



HAL
open science

Une méthodologie pour évaluer les pertes de pesticides vers l'environnement pendant les pulvérisations viticoles

C. Sinfort, Eric Cotteux, B. Bonicelli, B. Ruelle

► **To cite this version:**

C. Sinfort, Eric Cotteux, B. Bonicelli, B. Ruelle. Une méthodologie pour évaluer les pertes de pesticides vers l'environnement pendant les pulvérisations viticoles. *STIC & Environnement*, Jun 2009, Calais, France. 14 p. hal-00468867

HAL Id: hal-00468867

<https://hal.science/hal-00468867>

Submitted on 31 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Une méthodologie pour évaluer les pertes de pesticide vers l'environnement pendant les pulvérisations viticoles

Carole Sinfort* — **Eric Cotteux**** — **Bernadette Ruelle**** — **Vincent De Rudnicki**** — **Bernard Bonicelli****

* Montpellier SupAgro - UMR ITAP

2, pl. Viala

F-34060 Montpellier

sinfort@supagro.inra.fr

** Cemagref - UMR ITAP

BP 5095

F-34033 Montpellier

{eric.cotteux, bernadette.ruelle, vincent.derudnicki, bernard.bonicelli}@cemagref.fr

RÉSUMÉ. Les traitements phytosanitaires des vignes entraînent des pertes vers l'environnement (sol, air) qui sont la cause de pollutions diffuses. Trois campagnes d'essais (une par an) ont été mises en place pour : i) quantifier les pertes de pesticide, ii) comparer les effets des technologies des pulvérisateurs et iii) évaluer l'importance des réglages des machines.

Une méthodologie a été développée pour évaluer les pertes de pesticides. Elle est basée sur l'utilisation d'un traceur fluorescent (de la Brillant Sulfo Flavine) piégé sur des collecteurs adaptés à chaque compartiment évalué (sol, plante, air). Les quantités de dépôt sont ensuite obtenues par une analyse spectro-fluorimétrique. L'efficacité des collecteurs a été préalablement testée en laboratoire. Le positionnement des collecteurs à l'intérieur des parcelles d'essai ont également été optimisées pour assurer une bonne estimation des dépôts réels. Les pulvérisateurs testés appartiennent aux viticulteurs qui participaient au projet ou à l'institut de recherche (Cemagref). Ils avaient été préalablement réglés par un technicien de la Chambre d'Agriculture.

Les résultats montrent que le protocole de mesure donne une bonne estimation du devenir des pesticides puisque environ 100% du produit pulvérisé est retrouvé à partir des collecteurs dans les différents compartiments. Les quantités de produit perdu sont considérables : entre 10 et 45% sur le sol et entre 15 et 40% dans l'air. Les pertes au sol sont plus importantes lors des traitements en stade végétatif précoce et sont difficiles à réduire dans ce cas, même en optimisant les réglages. Quand la végétation est totalement développée, l'orientation des jets a

un effet significatif sur les pertes : un mauvais réglage de cette orientation peut multiplier les pertes au sol par trois.

ABSTRACT. Vine spraying induces pesticide losses to the environment (ground, air) that are responsible of background pollutions. Three test campaigns (one per year) were set up to : i) quantify pesticide losses, ii) compare the effects of sprayer technologies and iii) evaluate the importance of the machine set-up.

Measurements were based on the use of a fluorescent dye (Brilliant Sulfo Flavine) trapped on several kind of collectors fitted to each evaluated compartment (ground, plant, soil). The amount of deposit was then obtained through spectro-fluorimetry analysis. Efficiency of collectors was previously tested in laboratory conditions. The implementation of the collectors within the test plots was also optimised to ensure a good estimation. The tested sprayers belong to the farmers participating to the project or to the research institute (Cemagref). They were adjusted by a specialised technician from the local agricultural advice organisation.

The results show that the measurement protocol gives a good estimation of the sprayed pesticide fate as roundly 100% of the sprayed product was found from the collectors of each compartment. The amounts of lost products are considerable : from 10 to 45% on the ground, 15 to 40% in the air. Losses on the ground are most important when spraying at an early vegetative stage and are difficult to reduce in this case, even when improving the machine setup. When the canopy is fully developed the orientation of the sprays is shown to have a significant effect : a bad orientation setup can multiply ground losses by three.

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

KEYWORDS: pesticide, sprayer, spraying, pollution, ground, air, field measurements

1. Introduction

La France est le troisième utilisateur mondial de pesticides, après les Etats-Unis et le Japon. 77 000 tonnes de pesticides ont été consommés en 2007 dans l'agriculture sur le plan national. Avec seulement 4% la SAU, la viticulture consomme 20% de ces produits. Seule une partie de la quantité de pesticides épandus atteint réellement la cible visée (mauvaise herbe, insecte ravageur, champignon, etc). Ces dernières années, la mise en cause des pesticides sur la contamination des milieux a amené les pouvoirs publics et l'ensemble de la société à s'interroger sur les risques potentiels encourus par la population générale, d'abord vis-à-vis des pollutions des eaux souterraines et de surface puis, plus récemment vis-à-vis des pollutions de l'air. La viticulture est particulièrement concernée, en partie à cause des quantités importantes pulvérisées mais aussi à cause des technologies utilisées. En effet, pour faciliter la pénétration des produits dans la végétation, les pulvérisateurs viticoles sont équipés de turbines créant un flux d'air turbulent qui assiste le transport des gouttes et secoue le feuillage. Une partie de cet air est dévié par le mur de végétation vers le sol et l'atmosphère et entraîne avec lui une part non négligeable de produits phytosanitaires. [BER 99] estime que 30 et 50% des masses épandues peuvent être perdues vers l'air. Lors d'essais sur vergers de pommiers [CRO 01] mesure des pertes au sol variant entre 24 et 97% et des pertes vers l'air variant entre 5 et 51%.

Ces pertes vers l'environnement sont difficiles à évaluer notamment du fait du grand nombre de molécules à rechercher (plusieurs centaines [L'H 09]). L'estimation quantitative des pertes est d'autant plus difficile qu'elle dépend de la machine, de sa conduite et de ses réglages (qui dépendent de l'opérateur) ainsi que des conditions ambiantes. Depuis les années 60, de très nombreux travaux décrivent des méthodologies pour mesurer les pertes par dérive, en mesurant les dépôts au sol à proximité de la zone traitée et/ou les dépôts sur des cibles verticales : le consortium américain « Spray Drift Task Force » a recensé 2500 articles scientifiques concernant l'étude de la dérive [SDT 97]. En général, une quantification complète de la contamination des compartiments air et sol n'est cependant pas recherchée. Par ailleurs on ne trouve pas, dans la littérature, de bilan des mesures dans les différents compartiments.

L'étude qui fait l'objet de cet article a été conduite pendant trois années consécutives sur un petit bassin versant viticole du département de l'Hérault - le bassin versant de la Valeille sur la commune de Neffies - avec la participation des viticulteurs. L'objectif de l'étude était de connaître les pratiques et les matériels utilisés en viticulture Languedocienne et d'estimer les pertes de pesticides vers l'environnement engendrées par les différentes pratiques sur le bassin versant.

Cet article a pour objectif de présenter les méthodologies mises en œuvre pour : i) quantifier les pertes de pesticides vers l'environnement, ii) comparer les effets des technologies des pulvérisateurs et iii) évaluer l'importance des réglages des machines. Après une rapide synthèse des méthodes disponibles pour mesurer les pertes de pesticides vers l'environnement, sont décrites la méthodologie développée ainsi que les protocoles mis en place puis les principaux résultats obtenus sur trois années de campagne d'essais sont présentés et discutés.

2. Méthodes de mesure des pertes de pesticides vers l'environnement

La méthode la plus pratique pour détecter les impacts des gouttes consiste à utiliser des papiers hydro-sensibles [DEM 00, LAN 04, FAR 04, PAN 04]. Ils peuvent être placés directement dans la végétation pour juger de l'efficacité du traitement sur le sol ou sur des supports dans l'air pour évaluer les pertes. Très utiles pour les évaluations qualitatives, ces collecteurs ne permettent pas de quantifier les masses de produit perdues.

L'utilisation de vélocimètres laser ou PDA (Phase Doppler Analyser) est utilisée depuis les années 80 pour évaluer le transport et la dispersion de nuages de gouttes pulvérisées (cf. [ZAL 80] pour une utilisation pour des pulvérisations aériennes). Par la suite, des systèmes LIDAR (Light Detection and Ranging) ont été proposés avec le même objectif, mais là encore, ces systèmes ne permettent pas une approche quantitative [HOF 89, STO 97].

Pour obtenir une évaluation quantitative, les méthodologies décrites dans la littérature scientifique font appel soit à des traceurs, piégés sur des collecteurs en général passifs, soit à des méthodes de chimie analytique.

Parmi les traceurs décrits, on recense les traceurs radioactifs [DOB 83], très précis mais peu disponibles, les traceurs métalliques quantifiés par spectrométrie d'absorption atomique [YAT 76, CRO 01, DAS 05], par conductimétrie ou par des techniques associant microscopie électronique à balayage et analyse d'image (Electron Beam Analysis [KRA 04]), les colorants (surtout la tartrazine, colorant alimentaire E102), analysés par spectrophotométrie [PER 01, ADE 07] et les traceurs fluorescents. L'utilisation de ces derniers s'est beaucoup développée (par exemple, [MIL 89, BAY 05, GIL 07]) car les mesures par spectrofluorimétrie sont rapides et très précises (détection de l'ordre du $\mu\text{g/L}$). Le traceur fluorescent le plus courant est la Brillant Sulfo Flavine qui présente l'intérêt d'avoir un faible taux de dégradation à la lumière [CAI 97]. Des essais sont également décrits avec un autre traceur, la Caracid Brilliant Flavine FFN [KIR 04]. Les traceurs fluorescents sont collectés sur des supports passifs qui sont ensuite rincés avec de l'eau désionisée et tamponnée, la concentration de la solution obtenue étant ensuite mesurée. L'utilisation de tous ces traceurs (fluorescents ou autres) présente l'inconvénient de ne pas permettre la quantification de la phase vapeur [SOL 96] ; il faut donc limiter leur emploi à de faibles distances du point d'émission. La solution la plus précise pour estimer les concentrations de pesticides dans l'eau, l'air ou sur un support quelconque reste le recours aux méthodes analytiques. Dans l'air, on recourt habituellement à des échantillonneurs qui aspirent l'air à travers un filtre ou une résine, suivant que l'on recherche la molécule en phase liquide ou en phase gazeuse. Le type d'échantillonneur joue un rôle important sur les quantités mesurées, tout en dépendant de la nature du produit piégé [BUI 98, BRI 2a]. Les méthodes d'analyse les plus courantes pour l'analyse des pesticides dans l'environnement sont la chromatographie en phase liquide (CPL) [CAR 06] ou la chromatographie en phase gazeuse (CG), complétée par une spectrométrie de masse (MS) [MIL 00, WIT 02, RAV 05]. Bien que des solutions existent pour des analyses multi-résidus [PIC 95, BRI 2b], ces méthodes sont surtout utilisées pour rechercher une substance active choisie au préa-

lable car elles sont très dépendantes des propriétés physico-chimiques de la molécule recherchée [GIL 05].

3. Matériel et Méthodes

Compte-tenu des spécificités des différentes méthodes et étant donné le grand nombre d'essais à réaliser, nous avons choisi d'utiliser un traceur fluorescent, la BSF, et d'optimiser la nature et le positionnement de collecteurs pour le sol, l'air et les plantes ainsi que les protocoles d'essai à nos différents objectifs. La concentration en fluorescence des échantillons est déterminée à l'aide d'un spectrofluorimètre LS45 Perkin Elmer dans des cuves de polystyrènes jetables de 1 cm de trajet optique. La longueur d'onde d'excitation est de 455 nm et le signal émis est lu à 500 nm.

3.1. Choix et positionnement des collecteurs

3.1.1. Collecteurs au sol

Les collecteurs au sol sont des bandes de dimensions 5cm x 1,5m, découpées dans des gaines d'irrigation souples. Les bandes sont rincées dans un volume d'eau désionisée et tamponnée de 500 mL. Le taux de récupération du traceur sur ce support a été testé en laboratoire en plaçant une quantité connue de traceur sur le support à l'aide d'une micro-pipette : 100% du produit déposé a été retrouvé après rinçage et analyse. Afin de limiter les incertitudes liées à l'échantillonnage, on a choisi de mesurer les pertes au sol sur des lignes continues perpendiculaires à l'avancement du pulvérisateur. La répétition de plusieurs lignes permet de prendre en compte la variabilité de la densité de végétation, de la surface du sol (ornières) et de la vitesse d'avancement dans le sens des rangs. Des essais préliminaires ont été mis en place pour déterminer statistiquement le nombre de collecteurs nécessaires pour obtenir une valeur moyenne des résultats s'écartant d'au plus 5% de la valeur vraie avec une probabilité de 5%. La valeur vraie a été estimée en utilisant 30 collecteurs espacés de 10cm. Le nombre de collecteurs a ainsi été fixé à 10 lignes d'échantillonnage de 5 collecteurs, espacées de 0,5m et permettant de couvrir une largeur de 7.5 m (3 inter-rangs) incluant le passage du tracteur. De plus, pour les mesures de bilan, le dispositif a été complété par un jeu de collecteurs parallèles à l'avancement, pour élargir la zone de mesure de deux rangs supplémentaires de part et d'autre du passage du pulvérisateur (on couvre ainsi 7 inter-rangs au total).

3.1.2. Collecteurs dans l'air

Pour mesurer les pertes vers l'air, les collecteurs utilisés sont des fils en PVC de 2 mm de diamètre extérieur (1 mm intérieur) et dont la dureté superficielle est de 60 Shore A. La capacité de ce dispositif à piéger le traceur et à échantillonner les pertes vers l'air a fait l'objet de nombreux travaux au Cemagref dont notamment une étude théorique, des essais en soufflerie et des essais pour quantifier le taux de resti-

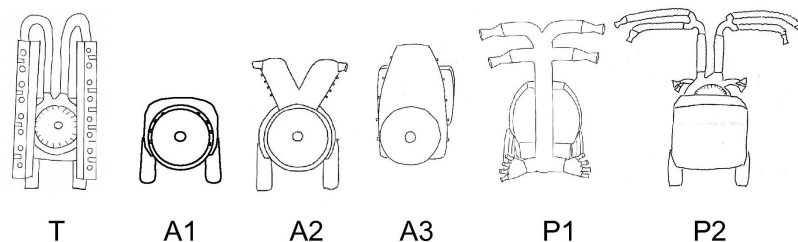


Figure 1. Schémas des pulvérisateurs testés : *T*, Tangentiel ; *A1*, atomiseur simple ; *A2*, atomiseur avec déflecteurs ; *A3*, atomiseur pour vignes étroites ; *P1*, pneumatique simple ; *P2*, pneumatique avec position des diffuseurs réglable en largeur.

tution après rinçage [GIL 07]. Il a été établi que la capacité de piégeage de ces collecteurs était de 80%. Un facteur correctif est introduit dans les résultats pour prendre en compte cette caractéristique.

Lors des essais, 5 fils de 10m de long sont placés au dessus de la parcelle, au dessus de 5 inter-rangs adjacents et à une hauteur de 2m50. La hauteur des fils a été choisie pour limiter les pertes par évaporation [GIL 07]. Après pulvérisation, les fils sont ramassés et rincés dans un volume de 250 mL d'eau.

3.1.3. Collecteurs pour la végétation

Sur la végétation, les collecteurs sont les feuilles et les fruits. Pour un point de mesure toutes les feuilles et les fruits présents sur une longueur de rang de 15cm sont collectés. La méthode a été mise en place lors de précédentes études [DAS 02] et a montré une excellente capacité à limiter la variabilité entre répétitions par rapport aux essais réalisés en prélevant seulement quelques feuilles ou en plaçant quelques collecteurs dans la végétation. Une efficacité de collecte de 90% a été obtenue en procédant de la même manière que pour les collecteurs au sol. Cette efficacité a été prise en compte dans les résultats.

3.2. Protocoles

Les machines testées sont schématisées dans la figure 1. Quatre pulvérisateurs ont été sélectionnés parmi ceux des viticulteurs. Ce sont des pulvérisateurs adaptés aux vignes de la région caractérisées par de petites parcelles conduites en gobelet ou palissées en cordon de Royat : deux pulvérisateurs à jet porté (A1 et A2) et deux pulvérisateurs pneumatiques (P1 et P2). Deux autres pulvérisateurs non présents sur le bassin versant mais cependant utilisés dans la région (A3 et T) ont également été testés dans certaines configurations. Tous les pulvérisateurs sont traînés, sauf la machine A3 qui est portée.

Les pulvérisateurs ont tous été réglés avant les essais par un technicien de la Chambre d'Agriculture. Avant chaque essai, les orientations des jets et, le cas échéant, des déflecteurs étaient réglés pour s'adapter au mieux à la position de la végétation. Les pulvérisateurs étaient conduits à une vitesse de 5 km/h en respectant les volumes par hectare en usage chez les viticulteurs. Les débits ont été mesurés avant chaque série d'essai. Les conditions météorologiques étaient enregistrées pendant toute la durée des essais à partir d'un capteur ultra son Young Model 81000 V placé à une hauteur de 3m50 à l'intérieur de la parcelle et des capteurs température hygromètre FH A646 placés au niveau de la végétation. Chaque essai a fait l'objet de trois répétitions.

3.2.1. *Effet des technologies*

Les différentes machines ont été testées sur une vigne artificielle, décrite dans [GIL 07], afin de s'affranchir de la variabilité de la végétation. La vigne est constituée de 4 rangs de 10m de long, espacés de 2m. Elle est composée de structures métalliques de 50cm de largeur et 1m50 de haut, recouvertes de filets pare-vent de mailles 1mm × 7mm. Des essais préalables en soufflerie ont montré que ces vignes artificielles avaient le même coefficient de traînée que des vignes réelles de taille équivalente, en pleine végétation. Le pulvérisateur réalise deux aller-retours dans le rang central. Les dépôts sont mesurés au sol et dans l'air (un fil au-dessus de l'inter-rang central et 2 fils de part et d'autre).

3.2.2. *Effet des réglages et du stade végétatif*

Les essais sont réalisés sur une parcelle plantée en cépage Marselan et palissée suivant un mode de conduite de type « Guyot ». La vigne est constituée de 10 rangs espacés de 2,5m, les ceps étant plantés sur les rangs tous les 1,75 m dans la plus grande longueur. La machine traite un rang sur deux et passe successivement dans 3 rangs. Seuls les dépôts au sol sont mesurés. Les pulvérisateurs T, P1 et P2 ont été utilisés pour ces essais. Les dépôts au sol sont mesurés sur une distance de 10m et une largeur de 7m50, dans une zone délimitée au centre de la parcelle. La pulvérisation est enclenchée 10m avant la zone et arrêtée 10m après.

Les stades végétatifs pour lesquels les essais ont eu lieu sont au mois de mai, le stade d'apparition des inflorescences, au mois de juin, le stade « pleine fleur » de la floraison et au mois de juillet, le stade « nouaison » pour lequel la végétation est totalement développée. Au mois de juillet, les essais ont eu lieu après relevage des fils de palissage, écimage et rognage.

A chacun de ces stades végétatifs, l'effet d'un réglage a été étudié : le nombre de sorties ouvertes, au mois de mai (toutes ouvertes ou seulement les sorties nécessaires), la vitesse d'avancement (5 ou 7 km/h), au mois de juin et l'orientation des jets au mois de juillet. Les conditions de cette dernière série d'essais concernent l'adaptation du pulvérisateur à la distance entre rangs. Les viticulteurs ont en effet souvent plusieurs parcelles plantées avec des espacements différents et ils ne modifient pas l'orientation des jets d'une parcelle à l'autre. Nous avons donc testé, sur la parcelle plantée à 2m50, un réglage optimisé pour un espacement de 2m et un réglage optimisé pour

2m50 (écartements les plus courants dans la région). Pour le pulvérisateur T, pour lequel on ne peut pas modifier l'orientation des jets, on a abaissé la hauteur des modules de 10cm.

3.2.3. Bilan du devenir des pesticides

Les essais ont lieu sur la même parcelle que précédemment, et aux mêmes trois stades végétatifs. Seul le pulvérisateur P1 a été testé. Le pulvérisateur réalise deux aller-retours dans le même rang. Une zone de mesure de 20m de long sur 17,50m de large est délimitée au centre de la parcelle. La première partie (les 10 premiers mètres) est le lieu des mesures de dépôt dans la végétation : les feuilles sont collectées sur 4 pieds, 2 sur les rangs directement traités et 2 sur les rangs suivants, de part et d'autre des rangs directement traités. Les dépôts au sol et dans l'air sont collectés dans la deuxième partie (les 10 mètres suivants). Avant chaque essai, les feuilles sont collectées en deux points pour vérifier le niveau initial de fluorescence.

4. Résultats

4.1. Effet des technologies

Le tableau 1 donne les pourcentages de pertes mesurés par rapport au débit pulvérisé, au sol et dans l'air, pour les six pulvérisateurs sélectionnés (moyennes de 3 répétitions). Les pertes vers l'air sont beaucoup plus importantes que les pertes vers le sol : elles sont comprises entre 15 et 37%. Les coefficients de variation calculés sur les trois répétitions sont assez faibles pour les mesures au sol (tous inférieurs à 1%). Pour les mesures des pertes dans l'air, par contre, les coefficients de variation sont toujours plus importants.

Un test non paramétrique de Kruskal-Wallis sur les autres pulvérisateurs fait apparaître deux groupes statistiquement différents : T et A1 d'une part, A2 et A3 de l'autre. Pour les pertes vers l'air, le test non paramétrique permet de dissocier le résultat de T, significativement plus faible, des résultats de A2 et A3.

	A1	A2	A3	P1	P2	T
Sol	7,7 (0,4)	10,4 (0,4)	10,2(0,4)	8,7 (0,7)	9,1 (0,3)	7,7 (0,5)
Air	24,3 (2,5)	37,7 (6,3)	37,4(4,2)	23,8 (4,7)	21,2 (7,7)	14,5 (3,2)

Tableau 1. Pourcentages de pertes par rapport au débit pulvérisé, au sol et dans l'air, mesurés sur vigne artificielle ; les chiffres entre parenthèses sont les écart-types.

4.2. Effet des réglages et du stade végétatif

Les pertes au sol mesurées aux trois périodes avec des réglages optimisés montrent pour tous les pulvérisateurs une diminution importante avec le développement de la

végétation (cf. Tab.2). Lors des premiers essais, les pertes au sol avoisinent les 40% ; en pleine végétation, les pertes ne sont plus que d'environ 10% sauf pour le pulvérisateur T pour lequel le réglage de l'orientation des jets n'a pas pu être optimisé. Concernant l'effet du nombre de sorties ouvertes, l'analyse des données brutes montre

	mai	juin	juillet
P1	44,5(3,2)	17,4(2)	10,3(1,5)
P2	35,5(4,7)	25,3(3,2)	13(1,1)
T	41(2)	26,8(2,6)	24,1(3,3)

Tableau 2. Pourcentages de pertes au sol par rapport au débit pulvérisé en fonction du stade végétatif et avec des réglages optimisés ; les chiffres entre parenthèses sont les écart-types.

qu'il n'y a aucune différence significative suivant que certaines sorties soient fermées ou que toutes soient ouvertes, pour les pulvérisateurs P1 et P2 (cf. première colonne des Tab.2 et 3). Par contre, les dépôts mesurés pour le pulvérisateur T avec toutes les buses alimentées sont significativement plus faibles (de moitié) que ceux mesurés avec un réglage correct (buses du haut fermées). Cependant, comme le vent était plus fort lors de ce dernier essai, la validité de ce résultat est discutable.

Le traitement à une vitesse de 7 km/h au lieu de 4 km/h (deuxième colonne) n'a pas d'effet important sur les dépôts mesurés au sol. Les différences ne sont statistiquement pas significatives, à l'exception du pulvérisateur P1 pour lequel on observe une diminution des dépôts de l'ordre de 5%.

Enfin, l'effet d'une mauvaise orientation des jets (troisième colonne) est très net pour les pulvérisateurs P1 et P2 pour lesquels on observe une augmentation significative des pertes au sol. Pour le pulvérisateur P2, les pertes sont plus que triplées. Pour le pulvérisateur T, la différence n'est pas significative.

	mai	juin	juillet
	nombre de sorties ouvertes	vitesse d'avancement	orientation des jets
P1	43,5(2,4)	11,4(1,6)	13,8(2,2)
P2	29,8(4,2)	27,9(2,5)	37,4(5,9)
T	20(2,8)	24,9(2,1)	22,2(1,8)

Tableau 3. Pourcentages de pertes au sol par rapport au débit pulvérisé pour des réglages dégradés ; les chiffres entre parenthèses sont les écart-types.

4.3. Bilan du devenir des pesticides

Les mesures du devenir des pesticides (cf. Tab.4) montrent que les pertes vers l'air sont dans tous les cas très importantes (entre 25 et 35%), les pertes au sol sont comprises entre 15 et 25% et les quantités piégées dans la végétation s'étalent entre

20 et 70%. Il faut toutefois noter que le protocole mis en place au mois de mai n'était pas adapté : la végétation n'a été prélevée que sur deux rangs et les dépôts au sol n'ont été mesurés que sur trois rangs. On ne retrouve d'ailleurs dans les mesures que 73,6% du produit pulvérisé. Compte-tenu, du stade végétatif et des résultats décrits dans le paragraphe précédent (4.2), on peut s'attendre à ce que la part manquante ait été essentiellement déposée au sol. Le protocole a été optimisé pour les essais des mois de juin et de juillet. Au total, on trouve au mois de juin 107,5% du produit pulvérisé et 85,5%, au mois de juillet. Les quantités retrouvées sur les rangs éloignés sont d'environ 1/4 de celles retrouvées sur les rangs adjacents au traitement. Si on considère un traitement classique d'un rang sur deux, les rangs adjacents recevront donc deux fois plus de produit que les rangs intermédiaires.

	Mai	Juin	Juillet
air	37,9(5,3)	31(3,2)	25,5(3,1)
rangs adjacents	19,6(1,6)	43,2(2,5)	34,2(3,1)
rangs éloignés	non mesuré	15,3(6,1)	7,5(1)
sol	16,1(2)	18(1,9)	19,7(1,6)

Tableau 4. Pourcentages de pertes dans l'air, la vigne et sur le sol, aux trois stades de développement ; les chiffres entre parenthèses sont les écart-types.

5. Discussion

La validité des résultats obtenus dépend beaucoup des dimensions des zones sur lesquelles le produit a été collecté. Les résultats mettent en évidence que sur les premiers essais (essai sur vigne artificielle, essai de bilan du mois de mai), il y avait trop peu de collecteurs au sol. Le protocole mis en œuvre finalement permet d'échantillonner correctement les zones de dépôt.

Une évaluation des erreurs a été réalisée sur la base des incertitudes recensées par les opérateurs. Ont été revues, avant les essais, les mesures de vitesse d'avancement et de débit, pendant l'essai, l'incertitude sur la concentration du produit pulvérisée et sur le maintien d'une vitesse constante, après l'essai, la détermination des volumes de rinçage et de dilution, l'efficacité du rinçage, le choix de la zone de prélèvement des feuilles, l'erreur du spectro-fluorimètre. L'efficacité du rinçage avait été optimisée en laboratoire au préalable en déterminant les volumes de rinçage et les temps de secouage pour chaque échantillon, l'erreur est donc supposée négligeable. L'effet « opérateur » sur le choix de la zone pourrait par contre avoir un rôle important (a priori, les zones de moindre densité sont systématiquement choisies) mais difficile à évaluer. L'erreur sur la concentration est limitée par la réalisation d'une courbe étalon à partir de la solution pulvérisée. L'erreur due au spectro-fluorimètre a été évaluée en mesurant successivement plusieurs échantillons d'une même solution et s'avère négligeable. A ces incertitudes, s'ajoutent les erreurs liées aux surfaces des collecteurs, à leur efficacité de piégeage, et l'erreur liée à l'échantillonnage. Cette dernière erreur a

été déterminée pour les collecteurs au sol (cf. par.3.1.1). Pour les collecteurs dans l'air, l'efficacité de piégeage a été estimée à 80% par [GIL 07], et a été intégrée dans les calculs ; l'erreur liée à l'échantillonnage n'a cependant pas été évaluée et revêt peut-être une importance non négligeable. Pour les feuilles, il n'y a pas d'échantillonnage au sein d'une zone de mesure. Par contre, l'erreur sur la taille de la zone de mesure peut-être importante (estimée à 15%). Au final, n'ont été conservées que les erreurs d'importance significative et pouvant être quantifiées : débit, vitesse d'avancement, dimensions de la zone de mesure, erreur sur le volume d'extraction et, pour les collecteurs au sol, l'erreur liée à l'échantillonnage. Les erreurs ainsi calculées sont : 10% pour les mesures au sol, 5% pour les mesures dans l'air et 17,5% pour les mesures dans la végétation.

D'autres points peuvent être discutés sur la méthodologie mise en œuvre, en particulier l'effet des conditions extérieures. D'une manière générale, les essais ont été réalisés avec des températures assez douces (inférieures à 25°C) un vent faible et une hygrométrie d'au moins 40% mais la présence de vent n'a pas toujours pu être évitée, ce qui a faussé au moins une mesure. On peut aussi s'interroger sur les quantités piégées sur les fils : il est possible qu'une certaine quantité retombe sur le plan de mesure après que le nuage ait été émis. Ce phénomène paraît peu probable à l'observation visuelle mais il n'est pas possible de le quantifier. Malgré tout, les résultats des mesures de bilan font apparaître des ordres de grandeur corrects, 85% et 107% du produit pulvérisé ayant été retrouvé. Ces résultats sont compatibles avec les erreurs estimées sur la procédure.

La représentativité d'un traceur en solution dans l'eau reste un dernier point discutable car les produits réels sont en général des suspensions et les produits pulvérisés ont des propriétés physico-chimiques qui peuvent être très différentes.

6. Conclusion

Au cours des trois années de l'étude, des protocoles basés sur l'utilisation d'un traceur fluorescent ont été mis en œuvre pour mesurer les pertes de pesticides vers l'environnement. Ces protocoles ont fait l'objet d'améliorations au fur et à mesure de l'avancement de l'étude, essentiellement par rapport au nombre et au positionnement des collecteurs au sol. De nombreuses vérifications ont été conduites en laboratoire et sur le terrain pour limiter autant que possible les sources d'erreur qui sont finalement évalués à 5 et 10% pour les collecteurs dans l'air et au sol, respectivement. Des essais de bilan montrent que globalement la méthode de mesure permet de retrouver tout le produit émis, avec l'incertitude liée aux différents collecteurs. Dans ces essais de bilan, c'est la collecte de produit dans la végétation qui est la plus grande source d'erreur.

Les résultats montrent l'influence importante des technologies ainsi que des réglages. Lors d'essais sur vigne artificielle, avec des réglages optimisés, les pertes au sol se situent entre 7 et 10% tandis que, suivant les machines, les pertes vers l'air varient entre 20 et 40%. Les résultats sur vignes réelles confirment ces ordres de grandeur. Les réglages les plus importants vis-à-vis des pertes vers l'environnement

concernent l'orientation des jets vers la végétation. Sur un réglage dégradé (orientation pour une vigne plantée à 2m au lieu de 2m50) on observe des pertes au sol multipliées par trois. Les pertes au sol peuvent être très importantes avec une utilisation conventionnelle des machines en début de végétation : elles peuvent alors dépasser 40% des quantités pulvérisées. Les mesures réalisées aux différentes périodes de développement de la vigne montrent que les pertes vers l'air restent toujours très importantes (entre 25 et 45%). Globalement, les ordres de grandeur sont environ 40-20-40 en début de végétation et 10-50-40 en pleine végétation pour les compartiments sol-plante-air, respectivement.

Remerciements

Ce travail a été financé pour partie par le programme européen Life Aware et pour partie par le projet ANR Geduque. Les auteurs tiennent à remercier les viticulteurs qui se sont portés volontaires pour cette étude, l'ensemble de l'équipe qui a participé aux essais et enfin, les stagiaires - M. Béranger, D. Gilles, N. Gimenez, J. Lagrevol et O. Liet - sans qui les essais n'auraient pu avoir eu lieu.

7. Bibliographie

- [ADE 07] ADE G., RONDELLI V., « Performance of an air-assisted boom sprayer in the control of Colorado beetle infestation in potato crops », *Biosystems engineering*, vol. 97, n° 2, 2007, p. 181–187.
- [BAY 05] BAYAT A., BOZDOGAN N. Y., « An air-assisted spinning disc nozzle and its performance on spray deposition and reduction of drift potential », *Crop Protection*, vol. 24, 2005, p. 951–960.
- [BER 99] VAN DEN BERG F., KUBIAK R. ., BENJAY W., « Emission of pesticides into air », *Water, Air, Soil and Pollution*, vol. 115, 1999, p. 195-218.
- [BRI 2a] BRIAND O., BERTRAND F., SEUX R., MILLET M., « Comparison of different sampling techniques for the evaluation of pesticide spray drift in apple orchards », *The science of the total environment*, vol. 288, 2002a, p. 199-213.
- [BRI 2b] BRIAND O., MILLET M., BERTRAND F., CLÉMENT M., SEUX R., « Assessing the transfer of pesticides to the atmosphere during and after application. Development of a multiresidue method using adsorption on Tenax and thermal desorption GC/MS », *Analytical and Bioanalytical chemistry*, vol. 374, 2002b, p. 848–857.
- [BUI 98] BUI Q., WOMAC A., HOWARD K. D., MULROONEY J. E., AMIN M. K., « Evaluation of sampler for spray drift », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 41, 1998, p. 37–41.
- [CAI 97] CAI S. S., STARK J. D., « Evaluation of five fluorescent dyes and triethyl phosphate as atmospheric tracers of agricultural sprays », *Journal of Environmental Science and Health Part B - Pesticides Contaminants and Agricultural Wastes*, vol. 32, 1997, p. 969–983.

- [CAR 06] CARLSEN S. C. K., SPLIID N. J., SVENSMARK B., « Drift of 10 herbicides after tractor spray application », *Chemosphere*, vol. 64, 2006, p. 787–794.
- [CRO 01] CROSS J. V., WALKLATE P. J., MURRAY R. A., RICHARDSON G. M., « Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer : 1. Effects of spray liquid flow rate », *Crop Protection*, vol. 20, n° 1, 2001, p. 13-30.
- [DAS 02] DA SILVA A., SINFORT C., BONICELLI B., VOLTZ M., HUBERSON S., « Spray penetration within vine canopies at different vegetative stages », *International advances in pesticide applications ; AAB/BCPC Conference, Unversity of Surrey, Guidford, UK, January 5-7, 2002*.
- [DAS 05] DA SILVA A., SINFORT C., TINET C., PIERRAT D., HUBERSON S., « A Lagrangian model for spray behaviour within vine canopies », *Journal of Aerosol Science*, vol. AS3921, 2005, p. 1–17.
- [DEM 00] DE MOOR A., LANGENAKENS J., VEREECKE E., « Image analysis of water sensitive paper as a tool for the evaluation of spray distribution of orchard sprayers », *Aspects of Applied Biology*, vol. 57, 2000.
- [DOB 83] DOBSON C. M., MINSKI M. J., MATTHEWS G. A., « Neutron activation analysis using dysprosium as a tracer to measure spray drit », *Crop Protection*, vol. 2, 1983, p. 345-352.
- [FAR 04] FAROOQ M., LANDERS A. J., « Interactive effects of air, liquid and canopies on spray patterns of axial-flow patterns. », *Paper 041001, ASAE/CSAE Annual International Meeting, Fairmont, Chateau Laurier, Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 August, 2004*, Paper 041001.
- [GIL 05] GIL Y., SINFORT C., « Emission of pesticides to the air during sprayer application : a bibliographic review », *Atmospheric Environment*, vol. 39, 2005, p. 2183-5193.
- [GIL 07] GIL Y., SINFORT C., BRUNET Y., POLVECHE V., BONICELLI B., « Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying », *Atmospheric Environment*, vol. 41, 2007, p. 2945–2957.
- [HOF 89] HOFF R. M., MICKLE R. E., FROUDE F. A., « A rapid acquisition Lidar system for aerial spray diagnostics », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 32, 1989, p. 1523-1528.
- [KIR 04] KIRK I. W., FRITZ B. K., HOFFMANN W. C., « Aerial Methods for increasing spray deposits on wheat heads », *ASAE/CSAE Annual International Meeting, Fairmont, Chateau Laurier, Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 August 2004*, 2004, Paper 041029.
- [KRA 04] KRAUSE C. R., ZHU H., FOX R. D., BRAZEE R. D., DEKSEN R. C., HORST L. E., ZONDAG R. H., « Detection and quantification of nursery spray penetration and off-target loss with electron beam and conductivity analysis », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 47, n° 2, 2004, p. 375–384.
- [LAN 04] LANDERS A., « Prevention is better than cure - Reducing Drit from Vineyard Sprayers », *Invited Presentation Article - International Conference on Pesticide Application for Drift Management. Waikoloa, Hawaï, 27-29 Octobre, 2004*.
- [L'H 09] L'HERMITE N., GOUZY A., LE GALL A.-C., FARRET R., BEDOS C., SINFORT C., BONICELLI B., MARLIERE F., « Identification and classification of pesticides of concern for human health : Sph'Air, a decision support system for pesticide air monitoring », *Atmospheric Environment*, vol. soumis, 2009.

- [MIL 89] MILLER P. C. H., HADFIELD D. J., « A simulation model of the spray drift from hydraulic nozzles », *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 42, n° 2, 1989, p. 135-147.
- [MIL 00] MILLER D. L., STOUGHTON T. E., STEINKE W. E., HUDDLESTON E. W., BOSS J. B., « Atmospheric stability effects on pesticide drift from an irrigated orchard », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 43, 2000, p. 1057–1066.
- [PAN 04] PANNETON B., LACASSE B., THERIAULT R., « Effect of the characteristics of air jets on the performance of a spray recovery sprayer for vineyards », *ASAE/CSAE Annual International Meeting, Fairmont, Chateau Laurier, Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 August, 2004*.
- [PER 01] PERGHER G., « Recovery rate of tracer dyes used for spray deposit assesment », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 44, 2001, p. 787–794.
- [PIC 95] PICHON V., GUENU S., DUPAS S., HENNION M.-C., « Analyse multirésidus des pesticides dans les eaux par extraction liquide-solide et chromatographie en phase liquide : Analyse de l'eau », *Spectra 2000 analyse*, vol. 24, n° 185, 1995, p. 25-31.
- [RAV 05] RAVIER I., HAOUISEE E., CLÉMENT M., SEUX R., BRIAND O., « Field experiments for the evaluation of pesticide spray-drift on arable crops », *Pest management science*, vol. 61, 2005, p. 728-736.
- [SDT 97] SDTF, « A summary of airblast application studies », rapport, 1997, Spray Drift Task Force, available on <http://www.agdrift.com>.
- [SOL 96] SOLANELLES F., FILLAT A., PIFARRÉ C., PLANAS S., « A method of drift measurement for spray applications in tree crops. », *Ageng'96, Madrid, Spain, Paper 96A-133*, 1996.
- [STO 97] STOUGHTON T. E., MILLER D. R., YANG X., DUCHARME K. M., « A comparison of spray drift predictions to lidar data », *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 88, n° 1-4, 1997, p. 15-26.
- [WIT 02] WITTICH K. P., SIEBERS J., « Aerial short-range dispersion of volatilised pesticides from an area source », *International Journal of Biometeorology*, vol. 46, 2002, p. 126–135.
- [YAT 76] YATES W. E., AKESSON N. B., BAYER D., « Effects of spray adjuvant on drift hazards », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 19, 1976, p. 41–46.
- [ZAL 80] ZALAY A. D., BOUSE L. F., CARLTON J. B., CROOKSHANK H. R., EBERLE W. R., HOWLE R. E., SHRIDER K. R., « Measurement of airborne spray with a laser Doppler velocimeter », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 23, 1980, p. 548-552.