues par le temps mis par le champ de vent pour parcourir cette distance. L'équation du panache gaussien est paramétrée par deux coefficients de diffusion (dans l'axe du panache et dans la direction perpendiculaire). Ces coefficients ont été pris ici pour une atmosphère neutre. Les quantités de produit sur tous les points du domaine sont incrémentées pour tous les postes successifs occupés par le tracteur. On obtient ainsi des quantités de produit sur chaque point du domaine de calcul. Le calcul se faisant en deux dimensions, ces quantités sont exprimées en  $\text{kg m}^{-2}$ .

Le modèle fait l'hypothèse d'un régime permanent et normalise les quantités de manière à ce que la totalité des quantités calculées corresponde à la quantité émise. Le calcul est donc faussé si le domaine de calcul n'est pas assez large : le nuage est alors coupé et la totalité des quantités émises est répartie sur le nuage tronqué. Les valeurs de concentration fournies par le modèle représentent un cumul pendant la période de traitement. Le modèle gaussien ayant fait l'objet de nombreuses validations, l'empreinte des nuages cumulés obtenue est réaliste dès lors qu'on est en condition de neutralité atmosphérique et stabilité et que le régime de vent reste stable pendant la durée du traitement.

Drift-GIS est une interface réalisée sur le SIG Quantum Gis. Elle permet à l'utilisateur de déterminer le domaine de calcul en faisant glisser un pointeur sur une carte. Elle permet également de choisir les points pour lesquels le vent est connu et de préciser sa vitesse et son orientation. Elle offre enfin des boîtes de dialogue qui permettent de saisir les caractéristiques du traitement et de la parcelle (taille des rangs, orientation, vitesse du tracteur, etc.). Une fois toutes les données saisies, DriftGIS extrait de la carte les altitudes des points du domaine de calcul, met en forme les données et lance le modèle DriftX. Quand le calcul est terminé, la carte des concentrations est chargée dans le système sous forme d'une image de type « raster ». Parmi les utilitaires disponibles sur Quantum GIS, l'outil « Profile » permet de tracer l'évolution de la concentration sur un segment donné. DrifGIS est décrit dans Bozon *et al.* (2010).

BatchDriftX, enfin, reprend les principales caractéristiques de Drift-GIS mais offre la possibilité de travailler à partir d'un fichier vectoriel synthétisant les pulvérisations à simuler et leurs caractéristiques. Dans le cadre de ce projet, BatchDriftX a fait l'objet de nombreuses améliorations pour optimiser la paramétrisation du code de calcul et améliorer les interfaces (interface utilisateur et interface avec les résultats du code LES). Ce travail a été confié à la société 3Liz.

## **10.2 Simulations sur un bassin versant**

A titre d'exemple, des simulations ont été réalisées dans la zone du bassin versant de Neffies (Hérault), en considérant séparément les cas du plateau et de la vallée. Sur la base d'une étude climatique régionale ont été retenues les trois situations les plus probables en termes de direction et de vitesse du vent. Pour la plateau (parcelle d'émission 14A sur la figure 28) les trois cas correspondent à  $127,5^\circ$  et  $2,6 \text{ km h}^{-1}$ ,  $67,5^\circ$  et  $4,7 \text{ km h}^{-1}$ , et  $210^\circ$  et  $9,5 \text{ km h}^{-1}$ . Pour la vallée (parcelle 13D sur la figure 29) ils correspondent à  $142,5^\circ$  et  $5,1 \text{ km h}^{-1}$ ,  $112,5^\circ$  et  $4,6 \text{ km h}^{-1}$ , et  $195^\circ$  et  $3,9 \text{ km h}^{-1}$ .

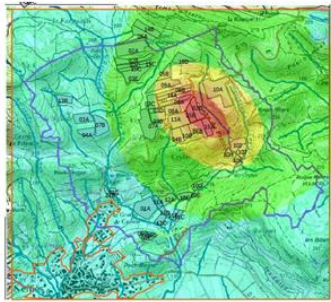
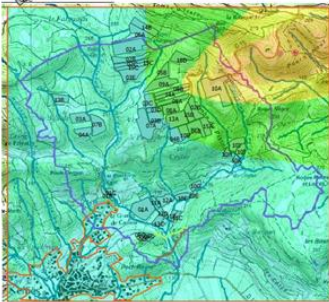
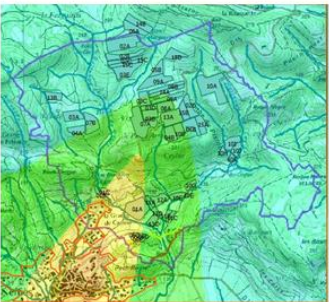
Dans chaque cas, deux dispersions ont été simulées, l'une avec les conditions qui donnent le plus d'émission vers l'air (émission de  $1,64 \cdot 10^{-2} \text{ kg s}^{-1}$ , pour une densité de vigne très faible et une bonne performance de pulvérisation) et celles qui donnent les émissions les



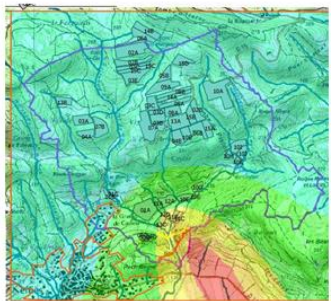
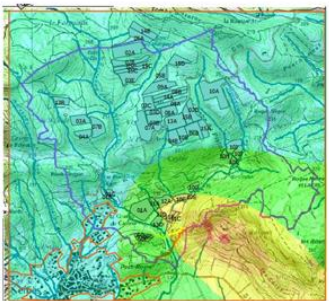
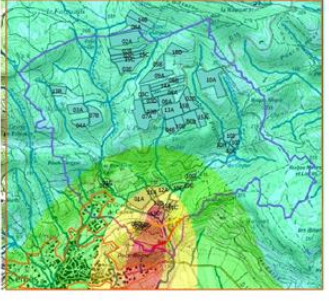
## MODAPEX

plus faibles (émission de  $2,22 \cdot 10^{-6} \text{ kg s}^{-1}$ , pour une densité de végétation moyenne et une très bonne performance de pulvérisation).

Pour les deux parcelles les conditions de calcul communes sont le nombre de rangs (10), leur longueur (100 m) et leur orientation ( $45^\circ$ ), la vitesse du tracteur ( $1,5 \text{ m s}^{-1}$ ) et la vitesse d'éjection des gouttes ( $10 \text{ m s}^{-1}$ ).

Configurations les plus probables pour les parcelles du plateau				
Direction du vent (deg)	127.5	67.5	210	
Vitesse du vent (km/h)	2.6	4.7	9.5	
Probabilité	0.15	0.10	0.23	
Simulations <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></span> 0</div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: cyan; margin-right: 5px;"></span> 0,015</div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: green; margin-right: 5px;"></span> 0,030</div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></span> 0,045</div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: orange; margin-right: 5px;"></span> 0,060</div> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: red; margin-right: 5px;"></span> &gt; 0,060</div> </div> [kg/m <sup>2</sup> ]				
Masse dissipée au-dessus de la zone urbanisée (kg)	Perte : $1.64E-2 \text{ kg/s}$	3.86	3.23	17.8
	Perte : $2.22E-6 \text{ kg/s}$	$5.3E-4$	$4.4E-4$	$2.41E-3$

**Figure 28.** Résultats des simulations régionales pour une émission sur le plateau.

Configurations les plus probables pour les parcelles de la vallée				
Direction du vent (deg)	142.5	112.5	195	
Vitesse du vent (km/h)	5.1	4.6	3.9	
Probabilité	0.19	0.13	0.15	
Simulations <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: blue; margin-right: 5px;"></span> 0</div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: cyan; margin-right: 5px;"></span> 0,015</div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: green; margin-right: 5px;"></span> 0,030</div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></span> 0,045</div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 2px;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: orange; margin-right: 5px;"></span> 0,060</div> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 10px; height: 10px; background-color: red; margin-right: 5px;"></span> &gt; 0,060</div> </div> [kg/m <sup>2</sup> ]				
Masse dissipée au-dessus de la zone urbanisée (kg)	Perte : $1.64E-2 \text{ kg/s}$	7.22	5.69	13.58
	Perte : $2.22E-6 \text{ kg/s}$	$9.8E-4$	$7.7E-4$	$1.86E-3$

**Figure 29.** Résultats des simulations régionales pour une émission dans la vallée.

Les figures 28 et 29 donnent les masses de produit dissipées au-dessus de la zone urbanisée (délimitée par un trait orange sur la carte) pour les différentes conditions. Les cartes fournies sont celles obtenues dans le cas des émissions fortes ; pour les émissions faibles les panaches sont inchangés : ce sont seulement les valeurs qui sont différentes.

Les résultats de ces simulations montrent l'intérêt du couplage entre modèle de dispersion et SIG, notamment pour calculer les quantités émises dans une zone sensible (zone urbanisée). On voit notamment que la position des parcelles (plateau ou vallée) par rapport à la zone urbanisée ne peut être interprétée que si elle est couplée à la direction du vent. La prise en compte des taux d'émissions vers l'air, calculés à l'aide de la méthode LES, montre ici tout son intérêt car leur variabilité est très importante (facteur  $10^4$ ), ce qui se traduit par une variation des masses dissipées sur la zone urbanisée par un facteur du même ordre. Ce taux de variation est beaucoup plus important que celui lié à l'orientation et la vitesse du vent, qui entraîne des variations de masse de l'ordre de 1 à 3.

Ce travail permet aussi et surtout de quantifier les émissions de produit vers l'air. Les valeurs peuvent paraître importantes (jusqu'à 17,8 kg au-dessus de la zone urbanisée) mais il s'agit de quantité totale pulvérisée. La quantité réelle de matière active est très variable en fonction du produit appliqué, puisque les concentrations des bouillies varient de quelques dizaines de grammes à plusieurs kilogrammes pour 100 litres d'eau (facteur 100).

Ces valeurs permettent d'envisager des validations à partir de mesures de terrain. Celles-ci donnant accès à des concentrations, il serait nécessaire pour cela de modifier le code DriftX de façon à pouvoir afficher des cartes de concentration à une hauteur donnée.

## 11. Conclusions et perspectives

Le projet de recherche MODAPEX avait une vocation « amont » claire, dans la mesure où il visait à élaborer une méthodologie de simulation de la dispersion aérienne d'un nuage de pesticides après pulvérisation, apte à quantifier les niveaux d'exposition en aval de la parcelle traitée. Cette méthodologie a été développée sous la forme d'un code numérique. Ce dernier a été validé vis-à-vis de mesures expérimentales acquises pour l'occasion. La possibilité de réaliser des applications pratiques a ensuite été démontrée.

Aussi les premiers résultats à mettre en avant sont-ils d'ordre méthodologique :

- introduction de particules lagrangiennes dans un code atmosphérique en mode LES, permettant de simuler le transport d'un nuage de pesticides émis par pulvérisation ;
- simulation dans ce code du jet lui-même, en sortie de buse ;
- réalisation de deux changements d'échelle, l'un permettant de passer d'une simulation sur un domaine de cinq rangs à une estimation des pertes sur l'ensemble de la parcelle ; l'autre reposant sur un couplage original du modèle LES avec un code de transport à plus longue distance, qui permet d'estimer la propagation du nuage de pesticides à l'échelle de plusieurs kilomètres.

Un deuxième ensemble de résultats tient à l'évaluation du code numérique à l'échelle d'une parcelle de vigne, à l'aide de données expérimentales acquises pendant le projet :

- validation du modèle dynamique dans le cas d'un vignoble de la région des Graves (Gironde), avec une restitution correcte des champs de vitesse du vent et des différentes grandeurs caractérisant la turbulence, à l'échelle des rangs comme à celle de la parcelle ;
- validation de la dynamique du jet en sortie de buse, sur les composantes axiale et transversale ;

- évaluation plus délicate, compte tenu de la difficulté des mesures expérimentales et de la représentation de la pulvérisation dans le code, de la dispersion des pesticides sur une petite parcelle de vigne artificielle à Montpellier ; si la structure spatiale des pertes aériennes et des dépôts au sol est correctement reproduite, les valeurs numériques présentent des écarts avec les mesures.

Une fois la méthodologie développée et le modèle local validé, il était prévu d'illustrer les possibilités offertes par cette approche de modélisation en entreprenant quelques études à vocation finalisée. Ainsi ont été obtenus quelques résultats intéressants sur les transferts atmosphériques en vignoble et la dispersion de pesticides. On pourra notamment mettre en avant les points suivants :

- à courte distance, la dispersion de pesticides dans les rangs de vigne est fortement dominée par le vent induit par le pulvérisateur plutôt que par les conditions de vent atmosphérique ;
- les pertes aériennes peuvent être fortement variables selon les conditions de pulvérisation (type et réglage du pulvérisateur). Dans trois des quatre cas testés elles sont faibles, mais dans un des cas elles atteignent 30% (résultat à vérifier) ;
- pour un même pulvérisateur, ces pertes dépendent également de la structure du vignoble, une vigne à faible densité foliaire entraînant des pertes plus importantes, tout au moins dans le cas qui a été considéré ici ;
- les traitements assistés par l'air nécessitent ainsi une orientation optimale des diffuseurs de jets d'air, dans la mesure où des derniers favorisent aussi la dérive. La méthode de forçage des conditions aux limites retenue offre la possibilité d'optimiser les pulvérisateurs en testant l'impact de leurs orientations, d'autant que les jets d'air sont finement résolus avec ARPS ;
- un vent dans l'axe des rangs est susceptible d'entraîner le nuage de pesticides à des distances sensiblement plus fortes qu'un vent perpendiculaire ;
- l'impact sur la dispersion aérienne d'une haie brise-vent située en aval de la parcelle traitée est réel, comme en témoignent les valeurs de décroissance des concentrations aériennes qui ont été calculées en aval d'une parcelle traitée, dans plusieurs configurations. Une haie tend à capter une partie du nuage de pulvérisation, mais aussi à en diriger une partie vers le haut ; cette dernière partie peut alors diffuser à plus longue distance, mais à de faibles concentrations ;

Par ailleurs, le couplage des deux modèles entrepris dans ce travail a permis de réaliser des cartographies de concentration (aérienne et au sol) à l'échelle régionale (le cas d'un bassin versant a été abordé ici, en séparant situations de vallée et de plateau), à partir de la connaissance des conditions de pulvérisation (nature de la parcelle et du pulvérisateur). Ce couplage montre l'intérêt de l'estimation des pertes aériennes par le modèle local, dans la mesure où c'est bien le taux d'émission de la parcelle qui joue le rôle le plus important dans la détermination des niveaux d'exposition. Les résultats obtenus ont également montré l'impact de la position de la parcelle dans le paysage et de la direction des vents dominants ; l'utilisation d'un SIG s'est avérée particulièrement intéressante pour visualiser cette dispersion régionale.

La possibilité de déterminer par simulation des quantités de pesticides émises vers l'air dans certaines zones est d'un intérêt majeur pour les analyses environnementales et les études liées à la santé publique. La mise au point de codes numériques, leur validation sur des données expérimentales et leur utilisation dans quelques cas particuliers constituent une démonstration de la « preuve du concept » sur lequel reposait MODAPEX. Les outils de recherche développés peuvent ainsi se prêter à de nombreuses études à vocation finalisée. Au-delà des quelques résultats obtenus, notamment sur l'impact du réglage du pulvérisateur et de la présence d'une haie en aval de la parcelle traitée, la réalisation d'applications pratiques plus élaborées était toutefois en dehors du champ de ce projet.

En ce qui concerne la physique des phénomènes modélisés, nous nous sommes restreints dans ce travail aux mécanismes essentiels, de manière à pouvoir entreprendre un premier jeu de simulations dans le temps imparti. Dans l'avenir, il faudrait pouvoir prendre en compte des processus qui ne l'ont pas été : évaporation des gouttelettes, volatilisation des produits pendant leur dispersion ou après leur dépôt, transformations chimiques. La thermique de l'atmosphère n'a pas non plus été prise en compte dans ce travail, mais elle est maintenant intégrée dans le code, et opérationnelle. Enfin, la représentation par seulement deux jets d'un pulvérisateur tel que celui utilisé pendant l'expérimentation est sans doute limitante, et peut-être responsable de certains des écarts observés entre mesures et résultats du modèle.

Le modèle régional BatchDriftX est lui aussi susceptible d'améliorations. Il faudrait d'abord pouvoir exprimer ses sorties en termes de concentration ou de niveau d'exposition, plutôt que de quantité dispersée par unité de surface ; cette modification entraînerait cependant une intervention dans le code, qui est à l'heure actuelle difficilement accessible. Ensuite, il serait intéressant de pouvoir intégrer des hétérogénéités du paysage, de type haies d'arbres par exemple. Mais il faudra bien évaluer la pertinence de tels changements car BatchDriftX repose sur des hypothèses qui peuvent être considérées comme fortes : calcul des champs de vitesse par une simple équation de continuité ; écoulement permanent ; atmosphère neutre ; diffusion gaussienne du panache de pesticides. Il pourrait alors s'avérer plus pertinent à terme de remplacer le modèle par un véritable code atmosphérique (par exemple ARPS lui-même ou Méso-NH, déjà testé à fine résolution par Courault et al., 2007 et Aumond *et al.*, 2013).

Si la dispersion à l'échelle du paysage a été traitée ici à l'aide d'un code (BatchDriftX) relativement accessible et doté d'une interface utilisateur simple, le modèle développé à l'échelle de la parcelle reste un code de recherche qui n'est utilisable que par des spécialistes. Reposant sur une physique élaborée et sur un traitement particulier de la turbulence (technique LES), il permet de faire des calculs fins de dispersion dans des cas précis, bien documentés. S'il est ainsi capable de simuler le transport atmosphérique de pesticides depuis la buse jusqu'à la sortie de parcelle, il ne s'agit nullement d'un outil « clé en main ».

L'avenir de cette thématique est dans ce contexte incertain. Ce projet a permis de poursuivre, en la renforçant substantiellement, une collaboration initiée vers le milieu des années 2000 entre l'UR Ephyse (INRA Bordeaux) et l'UMR ITAP (SupAgro Montpellier et IRSTEA). Mais la taille modeste des équipes partenaires et l'engagement de ces dernières dans d'autres programmes de recherche ne permettent toutefois pas actuellement d'envisager une suite concrète à ce travail. La poursuite éventuelle de ces activités doit faire l'objet d'une réflexion collective.

## Références bibliographiques

- Aubertot J.-N., Barbier J.-M., Carpentier A., Gril J.-J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Voltz M. (éditeurs), Savini I. (rédactrice), 2005. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux, Expertise scientifique collective Inra – Cemagref, 64 p.
- Aumond P., Masson V., Lac C., Gauvreau B., Dupont S., Berengier M., 2013. Including the drag effects of canopies: real case large-eddy simulation studies. *Boundary-Layer Meteorol.*, 146, 65-80.
- Baetens K., Nuyttens D., Verboven P., De Schampheleire M., Nicolaï B., Ramon H., 2007. Predicting drift from field spraying by means of a 3D computational fluid dynamics model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 56, 161–173.
- Bedos C., Cellier P., Calvet R., Barriuso E., 2002a. Occurrence of pesticides in the atmosphere in France. *Agronomie*, 22, 35–49.
- Bedos C., Cellier P., Calvet R., Barriuso E., Gabrielle B., 2002b. Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plant: overview. *Agronomie*, 22, 21–33.
- Bozon N., Mohammadi B., Sinfort C., 2008. Similitude and non symmetric geometry for dispersion modelling, *e-STA, Sciences et Techniques de l'Automatique*, 5(2), numéro spécial *STIC&Environnement'07*.
- Bozon N., Sinfort C., Mohammadi B., 2010. A GIS-based atmospheric dispersion model. *Journal Européen des Systèmes Automatisés. Numéro spécial "Traitement de l'information et Environnement"*, 44, 445-461.
- Brun J.M., 2007. Modèles à complexité réduite de transport pour applications environnementales. Doctorat en Mathématiques Appliquées, Université de Montpellier, 192 p.
- Coignard F., Lorente C., 2006. Exposition aérienne aux pesticides des populations à proximité de zones agricoles. Bilan et perspectives du programme régional intercirc. Institut de Veille Sanitaire, 64 p.
- Courault D., Drobinski P., Brunet Y., Lacarrère P., Talbot C., 2007. Impact of surface heterogeneity on a buoyancy-driven convective boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 124, 383-403.
- Craig I.P., 2004. The GDS model – a rapid computational technique for the calculation of aircraft spray drift buffer distances. *Comput. Electron. Agric.*, 43, 235–250.
- Cross J.V., Walklate P.J., Murray R.A., Ridcharson G.M., 2001. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: I. Effects of liquid flow rate. *Crop Protection*, 20, 13–30.
- Davakis E., Degliannis P., 2000. Dispersion modelling intercomparison exercise. *Int. J. Environ. Poll.*, 14, 176–185.
- Da Silva A., Sinfort C., Vanhiesbecq S., Polvêche V., Huberson S., Silva F., Bonicelli B., 2001. Simulation of sprayed pesticide deposit within a vineyard. *Parasitica*, 57, 195–204.
- Da Silva A., Sinfort C., Tinet C., Pierrat D., Huberson S., 2006. A Lagrangian model for spray behaviour within vine canopies. *J. Aerosol Sci.*, 37, 658–674.
- De Leeuw F.A.A.M., Van Pul A.J., Van Den Berg F., Gilbert A.J., 2000. The use of atmospheric dispersion models in risk assessment decision support systems for pesticides. *Envir. Monit. Asses.*, 62, 133–145.
- Derwent R.G., Hov O., Asman W.A.H., Van Jaarsveld J.A., De Leuw, F.A.A.M., 1989. An intercomparison of long-term atmospheric models: the budgets of acidifying species for The Netherlands. *Atmos. Environ.*, 23, 1893–1909.
- Dupont S., Brunet Y., Jarosz N., 2006. Eulerian modelling of pollen dispersal over heterogeneous vegetation canopies. *Agric. For. Meteorol.*, 141, 82–104.
- Dupont S., Brunet Y., 2008a. Influence of foliar density profile on canopy flow: a large-eddy simulation study. *Agric. For. Meteorol.*, 148, 976–990.
- Dupont S., Brunet Y., 2008b. Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorol.*, 126, 51–71.
- Dupont S., Brunet Y., 2008c. Impact of forest edge shape on tree stability: a large-eddy simulation study. *Forestry*, 81, 299–315.

- Dupont S., Brunet Y., 2009. Coherent structures in canopy edge flow: a large-eddy simulation study. *J. Fluid Mech.*, 630, 93–128.
- Dupont S., Gosselin F., Py C., de Langre E., Hémon P., Brunet Y., 2009. Modelling waving crops using Large-Eddy Simulation: comparison with experiments and a linear stability analysis. *J. Fluid Mech.*, 652, 5-44.
- Fox R.D., Brazee R.D., Reichard D.L., 1985. A model study of the effect of wind on air sprayer jets. *Trans. ASAE*, 28, 83–88.
- Gil Y., Sinfort C., 2005. Emission of pesticides to the air during sprayer application: a bibliographic review. *Atmos. Environ.*, 39, 5183–5193.
- Gil Y., Sinfort C., Brunet Y., Polveche V., Bonicelli B., 2007. Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying. *Atmos. Environ.*, 41, 2945–2957.
- Gil Y., Sinfort C., Guillaume S., Brunet Y., Palagos B. 2008. Influence of micrometeorological factors on pesticide loss to the air during vine spraying: data analysis with statistical and fuzzy inference models. *BioSystems Engineering*, 100, 184–177.
- Hobson P. A., Miller P. C. H., Walklate P. J., Tuck C. R., Western N. M., 1993. Spray drift from hydraulic spray nozzles : the use of a computer simulation model to examine factors influencing drift. *J. Agric. Eng. Res.*, 54, 293–305.
- Holterman H.J., Van De Zande J.C., Porskamp H.A.J., Huijmans J.F.M., 1997. Modelling spray drift from boom sprayers. *Comput. Electron. Agric.*, 19, 1–22.
- Kanda M., Hino M., 1994. Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using a large eddy simulation. *Boundary-Layer Meteorol.*, 68, 237–257.
- Mensink C., Maes G., 1997. Comparative sensitivity study for operational short-range atmospheric dispersion models. *Int. J. Environ. Poll.*, 8, 356–366.
- Miller P.C.H., Hadfield D.J., 1989. A simulation model of the spray drift from hydraulic nozzles. *J. Agric. Eng. Res.*, 42, 135–147.
- Patton E.G., Shaw R.H., Judd M.J., Raupach, M.R., 1998. Large-eddy simulation of windbreak flow. *Boundary-Layer Meteorol.*, 87, 275–306.
- Raupach M.R., Finnigan J.J., Brunet Y., 1996. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing layer analogy. *Boundary-Layer Meteorol.*, 78, 351-382.
- Raupach M.R., Briggs P., Ahmad N., Edge V.E., 2001. Endosulfan transport II: Modeling airborne dispersal and deposition by spray and vapor. *J. Environ. Quality*, 30, 729–740.
- Reichard D.L., Zhu H., Fox R.D., Brazee R.D., 1992. Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift. *Trans. ASAE*, 35, 755–758.
- Ricoux C. 2009. Evaluation de l'exposition aérienne aux pesticides de la population générale. Etude en air extérieur dans quatre sites de l'Hérault en 2006. Institut de Veille Sanitaire F-94415 St Maurice, 55 p.
- Shaw R.H., Brunet Y., Finnigan J.J., Raupach M.R., 1995. A wind tunnel study of air flow in waving wheat : two-point velocity statistics. *Boundary-Layer Meteorol.*, 76, 349-376.
- Sinfort, C., Cotteux, E., Bonicelli, B., Ruelle, B. 2009. A methodology to estimate environmental pesticide losses during vine spraying. CD-ROM, STIC & Environnement, Calais, 16-18 Juin.
- Teske M.E., Valcore D.L., Hewitt A., 2001. An analytical ground sprayer model. *ASAE Annual International Meeting*, Paper Number 01–1051.
- Teske M.E., Bird S.L., Esterly D.M., Curbishley T.B., Rey S.L., Perry S.G., 2002. AgDRIFT: a model for estimating near-field spray drift from aerial applications. *Environ. Toxicol. Chem.*, 21, 659–671.
- Thistle H., 2000. The role of stability in fine pesticide droplet dispersion in the atmosphere: a review of physical concepts. *Trans. ASAE*, 46, 1409–1413.
- Thompson N., Ley A.J., 1983. Estimating spray drift using a random-walk model of evaporating drops. *J. Agric. Eng. Res.*, 28, 419–435.
- Vinkovic I, Aguirre C., Simoëns S., Gorokhoviski M., 2006a. Large-eddy simulation of droplet dispersion for inhomogeneous turbulent wall flow. *Int. J. Multiphase Flow*, 32, 344364.
- Vinkovic I, Aguirre C., Ayrault M., Simoëns S., 2006b. Large-eddy simulation of the dispersion of solid particles in a turbulent boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 121, 283–311.

- Walklate P., 1992. A simulation study of pesticide drift from an air-assisted orchard sprayer chemical application group. *J. Agric. Eng. Res.*, 51, 263–283.
- Watanabe T., 2004. Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies. *Boundary-Layer Meteorol.*, 112, 307–341.
- Xu Z.G., Walklate P.J., Rigby S.G., Richardson G.M., 1998. Stochastic modelling of turbulent spray dispersion in the near-field of orchard sprayers. *J. Wind Engin. Indus. Aerod.*, 74–76, 295–304.

## ANNEXE 1 : EQUATIONS DE BASE DU MODÈLE

The airflow model is based on the large-eddy simulation method. The equations of motion are spatially filtered with a filter of the same size as the mesh size in the grid domain. Thus only the large eddies are solved while the small eddies are modelled using a turbulence model based on the resolution of a subgrid scale turbulent kinetic energy equation. The momentum equation writes:

$$\bar{\rho} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \tilde{p}' - \alpha_{div} \frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \bar{\rho} C_d A_f \sqrt{\tilde{u}_j \tilde{u}_j} \tilde{u}_i, \quad (1)$$

where the overtilde indicates the filtered variables. In equation (1),  $\bar{\rho}$  is the base state density of the air ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $p$  is the air pressure,  $t$  is time and  $x_i$  ( $x_1=x$ ,  $x_2=y$ ,  $x_3=z$ ) are the streamwise, lateral and vertical directions, respectively;  $u_i$  ( $u_1=U$ ,  $u_2=V$ ,  $u_3=W$ ) are the instantaneous velocity components along  $x_i$ ,  $\alpha_{div}$  is a damping coefficient used to attenuate the acoustic waves. The variables  $C_d$  and  $A_f$  are the drag force coefficient and the frontal area density of the vegetation ( $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ), respectively. These two parameters account for the effect of vegetation on the wind flow according to the drag force approach.

The subgrid stress tensor  $\tau_{ij}$  is modelled through a subgrid scale eddy viscosity as follows,

$$\tau_{ij} = -\bar{\rho} \nu_t \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

where  $\nu_t$  is the eddy viscosity modelled as a function of the length and velocity scales characterizing the subgrid scale eddies:  $\nu_t = 0.1 \sqrt{e} l$ .

The length scale  $l$  is the grid spacing  $l = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ , where  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  and  $\Delta z$  are the grid size components in the streamwise, lateral and vertical directions, respectively. The subgrid scale velocity is obtained by solving the conservation equation of the turbulent kinetic energy  $e$  contained in the small unsolved eddies:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial e}{\partial x_j} = -\tau_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{g}{\theta} \tau_{3\theta} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( 2\nu_t \frac{\partial e}{\partial x_j} \right) - C_\varepsilon \frac{e^{3/2}}{l} - 2C_d A_f \sqrt{\tilde{u}_j \tilde{u}_j} e. \quad (3)$$

The terms on the right hand side of equation (3) represent, respectively, the shear production, the buoyancy production, the turbulent transport, the dissipation and the cascade term for subgrid scale turbulent kinetic energy (see Dupont and Brunet, 2008).

In the Lagrangian dispersal model, a pesticide droplet emitted from the sprayer into the atmosphere experiences the drag force that the ambient air exerts on its surface and the gravity force due to its apparent weight. Assuming that there is no interaction between droplets and neglecting subgrid scale dispersal, the motion of each droplet is described by the Newton's second law (see for example Teske *et al.*, 2002):

$$\frac{d \bar{x}_p(t)}{dt} = \bar{v}_p(t) \quad (4a)$$



$$\frac{d\vec{v}_p(t)}{dt} = \frac{\vec{v}(\vec{x}_p(t), t) - \vec{v}_p(t)}{\tau_p} q(Re_p) + \vec{g}, \quad (4b)$$

where  $\vec{v}_p$  is the velocity of a droplet,  $\vec{v}(\vec{x}_p(t), t)$  is the air velocity at the droplet position  $\vec{x}_p(t)$  determined following equation (1),  $\vec{g}$  is the acceleration of gravity. The droplet inertia is characterized by the relaxation time  $\tau_p$  given by  $\tau_p = \rho_p d_p^2 / 18\rho\nu$ , where  $d_p$  and  $\rho_p$  are the diameter and density of droplets, respectively, and  $\nu$  is the molecular air kinematic viscosity.

The particle Reynolds number is given as  $Re_p = |\vec{v}_p - \vec{v}| d_p / \nu$  and  $q(Re_p)$  is a function of particle Reynolds number ( $Re_p$ ) that takes into account the non-linear effect of the drag force as follows (Clift *et al.*, 1978):

$$\begin{aligned} q(Re_p) &= 1 \text{ if } Re_p < 1, \\ q(Re_p) &= 1 + 0.15 Re_p^{0.687} \text{ if } Re_p \geq 1. \end{aligned} \quad (5)$$

This Lagrangian dispersal model is based on that developed by Vinkovic *et al.* (2006) for solid particles. In this first application of the model to pesticide droplets, volatilization of droplets after emission was not considered.

## **ANNEXE 2 : TEXTES DES PUBLICATIONS**

Chahine A., Dupont S., Sinfort C., Brunet Y., 2012. Modelling pesticide dispersal in the atmosphere: a review. *Atmos. Envir. (en voie de finalisation)*.

Chahine A., Dupont S., Sinfort C., Brunet Y., 2013. Wind flow dynamics over a vineyard. *Boundary-Layer Meteorol. (en voie de finalisation)*.

Chahine A., Dupont S., Sinfort C., Brunet Y., 2013. Modelling pesticide dispersal over a vineyard. *Agric. For. Meteorol. (en voie de finalisation)*.

(voir pages suivantes – documents en chantier, à ne pas diffuser)