



HAL
open science

Application des produits phytopharmaceutiques et protection des riverains : Synthèse des connaissances pour définir les distances de sécurité Membres du groupe de travail INRAE-Anses-ACTA

Carole Bedos, Jean Paul Douzals, Enrique Barriuso, Jean-Paul Bordes, Eric Chantelot, Pierre Cellier, Benjamin Loubet, Thierry Mercier, Benjamin Perriot, Mehdi Sine, et al.

► **To cite this version:**

Carole Bedos, Jean Paul Douzals, Enrique Barriuso, Jean-Paul Bordes, Eric Chantelot, et al.. Application des produits phytopharmaceutiques et protection des riverains : Synthèse des connaissances pour définir les distances de sécurité Membres du groupe de travail INRAE-Anses-ACTA. [Rapport de recherche] INRAE. 2020, 71 p. hal-02615232

HAL Id: hal-02615232

<https://hal.inrae.fr/hal-02615232>

Submitted on 25 May 2020

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.



Application des produits phytopharmaceutiques et protection des riverains : Synthèse des connaissances pour définir les distances de sécurité

Membres du groupe de travail INRAE-Anses-ACTA :
Bedos C., Douzals J.P., Barriuso E., Bordes J.P., Chantelot E., Cellier
P., Loubet B., Mercier T., Perriot B., Sine M., Verjux N., Verpont F.,
Huyghe C.

Avril 2020

Table des matières

1.	CONTEXTE GENERAL	5
1.1.	DE QUOI PARLE-T-ON ? QUELQUES ELEMENTS DE DEFINITION	5
1.2.	DETERMINANTS DES CONCENTRATIONS EN PESTICIDES DANS L'AIR A L'ECHELLE LOCALE	6
1.3.	ETABLISSEMENT DE DISTANCES DE SECURITE SOUS FORME DE ZONES NON TRAITEES.....	7
1.4.	CONTEXTE REGLEMENTAIRE : METHODOLOGIE D'EVALUATION DES RISQUES APPLICABLE AUX RIVERAINS	9
1.5.	OBJECTIFS DE CETTE NOTE	10
2.	AGROEQUIPEMENTS POUR L'APPLICATION DE PPP	11
2.1.	LA PRODUCTION DE GOUTTES PAR PULVERISATION.....	11
2.1.1.	<i>Principes d'atomisation et types de pulvérisation</i>	11
2.1.2.	<i>Les faiblesses de l'atomisation</i>	12
2.1.3.	<i>Du spray au pulvérisateur</i>	12
2.1.4.	<i>Les conditions à risques</i>	13
2.2.	LA CARACTERISATION DE L'EMISSION : MESURE DE LA DERIVE ET RETOUR D'EXPERIENCE	13
2.2.1.	<i>Dérive sédimentaire</i>	14
2.2.2.	<i>Dérive aérienne</i>	14
2.3.	LES MOYENS DE REDUCTION DE LA DERIVE	14
2.3.1.	<i>Adapter la taille des gouttes par le choix des buses</i>	14
2.3.2.	<i>L'assistance d'air</i>	16
2.3.3.	<i>Le confinement, le recyclage</i>	16
2.3.4.	<i>Gestion spécifique (spatialisée) des zones à risques (PWM, porte-buses à sélection automatique)</i> 16	
2.3.5.	<i>Principe de la combinaison de moyens limitant la dérive</i>	17
2.4.	LES ALTERNATIVES	17
2.4.1.	<i>Pulvérisation à poste fixe</i>	17
2.4.2.	<i>Micro-injection</i>	18
3.	AMENAGEMENTS DE L'ENVIRONNEMENT PARCELLAIRE	20
3.1.	LES AMENAGEMENTS EN BORDURE DE PARCELLE DANS LE CONTEXTE REGLEMENTAIRE NATIONAL	20
3.2.	QUELS SONT LES TYPES D'AMENAGEMENTS PRESENTANT UN INTERET VIS-A-VIS DE LA LIMITATION DE LA DERIVE ?.....	20
3.3.	QUELS SONT LES PARAMETRES AGISSANT SUR LA CAPACITE DES BARRIERES PHYSIQUES A REDUIRE LA VITESSE DU VENT ET A FILTRER LES PARTICULES ?.....	21
3.4.	TOUR D'HORIZON DES RESULTATS D'EFFICACITE POUVANT ETRE ATTENDUS SELON LE TYPE D'AMENAGEMENT PARCELLAIRE 22	
3.5.	LIMITES ACTUELLES POUR LA PRISE EN COMPTE DES BARRIERES PHYSIQUES	23
4.	DES ADJUVANTS POUR LA LIMITATION DE LA DERIVE	25
5.	CONDITIONS D'APPLICATION : INFLUENCE DU VENT ET DE L'HUMIDITE DE L'AIR	28
6.	DISPOSITIFS DISPONIBLES OU EN COURS D'ELABORATION POUR MESURER LA DERIVE LORS DE LA PULVERISATION ET LA VOLATILISATION EN POST-APPLICATION	32
6.1.	CONTEXTE.....	32
6.2.	MESURE DE LA DERIVE EN VITICULTURE.....	32
6.3.	MESURE DE LA DERIVE EN ARBORICULTURE	37
6.4.	MESURE DE LA DERIVE EN GRANDES CULTURES :	40
6.5.	DISPOSITIFS DE MESURES DES FLUX DE VOLATILISATION DE PPP	41
6.5.1.	<i>Un préalable : la mesure de concentrations dans l'air</i>	42
6.5.2.	<i>Méthodes de mesures de flux</i>	42

7.	BESOIN POUR LA RECHERCHE	44
7.1.	TRAVAUX DE RECHERCHE POUR REDUIRE L'EXPOSITION PAR DERIVE DES GOUTTES DE PULVERISATION.....	44
7.1.1.	– <i>Travaux à court terme</i>	44
7.1.2.	<i>Travaux à moyen/ long terme</i>	45
7.2.	TRAVAUX DE RECHERCHE POUR REDUIRE L'EXPOSITION AUX PPP EMIS PAR VOLATILISATION	46
7.2.1.	<i>Travaux à court/moyen terme</i>	46
7.2.2.	<i>Travaux à long terme</i>	46
7.3.	TRAVAUX DE RECHERCHE PORTANT SUR LES DEUX VOIES D'EXPOSITION	47
7.3.1.	<i>Travaux à court/moyen terme</i>	47
7.3.2.	<i>Travaux à moyen/long terme</i>	47
7.4.	CONCLUSION	48
8.	CONCLUSION GENERALE.....	50
9.	REFERENCES.....	52
10.	ANNEXES	55
10.1.	ANNEXE 1 : JEUX DE DONNEES ACQUIS EN CONDITIONS REELLES POUR QUANTIFIER LES EMISSIONS.....	55
10.2.	ANNEXE 2 : ETUDES EXISTANTES.....	56
10.2.1.	<i>Des études intégrées des voies de contamination de pesticides</i>	56
10.2.2.	<i>Des résultats qui montrent l'importance de la contamination aérienne locale</i>	56
10.2.3.	<i>Conclusion : quantifier la contamination par voie aérienne locale est une nécessité</i>	57
10.2.4.	<i>Corolaire : pour quantifier cette contamination il faut des méthodes fiables</i>	57
10.3.	ANNEXE 3 : MODELES EXISTANTS.....	59
10.3.1.	<i>Dérive des gouttes pendant l'application</i>	59
10.3.2.	<i>Volatilisation en post-application</i>	59
10.3.3.	<i>Dispersion atmosphérique à l'échelle locale</i>	60
10.4.	ANNEXE 4 : CONTEXTE REGLEMENTAIRE : DEFINITIONS, REQUIS REGLEMENTAIRES DANS LE CADRE DU REGLEMENT (CE) N°1107/2009 ET METHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES RISQUES APPLICABLE AUX PERSONNES PRESENTES ET AUX RESIDENTS.....	63
10.4.1.	<i>Définitions, requis réglementaires dans le cadre du règlement (CE) N°1107/2009</i>	63
10.4.2.	<i>Méthodologie d'évaluation des risques applicable aux personnes présentes et aux résidents</i>	64
10.4.3.	<i>Estimation de l'exposition totale des résidents et des personnes présentes (adultes et enfants) et évaluation des risques dans le cadre de la méthodologie EFSA</i>	65
10.5.	ANNEXE 5 : DETAILS DE TRAVAUX PREVUS A COURT TERME EN VITICULTURE.....	67

Listes de figures

Figure 1 : Comparaison de buses selon les protocoles sédimentaires et aériens XR : buse à jet plat standard ; XLTD : buse à jet plat antiderive. les mesures aériennes sont détaillées pour des plages de hauteur (0-1m ; 0-2m ; 0-3m) (Etude OBO : https://www.bestrijdingsmiddelen-omwonenden.nl/english).	8
Figure 2 : Distribution de taille des gouttes pour une buse standard (XR 110 04 – 3 bar, bleue) et une buse à dérive limitée (TDXL 110 04 – 3 bar, rouge). CLASSIFICATION DES TAILLES selon BCPC. Source INRAE.	11
Figure 3 : Schéma représentant l'effet d'une haie sur les écoulements d'air.	21
Figure 4 : Effet des adjuvants, du type de buse et de la formulation de phenmedipham sur la taille des gouttes. Actiob (Methylester de colza), BreakThru (Polyéther trisiloxane), SILWET L77 (HeptaMEthylTriSiloxane), Tensiofix D03 (Non ionique) (FF : jet plat, HC : cone creux, AI : induction d'air), (W : eau pure, SC : suspension concentrée, EC : emulsion concentrée) (AlHeidary et al., 2016, d'après Stainier et al., 2006).	25
Figure 5 : effet de l'adjuvant GONDOR 0,25% sur la réduction de dérive de deux herbicides (AsteroidE et Lontrel) par rapport à de l'eau. Source Desangosse Etude Decembre 2018.	26
Figure 6 : Taux de réduction de dérive potentielle basé sur le V100 (% du volume de bouillie pulvérisée dont les particules ont un diamètre < 100 µm) relativement à la référence Albuz Yellow avec de l'eau (van de Zande et al., 2008).	27
Figure 7 : Influence de la vitesse de vent moyen sur les dépôts en bordure de parcelle (grandes cultures) Mesurées (symboles) et simulées (lignes continues) à l'aide du modèle IDEFICS (Holterman et al., 1997).	28
Figure 8 : dérive sédimentaire (zone 4 à 6 m sous le vent) d'un pulvérisateur de référence mesurée en arboriculture en fonction de l'intensité moyenne du vent (Holterman et al. 2018).	29
Figure 9 : cinétiques d'évaporation de gouttes d'eau selon la température, l'humidité et la taille initiale des gouttes (d'après Holterman, 2003).	30
Figure 10 : Vue de dessus schématique du banc d'essai EoleDrift.	33
Figure 11 : Mur de ventilation	34
Figure 12 : Cartographie par simulation numérique de la proportion de la vitesse de vent débitée par les ventilateurs en vigueur dans un plan vertical parallèle au soufflage (CSTB).	34
Figure 13 : Vigne artificielle	35
Figure 14 : Représentation schématique de réseau de capteurs météorologiques implantés sur la plateforme du banc d'essai EoleDrift, pour le contrôle de la conformité des conditions de mesure et la traçabilité des essais.	36
Figure 15 : Courbes de dérive sédimentaire et aérienne mesurées.	39
Figure 16 : Taux de dérive d'une buse 110 03 à 3 bar et 50 cm de haut comparée au 1/3 d'une buse de référence (110 02 à 2,5 bar).	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des gouttes de buses à fente standard (XR) ou à induction d'air (TDXL). Source INRAE.	12
Tableau 2 : Types de buses commercialisés en grandes cultures et conditions d'emploi. Valeurs issues de la classification des tailles de gouttes du BCPC (1985), données à titre indicatif et ne constituant pas une description précise du spectre de chaque buse et de leur qualité de répartition.	15
Tableau 3 : Relation entre pourcentage et facteur de réduction de dérive	17
Tableau 4: % de dérive de la pulvérisation de référence et de PulVéFix en milieu de végétation.	18
Tableau 5 : efficacités des haies végétales sur la limitation de la dérive en arboriculture, viticulture, cultures basses.	22
Tableau 6 : Efficacité des filets verticaux sur la limitation de la dérive en arboriculture, viticulture et cultures basses.	23
Tableau 7 : moyens de réduction de dérive adoptés selon la culture et le pays (communication L. Warangot DGAL 2018).	24
Tableau 8 : Pourcentage de réduction de dérive obtenue par 3 adjuvants mesurée d'après l'évolution du V100. Source : De Sangosse, Etude 2020.	26
Tableau 9 : Fréquence des vitesses de vents (toutes directions) sur quelques stations.	29
Tableau 10 : contraintes du protocole ISO22866 de mesure de dérive aérienne et intérêts d'un protocole simplifié.	37

Liste des photos

<i>Photo 1 : Atomisation induite par la pression - buse à jet plat D'après Kooij et al. (2018).</i>	11
<i>Photo 2 : Orientation des sprays et risques.</i>	13
<i>Photo 3 : étude de dérive aérienne avec vent artificiel photo INRAE.</i>	14
<i>Photo 4 : Pulvérisateur équipé de l'assistance d'air « TWIN ». Copyright : HARDI-EVRARD.</i>	16
<i>Photo 5: exemple de rose des vents sur une période de 20 ans - site de Colmar.</i>	31
<i>Photo 6 : Réalisation des premiers essais de mesure de la dérive sur EoleDrift - utilisation du banc en début de végétation.</i>	36
<i>Photo 7 : Réalisation des premiers essais de mesure de la dérive sur EoleDrift - utilisation du banc sur un stade de pleine végétation.</i>	37
<i>Photo 8 : prototype d'une bordure du verger artificiel (gauche) et banc feuille (droite) (INRAE)</i>	39
<i>Photo 9 : vue d'ensemble du tunnel de dérive de Boigneville composé d'une soufflerie, d'une zone de transfert et d'un filtre.</i>	40
<i>Photo 10: vue d'ensemble de la buse en test et des éprouvettes recueillant le liquide pulvérisé.</i>	41
<i>Photo 11 : Systèmes en laboratoire : (gauche et milieu) deux systèmes de l'UMR INRAE Ecosys, (droite) système du RLP AgroScience GmbH.</i>	42
<i>Photo 12 : Systèmes de tunnels de ventilation : (gauche) un des 7 tunnels de l'UMR INRAE Ecosys, (droite) tunnel du RLP AgroScience GmbH.</i>	43
<i>Photo 13 : Mesures au champ : (Gauche) Systèmes de prélèvements d'air, (droite) mât micrométéorologique</i>	43

1. CONTEXTE GENERAL

1.1. De quoi parle-t-on ? Quelques éléments de définition

La question de la présence de produits phytopharmaceutiques (PPP) dans l'atmosphère et ses conséquences a émergé dans le débat public dans le domaine de la recherche et de l'expertise (cf. par exemple l'Expertise scientifique collective INRA Cemagref, Aubertot et al., 2005) et plus récemment depuis le milieu des années 2010 dans l'opinion publique. Cette question recouvre la problématique de la contamination de l'air par les PPP et les conséquences sur l'exposition des populations à deux échelles :

- La contamination de l'air ambiant par les PPP, c'est-à-dire la présence de PPP sous forme gazeuse ou particulaire (aérosols, gouttes de pulvérisation), résulte de la dispersion atmosphérique pendant l'application et de la volatilisation depuis la surface traitée après l'application. Les PPP gazeux peuvent réagir avec d'autres composants atmosphériques et être incorporés dans les aérosols. La présence des PPP dans l'atmosphère est traitée depuis les années 90 par la recherche (universités, ENSP, INRA, Cemagref/Irstea, CNRS). Certaines AASQA¹ ont mis en place dès les années 2000 des campagnes de mesure des PPP dans l'air à l'échelle régionale montrant la contamination de l'atmosphère par de nombreuses molécules. Cette contamination est générale, tant en zones rurales qu'en zones urbaines, avec une signature des pratiques agricoles (cf la base de données PhytAtmo mise à disposition par les AASQA). L'échelle pertinente pour la caractérisation de la contamination de l'air par les PPP va de la région, voire petite région (ex : zones de vignobles), à l'échelle nationale voire transfrontalière. Cette problématique est actuellement prise en charge par l'ANSES via les AASQA et le LCSQA² (Ineris), notamment dans le cadre de la campagne nationale exploratoire lancée en 2018 (CNEP³). Elle vise à évaluer *in fine* l'exposition de la population générale à la présence de PPP dans l'atmosphère via les mesures de concentrations dans l'air sur un cycle annuel et spatialement réparties sur le territoire (métropole et DROM) et ce avec une méthodologie harmonisée (en termes de composés recherchés et de méthode de prélèvement et d'analyse). Des actions de recherche complètent ce type d'actions, impliquant les établissements de recherche et certains acteurs professionnels (instituts techniques agricoles, chambres d'agriculture, AASQA) ;
- L'exposition des riverains (populations à proximité des parcelles traitées) des zones agricoles, dans un contexte de contact entre les zones agricoles et les zones résidentielles, les zones scolaires ou les zones d'activité. Cette exposition est attachée à la présence des PPP dans l'air avec une dynamique des niveaux des concentrations propres aux mécanismes impliqués sur de courtes distances depuis la zone d'épandage. Le plus connu et mis en question est celui de la dérive des gouttes de pulvérisation, ainsi que du PPP qui peut s'en évaporer, portées par le vent depuis le champ où est effectué un traitement vers les zones habitées. On est ici sur des laps de temps courts, de l'ordre de quelques minutes pendant et après l'application, avec des niveaux de concentration potentiellement importants. Le second mécanisme est celui de la volatilisation du PPP depuis la plante ou le sol après l'application. On est ici sur des périodes de quelques heures à quelques semaines selon les caractéristiques des PPP, avec une grande variabilité dans les valeurs d'émission. Dans les deux cas, la décroissance des concentrations en gouttes, aérosols solide ou gaz est très rapide dès qu'on s'éloigne de la source (rampe de pulvérisation ou bord du champ traité). La distance est donc une variable déterminante de la concentration. Des campagnes de mesures sont également programmées au niveau national, avec un pilotage par Santé publique France (SpF) et l'Anses pour évaluer cette exposition des riverains (campagne PestiRiv à venir).

La présente note est focalisée sur cette problématique d'exposition des riverains. Elle aborde les questions de la dérive des gouttes au moment de la pulvérisation des PPP et de la volatilisation en post-application, pour analyser les moyens de les limiter sur la base des distances entre les parcelles traitées

¹ Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air

² Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

³ Campagne Nationale Exploratoire de surveillance des Pesticides

et les riverains. Comme on vient de le mentionner, ces sources de PPP vers l'atmosphère ont des temporalités très différentes : la dérive a lieu pendant la durée du traitement alors que la volatilisation a lieu en post-application sur des durées de quelques heures à quelques semaines. De plus, la volatilisation présente en général un cycle diurne (minimum la nuit) et peut durer plus ou moins longtemps selon les composés et les conditions ambiantes, générant toutefois des niveaux de concentrations généralement bien moindres.

Concernant la dérive, il faut également rappeler que sous un même processus cette notion recouvre deux concepts, ayant certes pour origine le même phénomène, mais faisant appel à des protocoles différents pour répondre aux besoins distincts de protection des milieux et des populations :

- La dérive dite « sédimentaire », correspondant aux dépôts au sol de gouttes de pulvérisation au-delà des limites du champ traité. C'est cette dérive qui est concernée lorsqu'on s'intéresse aux risques de contamination des eaux de surface et qui a donné lieu, comme mesure de gestion des risques, à la mise en place de bandes enherbées le long des cours d'eau ou des fossés avec présence d'eau permanente (Arrêtés du 12 Septembre 2006 puis du 4 Mai 2017). Elle peut aussi concerner les risques d'exposition pour les riverains par contact, en bordure de champ ;
- La dérive dite « aérienne » qui correspond aux gouttes de pulvérisation transportées par le vent en dehors de la zone d'application ainsi qu'aux gaz issus de la volatilisation du composé depuis la goutte, et qui peuvent se déposer sur la végétation avoisinante (haies, brise-vent, forêts ...) ou être inhalées par des êtres vivants (oiseaux, insectes, mammifères, dont l'homme) et, dans les deux cas, générer des impacts.

1.2. Déterminants des concentrations en pesticides dans l'air à l'échelle locale

La concentration en PPP en un point d'intérêt en dehors d'une parcelle agricole dépend de l'intensité et des caractéristiques de la source d'émission, des caractéristiques de transfert atmosphérique entre la source et le point d'intérêt et de la présence éventuelle d'obstacles entre ces deux points.

Les facteurs conditionnant l'intensité de ces sources concernant la dérive et la volatilisation en post-application sont différents :

- La dérive dépend du matériel utilisé (pulvérisateur, pression, buses), des co-formulants présents dans le produit formulé et des éventuels adjuvants ajoutés en extemporané, de la culture traitée (développement, hauteur, porosité) et des conditions de vent et de déficit de pression de vapeur de l'air au moment du traitement. Quantitativement, la dérive peut être très différente d'une situation à une autre (notamment en fonction des types de cultures – haute vs basse) ;
- La volatilisation dépend des propriétés physicochimiques de la matière active, de la nature de la surface traitée (sol nu, mulch, couvert végétal), de la formulation, des conditions météorologiques et pédologiques. La volatilisation peut être très variable selon les composés – de négligeable à plusieurs % de la dose appliquée pour les cas les plus défavorables.

Ces différences expliquent le fait que les leviers d'action pour limiter la dérive ou la volatilisation vont être de natures différentes : des préconisations sur les caractéristiques du matériel utilisé, y compris des systèmes qualifiés « antidérive » et des plages de conditions météorologiques (vent, humidité) sont proposées pour limiter la dérive aérienne, alors que la limitation de la volatilisation va porter sur d'autres leviers comme les caractéristiques physicochimiques des produits ou l'incorporation au sol quand cela est possible. Pour l'instant, les solutions techniques pour limiter la volatilisation sont moins nombreuses que pour la dérive.

Une fois les PPP émis dans l'atmosphère, leur transfert à différentes distances et à différents instants sous différentes formes (gaz, gouttes, particules) (et donc leur dépôt ou leur risque d'inhalation) dépend, des conditions météorologiques locales, qui vont déterminer la dispersion et le transport atmosphérique des PPP, de l'occupation des sols environnants, mais également de l'état de ces PPP dans l'atmosphère et de leur potentiel de dégradation (par exemple par photochimie). Ainsi, la décroissance des concentrations en PPP dans l'atmosphère avec la distance à la source (*i.e.* la parcelle traitée) est-elle directement liée à :

- l'état du composé dans l'air (gaz, gouttes ou particules), avec une décroissance des concentrations plus rapide pour les grosses particules (en raison d'une vitesse de sédimentation

plus forte) que pour les gaz ou les particules fines. Ainsi, la fraction grossière des gouttes va-t-elle se déposer à proximité de la surface traitée (typiquement moins de quelques dizaines de mètres) alors que la fraction fine de ces gouttes et les gaz peuvent générer des niveaux des dépôts et des concentrations résiduelles dans la basse atmosphère jusqu'à plusieurs centaines de mètres. A noter que la taille des gouttes évolue dans l'atmosphère par évaporation et que la fraction fine sera donc plus abondante par des conditions de faible hygrométrie ;

- la « capacité de dilution » du compartiment atmosphérique et donc la vitesse du vent et la turbulence. La turbulence dépend de la vitesse du vent, de la rugosité de la zone étudiée (une forte rugosité engendre plus de dispersion, donc de dilution) et du niveau de stratification thermique de la couche limite de surface : les conditions stables, nocturnes, engendrent moins de dilution que les conditions instables ou neutres de jour. A noter que pour les gaz, même si les conditions nocturnes stables limitent les émissions par volatilisation car la température de surface est plus basse, les produits émis restent concentrés dans les premiers mètres au-dessus du sol car la dispersion dans l'atmosphère est plus faible ;
- l'ensemble des processus qui peuvent engendrer une décroissance additionnelle des concentrations dans l'air : dégradation chimique ou photochimique dans l'air (souvent négligeable à courte distance au vu des laps de temps concernés) et dépôt sur la végétation ou le sol ;
- la présence de haies ou d'obstacles artificiels, qui modifie les conditions de turbulence et peut intercepter une fraction importante des composés (gouttes, particules, gaz). La turbulence induite par la haie favorise la dispersion, donc diminue l'exposition locale en aval, sauf très localement derrière la haie où la turbulence peut être diminuée et où les particules et gaz peuvent s'accumuler et induire des dépôts élevés. En général, il a été trouvé pour les polluants atmosphériques que l'effet d'interception est globalement très efficace pour la fraction grossière mais négligeable pour la fraction fine (quelques microns à quelques dizaines de microns) et pour les gaz.

Comme on le verra plus loin dans cette note, un nombre relativement limité de jeux de données (Annexe 10.1) existent pour analyser et quantifier ces processus et leurs effets. Ils restent assez disparates, ne couvrent pas toutes les gammes de situations et ne permettent pas d'avoir une vision définitive sur l'efficacité des leviers d'actions. Cependant, deux études récentes réalisées en Europe ont caractérisé les voies d'exposition des riverains de parcelles agricoles (cultures basses) et l'influence de certains moyens de réduction des risques (Annexe 10.2 ; Vermeulen *et al.*, 2019 ; Ruthy *et al.* ; 2019) ; nous pourrions également citer le projet européen Browse (Butler-Elis *et al.*, 2017).

Relevant d'une autre approche, la modélisation est une manière d'analyser les interactions entre les différents facteurs d'influence et de tester quantitativement de possibles moyens de limitation de l'exposition. Des modèles existent d'ores et déjà (Guiral *et al.*, 2016), dont certains utilisés pour l'évaluation des risques des PPP (voir annexe 10.3). Cependant d'autres modèles prenant en compte les mécanismes pourraient être mobilisés pour étudier plus finement les processus d'émission et de transferts de PPP, ainsi que le potentiel de certaines pratiques et aménagements pour la réduction des transferts atmosphériques des PPP.

1.3. Etablissement de distances de sécurité sous forme de Zones Non Traitées

Compte tenu de la décroissance rapide des concentrations dans l'atmosphère lorsqu'on s'éloigne de la source d'émission, introduire une distance de sécurité sous la forme d'une Zone Non Traitée (ZNT) permet d'éloigner la source de la localisation de l'organisme à protéger et de diminuer les niveaux de concentrations auxquels cet organisme est exposé. Il s'agit d'une mesure de gestion classiquement utilisée lors de l'évaluation des risques pour la délivrance des autorisations de mise sur le marché (AMM) lorsqu'une situation de référence correspond à un pire cas réaliste.

L'origine des ZNT réside dans la prise en compte de la dérive sédimentaire pour limiter la contamination des eaux de surface. Cela consiste à évaluer les dépôts au sol qui décroissent avec la distance, selon un modèle de type « dérive = $A \times (\text{distance})^B$ » ; où A et B sont des coefficients déterminés pour chaque type de culture (Rautmann *et al.*, 2001). La réduction du risque est donc basée sur la définition de distances de retrait. Sur ces bases, la préservation de la qualité des eaux de surface a été à l'origine de la mise en place de ZNT sous forme de bandes enherbées/végétalisées, éventuellement combinées à des dispositifs (ex. buses, panneaux récupérateurs) réducteurs de dérive (directive cadre sur l'eau ou

DCE, 2000). Trois éléments sont pris en compte pour déterminer la largeur des ZNT : 1) la toxicité intrinsèque du produit qui va entraîner en pratique une « ZNT produit » variable, de 5 à 20 m, au bord des cours d'eau, 2) la culture (développement, hauteur), au travers du matériel « type » utilisé pour le traitement, caractérisée par des courbes génériques de dérive sédimentaire notamment pour les cultures basses, la viticulture et l'arboriculture, et 3) des équipements matériels spécifiques ou complémentaires pour limiter la dérive. Un abattement de la dérive par un équipement antidérive permet de réduire la ZNT par rapport à un équipement de traitement de référence en diminuant la distance de « ZNT pratique ». Ceci permet de calculer des « ZNT équivalentes ». Par exemple, un traitement avec un équipement classique nécessitant une ZNT de 20 m peut être mené avec une ZNT réduite à 5 m s'il utilise un équipement antidérive ayant un facteur d'abattement de 66%. La détermination des « ZNT pratiques » pour la réalisation du traitement est donc indissociable du produit et du matériel de traitement utilisé.

Cette démarche, déjà appliquée à la dérive sédimentaire pour la protection des eaux de surface, est envisageable pour déterminer les ZNT liées à la protection des riverains vis-à-vis de la dérive aérienne en combinant :

- la performance de matériels antidérive : notamment la granulométrie et la vitesse et la trajectoire des gouttes à la sortie des buses ;
- des pratiques spécifiques comme la suppression de l'assistance d'air (en vigne, arboriculture) voire la suppression de la pulvérisation dans les rangs en bord de parcelle ;
- des structures physiques de protection (filets brise vent, filets insect-proof, haies) entre la zone épanchée et les zones habitées.

Peu d'études ont porté sur la transposition des performances de réduction de dérive entre dérive sédimentaire et dérive aérienne et les protocoles pour chacune sont parfois différents. Cependant elles convergent toutes vers un même principe d'équivalence entre les taux de réduction pour un même moyen. La Figure 1 présente la mesure comparée de dérive aérienne et sédimentaire à différentes distances sous le vent pour une buse de référence (XR) et une buse qualifiée antidérive à 75% (XLTD) aux Pays Bas dans le cas d'un traitement de cultures basses avec un appareil à rampe. On note que si les valeurs obtenues à une même distance sont différentes pour les deux types de dérive (protocole différent), le ratio de réduction de dérive entre les deux buses est conservé entre protocoles et ceci pour différentes distances. Cette même figure illustre également les différences quantitatives entre les deux protocoles en fonction de la distance.

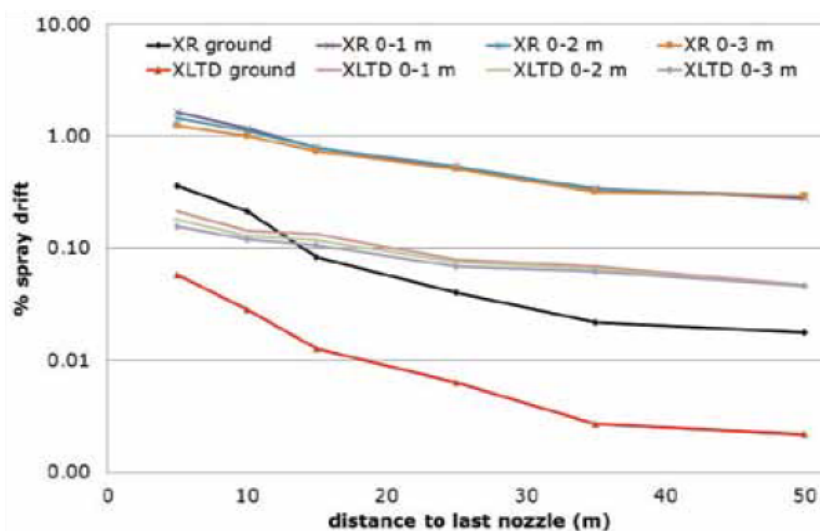


FIGURE 1 : COMPARAISON DE BUSES SELON LES PROTOCOLES SEDIMENTAIRES ET AERIENS XR : BUSE A JET PLAT STANDARD ; XLTD : BUSE A JET PLAT ANTIDERIVE. LES MESURES AERIENNES SONT DETAILLEES POUR DES PLAGES DE HAUTEUR (0-1M ; 0-2M ; 0-3M) (ETUDE OBO : [HTTPS://WWW.BESTRIJDINGSMIDDELEN-OMWONENDEN.NL/ENGLISH](https://www.bestrijdingsmiddelen-omwonenden.nl/english)).

Ce ratio est donc en partie une déclinaison du principe d'abattement de la dérive sédimentaire à la dérive aérienne, mettant bien en exergue les spécificités de la dérive aérienne. Cette partie est

complétée par la prise en compte de la volatilisation post-application dans l'exposition au sein des zones proches depuis la limite de la ZNT.

1.4. Contexte réglementaire : méthodologie d'évaluation des risques applicable aux riverains

L'estimation de l'exposition des **riverains** (terme englobant les personnes présentes et les résidents de proximité) est requise dans le cadre des demandes d'autorisation de mise sur le marché (AMM) des PPP. Le Règlement d'exécution (UE) n°284/2013 introduit la définition des résidents conjointement à celle préexistante des personnes présentes.

- **personnes présentes** les personnes qui se trouvent fortuitement dans un espace où un produit phytopharmaceutique est ou a été appliqué, ou dans un espace adjacent, à une fin autre que celle de travailler dans l'espace traité ou avec le produit traité ;
- **les résidents** sont des personnes qui habitent, travaillent ou fréquentent une institution à proximité des espaces traités avec des produits phytopharmaceutiques, à une fin autre que celle de travailler dans l'espace traité ou avec les produits traités.

Dans ce même Règlement, il est écrit : « Une estimation de l'exposition des personnes présentes et des résidents doit être faite pour chaque type de méthode d'application pertinent. Des informations spécifiques incluant la dose totale et la concentration de pulvérisation maximales doivent être incluses. L'estimation doit se fonder sur l'hypothèse selon laquelle les personnes présentes et les résidents ne portent aucun équipement de protection individuelle. »

La méthodologie actuellement utilisée dans le cadre de l'évaluation des dossiers de demande d'autorisation de mise sur le marché de produits phytopharmaceutiques est basée sur le document guide de l'EFSA (EFSA, 2014)⁴ et la note de la Commission⁵. En ce qui concerne les riverains, le document guide de l'EFSA décrit actuellement une méthodologie d'évaluation s'appliquant uniquement à un mode d'application par pulvérisation qui est celui qui nous concerne ici.

Dans le cadre de la méthodologie de l'EFSA, quatre voies d'exposition sont prises en considération pour l'évaluation de l'exposition des riverains :

- la dérive de pulvérisation au moment de l'application du produit ;
- les émissions de vapeurs qui peuvent se produire après l'application du produit ;
- le contact avec une surface contaminée (en dehors des cultures traitées) ;
- le contact lors de la rentrée dans les cultures traitées.

Le cas qui nous intéresse ici considèrera explicitement les trois premières que cela soit par voie inhalée ou cutanée.

La description complète des modalités de l'évaluation figure en Annexe 10.4. Les éléments qu'elle fournit présentent un résumé de la démarche mise en œuvre pour réaliser l'évaluation du risque pour les riverains, qui est basée sur un certain nombre de volets s'appuyant sur les informations et les outils disponibles à un moment donné, issus d'un consensus européen permettant une uniformisation des procédures entre états membres. C'est une démarche qui peut cependant comporter des limites et être adaptée pour y intégrer les nouvelles informations et les nouveaux outils disponibles. Cette analyse constitue par ailleurs un puissant moteur pour inciter des recherches et mobiliser des équipes pour proposer et valoriser des avancées.

Il est à noter que l'EFSA a engagé des travaux relatifs à l'actualisation du document-guide sur l'estimation des expositions des opérateurs, travailleurs, personnes présentes et résidents.

⁴ Guidance of EFSA. Guidance of the assessment of exposure for Operators, Workers, Residents and Bystanders in risk assessment for plant protection Products. EFSA, 2014.

⁵COMMISSION GUIDANCE DOCUMENT. SANTE-10832-2015 rev. 1.7. 24 January 2017. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment for plant protection products.

1.5. Objectifs de cette note

Afin de protéger les riverains, des distances non traitées ont été proposées dans le cadre d'un arrêté sur les distances minimales de sécurité et sur les mesures apportant des garanties équivalentes, par la mise en œuvre d'un ou plusieurs moyens réduisant les risques d'exposition à la dérive (Arrêté du 27 Décembre 2019). En absence de distance de sécurité spécifique fixée par l'AMM, une distance minimale de 20 m est requise pour les produits comportant une mention de danger (toxicité). Pour les produits à faible risque (sans phrase de toxicité), ces distances sont de 10 m (arboriculture, viticulture, arbres et arbustes, forêt, petits fruits et cultures ornementales de plus de 50 cm de hauteur, bananiers, houblon) et de 5 m (pour les autres utilisations agricoles et non agricoles). Ces distances peuvent être réduites à 3 m en cultures basses, à 5 m ou 3 m en viticulture et 5 m en arboriculture grâce à la mise en œuvre d'un ou plusieurs moyens permettant de maîtriser le risque d'exposition des riverains (buses antidérive, panneaux récupérateurs, barrières physiques en bord de parcelle, aménagements parcellaires, conditions d'utilisation sur les rangs de bordures, ...). Les matériels permettant d'atteindre les niveaux de réduction de la dérive sont énumérés dans une liste publiée au Bulletin officiel du ministère chargé de l'agriculture et régulièrement mise à jour.

L'objectif de la présente note est d'identifier, au vu des processus concernés qui mènent à l'exposition des riverains par les voies évoquées précédemment (dérive et volatilisation post-application), d'une part les risques liés à la proximité des applications de PPP et, d'autre part les mesures et les aménagements qui permettraient de réduire ces risques. Ceci suppose d'identifier et proposer des moyens permettant de réduire les concentrations en PPP dans l'atmosphère sous leurs différentes formes à ces distances, à partir de l'analyse des connaissances techniques et scientifiques, des données (existantes ou à acquérir) et des modèles (existants ou à mobiliser). Pour fonder ces propositions, nous analysons dans un premier temps les déterminants de l'exposition en dehors de la parcelle, à proximité des applications de PPP, incluant à la fois l'influence des matériels de pulvérisation (chapitre 2), les effets de la présence possible d'aménagements entre les zones épanchées et les zones riveraines (chapitre 3), l'effet de l'utilisation des adjuvants (chapitre 4), les conditions d'application (chapitre 5), les dispositifs existants pour mesurer la dérive lors de la pulvérisation et la volatilisation (chapitre 6). Cette analyse débouche enfin (chapitre 7) sur l'identification de pistes de recherche et de données à acquérir.

2. AGROEQUIPEMENTS POUR L'APPLICATION DE PPP

2.1. La production de gouttes par pulvérisation

La pulvérisation est le moyen couramment utilisé pour appliquer des produits de protection des plantes sous forme liquide. Elle consiste à atomiser une bouillie phytosanitaire à partir de buses ou de diffuseurs, à transporter ces gouttes et à les répartir sur les cibles.

2.1.1. Principes d'atomisation et types de pulvérisation

Parmi les différents principes d'atomisation existants, l'atomisation induite par la pression à travers un orifice reste la plus courante en agriculture notamment rencontrée avec les buses à fente, buses miroir ou buses à turbulence. Simple de conception, elle permet de générer des gouttes après la rupture d'une veine liquide en filaments puis de filaments en gouttes (PHOTO 1) (Kooij *et al.*, 2018).

La présence d'un Venturi et d'une chambre de mélange caractérise les buses à induction d'air entraînant la production de gouttes plus grosses (Nuyttens *et al.*, 2007). Les atomiseurs pneumatiques utilisent l'énergie de l'air à haute vitesse pour fragmenter par cisaillement un jet liquide et ont des capacités limitées de faire varier la taille des gouttes (Womac *et al.*, 1998) ; la nécessité d'un flux d'air important classe ces appareils parmi les techniques générant potentiellement une dérive importante. Enfin, les atomiseurs centrifuges génèrent des gouttes fines mais relativement calibrées en diamètre grâce à un plateau rotatif (Tate et Marshall, 1953).



PHOTO 1 : ATOMISATION INDUITE PAR LA PRESSION - BUSE A JET PLAT D'APRES KOOIJ ET AL. (2018).

Les tailles de gouttes de deux buses (standard à fente et à induction d'air) sont distribuées selon le diamètre (Figure 2) et sont classées selon différentes catégories d'après la classification du British Crop Protection Council (BCPC). Les gouttes de diamètre inférieur à 150 μm sont particulièrement sensibles à la dérive ; les gouttes de diamètre supérieur à 600 μm , quant à elles, peuvent entraîner des pertes par ruissellement sur les feuilles. Le Tableau 1 indique les principales caractéristiques granulométriques déduites de la Figure 2.

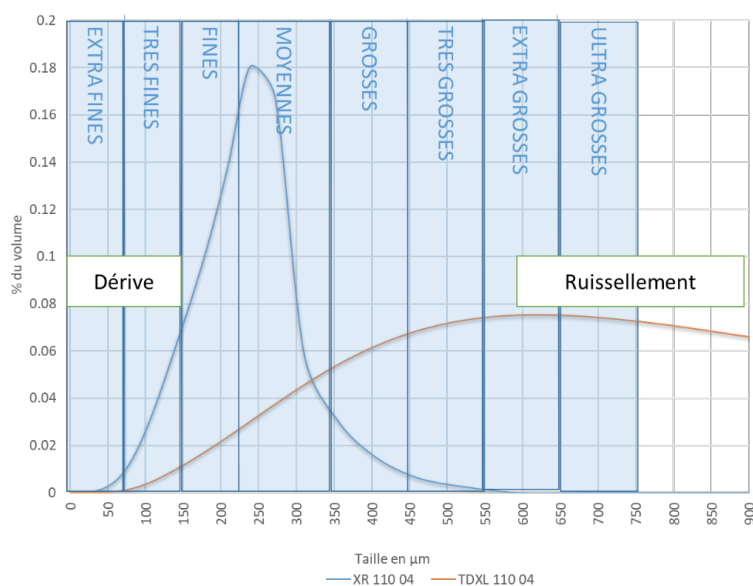


FIGURE 2 : DISTRIBUTION DE TAILLE DES GOUTTES POUR UNE BUSE STANDARD (XR 110 04 – 3 BAR, BLEUE) ET UNE BUSE A DERIVE LIMITEE (TDXL 110 04 – 3 BAR, ROUGE). CLASSIFICATION DES TAILLES SELON BCPC. SOURCE INRAE.

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES GOUTTES DE BUSES A FENTE STANDARD (XR) OU A INDUCTION D’AIR (TDXL). SOURCE INRAE.

Paramètre	Teejet XR04 3 bar	Agrotop TDXL 04 3 bar
Distance à la buse (cm)	50	50
Dv50 ou VMD (µm)	215	565
Dv10 (µm)	108	224
Dv90 (µm)	374	1283
%V<100 µm	3.3%	0.5%
%V<150 µm	8.3%	1.4%

Dv50 : 50% du volume est occupé par des gouttes de diamètre inférieur (appelé aussi Volume Median Diameter (VMD))

Dv10 : 10% du volume est occupé par des gouttes de diamètre inférieur

Dv90 : 90% du volume est occupé par des gouttes de diamètre inférieur

%V<100 µm : fraction du volume total occupé par des gouttes de diamètre inférieur à 100 µm

Les données granulométriques présentées dans la Figure 2 et Tableau 1 montrent d'une part un spectre relativement étroit de diamètres centré sur des tailles moyennes (buse XR 04) et d'autre part que l'augmentation du diamètre médian pour la buse TDXL ne se fait qu'au prix d'un élargissement important de la distribution vers des gouttes extrêmement grosses. Le risque de ruissellement des grosses gouttes est toutefois limité car ces dernières ont une plus forte propension à l'éclatement en plusieurs fractions lors du contact avec la cible. Une fine goutte rapide sera sensible au rebond ou à l'adhésion directe selon le régime de contact dépendant de la taille et vitesses des gouttes, de la formulation du produit et de l'hydrophobicité des feuilles (Massinon *et al.*, 2017)

2.1.2. Les faiblesses de l'atomisation

i. Dépendance débit / pression / taille de goutte

Une buse est principalement constituée d'un orifice agissant à la fois pour la calibration du débit et pour la définition de la forme du jet. Une modification de la pression d'injection entraîne une modification analogue du débit (donc par exemple de la dose appliquée) mais entraîne également une modification inverse de la taille des gouttes. Pour une buse à fente, les facteurs internes à la buse influençant la taille des gouttes sont la taille de l'orifice (calibre de la buse) et l'angle du spray (Alheidray *et al.*, 2014).

ii. Energie cinétique des gouttes et distance à la cible

Selon la pression d'injection, les gouttes générées disposent d'une énergie cinétique qui se dissipe du fait des frottements dans l'air d'autant plus rapidement que le diamètre est petit ; le rapport surface de contact/volume ou poids étant plus défavorable (Cornacchia *et al.*, 2020). La perte de diamètre due à l'évaporation des gouttes dans l'atmosphère renforce ce phénomène (Kincaid et Langley, 1989) (voir également Chapitre 5. Conditions d'application). Lorsqu'une goutte n'a plus d'énergie propre et un diamètre relativement faible pour ne pas sédimenter naturellement, elle peut contribuer à la dérive aérienne si les conditions de vent ou de stabilité sont favorables.

2.1.3. Du spray au pulvérisateur

Mis à part les appareils portatifs, les sprays sont rarement appliqués isolément mais plusieurs sprays sont associés au sein d'une rampe horizontale ou verticale au niveau de laquelle les principales grandeurs d'influence sont réglées (hauteur, pression et vitesse d'avancement).

i. Cultures basses

En cultures basses, le principal type d'appareil est muni d'une rampe horizontale. Les buses, orientées vers le bas, sont régulièrement espacées (souvent 50 cm en Europe) et chacune couvrant une zone de

150 cm pour une buse à fente de 110° d'angle avec une distribution de forme triangulaire et située à 50 cm de la cible. Dans ces conditions, une zone cible est donc pulvérisée par au moins 3 buses différentes, assurant ainsi un recouvrement correct. Lorsque la pulvérisation se fait uniquement par des buses, on parle de pulvérisation en « jet projeté ».

ii. Cultures hautes

Dans le cas des cultures hautes (viticulture, arboriculture), les buses ou atomiseurs sont orientés vers le côté ou en oblique vers le haut. Afin d'accéder à des cibles lointaines et de renforcer la pénétration des gouttes dans le feuillage, les sprays produits par des buses sont souvent placés dans un flux d'air pouvant atteindre 200 km h⁻¹ et la pulvérisation se fait alors en « jet porté ». En l'absence de buse, l'atomisation peut se faire par des diffuseurs et on parle alors de « pulvérisation pneumatique ».

2.1.4. Les conditions à risques

i. Les limites de la balistique

La vitesse initiale des gouttes générées par des buses agricoles, de l'ordre de 6 à 10 m s⁻¹) se dissipe rapidement au-delà d'une distance d'environ 50 cm selon les conditions de pression et du type de spray. Ce phénomène est atténué si on pulvérise vers le bas (cas des appareils à rampe pour cultures basses) mais peut être accentué sur les appareils en jet projeté horizontal ou oblique. Un transport sur des distances plus importantes ou à travers une végétation dense est rendu possible avec un flux d'air (appareils à jets portés cités plus haut). Il est cependant difficile de maîtriser correctement les conséquences de ce flux d'air à haute vitesse en absence de végétation ou dans le cas de faibles densités de végétation (PHOTO 2, Source Sprayers101.com).

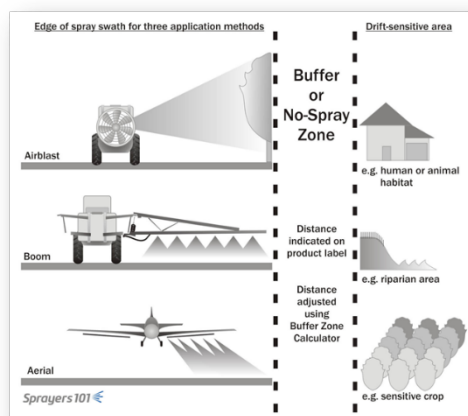


PHOTO 2 : ORIENTATION DES SPRAYS ET RISQUES.

ii. Les conditions atmosphériques

Compte tenu de leur faible masse, les trajectoires des gouttes sont fortement dépendantes de l'orientation du flux d'air qui les transporte (turbulences) et des conditions de stabilité atmosphérique. Ainsi que mentionné dans le paragraphe introductif, par vent faible, des mouvements de convection atmosphérique peuvent engendrer des transferts de bouillie en toute proximité de la parcelle traitée (Gil et Sinfort, 2005) et par vent fort, les transferts ont lieu par transport horizontal sur de plus grandes distances.

2.2. La caractérisation de l'émission : mesure de la dérive et retour d'expérience

La dérive correspond à la fraction liquide pulvérisée qui n'atteint pas la cible sous l'effet du vent au moment de l'application (ISO 22866, 2005). Bien que largement utilisée pour des raisons de gestion du risque écotoxicologique, cette définition est relativement imprécise dans le temps et dans l'espace. La norme ISO 22866 décrit d'une part les conditions de vents acceptables *dans la seule situation où le vent est perpendiculaire à l'application* et d'autre part les principes d'échantillonnage au bord de la parcelle traitée. Deux types d'échantillonnage sont considérés pour quantifier l'un, la dérive sédimentaire au sol, et l'autre, la dérive aérienne au-dessus du sol. D'autres méthodes simplifiées ont été développées pour l'étude de la dérive en conditions contrôlées à travers les normes ISO 22856, 2008 (évaluation de la dérive potentielle de sprays en soufflerie) et ISO 22401, 2015 (évaluation de la dérive potentielle d'appareils à rampe au moyen d'un banc d'essai). Les difficultés de mise en œuvre de la norme ISO 22866 au champ génère donc un important travail prénormatif afin de trouver des solutions alternatives au champ avec un LiDAR atmosphérique (Gregorio *et al.*, 2016) ou en conditions mieux contrôlées, avec un banc d'essai (ISO 22401, 2015) ou une végétation et un vent artificiels (bancs Evaspray viti et Eoledrift, UMT Ecotech INRAE IFV détaillés Chapitre 6).

2.2.1. Dérive sédimentaire

La dérive sédimentaire est évaluée en quantifiant le dépôt de gouttes liquides à différentes distances en dehors du champ traité au moment de l'application (ISO 22866, 2005). Ces dépôts sont recueillis dans différents types de collecteurs (boîtes de Pétri, papier filtre, etc). Cette mesure est particulièrement utilisée pour évaluer et gérer la contamination des milieux aquatiques de surface et les plantes et cultures non cibles. Cette mesure au champ avec la norme ISO 22866 se heurte à la difficulté de gérer l'orientation du vent (perpendiculaire au passage du pulvérisateur $\pm 30^\circ$) vis-à-vis de l'orientation des rangs de cultures pérennes. Seul la moitié environ des deux cents essais réalisés en verger et au vignoble en 2007 et 2008 ont été validés pour conditions météorologiques conformes (Liet et Polveche, 2009). D'autre part, elle nécessite un dégagement suffisant sous le vent pour disposer les systèmes d'échantillonnage.

2.2.2. Dérive aérienne

La dérive aérienne est évaluée en échantillonnant les gouttes dans l'atmosphère (de 5 à 10 m au-dessus du sol). Elle peut être captée par des préleveurs passifs (fils nylons 2 mm de diamètre disposés verticalement ou horizontalement, roses de douche...) ou capteurs actifs (rotorods, ou aspirateur à air) (Cornacchia *et al.*, 2020). Cette mesure, quelquefois réalisée en conditions partiellement artificielles (PHOTO 3), permet d'évaluer le flux de bouillie transporté dans l'atmosphère et pouvant potentiellement contaminer les arthropodes (ex. abeilles) les résidents et les personnes présentes (promeneurs).



PHOTO 3 : ETUDE DE DERIVE AERIEENNE AVEC VENT ARTIFICIEL PHOTO INRAE.

2.3. Les moyens de réduction de la dérive

2.3.1. Adapter la taille des gouttes par le choix des buses




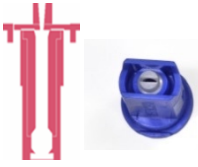
Quatre grands types de buses sont commercialisés : les buses à fente classique standard, les buses à fente classique basse pression, les buses à pastille de calibrage et les buses à induction d'air (classiques et basse pression) communément appelées buses à injection d'air, par ordre d'apparition sur le marché. Au-delà de leur conception, très différente d'un type à un autre, c'est aussi leurs pressions de travail qui les différencient.

En matière de réduction de dérive, les buses à pastille de calibrage ont été une innovation dans les années quatre-vingts. En effet, le simple fait d'apposer une pastille de calibrage en amont de la buse entraîne une chute de la pression au sein du corps de la buse qui forme alors des gouttes de tailles moyennes, ce qui limite la dérive.

La dernière révolution technologique date des années 2000, avec la fabrication de buses à induction d'air. Leur principe est très différent de celui des autres buses : un Venturi placé dans la buse permet l'aspiration d'air grâce à un ou deux trous sur le côté des buses ; la bouillie se charge alors artificiellement en air. Ces bulles d'air entraînent une fragmentation de la nappe liquide plus précoce et produisent donc des gouttes plus grosses. Les premières buses de ce type étaient utilisées entre 3 et 6 bars. La nouvelle génération de buses à induction d'air s'utilise entre 1,5 et 5 bars - on parle alors d'induction d'air basse pression, par opposition aux buses à induction d'air classiques.

En matière de mesure de taille de gouttes, peu de références objectives existent car la méthodologie de mesures est lourde à mettre en place (utilisation de lasers ou de caméras) et rarement respectée dans le milieu industriel. On peut néanmoins utiliser la notion de VMD (pour *Volume Median Diameter*) pour caractériser une population de gouttes (Tableau 2). Le VMD est le diamètre tel que 50 % du volume est constitué de gouttes dont le diamètre est inférieur ou égal à cette valeur. En moyenne, le VMD est de l'ordre de 200 μm pour les buses à fente classique (standards ou basse pression), de 300 μm pour les buses à pastille de calibrage, et d'environ 600 μm pour les buses à induction d'air.

TABLEAU 2 : Types de buses commercialisés en grandes cultures et conditions d'emploi. Valeurs issues de la classification des tailles de gouttes du BCPC (1985), données à titre indicatif et ne constituant pas une description précise du spectre de chaque buse et de leur qualité de répartition.

Type de buse	Structure	Taille de gouttes approximative	Préconisations
Fente classique standard		VMD~150 µm (gouttes fines)	Angle formé à partir de 2 bars <u>Pression d'utilisation</u> 2 à 3 bars
Fente classique basse pression		VMD~200 µm (gouttes fines)	Angle formé à partir de 1,2 bar <u>Pression d'utilisation</u> 1,5 à 3 bars
À pastille de calibrage		VMD~300 µm (gouttes moyennes)	Présence d'une pastille de calibrage Formation de grosses gouttes <u>Pression d'utilisation</u> 2 à 3 bars
À induction d'air		VMD~600 µm (grosses gouttes) VMD~500 µm (grosses gouttes)	Aspiration d'air par effet Venturi <u>Pression d'utilisation</u> - classique : 3 à 6 bars - basse pression : 1,5 à 5 bars

La buse à induction d'air constitue aujourd'hui le meilleur rapport technico-économique pour réduire la dérive. Elle est même rendue obligatoire dans certains cas. Rappelons qu'une liste mise à jour régulièrement par la DGAL mentionne les buses (modèles et calibres) inscrites pour réduire la dérive. Aujourd'hui les seuils pour l'inscription de buses sont de 66, 75 ou 90 % de réduction de dérive.

Ces buses produisent des gouttes 2 à 3 fois plus grosses que les buses à fente classique et sont généralement connotées négativement dans le milieu agricole. En effet, pour beaucoup d'utilisateurs, la production de grosses gouttes est synonyme d'une moindre efficacité. Arvalis a effectué une série d'essais comparatifs de buses pulvérisant des produits herbicides et fongicides, en distinguant les produits systémiques des produits de contact. Le résultat est sans appel : la buse à induction n'est pas contraignante à l'efficacité biologique des produits. En revanche, un ajustement du volume de bouillie est parfois nécessaire pour maintenir le même niveau d'efficacité biologique qu'une buse à fente classique. Par exemple pour un produit de contact appliqué sur de petites cibles, le volume minimum est de 80 l ha⁻¹ avec des buses à fente classique et de 150 l ha⁻¹ avec des buses à induction d'air (Perriot *et al.*, 2012).

Une troisième génération de buses est en train d'arriver sur le marché, suscitée par les besoins réglementaires dans certains pays : les buses à induction d'air « à 90% ». Cette technologie de buses permet une réduction de dérive bien supérieure aux deux générations précédentes et de l'ordre de 90% et plus. Actuellement en phase de tests et de prototypage, ces buses devraient être commercialisées dans l'année 2020 après avoir passé les phases de test en tunnel de dérive. Pour obtenir de tels scores de réduction de dérive, ces buses font des gouttes encore plus grosses que les buses à induction d'air classique et de l'ordre de 900 µm de VMD. C'est donc une nouvelle phase de références agronomiques

qu'il va falloir acquérir (volume d'application optimal) afin de mettre à jour les références d'efficacité biologique.

2.3.2.L'assistance d'air

Certains constructeurs équipent les rampes d'une assistance d'air. Le principe : de l'air contenu dans une manche à air gonflable est envoyé au niveau des rampes pour accompagner la bouillie pulvérisée au sein de la canopée.

Le procédé présent (PHOTO 4) est ici composé de deux turbines produisant de l'air respectivement distribué dans des manches souples situées à gauche et à droite de la rampe. La sortie d'air produit un flux d'air continu vers le bas, et l'orientation de la sortie d'air peut être modifiable électroniquement en cours de pulvérisation afin de contrer l'effet éventuel du vent.



PHOTO 4 : PULVERISATEUR EQUIPE DE L'ASSISTANCE D'AIR « TWIN ». COPYRIGHT : HARDI-EVRARD

Ce procédé historique développé au Danemark a ensuite été repris par d'autres constructeurs. Même si le principe reste le même (assistance d'air au niveau du jet), certains constructeurs proposent un équipement plus simple avec une orientation fixe du flux d'air et une turbine unique pour les deux côtés de la rampe.

Les différents constructeurs proposant cet équipement insistent sur les avantages suivants :

- pénétration accrue de la bouillie dans un feuillage dense et meilleure couverture foliaire ;
- réduction de la dérive potentielle tout en conservant les buses à fente classique.

Dans certains pays, l'outil est homologué « ZNT » au même titre que les buses à induction d'air le sont en France. Rappelons que sur le territoire français, l'outil est homologué à titre provisoire et uniquement avec des buses à induction d'air.

Dans tous les cas, cet équipement requiert une puissance importante sur le tracteur. On considère qu'il ne faut pas moins de 30 cv supplémentaires pour alimenter les turbines.

2.3.3. Le confinement, le recyclage

Ces techniques ont été développées récemment en viticulture. Elles consistent d'une part à confiner les sprays dans les rangs de végétation avec des panneaux ou un film d'air pour limiter la dérive. Ces matériels peuvent en plus être équipés de dispositif de recyclage de la bouillie non captée par la végétation. On parle de panneaux récupérateurs, d'appareils tunnel, etc.

Le confinement peut également permettre d'appliquer des produits sur l'inter-rangs des cultures à grand écartement tout en étant sélectif de la culture. Si certains matériels existent pour l'arboriculture, leur potentiel d'usage est cependant très limité en France du fait de la présence de filets paragrêle ou filets intégraux permanents largement répandus en vergers à pépins.

2.3.4.Gestion spécifique (spécialisée) des zones à risques (PWM, porte-buses à sélection automatique)

Dans le domaine de l'agriculture de précision, on voit apparaître des équipements spécifiques qui permettent d'assister l'opérateur au moment du traitement et de lui faciliter la tâche. Afin de faciliter l'application des produits phytosanitaires et d'éviter les manques et les recouvrements à l'échelle de la parcelle, les coupures de tronçons de la rampe de pulvérisation assistées par GPS ont permis une réelle avancée dans ce sens. Si en 2008, elles faisaient figure d'innovation, elles équipent aujourd'hui de nombreux pulvérisateurs neufs. Pour continuer dans cette voie et augmenter la précision, on voit maintenant apparaître les coupures buse par buse. Ces innovations concourent indirectement à limiter les pertes de produits en les appliquant uniquement là où il faut.

Mais en matière de qualité de pulvérisation et de limitation de la dérive, on peut citer deux innovations majeures : les porte-buses à sélection automatique et le PWM (Pulse Width Modulation). Ces deux innovations ont deux objectifs communs :

- maintenir une dose constante indépendamment de la vitesse d'avancement ;
- assurer la modulation intra-parcellaire des PPP (exemple d'application d'herbicide).

Les façons d'atteindre ces objectifs sont différentes entre les deux innovations. Pour les porte-buses, le système choisit automatiquement la bonne buse ou la bonne combinaison de buses afin de rester dans la plage de pression optimale ou pour permettre de basculer automatiquement tout ou partie de la rampe en buses antidérive à proximité d'une zone sensible. Pour le PWM, le système fixe une pression de travail constante (et donc conserve la taille de gouttes) mais fait varier le débit à la buse par modification du temps d'ouverture de celle-ci. La dépendance du débit à la pression est donc supprimée dans ce cas puisque le système effectue un micro-hachage de la pulvérisation à pression constante.

En plus d'assurer une bonne qualité de pulvérisation, ces deux systèmes contribuent à assurer une réduction de la dérive. En effet, dans le cas des porte-buses, le fait de veiller au respect de la plage de pression des buses permet d'éviter les phases de surpression favorables à la formation de fines gouttes. Pour le PWM, le fait de travailler avec des gros calibres de buses et de se positionner sur de faibles pressions contribue aussi à une certaine maîtrise de la dérive.

2.3.5.Principe de la combinaison de moyens limitant la dérive

La réduction de la dérive peut s'exprimer soit en % de réduction, soit sous forme de facteur de réduction de dérive ; ces deux valeurs sont déterminées par rapport à un équipement ou une situation de référence. Le

Tableau 3 suivant donne les équivalences entre ces deux paramètres

TABLEAU 3 : RELATION ENTRE POURCENTAGE ET FACTEUR DE REDUCTION DE DERIVE

Pourcentage de réduction	0%	25%	33%	50%	66%	75%	82%	90%	95%	99%
Facteur de réduction	1	1.3	1.5	2	3	4	6	10	20	100

La résultante de la combinaison de deux moyens de réduction de la dérive doit se faire en multipliant les facteurs de chacun des moyens. Ainsi, si on associe une buse efficace à 66% (facteur de réduction de 3) et un filet brise vent efficace à 50% (facteur de réduction de 2), la résultante de la combinaison des deux moyens aboutira à une réduction d'un facteur 6 soit 82%. Des exemples de combinaisons de leviers sont décrits dans le Chapitre 3.5.

2.4. Les alternatives

2.4.1. Pulvérisation à poste fixe

PulVéfix est une technique qui permet d'appliquer les PPP en vergers de pommiers en s'affranchissant de l'usage du pulvérisateur. Cette technique repose sur l'utilisation combinée d'un réseau hydraulique "fixe" positionné sur la frondaison et d'un réseau d'air comprimé assurant la pulvérisation. Cette technique, étudiée au niveau national depuis 2012 a fait ses preuves à des échelles de 2500 m² et les résultats pourraient permettre d'envisager l'adoption de cette technique dans des contextes sensibles sur les 5 ou 10 derniers rangs de vergers de pommiers situés à proximité de points d'eau, d'habitation, ou de lieux fréquentés par des personnes sensibles (écoles, EHPAD⁶ ...). L'atout indéniable de cette technique est son intérêt environnemental avec une limitation de la dérive très importante, plus de 90% dès les 5 premiers mètres du dernier rang (cf Tableau 4) et le fait d'avoir démontré l'innocuité de la technique vis-à-vis du risque consommateur (respect des LMR) permet d'envisager de belles perspectives de déploiement. En tenant compte des points de vigilances sur l'utilisation de cette technique (positionnement des asperseurs), cette technique permet de maîtriser la tavelure du pommier, les ravageurs de type lépidoptères du pommier, les maladies de conservation (Verpont et al., 2019). Une adaptation de la pratique voire un passage au pulvérisateur sera nécessaire pour le contrôle de l'oïdium ou des pucerons cendrés. Ce déploiement ne pourra se faire bien entendu que par l'intégration de la technique dans le cadre réglementaire. Un dossier complet sera donc livré aux instances

⁶ Etablissement Hébergeant des Personnes Agées Dépendantes

réglementaires dans le courant du premier semestre 2020 pour qu'elles puissent statuer. Mais sans attendre, les expérimentations pourront continuer à partir des prototypes en place et ceux mis en place en 2019 à l'échelle d'1 ha chez deux producteurs de pommes dans le Tarn et Garonne et L'Hérault.

TABLEAU 4: % DE DERIVE DE LA PULVERISATION DE REFERENCE ET DE PULVéFix EN MILIEU DE VEGETATION.

% de dérive mesuré à (milieu de végétation) :	Pulvérisation de référence	PulVéFix
5 m du dernier rang	10,4%	0,7%
10 m du dernier rang	6,0%	0 %
20 m du dernier rang	2,2%	0 %
30 m du dernier rang	1,0%	0 %
50 m du dernier rang	0,4%	0 %

Cette technique de pulvérisation fixe, développée avec succès sur l'arboriculture, a incité l'IFV à déposer un projet afin d'essayer d'adapter cette technique à la vigne. Ce projet (2018-2020) a permis de sélectionner et de tester les solutions proposées par les sociétés spécialisées dans la micro-irrigation (2018) puis d'installer deux plateformes d'essai afin de réaliser les premiers tests physiques (répartition du produit sur la végétation) et biologiques.

Dans l'optique de réaliser la preuve de concept, cette première version a permis d'entreprendre les premiers tests en végétation (2019). Bien que les expérimentations antérieures sur les systèmes de pulvérisation fixes en arboriculture révèlent des résultats d'efficacité physiques et biologiques intéressants, les résultats de l'adaptation d'un tel système sur la vigne restent pour le moment plus mitigés. Les tests réalisés mettent en évidence des dépôts faibles associés à une répartition très hétérogène des produits pulvérisés sur la vigne, synonyme d'efficacité réduite avec des pulvérisateurs classiques. D'un strict point de vue physique, le système ne répond donc pas aux attentes actuelles de la protection du vignoble. L'efficacité biologique du système a également été mesurée grâce à la notation des maladies sur les modalités PulvéFixe, comparée à un témoin non traité. Ces premières notations font part de résultats intéressants dans la lutte contre le mildiou bien qu'inférieurs à ceux pouvant être obtenus avec un pulvérisateur classique. La protection de la vigne contre l'oïdium semble plus difficile. Le système étant désormais en place, l'efficacité biologique doit être testée de nouveau en engageant des traitements, à faible dose mais plus fréquents, dès le début de la campagne 2020. Si les résultats biologiques sont concluants, un lourd travail d'optimisation de la technique devra être réalisé, notamment sur la gestion des reliquats, pour rendre le système opérationnel. En revanche, compte tenu de la technique de pulvérisation et de la taille des gouttes produites, la technique développée répond parfaitement aux objectifs de réduction de la dérive.

2.4.2. Micro-injection

La deuxième approche alternative à l'utilisation du pulvérisateur peut être qualifiée de rupture : l'application des produits ne se fait plus sur les parties aériennes des arbres mais par micro-injection sécurisée dans le tronc des arbres (arboriculture fruitière et JEVI⁷). Les impacts visés par la mise en place de cette nouvelle technique d'application sont une division par 2 du nombre d'applications effectuées actuellement par pulvérisation et une réduction totale de la dérive, partant de l'hypothèse que 100% du produit atteint la cible. Le projet FUI Preamisse (2015-2018) et les travaux menés dans sa continuité ont permis : de développer un micro-injecteur sécurisé pour l'opérateur, d'apporter la preuve de l'innocuité de la technique avec la démonstration de la régénération tissulaire post micro-injection, mais aussi avec de premiers résultats de résidus dans les fleurs et les fruits, où la plupart des matières actives injectées ne sont pas décelables, de démontrer que la technique peut-être opérationnelle dès maintenant sur certains modèles Zones Non Agricoles (chenilles processionnaires du pin) et arboricole (pucerons cendrés du pommier, carpocapse du châtaignier). Un déploiement des essais sur d'autres modèles arboricoles est en cours : en 2020 sur la bactériose du kiwi (fonds propres CTIFL) et le dépôt d'un projet multi-espèces (kiwi, pommes, noix et châtaignes) se fera dans le courant de l'année.

Pour la vigne, à ce jour, malgré des fréquences d'injection élevées par rapport à un optimum économique, l'efficacité de la méthode reste insatisfaisante sur mildiou et oïdium. Il semblerait que les

⁷ Jardin Espaces Verts et Infrastructures

matières actives testées et injectées, malgré leur profil systémique connu en application foliaire, ne migrent pas suffisamment pour protéger l'ensemble des organes sensibles dans une période où la croissance végétative est importante. Un screening des matières actives plus complet et un travail pour l'élaboration de formulations adaptées des produits pourraient apporter des solutions à ces freins actuels. Ces leviers complémentaires devront permettre d'arriver à un niveau d'efficacité acceptable ainsi qu'un ratio de temps de travail destiné à la micro-injection économique intéressant par rapport à de la pulvérisation classique.

3. AMENAGEMENTS DE L'ENVIRONNEMENT PARCELLAIRE

En complément du levier « Agroéquipement » évoqué précédemment, le levier portant sur les aménagements de l'environnement parcellaire peut lui aussi être mis en œuvre pour permettre de limiter la dérive au-delà de la parcelle traitée.

3.1. Les aménagements en bordure de parcelle dans le contexte réglementaire national

Pour rappel, la mise en place de haie à vocation « antidérive » est, depuis 2006, une mesure de protection reconnue dans le cadre de la protection des points d'eau. L'arrêté du 12 septembre 2006 remplacé par l'arrêté du 4 mai 2017 relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des PPP et de leurs adjuvants visés à l'article L. 253-1 du code rural et de la pêche maritime, précise que les deux conditions à respecter pour pouvoir réduire la largeur de la zone non traitée (ZNT) Eau de 20 à 5 mètres ou de 50 à 5 mètres sont :

- 1) la présence d'un dispositif végétalisé permanent d'au moins 5 m de large en bordure du point d'eau pouvant comporter sur une partie de la largeur une haie arbustive ayant à minima la hauteur de la culture pour les cultures hautes (arboriculture, viticulture, houblon et cultures ornementales hautes) ou pouvant comporter un dispositif herbacé ou arbustif pour les autres cultures.
- 2) La mise en œuvre de moyens permettant de diminuer le risque pour les milieux aquatiques.

Depuis 2016, la haie antidérive fait aussi partie des mesures de protection pouvant être mise en place pour renforcer la protection des personnes vulnérables lors de l'application de produits phytopharmaceutiques (Instruction technique DGAL/SDQPV/2016-80, 27/01/2016). Pour la première fois dans les textes, des précisions sont apportées sur les paramètres que la haie doit avoir pour être efficace :

- sa hauteur doit être supérieure à celle de la culture en place ou des équipements du pulvérisateur ;
- sa précocité de végétation doit assurer de limiter la dérive dès les premières applications ;
- son homogénéité (hauteur, largeur, densité de feuillage) et son absence de trous dans la végétation doit être effective ;
- sa largeur et sa semi-perméabilité doit permettre de filtrer le maximum de dérive sans la détourner totalement.

Il est aussi précisé que « les résultats obtenus avec des dispositifs totalement imperméables (mur, palissade, filet brise-vent, haie trop compacte...) ne sont pas satisfaisants en termes de réduction de dérive. En effet, la dérive de pulvérisation est principalement détournée et reportée au-delà de ces dispositifs sans filtration et abattement suffisants » (Instruction technique DGAL/SDQPV/2016-80, 27/01/2016).

Dans le cadre de la mise en application de la nouvelle réglementation visant à protéger les riverains et les résidents, un aménagement de l'environnement parcellaire à proximité des habitations pourrait être proposé, l'objectif premier étant que cet aménagement ait là encore un rôle d'obstacle à la dérive de pulvérisation. Comme vu ci-dessus, à ce jour, seule la haie de type végétal apparaît clairement dans les textes réglementaires mais d'autres types de barrière physique à la dérive pourraient être envisagés seuls ou en combinaison avec d'autres moyens.

3.2. Quels sont les types d'aménagements présentant un intérêt vis-à-vis de la limitation de la dérive ?

On peut distinguer deux grands types d'aménagements parcellaires :

- les aménagements naturels : les haies végétales, qui pour celles déjà en place ont un rôle initial de brise-vent et/ou de haie composite réservoir d'espèces auxiliaires ;
- les aménagements artificiels : verticaux comme les filets brise-vent ou les filets Alt'Dérives, horizontaux et verticaux comme les filets paragrêles couplés à des filets Alt'Carpo.

Ces barrières physiques, qu'elles soient naturelles ou artificielles, agissent de deux manières sur la réduction de la dérive :

→ par une action de filtration : en interceptant les gouttes de pulvérisation et en limitant la distance qu'elles parcourent en dehors de la zone de traitement (Ucar et Hall, 2001 ; Reichenberger *et al.*, 2007). Un modèle a par le passé été développé par Raupach *et al.* (2001). Il permet de décrire le processus de réduction de la dérive de pulvérisation derrière un brise-vent en réduisant la concentration de particules en suspension dans l'air ;

→ par une action majeure de réduction de la vitesse du vent. Les processus se produisant lorsqu'une masse d'air rencontre une haie brise-vent ont largement été étudiés depuis les années 1980 en Australie, en Nouvelle-Zélande, en Hollande et en France. Les écoulements d'air sont tridimensionnels, compressibles et turbulents (Ucar et Hall, 2001 ; Reichenberger *et al.*, 2007). Cette réalité rend très difficile la prédiction du mouvement des gouttes en dérive et l'évaluation de l'efficacité des différentes stratégies de réduction de la dérive (Van de Zande *et al.*, 2004). De manière simplifiée, l'air se déplace selon diverses voies de dispersion et forme des zones qui se distinguent notamment par des vitesses de vent différentes et par des dépôts de gouttes en concentrations variables. Ucar et Hall (2001) suggèrent qu'une réduction de la vitesse du vent se produit jusqu'à $20 \times H$ sur une distance derrière la haie, où H équivaut à la hauteur de la haie. Les travaux de De Schamphelre *et al.* (2009) ont montré des réductions de vitesse de vent pouvant aller jusqu'à 30 ou 35 fois la hauteur de la haie. Ces résultats peuvent se résumer par le schéma de la Figure 3, la longueur L pouvant varier selon les études.

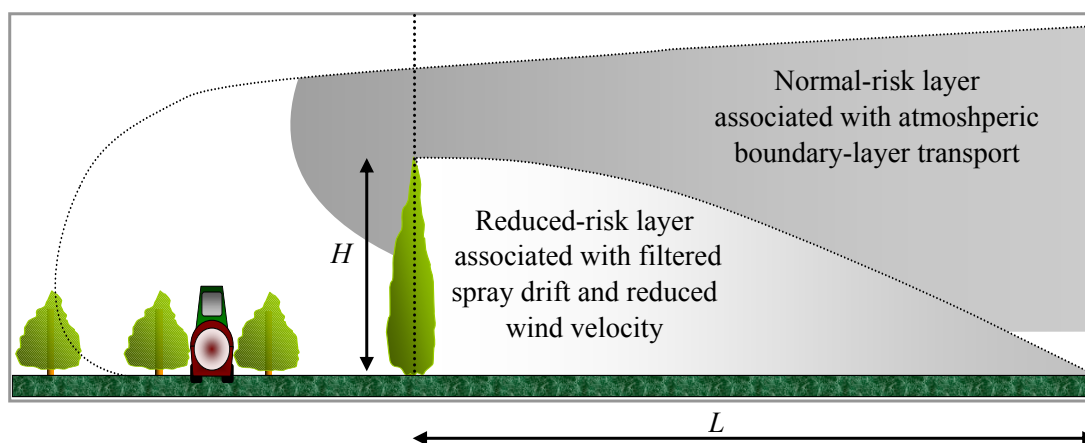


FIGURE 3 : SCHEMA REPRESENTANT L'EFFET D'UNE HAIE SUR LES ECOULEMENTS D'AIR

SOURCE: SILSOE RESEARCH INSTITUTE (2003)

3.3. Quels sont les paramètres agissant sur la capacité des barrières physiques à réduire la vitesse du vent et à filtrer les particules ?

Les facteurs essentiels qui vont jouer sur l'efficacité d'une barrière physique à réduire la dérive sont :

- la porosité de la barrière, que ce soit une haie naturelle ou un filet (brise-vent, Alt'Dérives, paragrêle + Alt'Carpo). Sur cette notion de porosité, la comparaison des résultats d'efficacité est souvent compliquée. D'une part du fait que les haies testées dans les différents essais à l'échelle internationale sont toutes différentes dans leur composition (haies composites, haies à feuillage caduque ou persistant, type et orientation des feuilles ou aiguilles...) et donc dans leur porosité, d'autre part car cette notion de porosité n'est pas toujours caractérisée de la même façon : certaines équipes se réfèrent à la porosité optique qui peut elle-même être mesurée de différentes façons (LiDAR system, analyse d'images...), d'autres à la porosité aérodynamique, et dans certains cas, notamment lors d'études portant sur des barrières type filets (cette notion de porosité est alors juste caractérisée par le type de maille utilisée). Cette variabilité limite la possibilité de comparer les études réalisées sur le thème, et certainement, les résultats qui en ressortent (Hamel, 2010). De manière générale, on retiendra qu'il faut éviter la mise en place d'une barrière physique trop dense qui crée l'effet d'un mur en forçant le vent à passer par-dessus la structure induisant la création d'un tourbillon descendant plus loin derrière la haie ou

le filet. De même il faut éviter que la barrière physique soit trop poreuse ce qui, au contraire, laisserait passer beaucoup trop d'air à travers leur structure et ne retiendrait qu'une quantité limitée des particules en dérive (Hamel, 2010) ;

- la hauteur et la longueur de la barrière. Plusieurs essais ont montré que la hauteur des haies avait une influence nette sur la réduction de la dérive. Les essais hollandais (Van de Zande *et al.*, 2004) montrent que la hauteur de la haie doit être égale ou supérieure à la hauteur de pulvérisation. Les travaux d'Ucar et Hall (2001) suggéraient une hauteur de haie au moins deux fois plus importante que celle de la culture traitée. En France, la réglementation précise que « la hauteur doit être supérieure à celle de la culture en place ou des équipements du pulvérisateur ». En Angleterre, le guide d'évaluation des risques environnementaux locaux (*Local Environment Risk Assessment for Pesticides LERAP*) précise que la haie doit être d'au moins 2 m plus haut que la culture à traiter. La continuité de l'écran (végétal ou artificiel) constitue aussi un facteur d'efficacité d'importance : une brèche sur la longueur permet le passage du vent et de la dérive, à une vitesse souvent supérieure à celle observée dans la parcelle (Brandle *et al.* 2004). L'idéal est donc bien d'avoir un écran continu tout le long de la parcelle à traiter.

3.4. Tour d'horizon des résultats d'efficacité pouvant être attendus selon le type d'aménagement parcellaire

Comme déjà mentionné ci-dessus, les recherches conduites sur le rôle des écrans naturels ou artificiels dans la réduction de la dérive reposent sur de multiples variables ce qui limite la comparaison des résultats entre les études (Hamel, 2010) : haies naturelles de compositions différentes, barrières artificielles de type filets avec différentes mailles, différentes hauteurs, différents positionnements par rapport au dernier rang de la culture, différences entre les types d'essais (en soufflerie, au champ ou utilisation de la modalisation), différentes conditions de pulvérisation (vitesse du vent le jour des essais, type de pulvérisateurs, types de buses...). Cette diversité rend difficile l'accès à une préconisation « générique » quant à la mise en place de barrières antidérive.

➤ Efficacité des haies végétales (Tableau 5)

Les critères préconisés pour l'implantation d'une haie efficace vis-à-vis de la limitation de la dérive (issus de la bibliographie ou des réglementations/préconisations à l'échelle internationale) sont les suivants :

- Hauteur de la haie : égale ou supérieure à la culture traitée ;
- Composition : pour les cultures hautes (arboriculture, viticulture) privilégier des espèces à développement du feuillage précoce (érable, sureau, aubépine, charme, chèvrefeuille, lilas) voire à feuillage persistant ; pour les cultures basses, des plantations de type « barrière de végétation » peuvent ponctuellement être mises en place le temps de la culture (*Miscanthus* par exemple) ;
- Porosité ou densité moyenne : ni trop basse ni trop haute (25 à 60% de densité optique) ;
- Continue sur toute la longueur de la culture à traiter ;
- Positionnement par rapport au dernier rang : entre 3 et 8 m.

TABLEAU 5 : EFFICACITES DES HAIES VEGETALES SUR LA LIMITATION DE LA DERIVE EN ARBORICULTURE, VITICULTURE, CULTURES BASSES.

Stade végétatif	Protocole	% de réduction de dérive		
		Arboriculture / houblon	Viticulture	Cultures basses
Début végétation	Mesure à 10 m du dernier rang	50 à 70% ⁽¹⁾	-(2)	-(2)
	Mesure à 20 m du dernier rang	- (2)	-(2)	-(2)
Pleine végétation	Mesure à 10 m du dernier rang	80 à 90% ⁽¹⁾	-(2)	-(2)
	Mesure à 20 m du dernier rang	45 à 75% ⁽¹⁾	-(2)	-(2)
Pleine végétation	A 2 m derrière la haie	-(2)	-(2)	60 à 90%
	A 7 m derrière la haie	-(2)	-(2)	< 60%

⁽¹⁾ Données essais les plus récents : CTIFL(France), Wageningen (Hollande), East Malling (Angleterre), Agroscope (*Schweizer et al.* (2013), Suisse)

⁽²⁾ Pas de données référencées.

➤ Efficacité des filets verticaux (Tableau 6)

Plusieurs types de filets verticaux sont disponibles sur le marché. Le choix de la maille du filet est prépondérant car il définit la porosité du filet. Dans le cas où cette porosité est faible (maille de filet dense), le filet s'apparentera à un mur et pourra même accentuer la dérive par des phénomènes d'aéroconvection. En arboriculture, les essais conduits en France (CTIFL) et en Suisse (Schweizer *et al.* (2013), Agroscope) avec ce type de filet brise-vent (maille de 1 x 1 mm) n'ont pas permis de mettre en évidence des effets sur la limitation de la dérive (résultats très variables et effet d'augmentation de la dérive dans les 5 voire 10 mètres après le filet (Polveche *et al.*, 2011). Par contre, des filets verticaux de type Alt'Dérives (3 m de haut), eux aussi à mailles très fines (0,77 x 0,39 mm) ont montré de bons résultats en viticulture dans le cadre des évaluations réalisées par l'IFV de Bordeaux, avec un positionnement à 3 m du dernier rang. D'autres filets couramment utilisés en arboriculture de type anti-insectes (Alt'Carpo par exemple) à mailles plus larges (5,5 x 2,2 mm / 3,4 x 2,2 mm) ou de type paragrêle positionné verticalement (7 x 3 mm, 3,4 x 8,8 mm) ont démontré dans différents essais leur efficacité significative vis-à-vis de la réduction de la dérive. La plupart des résultats sont issus d'essais conduits en pleine végétation.

TABLEAU 6 : EFFICACITE DES FILETS VERTICAUX SUR LA LIMITATION DE LA DERIVE EN ARBORICULTURE, VITICULTURE ET CULTURES BASSES.

Type filet	% efficacité	Arboriculture	Viticulture	Cultures basses
Brise-vent (maille 1 x 1mm) positionné à 3 à 5 m du dernier rang	A 10 m du dernier rang	-35 à 30 % ⁽³⁾	-(2)	-(2)
	A 20 m du dernier rang	-55 à 40% ⁽³⁾	-(2)	-(2)
Filets anti-insectes ou paragrêle vertical (maille 5,5 x 2,2 mm / 3,4 x 2,2 mm / 3,4 x 8,8 mm / 7 x 3 mm)	A 10 m du dernier rang	65 à 100% ⁽⁴⁾	-(2)	50% ⁽⁴⁾
	A 20 m du dernier rang	55 à 80% ⁽⁴⁾	-(2)	-(2)
Filets Alt'Dérives (maille 0,77 x 0,39 mm)	A 5 m du dernier rang	-(2)	64 à 71% ⁽⁵⁾	-(2)
	A 10 m du dernier rang	-(2)	En moy 55% ⁽⁵⁾	-(2)

(2) Pas de données référencées.

(3) Données essais les plus récents : CTIFL(France), Agroscope (Suisse).

(4) Données essais les plus récents : CTIFL(France), Wageningen (Hollande), Agroscope (Suisse), Projet PROPULPP (Belgique), in Hort (Doruchowski *et al.* 2019)

(5) Données IFV Bordeaux (Davy, 2017)

➤ Efficacité des filets paragrêles horizontaux en arboriculture

Une spécificité de l'arboriculture est d'utiliser des filets paragrêles tendus horizontalement au-dessus des vergers. Plusieurs essais français (Garcin et Zavagli, 2006) et suisses (Agroscope) ont démontré que ces filets, en limitant l'extension du nuage de particules pulvérisées vers le haut, avait un effet de réduction de la dérive sédimentaire de 65, 75 et 80% respectivement à 5, 10 et 20 m du dernier rang.

3.5. Limites actuelles pour la prise en compte des barrières physiques

Concernant les haies végétales, il sera toujours compliqué d'avoir une approche générique tant ces haies sont diverses. Par contre, certaines sociétés développent et proposent depuis quelques années des filets baptisés « Alt'Dérives ». Les résultats des essais conduits avec ce type de barrière ayant été significatifs en viticulture, il serait pertinent de conduire quelques essais en arboriculture voire en grandes cultures pour confirmer l'intérêt de ces produits.

Certains pays européens ont déjà adopté le principe de combinaison de moyens mais sur une gamme souvent limitée de moyens (ex. buse + gestion de l'air en cultures pérennes et ou aménagements).

Un verrou important réside dans la difficulté de pouvoir tester toutes les combinaisons possibles et le recours à la modélisation et à la simulation sur bancs sont donc essentiels.

Les moyens utilisés dans certains pays européens et éventuellement cumulables sont listés dans le Tableau 7.

TABLEAU 7 : MOYENS DE REDUCTION DE DERIVE ADOPTES SELON LA CULTURE ET LE PAYS (COMMUNICATION L. WARANGOT DGAL 2018).

Moyen associé à un matériel de référence	Facteur de réduction	Pays	Conditions
Air réduit sur appareil standard	2	NL	
	2	CH	
Gestion de l'assistance d'air (viti-arbo), nécessairement associé à des buses spécifiques	4	DE	Air réduit à 20 ou 30 000 m ³ h ⁻¹
	10	DE	Obturation de l'air sur les faces extérieures des 3 derniers rangs
	20	DE	Obturation de l'air sur les faces extérieures des 5 derniers rangs
Buses à limitation de dérive	2 à 20	NL	Taux de la buse s'applique à une pulvérisation axiale à condition que le dernier rang soit traité face intérieure uniquement
	2	BE	
	2 à 10	FR	
Végétation - Haie vive	2,5	BE	Pulvérisateur conventionnel axial
	3	FR	Pulvérisateur conventionnel axial
Filet Paragrêle	2	CH	Air < 20 ou 30 000 m ³ h ⁻¹ ou air/pulvé 5 rangs*
	2	BE	Pulvérisateur confiné
Filet Brise vent	2	CH	Air < 20 ou 30 000 m ³ h ⁻¹ ou air/pulvé 5 rangs*
Filet Insect proof	2	CH	Air < 20 ou 30 000 m ³ h ⁻¹ ou air/pulvé 5 rangs*
Pulvérisation confinée nécessairement associé à des buses spécifiques	4	NL	
	20	CH	Combiné avec filet paragrêle et distance de ZNT) ou filet brise vent
	100	BE	Avec ou sans haie
Appareil à flux dirigé ou Face Par Face nécessairement associé à des buses spécifiques	2 à 20	NL	Selon situation
	2 à 20	CH	Selon situation
	2 à 100	BE	Selon situation

*Limitation de la puissance de ventilation (viticulture 20 000 m³ h⁻¹, arboriculture 30 000 m³ h⁻¹). Par ailleurs, l'assistance d'air et/ou la pulvérisation peuvent être supprimées sur les faces extérieures des 5 derniers rangs.

4. DES ADJUVANTS POUR LA LIMITATION DE LA DERIVE

L'application de PPP doit répondre à plusieurs problématiques physicochimiques. Premièrement, la substance active représente une fraction souvent faible du produit concentré et de nombreux co-formulants sont utilisés afin de permettre la dispersion homogène et la suspensibilité du produit dans le diluant qui est très souvent de l'eau. Deuxièmement, l'utilisation de cette eau de dilution s'avère relativement inadaptée à la rétention sur des feuilles réputées plus ou moins hydrophobes. Les co-formulants aident donc à gérer ces deux étapes du processus d'application. Des adjuvants peuvent être rajoutés à cette bouillie, on parle alors d'adjuvants extemporanés. D'une manière générale, il existe différentes classes physicochimiques d'adjuvants (sels, polymères, colloïdes, huiles et esters, polymères,...) aux fonctions souvent spécifiques : surfactants, humectants/mouillants antimousse ou limiteur de dérive. Dans ce dernier cas, les adjuvants agissent sur la taille des gouttes produites dans le spray en diminuant le délai de rupture de la nappe liquide en ligaments et des ligaments en gouttes (cf § 2.1.1) grâce à la modification de deux propriétés physicochimiques de la bouillie : la viscosité/thixotropie et la tension de surface (Sijs et Bonn, 2020). Des études réalisées en conditions standardisées (Stainier *et al.*, 2006) montrent que l'effet antidérive d'adjuvants dépend beaucoup de la formulation d'un même produit (Figure 4) (cité par Alheidary *et al.*, 2016). L'effet des co-formulants et des adjuvants pour réduire la volatilisation reste mal connu. Il a fait l'objet de seulement quelques études ponctuelles (Ruiter *et al.*, 2003 ; Houbraken *et al.*, 2015 ; Lichiheb *et al.*, 2015).

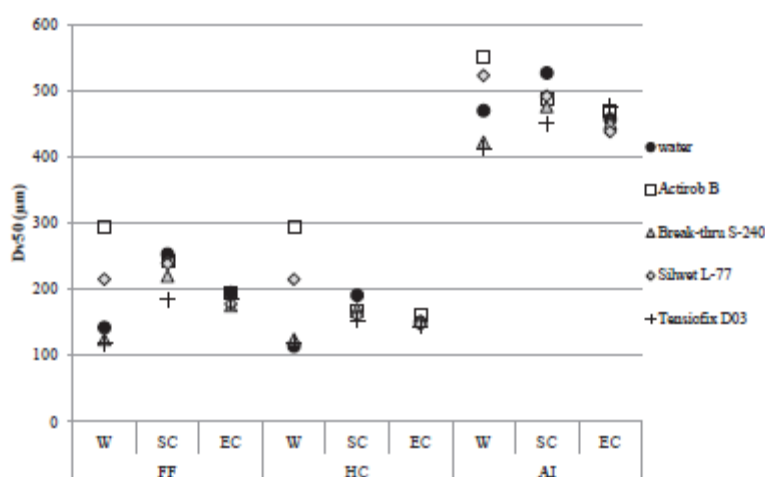


FIGURE 4 : EFFET DES ADJUVANTS, DU TYPE DE BUSE ET DE LA FORMULATION DE PHENMEDIPHAM SUR LA TAILLE DES GOUTTES. ACTIROB (METHYLESTER DE COLZA), BREAKTHRU (POLYETHER TRISILOXANE), SILWET L77 (HEPTAMETHYLTRISILOXANE), TENSIOFIX D03 (NON IONIQUE) (FF : JET PLAT, HC : CONE CREUX, AI : INDUCTION D'AIR), (W : EAU PURE, SC : SUSPENSION CONCENTREE, EC : EMULSION CONCENTREE) (ALHEIDARY *ET AL.*, 2016, D'APRES STAINIER *ET AL.*, 2006).

Par ailleurs, si plusieurs études ont porté sur l'effet des adjuvants antidérive au champ, les résultats confirment la variabilité des résultats selon la formulation du produit (Lan *et al.*, 2008).

Des mesures de granulométrie réalisées au *Silsoe Spray Application Unit* (<https://ssau.co.uk>) ont comparé le volume total du spray constitué de gouttes dont le diamètre est inférieur à 100 µm (V100) de différentes combinaisons de produits herbicides et d'adjuvants. Le Tableau 8 indique que par rapport à de l'eau pure, les modalités considérant différents herbicides ou un limiteur de croissance sont équivalents.

TABLEAU 8 : POURCENTAGE DE REDUCTION DE DERIVE OBTENUE PAR 3 ADJUVANTS MESUREE D'APRES L'EVOLUTION DU V100.
SOURCE : DE SANGOSSE, ETUDE 2020.

Modalité		V100(%)	Ecart à la référence
1	Eau pure	20,77	
2	0.25% AGE 809 (GONDOR®)	12,05	42%
3	1 % AGE 878 (LE 846®)	12,0	42%
4	0,8 % AGE 825 (ASTUSS®)	13,0	37%
5	2% Asteroid SL (glyphosate) + 0.25% AGE 809 (GONDOR)	13,25	36%
6	2% Terpal SL + 0.25% AGE 809 (GONDOR)	12,05	42%
7	1.5% Decano SC + 0.25% AGE 809 (GONDOR)	12,97	38%
8	16 g/L Adagio SG + 0.25% AGE 809 (GONDOR)	12,49	40%
9	1.74 g/L 2,4D Lontrel SG + 0.25% AGE 809 (GONDOR)	12,1	42%

Gondor® : lécithine de soja ; LE 846® : ester méthylique d'acide gras (C16-C18) ; ASTUSS® : ester méthylique d'huile de colza.

La Figure 5 indique la réduction de dérive mesurée en soufflerie à une distance de 5 m. Chaque produit (Lontrel SG ou Asteroid) est testé seul comparé à l'eau et la formulation de ces deux herbicides n'a qu'un effet limité sur la réduction de dérive (de l'ordre de 30%). Lorsque l'adjuvant Gondor est ajouté à chacun des herbicides, la réduction de dérive obtenue par rapport au produit seul atteint entre 61 et 67%. Enfin si l'eau pure est choisie comme référence, les réductions de dérive obtenues atteignent 75%. L'eau pourrait être une modalité de référence commode pour l'étude de l'effet d'adjuvants.

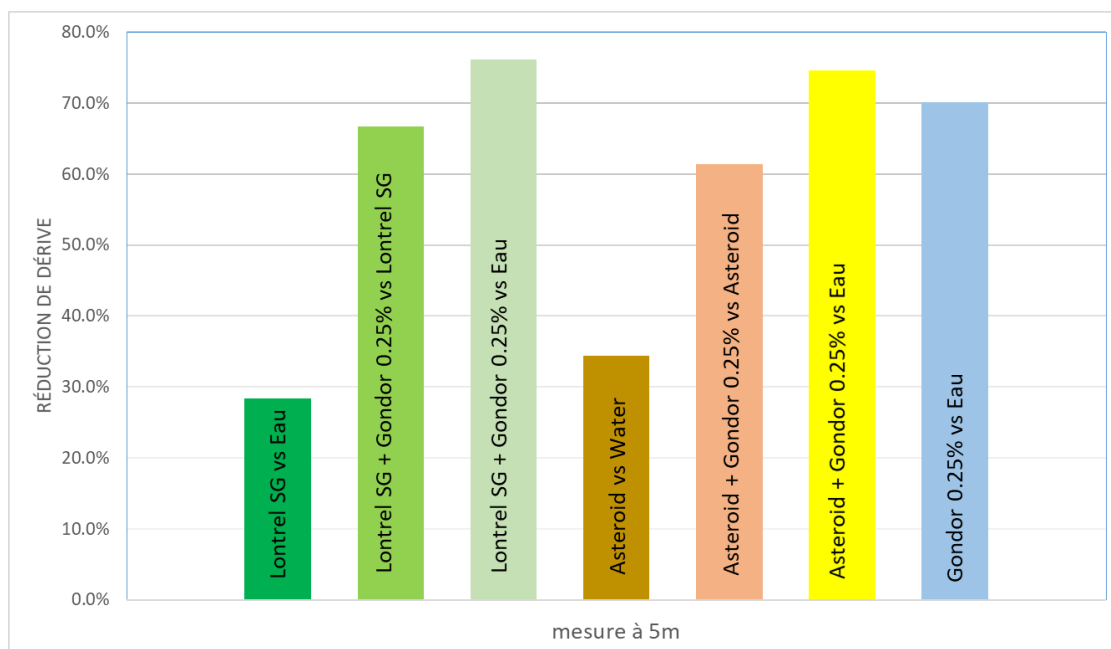


FIGURE 5 : EFFET DE L'ADJUVANT GONDOR 0,25% SUR LA REDUCTION DE DERIVE DE DEUX HERBICIDES (ASTEROIDE ET LONTREL) PAR RAPPORT A DE L'EAU. SOURCE DESANGOSSE ETUDE DECEMBRE 2018.

Si la réduction de dérive obtenue avec certains adjuvants est encourageante (Figure 5), les performances atteintes avec des buses à induction d'air (

Figure 6) sont plus importantes (Collectif, 2005 ; van de Zande *et al.*, 2008).

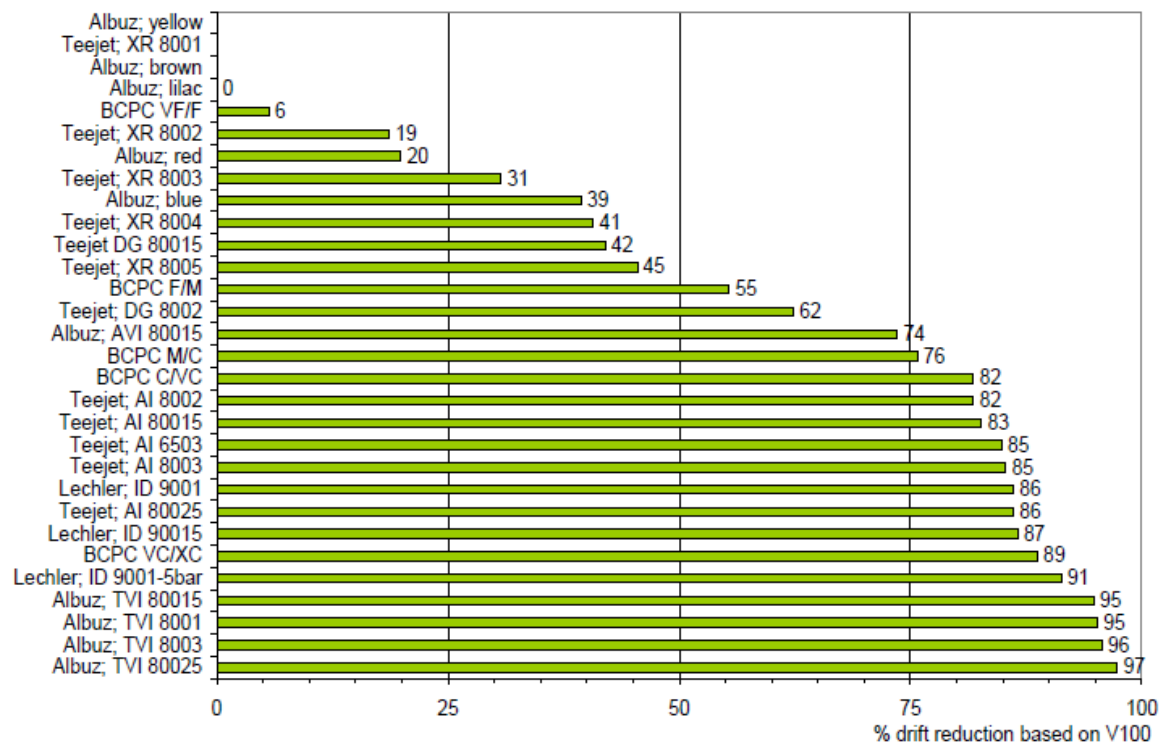


FIGURE 6 : TAUX DE REDUCTION DE DERIVE POTENTIELLE BASE SUR LE V100 (% DU VOLUME DE BOUILLIE PULVERISEE DONT LES PARTICULES ONT UN DIAMETRE < 100 μ M) RELATIVEMENT A LA REFERENCE ALBUS YELLOW AVEC DE L'EAU (VAN DE ZANDE *ET AL.*, 2008).

En France, trois adjuvants à base de lécithine de soja, d'organo-silicones ou d'alcool terpénique ont reçu une mention antidérive par le Ministère en charge de l'agriculture après des tests réalisés dans la soufflerie d'Arvalis en 2007. Depuis, la méthode CEB 245 utilisant le protocole de la norme de mesure de la dérive potentielle en soufflerie (ISO 22856, 2008) a été développée pour tester la performance d'adjuvants antidérive en soufflerie. Cependant à ce jour aucun adjuvant n'a obtenu récemment de mention antidérive par cette voie.

5. CONDITIONS D'APPLICATION : INFLUENCE DU VENT ET DE L'HUMIDITE DE L'AIR

Selon la réglementation en vigueur (arrêté du 4 mai 2017)⁸, les pulvérisations sont interdites à partir d'une vitesse de vent de 3 Beaufort correspondant à une vitesse au-delà de 19 km h⁻¹ soit 5,27 m s⁻¹ mesurée à une hauteur de 10 m. Selon l'échelle Beaufort, cela se traduit concrètement par une petite brise les feuilles des arbres en mouvement mais pas les petites branches.

Un des leviers possibles pour réduire la dérive des gouttes pourrait porter sur une réduction de ce seuil en le portant de 3 Beaufort à 2 Beaufort (soit maximum 11 km h⁻¹ ou 3,05 m s⁻¹) par exemple, en se basant sur le fait qu'un vent plus faible transporterait moins de gouttes hors du champ par dérive. Il serait intéressant d'évaluer l'efficacité de ce levier soit via des mesures soit également par modélisation.

Quelques exemples de résultats expérimentaux peuvent être trouvés dans la littérature ainsi qu'illustré dans la Figure 7 dans le cas de mesures de dérive sédimentaire en contexte de grandes cultures via des mesures mais aussi des simulations grâce au modèle IDEFICS (Holterman *et al.*, 1997) et dans la Figure 8 dans le cas de la dérive sédimentaire en arboriculture (Holterman *et al.*, 2018). Les auteurs indiquent bien une dépendance de la dérive sédimentaire avec le vent. En effet la comparaison des données ponctuelles de dérive mesurées et simulées (Figure 7) montre à la fois une bonne corrélation entre mesure et simulation mais également la dépendance globale de la dérive aux conditions de vitesse de vent. Les auteurs qualifient cette dérive d'un peu différente de celle pouvant être observée en grandes cultures, et indiquent que la dispersion des points de mesure est assez forte.

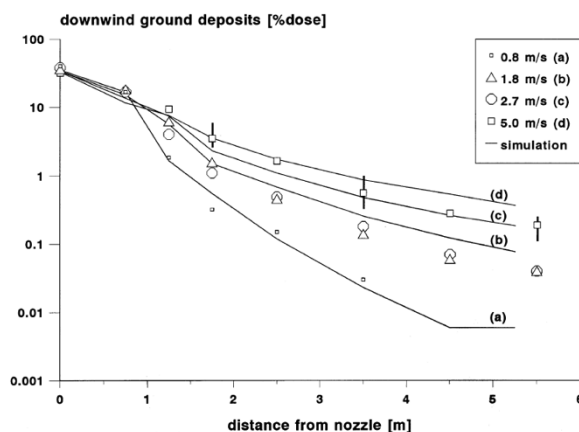


FIGURE 7 : INFLUENCE DE LA VITESSE DE VENT MOYEN SUR LES DEPOTS EN BORDURE DE PARCELLE (GRANDES CULTURES) MESUREES (SYMBOLES) ET SIMULEES (LIGNES CONTINUES) A L'AIDE DU MODELE IDEFICS (HOLTERMAN ET AL., 1997).

La figure 8 illustre la dépendance de la dérive sédimentaire (distance de 4 à 6 m du bord du champ) à la vitesse du vent à partir de données obtenues au Pays-Bas lors de traitements en vergers de pommiers, dans différentes conditions de stade végétatif. L'effet de différentes techniques de pulvérisation a été étudié durant 20 ans. Les données utilisées dans cette figure sont celles obtenues pour le système de référence : pulvérisateur à flux dirigé Munckhof avec des buses à cône creux Albuz ATR lilas lors d'application à 7 bars et de 175 à 200 l ha⁻¹, avec deux régimes de flux d'air k_{fan} (haut et bas). Une solution aqueuse du traceur BSF a été utilisée et les collecteurs au sol ont été placés sur 2 rangées perpendiculaires au dernier rang de pommiers. Le jeu de données comporte 158 expérimentations entre 1992 et 2011 (5400 collecteurs). Au fil des années, il y a eu quelques variations dans le protocole : nombre de rangées traitées N (de 5 à 8,5 ; médiane à 8), les distances sous le vent explorées x (3-7 m, 3-13 m, 1,5-25,5 m) et les conditions météorologiques (la température ambiante ayant varié de 5 à 28°C avec une médiane à 17°C ; l'humidité relative de l'air ayant varié de 24 à 88% avec une médiane à 63%, la vitesse du vent ayant varié de 0,4 à 7,2 m s⁻¹ avec une médiane de 63% et la direction du vent ayant varié de 0 à 53° avec une médiane à 10°). Le stade phénologique selon

⁸ * Arrêté du 4 mai 2017 relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et de leurs adjuvants visés à l'article L. 253-1 du code rural et de la pêche maritime modifié par l'arrêté du 27 décembre 2019

l'échelle BBCH, a quant à lui varié entre 0 et 93 (médiane à 74). Enfin, la hauteur moyenne des arbres était d'environ 2,25 m, la distance entre les rangées d'arbres était de 3,0 m et la distance entre d'arbres en ligne était de 1,2 m, mais il a pu y avoir des tailles de pommiers différentes selon les années.

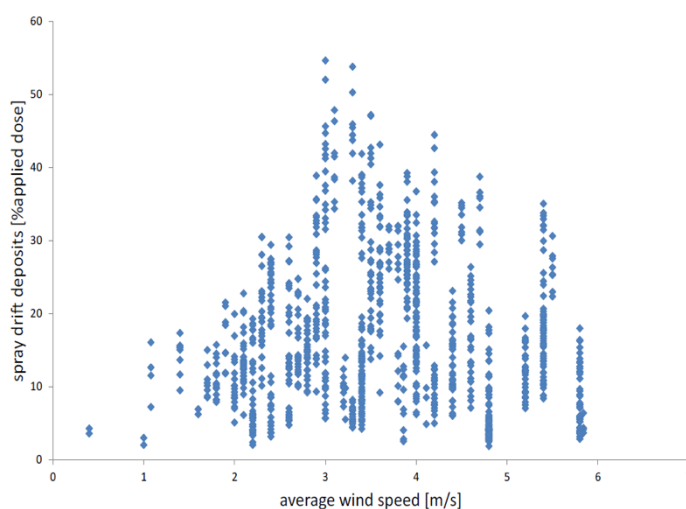


FIGURE 8 : DERIVE SEDIMENTAIRE (ZONE 4 A 6 M SOUS LE VENT) D'UN PULVERISATEUR DE REFERENCE MESUREE EN ARBORICULTURE EN FONCTION DE L'INTENSITE MOYENNE DU VENT (HOLTERMAN ET AL. 2018).

La mesure appropriée du vent soulève également la question de l'analyse des résultats généralement acquis à fréquence élevée (la norme ISO 22866 préconise une fréquence de 1 Hz soit une mesure par seconde) pour laquelle il faut combiner des vitesses et des directions instantanées variables. Ainsi la rose des vents (Exemple Photo 5) permet de représenter l'ensemble des données et leur poids statistique mais ce diagramme ne peut être résumé simplement. D'autres représentations de la vitesse et de la direction du vent, plus intégratives, sont possibles (ex. représentation en mètres de vent) mais la moyenne de vitesse apparaît comme la donnée la plus couramment rencontrée.

Si le vent apparaît indéniablement comme un paramètre d'influence sur la dérive, il convient de mieux en préciser la métrologie (hauteur, fréquence, etc.) ainsi que le processus analytique. En effet, il faut combiner des intensités et des orientations de vent instantanées, toutes deux extrêmement variables, afin de fournir une information véritablement explicative du risque de dérive. Il est important que cette information soit disponible pour l'agriculteur.

Sans évaluer plus avant l'efficacité de ce levier, nous avons toutefois cherché à savoir quelles seraient les conséquences d'une telle mesure sur les heures alors disponibles pour réaliser les traitements via des données d'Arvalis sur quelques stations (Tableau 9). Si l'on considère uniquement les plages de temps en journée (7h-18h), cela pourrait diminuer significativement les créneaux possibles de traitement. Cette analyse serait toutefois à approfondir à partir d'un ensemble de conditions plus large, notamment dans différentes régions, et après avoir testé l'efficacité de ce levier.

TABLEAU 9 : FREQUENCE DES VITESSES DE VENTS (TOUTES DIRECTIONS) SUR QUELQUES STATIONS

Station	Période étudiée (1990-2010)	Tranche horaire étudiée	% d'heures dont la vitesse du vent > 3 Beaufort correspondant à la réglementation en vigueur	% d'heures dont la vitesse du vent > 2 Beaufort
Lyon St Exupéry (69)	mars à mai	7h00 à 18h00	25,5%	49,5%
Niort (79)	mars à mai	7h00 à 18h00	34,0%	65,6%
Colmar (68)	avril à mai	5h00 à 19h00	21,2 %	48,3%

Sur ces 3 exemples, abaisser le seuil de tolérance pour les applications de produits phytopharmaceutiques à 2 Beaufort reviendrait à doubler le nombre d'heures pour lesquelles la vitesse dépasserait le seuil.

Par ailleurs, les gouttes transportées dans l'air et déposées sont rapidement soumises à évaporation sous l'effet combiné de la température et de l'humidité selon le diagramme enthalpique de Mollier pour l'eau.

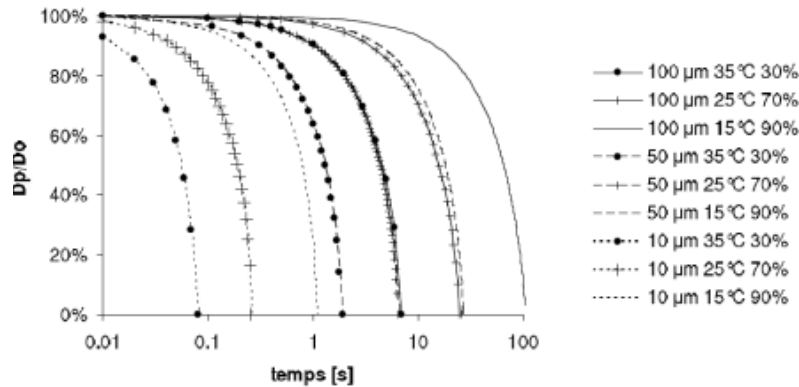


FIGURE 9 : CINÉTIQUES D'ÉVAPORATION DE GOUTTES D'EAU SELON LA TEMPÉRATURE, L'HUMIDITÉ ET LA TAILLE INITIALE DES GOUTTES (D'APRÈS HOLTERMAN, 2003).

La Figure 9 obtenue par modélisation et pour des fines gouttes, indique quant à elle les cinétiques de variation du diamètre selon les conditions atmosphériques (température et humidité relative) mais également le diamètre initial des gouttes (et par voie de conséquence le volume des gouttes). En effet, sous les mêmes conditions atmosphériques (35°C – 30% HR), le temps d'évaporation passe de 0,1 s à 2 s et 8 s pour des diamètres passant de 10 à 50 et 100 μm respectivement. Lorsque l'on compare des gouttes de 10 μm et 50 μm de diamètre, le rapport de temps d'évaporation correspond à un facteur 20 pour un rapport de volume initial de 125. Quand on passe des gouttes de diamètre de 10 μm à 100 μm , le facteur de temps d'évaporation atteint un rapport de 80 pour un rapport de volume initial de 1000.

Au-delà de la vitesse du vent, la taille initiale des gouttes est un paramètre important car l'évaporation de fines gouttes conduit à la production de particules plus ou moins sèches qui vont contribuer à l'exposition des riverains. Les conditions atmosphériques sont donc à intégrer systématiquement dans les modèles de dérive.

ROSE DES VENTS

Vent horaire à 10 mètres, moyenné sur 10 mn

Période 1990-2010 - Mois d'AVRIL à MAI

COLMAR-MEYENHEIM (68)

Indicatif : 68205001, alt : 207 m., lat : 47°55'42"N, lon : 07°24'24"E

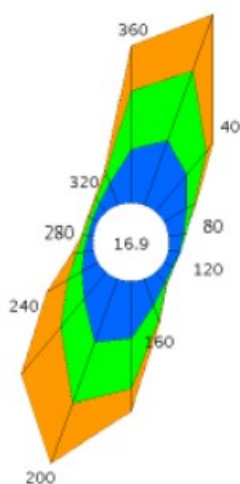
Fréquence des vents en fonction de leur provenance en %

Valeurs horaires à 5h00, 6h00, 7h00, 8h00, 9h00, 10h00, 11h00, 12h00, 13h00, 14h00, 15h00, 16h00, 17h00, 18 et 19h00, heure UTC

Tableau de répartition

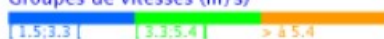
Nombre de cas étudiés : 17338

Manquants : 1877



Dir.	[1,5;3,3[[3,3;5,4[> 5,4 m/s	Total
20	4.7	5.1	4.1	13.9
40	3.3	2.0	0.8	6.2
60	1.8	0.6	0.2	2.6
80	1.1	0.1	+	1.2
100	0.8	+	+	0.8
120	0.7	+	+	0.8
140	1.0	0.2	+	1.1
160	1.9	1.0	0.2	3.2
180	3.9	3.5	1.5	8.9
200	4.6	4.5	4.4	13.4
220	2.4	2.5	4.3	9.1
240	1.2	1.2	1.6	4.0
260	0.6	0.6	0.3	1.5
280	0.4	0.3	0.1	0.8
300	0.4	0.3	0.1	0.8
320	0.7	0.4	0.1	1.3
340	1.6	0.8	0.3	2.6
360	3.7	4.0	3.0	10.7
Total	34.8	27.1	21.2	83.1
[0;1,5[16.9

Groupes de vitesses (m/s)



Pourcentage par direction



Dir. : Direction d'où vient le vent en rose de 360° : 90° - Est, 180° - Sud, 270° - Ouest, 360° - Nord
le signe + indique une fréquence non nulle mais inférieure à 0.1%

Page 1/1

Edité le : 21/01/2011 dans l'état de la base

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

METEO FRANCE Centre départemental de l'Essonne
BP 109 94396 ORLY AEROGARE CEDEX
Tél. : 01 49 75 60 60 - Fax : 01 49 75 38 43 - Email : cdm91@meteo.fr

PHOTO 5: EXEMPLE DE ROSE DES VENTS SUR UNE PERIODE DE 20 ANS - SITE DE COLMAR.

6. DISPOSITIFS DISPONIBLES OU EN COURS D'ÉLABORATION POUR MESURER LA DÉRIVE LORS DE LA PULVÉRISATION ET LA VOLATILISATION EN POST-APPLICATION

6.1. Contexte

La méthode officielle pour mesurer la dérive de pulvérisation est définie par une norme ISO intitulée « mesurage de la dérive du jet au champ » (ISO 22866, 2005). Cette méthode ISO de référence pour la mesure de la dérive qui doit être réalisée *in situ*, avec des conditions de vent bien définies, est souvent impossible à mettre en œuvre pour une importante quantité d'essais, dans des limites de temps de travail et de coûts acceptables.

Cette norme ISO décrit deux méthodes de collecte de la dérive : méthode sédimentaire et méthode aérienne. Elle précise « le dépôt sur des surfaces horizontales est intéressant pour l'évaluation du risque de contamination de la surface de l'eau, par exemple, alors que le mesurage par capteurs aériens est pertinent pour des évaluations des risques liés aux effets de l'inhalation et à la contamination, par exemple des structures végétales aux limites des champs. Cette norme internationale s'applique aux deux situations, bien que l'accent puisse être mis au cours des séries d'essais sur l'un ou l'autre aspect, par la sélection de la matrice d'échantillonnage à utiliser. »

Dans le contexte de l'arrêté ministériel de septembre 2006 puis de ses mises à jour successives qui visaient la protection de eaux de surface par la mise en place de ZNT, ce sont les mesures de dérive sédimentaires qui ont été privilégiées. Au demeurant, la norme ISO 22866 décrit bien une méthode de collecte de la dérive aérienne et la reconnaît comme étant pertinente pour l'évaluation d'autres risques inhérents à la dérive de pulvérisation.

Le projet PREPARE (PRotocol de mesure des Emissions des Pesticides vers l'Atmosphère), coordonné par INRAE (unités ECOSYS et ITAP) en collaboration avec l'Université de Wageningen (WUR), a permis, avec la réunion d'une vingtaine d'experts européens et des USA, la définition de protocoles standard à l'échelle européenne pour la mesure de la dérive aérienne et de la volatilisation post application (Bedos *et al.*, 2019). L'évaluation de la dérive aérienne est proposée en utilisant des collecteurs passifs (ex. fils polyéthylène Ø 2mm, boules polystyrène) et, de manière optionnelle, des collecteurs actifs (aspirateurs à air avec cartouche filtrante). Si ce protocole correspond à un consensus parmi les experts, il doit néanmoins être validé sur le terrain car peu de données existent à l'échelle européenne.

6.2. Mesure de la dérive en viticulture

En viticulture des travaux ont débuté en 2016 dans le cadre d'un programme financé par le Ministère en charge de l'agriculture (CASDAR). Ces travaux avaient pour objectif de mettre au point une méthodologie de substitution à la norme ISO afin de faciliter la réalisation des tests de dérive : création d'un champ de vent artificiel conforme aux exigences de la norme ISO 22866 et utilisation d'une végétation artificielle.

Ainsi, l'UMT ECOTECH (INRAE-IFV) a mis au point un dispositif unique : le banc d'essai EoleDrift. La méthodologie de mesure est en cours de finalisation dans le cadre du projet StopDrift (ECOPHYTO). L'objectif est de définir et valider des procédures de tests de routine et de disposer d'informations précises sur la répétabilité des mesures issues de ces méthodes à l'automne 2020.

Caractéristiques techniques :

Vue d'ensemble du banc d'essai:

Comme le montre le schéma en vue de dessus ci-après (Figure 10), le banc d'essai EoleDrift est composé de 4 éléments principaux :

- un dispositif de soufflage ou mur de ventilateurs ;
- quatre rangs de vigne artificielle ;
- un réseau de capteurs des conditions météorologiques au moment des mesures ;
- un dispositif de collecte des embruns de pulvérisation.

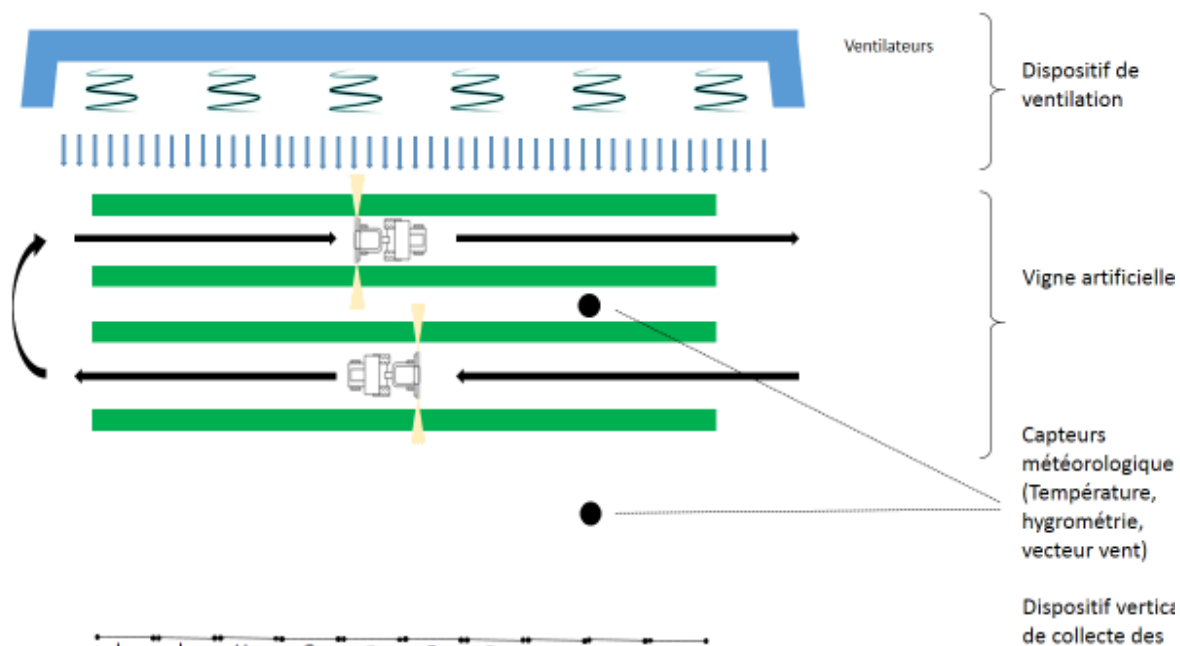


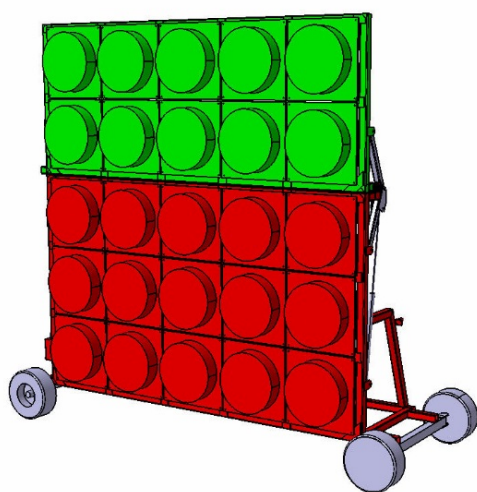
FIGURE 10 : VUE DE DESSUS SCHEMATIQUE DU BANC D'ESSAI EOLEDRIFT.

Les mesures de dérive sont réalisées à l'aide d'un traceur pulvérisé en simulant le traitement des 4 rangs de vigne de 10 m de long du banc d'essai sous un régime de vent stable et maîtrisé. La vitesse moyenne en sortie des ventilateurs est de l'ordre de 8 m s^{-1} et, selon les conditions de vent naturelle, une vitesse résiduelle d'environ 3 m s^{-1} est observée au niveau du plan de collecte. Des collecteurs placés sous le vent à 10 m de la limite de la parcelle artificielle reçoivent les embruns partis en dérive. Enfin, leur analyse révèle le potentiel de limitation de la dérive de la technique de pulvérisation passée au banc d'essai.

Des développements méthodologiques en vue de mesures de dérive avec du matériel de pulvérisation dédié au vignoble étroit sont prévus en 2020. 9 rangs de vigne artificielle espacés de 1,1 m seront mis en œuvre.

Description du dispositif de soufflage :

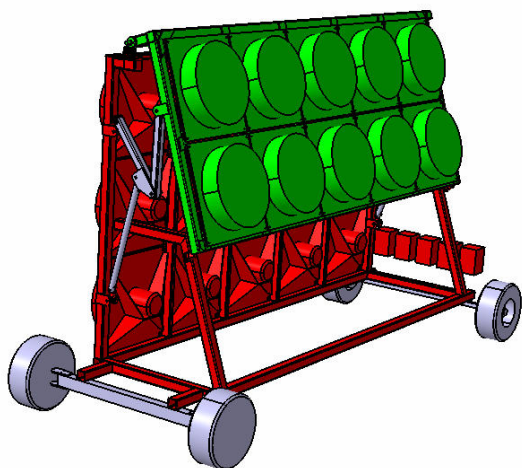
Comme le montrent les schémas issus de logiciels de CAO ci-dessous (Figure 11), il s'agit d'un mur de ventilateurs repliable et mobile.



Vue de devant déplié
de l'arrière déplié



Vue



Ce mur de ventilateurs occupe une surface de 25 m², il s'agit d'un carré de 5 m de haut par 5 m de large. Chaque ventilateur occupe un logement d'un m², 25 ventilateurs sont donc assemblés au total dans ce dispositif.

La puissance électrique nécessaire au fonctionnement des ventilateurs à leur régime nominal s'élève à 18 kWh au total. Chacune des 5 rangées horizontales de variateurs est contrôlée par un variateur permettant d'ajuster le débit d'air produit. De plus protection thermique de chacun des 25 moteurs de ventilateur est assurée.

Vue de l'arrière replié

FIGURE 11 : MUR DE VENTILATION

Une étude aéroulque menée en partenariat avec le CSTB⁹ a montré que la vitesse d'air de 8 m.s⁻¹ débitée immédiatement en sortie du mur permettait d'obtenir des conditions de vent propices à la mesure de dérive selon la norme ISO 22866 jusqu'à 10 m après le dernier rang de vigne artificielle (soit à une distance de 22,5 m du mur de vent). En effet, les résultats de la simulation numérique présentés Figure 12 ci-dessous montrent que jusqu'à 10 m après le dernier rang de vigne, environ 50% de la vitesse d'air débitée par les ventilateurs est toujours présente quelle que soit la hauteur considérée.

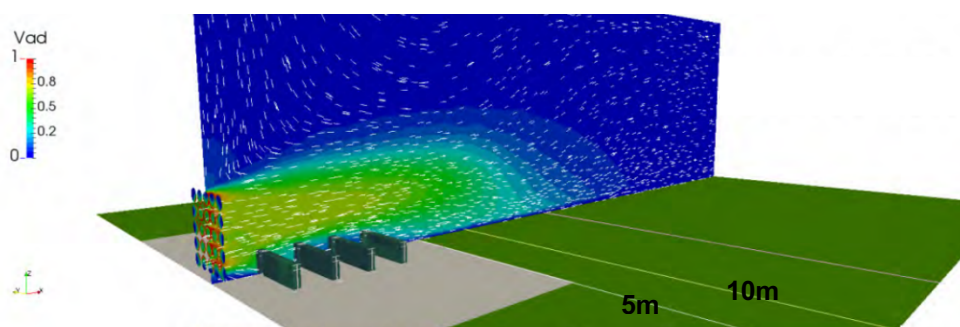


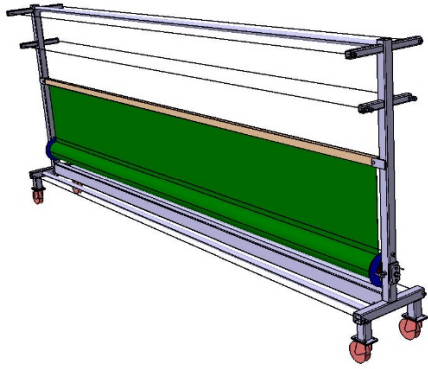
FIGURE 12 : CARTOGRAPHIE PAR SIMULATION NUMERIQUE DE LA PROPORTION DE LA VITESSE DE VENT DEBITEE PAR LES VENTILATEURS EN VIGUEUR DANS UN PLAN VERTICAL PARALLELE AU SOUFLAGE (CSTB).

Description des quatre rangs de vigne artificielle :

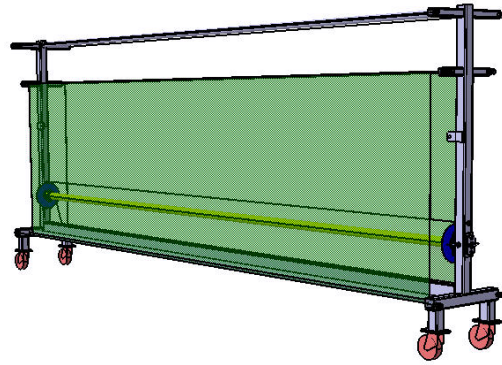
Les quatre rangs de vigne artificielle de 10 mètres de long utilisés dans le cadre du banc d'essai EoleDrift sont constitués de filets dont la porosité mime parfaitement celle d'un rang de vigne d'après une étude menée par le CSTB (Figure 13).

Cette vigne artificielle peut être modulée selon trois stades végétatifs et la distance inter-rang peut varier. Ainsi, tout type de pulvérisateur viticole qu'il soit dédié au vignoble large ou au vignoble étroit est susceptible d'être testé. De plus cette artificialisation de la végétation permet de réaliser des essais correspondant à chacun des stades végétatifs à toute période de l'année.

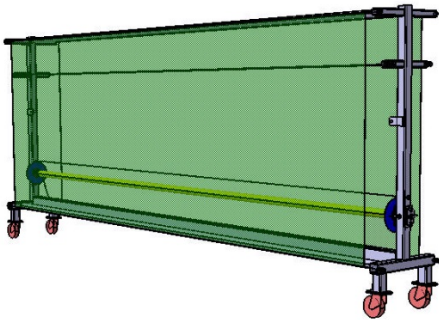
⁹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment



Vigne artificielle en début de végétation



Vigne artificielle en milieu de végétation



Vigne artificielle en pleine végétation

FIGURE 13 : VIGNE ARTIFICIELLE

Description du réseau de capteurs des conditions météorologiques :

Le banc d'essai EoleDrift est équipé d'un réseau de capteurs météorologiques permettant, avant le lancement de la pulvérisation, de s'assurer grâce à un affichage en temps réel de la conformité des conditions de vent, de température et d'hygrométrie pour la mesure de dérive (critères de la norme ISO 22866). Un enregistrement de ces conditions pendant toute la durée de la pulvérisation est également assuré automatiquement de manière à alimenter la traçabilité des essais et à valider leur conformité selon les critères de la norme. Pour faciliter la supervision des conditions météorologiques pour les opérateurs pendant la réalisation des essais, une application mobile « EoleView » affichant les mesures en temps réel a été développée (Figure 14).

Deux anémomètres à ultrason sont utilisés pour contrôler les caractéristiques du vent artificiel produit. Conformément à ce qui est précisé dans la norme ISO 22866, la température est mesurée à deux hauteurs pour s'assurer de l'absence de courants d'air ascendants de type thermique. L'hygrométrie, influençant l'évaporation des gouttes de pulvérisation est également mesurée.

Ainsi au-delà des mesures de dérive, le dispositif Eoledrift en générant un flux relativement normé peut également servir toute opération d'étalonnage par exemple pour les préleveurs d'air.

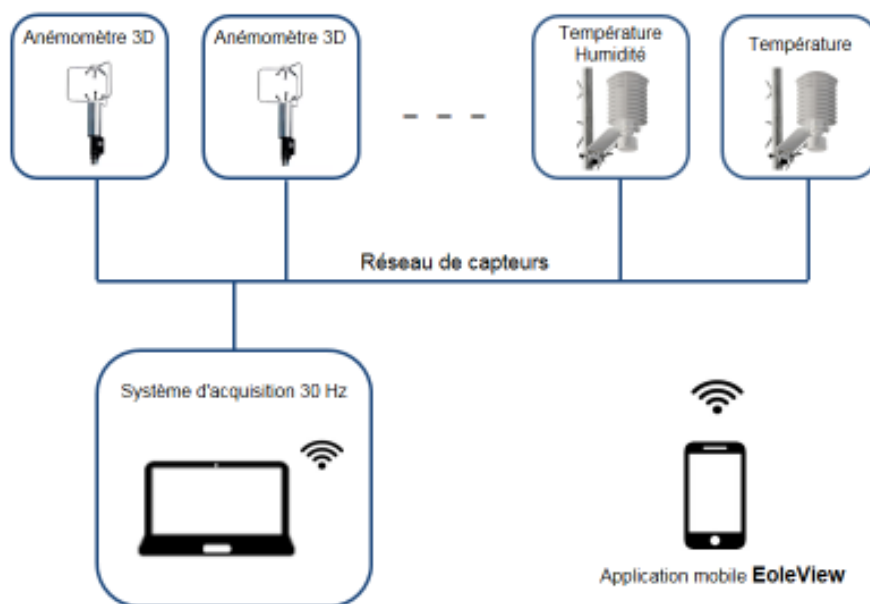


FIGURE 14 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE RESEAU DE CAPTEURS METEOROLOGIQUES IMPLANTES SUR LA PLATEFORME DU BANC D'ESSAI EOLEDRIFT, POUR LE CONTROLE DE LA CONFORMITE DES CONDITIONS DE MESURE ET LA TRAÇABILITE DES ESSAIS.

Description du dispositif de collecte des embruns de dérive :

La collecte de la dérive est assurée par des fils en polyéthylène horizontaux et situés dans un plan vertical à une distance de 10 m du dernier rang de vigne artificielle. Un fil est placé tous les 50 cm de hauteur jusqu'à 6 m de haut conformément aux recommandations de la norme ISO 22866 pour ce qui concerne l'évaluation de la dérive aérienne en cultures pérennes (Photo 6 et 7). A l'avenir, afin d'optimiser le temps de manipulation, l'intérêt de dispositifs innovants d'évaluation des quantités d'embruns qui partent en dérive (LiDAR, collecteurs actifs) sera évalué grâce à la plateforme EoleDrift.



PHOTO 6 : REALISATION DES PREMIERS ESSAIS DE MESURE DE LA DERIVE SUR EOLEDRIFT - UTILISATION DU BANC EN DEBUT DE VEGETATION.



PHOTO 7 : REALISATION DES PREMIERS ESSAIS DE MESURE DE LA DERIVE SUR EOLEDRIFT - UTILISATION DU BANC SUR UN STADE DE PLEINE VEGETATION.

6.3. Mesure de la dérive en arboriculture

En arboriculture des travaux ont débuté en 2015 dans le cadre du projet National PulvArbo (2015-2020) soutenu par le Ministère en charge de l'agriculture (DGAL) et financé par l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB). Plusieurs axes de travail constituent ce projet dont l'un portant sur la mise au point d'une méthodologie de substitution à la norme ISO afin de faciliter la réalisation des tests de dérive. La simplification devrait permettre de lever la majorité des contraintes techniques et économiques rencontrées dans le cadre du protocole actuel, comme le précise le Tableau 10 ci-dessous.

TABLEAU 10 : CONTRAINTES DU PROTOCOLE ISO22866 DE MESURE DE DERIVE AERIEENNE ET INTERETS D'UN PROTOCOLE SIMPLIFIE.

Niveau d'analyse	Protocole ISO 22866 (sédimentaire)	Protocole simplifié (aérienne)	
Technique	Parcelle correctement orientée et zone nue adjacente de 50 m entretenue.	Zone nue restreinte (5 m après le dernier rang), facilitation à trouver des parcelles	→ Démultiplication des sites d'essai susceptibles de correspondre aux besoins du protocole.
Humain	50 boîtes de pétri par répétition.	Deux mâts et 17 fils.	→ Facilité d'organisation vis-à-vis des besoins humains et météo
Météorologique	Si l'orientation du vent change, difficile de réaliser le protocole.	En quelques minutes les deux mâts peuvent être déplacés de l'autre côté du verger.	→ Probabilité plus élevée à réaliser l'essai dans une situation convenable
Economique	50 échantillons à analyser au spectrophotomètre.	17 échantillons à analyser au spectrophotomètre.	→ Diminution du temps d'analyse.
Environnemental	Protocole adapté à la dérive sédimentaire vis-à-vis de la réglementation des ZNT.	Protocole adapté aux spécificités de l'arboriculture caractérisée par de la dérive atmosphérique.	→ Meilleure prise en compte des problématiques liées à la qualité de l'air.

La pertinence de ce protocole simplifiée est jugée sur :

- sa capacité à faciliter la mise en œuvre des essais par rapport au protocole actuel ;
- sa capacité à comparer différents matériels entre eux en vue de leur homologation comme moyens de réduction de la dérive ;
- sa capacité à aboutir aux mêmes conclusions que le protocole de référence actuel, au niveau du classement des matériels, au niveau du taux de réduction de la dérive.

Depuis 2015, 19 essais de comparaison « mesure de la dérive sédimentaire » et « mesure de la dérive aérienne » ont pu être conduits. Ces essais ont été conduits en collaboration avec INRAE (UMR ITAP – Montpellier, UMT ECOTECH) sur les deux seuls sites ayant une parcelle conforme à la norme ISO 22866, le site du CTIFL de Lanxade et le site de SudExpé. La mise au point technique du protocole de mesure de dérive aérienne est validée pour l'arboriculture (positionnement des mâts, hauteur des mâts, nombre de fils de collecte). La synthèse des 4 années d'essai (profils sédimentaires, profils aériens de différentes modalités) est en cours pour un rendu du livrable au Ministère et à l'AFB à l'automne 2020.

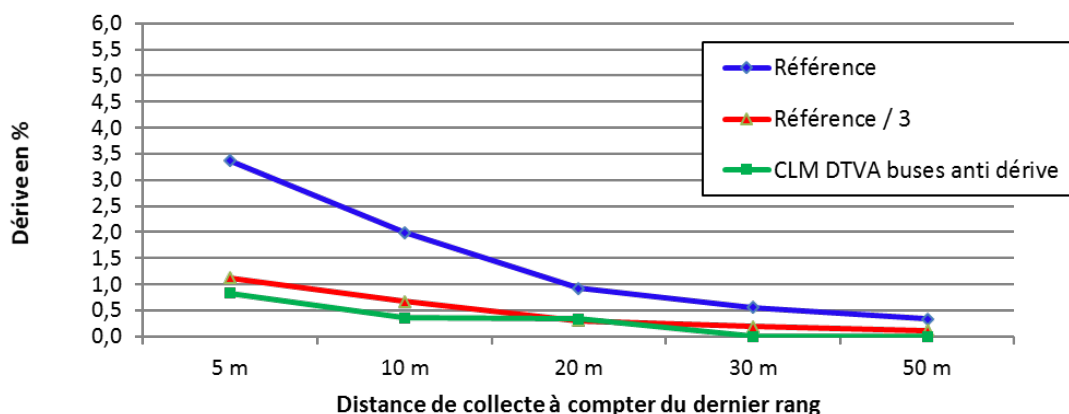
Dispositif disponible actuellement pour la mesure de la dérive en arboriculture :

Le CTIFL de Lanxade (Bergerac) dispose d'une parcelle dédiée aux essais dérive. La principale contrainte limitant les essais est la disponibilité en main d'œuvre et les créneaux météorologiques répondant à la norme en termes d'orientation et de vitesse du vent. Le dispositif est composé :

- de 4 rangs de pommiers de 60 m de long ;
- d'une zone de 50 m en sol enherbé et entretenu de part et d'autre de ces 4 rangs permettant la collecte sédimentaire et la collecte aérienne en fonction du vent ;
- d'une station météo permettant l'enregistrement in situ des données pendant les essais ;
- du matériel de collecte sédimentaire à 5, 10, 20, 30 et 50 m du dernier rang : supports collecteurs, collecteurs (boîtes de Pétri) ;
- du matériel de collecte aérienne : 2 mâts de 12 m de haut, collecteurs (fils de PVC) ;
- de traceurs (BSF, tartrazine) ;
- du matériel d'analyse des échantillons : spectrofluorimètre et consommables.

Les mesures de dérive sont réalisées à l'aide d'un traceur (tartrazine ou BSF) pulvérisé sur les 4 rangs. La collecte sédimentaire se fait par la pose de collecteurs à 5, 10, 20, 30 et 50 m du dernier rang (10 grandes boîtes de Pétri par distance de collecte). La collecte aérienne se fait par de collecteurs (fils PVC) entre deux mâts positionnés à 5 m du dernier rang. 17 fils sont tendus entre ces deux mâts afin de capter le nuage entre 0,5 m et 12 m de haut. Les collecteurs sont ensuite relevés puis acheminés au laboratoire pour extraire le traceur et réaliser les analyses. Des profils de dérive sédimentaire et aérienne sont établis pour chaque équipement, réglage ou pratique testés (Figure 15).

Courbes de dérive (en % du volume pulvérisé) médianes - Comparaison Référence / CLM DTVA
TVI, Ctifl Lanxade, 13/09/18, collecte sédimentaire



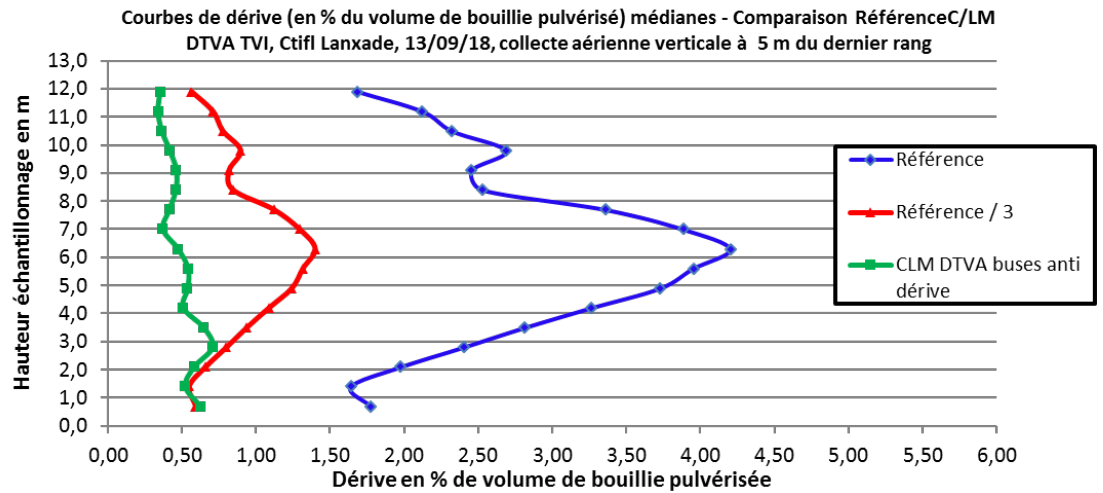


FIGURE 15 : COURBES DE DERIVE SEDIMENTAIRE ET AERIENNE MESUREES.

A l'heure d'aujourd'hui, ces essais se font donc en verger. Demain, l'objectif est de conduire ces essais en conditions standardisées au CTIFL sur le modèle de la vigne (Evapsrayviti + EoleDrift) avec en plus la possibilité de conduire ces essais en Indoor pour rentabiliser le banc de mesure toute l'année. La plateforme TITEC (Transfert Innovation TEChnologie du CTIFL de Lanxade) sera livrée à l'automne 2020. Un hall de R&D permettra de conduire en autres des essais de mesures de la dérive sur un verger artificiel avec un mur de vent artificiel.

Pour arriver à cela, il reste à :

- construire un mur de vent artificiel sur le principe d'EoleDrift (sous réserve de trouver des financements) ;
- finaliser la construction du verger artificiel (Photo 8) dont une partie a été construite dans le cadre du projet PulvArbo par l'INRAE (UMR ITAP Montpellier- UMT ECOETCH), sous réserve de trouver des financements aussi ;
- mettre au point et valider la méthodologie de mesure de la dérive en conditions standardisées indoor.

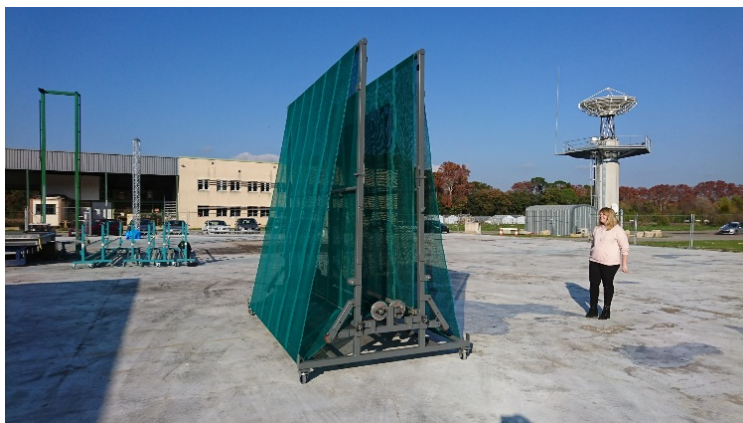


PHOTO 8 : PROTOTYPE D'UNE BORDURE DU VERGER ARTIFICIEL (GAUCHE) ET BANC FEUILLE (DROITE) (INRAE)

La construction de ce banc de mesure est une étape indispensable pour pouvoir conduire avec des contraintes acceptables et prévisibles des essais d'évaluation de performance de matériels / leviers présentant des intérêts quant à la limitation de la dérive.

6.4. Mesure de la dérive en grandes cultures :

En grandes cultures, les travaux portent essentiellement sur la mesure de dérive sédimentaire au champ selon la norme ISO 22866 et sur des mesures de dérive avec une soufflerie (ARVALIS Institut du végétal- Boigneville). Une fois le potentiel de réduction de dérive mesuré en conditions contrôlées, les buses sont testées sur le plan efficacité de protection dans des essais en micro-parcelles. L'institut est équipé de matériel spécifique pour tester spécifiquement les techniques d'application. Ce sont des quads équipés de rampes de 3 m et qui permettent par exemple de générer des volumes de bouillies variés par modification de la vitesse d'avancement.

Mesure de dérive au champ : norme ISO 22866

Bien que difficile à mettre en place par rapport à l'orientation du vent, aucun travail de simplification de cette méthode n'a vu le jour pour le moment. Cependant, des travaux d'ampleur ont été mis en place dans le cadre du projet SETAC DRAW (financé par l'ECPA) en 2018 (Mackay *et al.*, 2018). Ces travaux visaient justement à i) constituer une base de données des mesures existantes en Europe, USA et Canada, et à ii) comparer les résultats de mesure de dérive obtenus sur différents sites européens appliquant le même protocole harmonisé simultanément. Le protocole harmonisé vise à mesurer la dérive au champ sur sol nu et sur du blé tendre d'hiver à 3 stades clés : 2 feuilles, tallage et Montaison) selon la norme ISO 22866.

Des campagnes de mesures de dérive aérienne pourraient être menées selon le protocole proposée par le projet PREPARE (cf Chapitre 6.1).

Mesure de dérive avec un tunnel de dérive : ARVALIS Institut du végétal Boigneville

Un tunnel ou banc de dérive est présent sur le site de Boigneville et permet de réaliser des mesures de dérive latérale de buses sur 5 m avec une vitesse de vent prédéfinie (jusqu'à 6 m s^{-1}). Ce banc existe depuis les années 1990. Sa fonction première était d'acquérir des références sur le plan technique, notamment sur le potentiel de réduction de dérive des buses à induction d'air. Depuis 2018, suite aux événements climatiques survenus à Montpellier, il permet également de réaliser des mesures officielles permettant l'homologation des buses.

→ Description du tunnel de dérive

Le tunnel est équipé d'une soufflerie, d'une zone de transfert de dérive de 6m de longueur et d'un filtre (Photo 9 et Photo 10). Contrairement à d'autres bancs existant en Europe (IRSTEA, Montpellier et GEMBLOUX) qui fonctionnent en recyclage d'air et circuit fermé, ce banc est linéaire. De l'air rentre à l'arrière du banc, est propulsé par la soufflerie dans la zone de transfert et ressort par le filtre en bout de ligne.



PHOTO 9 : VUE D'ENSEMBLE DU TUNNEL DE DERIVE DE BOIGNEVILLE COMPOSE D'UNE SOUFFLERIE, D'UNE ZONE DE TRANSFERT ET D'UN FILTRE.

→ Principe de mesure

Une buse est positionnée en sortie de soufflerie dans la zone de transfert (Photo 10). Cette buse est mise en fonctionnement à la pression souhaitée sans vent. Le débit total est mesuré dans des éprouvettes présentes sous le banc. Ensuite, la même manipulation est réalisée en actionnant la

soufflerie. Le débit total sur les 6 m est à nouveau mesuré. La dérive de la buse est ainsi calculée par comparaison entre les débits sans vent et avec vent. Une courbe de taux de dérive est alors établie jusqu'à 5 m au-delà de la position de la buse (Figure 15) sous le vent. La courbe de la buse candidate (en bleu, Figure 16) est comparée à la courbe d'une buse de référence (en jaune). Dans l'exemple du graphique présenté, la buse candidate est comparée à 33% de la dérive de la buse de référence ; l'exigence réglementaire étant une réduction d'un facteur au moins égal à 3. La courbe de la buse candidate est au-dessus de la courbe de référence, cette buse ne peut pas être homologuée pour réduire de 66% la dérive.



PHOTO 10: VUE D'ENSEMBLE DE LA BUSE EN TEST ET DES EPROUVETTES RECUEILLANT LE LIQUIDE PULVERISE.

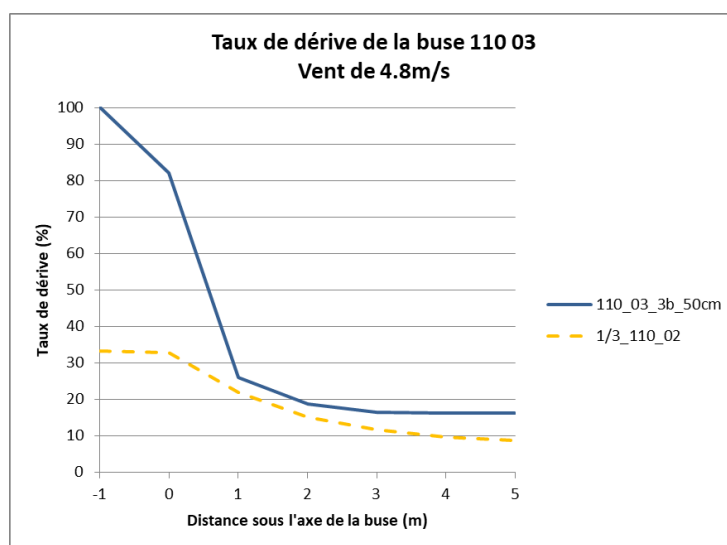


FIGURE 16 : TAUX DE DERIVE D'UNE BUSE 110 03 A 3 BAR ET 50 CM DE HAUT COMPAREE AU 1/3 D'UNE BUSE DE REFERENCE (110 02 A 2,5 BAR).

6.5. Dispositifs de mesures des flux de volatilisation de PPP

Des dispositifs de mesures de la volatilisation des matières actives en post application ont été développés depuis plusieurs années que cela soit à l'échelle du laboratoire, au champ en conditions semi-contrôlées ou au champ en conditions réelles.

6.5.1. Un préalable : la mesure de concentrations dans l'air

Quel que soit l'échelle, la mesure de flux repose sur une mesure des concentrations en matière active dans l'air.

- En l'absence d'analyseur opérationnel qui permettrait une quantification en ligne, la mesure de la concentration repose sur un prélèvement actif avec piégeage des composés sur des adsorbants adéquats, dont les composés doivent être extraits, la masse piégée étant quantifiée par une chaîne analytique adaptée. A chaque étape, un panel de solutions est disponible et le choix repose sur les propriétés physicochimiques des composés essentiellement.
- Le calcul des concentrations requiert enfin la mesure du débit de prélèvement afin de quantifier le volume d'air échantillonné.
- Les capteurs passifs, développés pour explorer le niveau de contamination de l'air aux pesticides ne sont à l'heure actuelle pas utilisés pour mesurer des flux de volatilisation de PPP
- A noter la mise au point assez récente de mesures des concentrations en air ambiant par PTRMS, qui permet de s'affranchir des étapes de piégeage et d'extraction citées ci-dessus et permet donc une détermination directe sur des pas de temps courts. Son utilisation pour accéder au flux de volatilisation est en cours de mise au point également.

6.5.2. Méthodes de mesures de flux

En laboratoire (Photo 11)

Différents systèmes reposant sur des « chambres de volatilisation » de volume plus ou moins grand ont été développés pour mesurer la volatilisation en conditions contrôlées (*i.e.* température de l'air, humidité de l'air, débit d'écoulement de l'air, rayonnement). La méthode repose sur un bilan de masse en considérant la concentration en sortie de chambre, celle en entrée (généralement considérée comme nulle) et le débit d'air. Un des challenges porte sur la possibilité d'appliquer les produits de manière homogène et représentative d'une pulvérisation en conditions agronomiques, et de contrôler la quantité appliquée. Exemple d'équipes ayant développé de tels systèmes: INRAE, UMR Ecosys (Lichiheb *et al.*, 2015) ; RLP AgroScience GmbH (R. Kubiak, G. Fent, C. Staffa) ; Helmholtz-Centre for Environmental Research – UFZ (K. Goss) ...

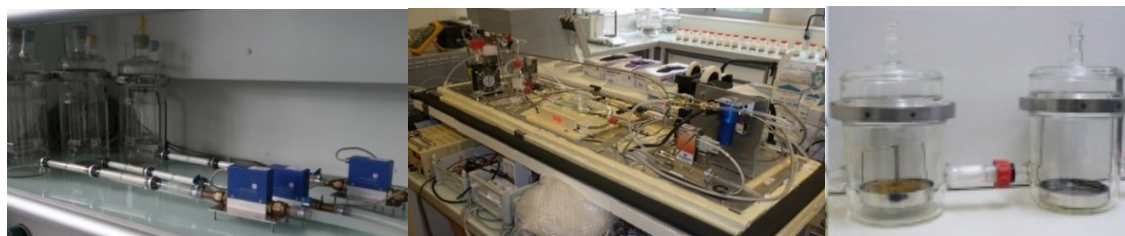


PHOTO 11 : SYSTEMES EN LABORATOIRE : (GAUCHE ET MILIEU) DEUX SYSTEMES DE L'UMR INRAE ECOSYS, (DROITE) SYSTEME DU RLP AGROSCIENCE GMBH.

En conditions semi-contrôlées au champ (Photo 12)

Des systèmes de tunnels de ventilation disposés au champ permettent de mesurer la volatilisation dans des conditions de sol et météo réalistes en appliquant le produit sur une surface de sol limitée (1 m² par exemple), de contrôler un certain nombre de facteurs (vitesse du vent au-dessus de la surface, pluie) et d'analyser l'effet d'un facteur (irrigation, effet de surface – présence de résidus de cultures- adjuvants, ...) sur la volatilisation en plaçant plusieurs tunnels en parallèle. L'application homogène sur les surfaces, même si plus facile qu'en condition de laboratoire et plus facilement quantifiable, reste également un point de vigilance.

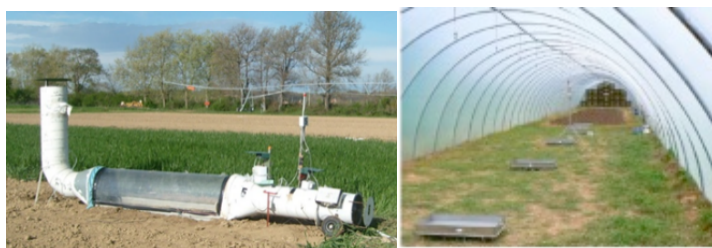


PHOTO 12 : SYSTEMES DE TUNNELS DE VENTILATION : (GAUCHE) UN DES 7 TUNNELS DE L'UMR INRAE ECOSYS, (DROITE) TUNNEL DU RLP AGROSCIENCE GMBH.

Au champ (Photo 13)

Diverses méthodes micrométéorologiques ont été utilisées dans la littérature pour mesurer des flux de volatilisation de PPP au champ, reposant toutes sur des mesures de concentrations dans l'air au-dessus de la parcelle traitée et des conditions micrométéorologiques locales (Photo 13). Un gros atout de ces méthodes est de quantifier les pertes par volatilisation représentatives de l'échelle de la parcelle traitée sans perturber le milieu. Les jeux de données existants dans la littérature ont été identifiés dans le cadre du projet PREPARE (Bedos, Douzals, van den Berg, 2019). Dans le cadre de ce projet, un protocole standard de mesures de flux de volatilisation au champ (en plus du protocole de mesure de la dérive aérienne cité plus haut) a été défini en concertation avec les équipes spécialistes du sujet au niveau européen (Aeforia Italie, Aarhus University Danemark, WUR Pays-Bas, Silsoe Spray Application Unit Angleterre, INRAE Ecosys France, Université de Ghent & Issep Belgique, RLP AgroScience GmbH Allemagne, SLU Suede) et l'appui d'un collègue de l'USDA Etats-Unis (J. Prueger) qui a étudié la volatilisation du S-métolachlor sur plusieurs années.



PHOTO 13 : MESURES AU CHAMP : (GAUCHE) SYSTEMES DE PRELEVEMENTS D'AIR, (DROITE) MAT MICROMETEOROLOGIQUE

7. BESOIN POUR LA RECHERCHE

Ce chapitre identifie les besoins en termes d'études et de recherches complémentaires. En effet, les distances de sécurité actuelles, traduites en ZNT, résultent de l'évaluation des risques réalisée selon les démarches EFSA, basées sur des approches de modélisation, avec une modulation intégrant des facteurs d'atténuation en fonction des conditions de pulvérisation, souvent considérées comme « pire cas réaliste¹⁰ ». Une réduction de ces distances de sécurité nécessite une vérification de l'efficacité des mesures identifiées en diverses situations d'application et en fonction des voies de transfert - exposition à considérer : la dérive et la volatilisation post-application sur les personnes présentes ou résidentes. L'exposition à plus large échelle de l'ensemble de la population sort du champ de cette analyse.

Les personnes proches des parcelles traitées, les riverains, peuvent être exposés à des PPP présents dans l'air sous forme de gouttes ou de gaz (cf Chapitre 1. *Contexte*). Les concentrations en PPP dépendent de l'intensité et des caractéristiques physiques et chimiques de l'émission et de la dispersion atmosphérique, elle-même dépendant des conditions météorologiques et de la présence d'obstacles. Ces concentrations diminuent en général rapidement en fonction de la distance à la source (c'est-à-dire la parcelle traitée), mais de manière différenciée, dans les trois dimensions, selon que l'on considère des particules ou des gaz. Les concentrations évoluent également dans le temps de manière très différenciée selon les processus d'émission. Outre l'état du composé (gouttes vs gaz) et sa concentration (espace/temps) à l'emplacement de la population étudiée, évaluer l'exposition des riverains via le compartiment atmosphérique requiert d'évaluer l'exposition par inhalation et par voie cutanée.

De ce fait, on distinguera les besoins de recherche pour réduire l'exposition des riverains par dérive aérienne et-sédimentaire de ceux pour réduire l'exposition liée à la volatilisation. Dans chaque cas, nous précisons s'il s'agit de recherches à court (année en cours) et moyen termes (2 prochaines années) ou de recherches nouvelles à engager sur le long terme (> 2 ans). Une troisième partie abordera les recherches transversales à ces voies d'exposition.

Un préalable : une multitude de situations étant à considérer (cultures / matériels de pulvérisation y compris matériels antidérive préconisés/hauteur de traitement / produits utilisés / conditions météorologiques/organisation spatiale / distances / durée), il semble judicieux de définir des scénarios pertinents qui serviraient de référence et de cadre pour la conception d'expérimentations, les simulations par des modèles et l'analyse et la synthèse des données.

7.1. Travaux de recherche pour réduire l'exposition par dérive des gouttes de pulvérisation

7.1.1.- Travaux à court terme

➤ Agroéquipements

L'adoption de buses antidérive reste problématique pour tous les secteurs de production car perçues, à tort, comme peu efficaces. Ce verrou pourrait certainement être levé si tous les essais d'efficacité biologique préliminaires à l'AMM étaient systématiquement réalisés avec des buses antidérive. Cela permettrait de redéfinir les conditions d'application optimales (dose/volume/ha) adaptées.

Sur **grandes cultures**, des travaux doivent être engagés pour démontrer l'efficacité technique des buses antidérive (notamment les buses à réduction 90%) sur diverses cibles et pour différents modes d'action de produits appliqués. Une attention particulière devrait être apportée sur la notion de volume de bouillie/ha car l'interaction est importante entre qualité de pulvérisation et volume de bouillie. La caractérisation normée des buses doit être poursuivie et s'accompagner de l'instruction d'une proposition de réduction des distances non traitées en fonction du niveau de réduction de la dérive mesurée. Ces travaux concernent toutes les grandes cultures : céréales, oléo-protéagineux, betteraves.

En arboriculture, les travaux devraient se poursuivre selon deux axes :

¹⁰ A l'inverse, depuis 2010, les semoirs pneumatiques semant des graines enrobées intègrent obligatoirement le moyen de réduction du risque de dérive de poussière d'insecticide (déflecteur) et les scénarii d'exposition peuvent donc être considérés comme « meilleurs cas réalistes ».

- La poursuite des évaluations des performances antidérive des équipements déjà sur le marché ou nouvellement commercialisés (pulvérisateurs, buses PWM, buses à dérive limitée) et des pratiques qui pourraient limiter la dérive (gestion du flux d'air sur les rangs de bordure) ;
- La poursuite des travaux sur des techniques d'application de rupture, alternative aux applications classiques par pulvérisation :
 - ✓ Evaluer la technique Pulvéfix sur une large gamme de cibles et sa combinaison éventuelle avec un passage de pulvérisateur (contre oïdium, pucerons cendrés) ; confirmer son fort intérêt environnemental (plus de 90 % de réduction de la dérive) dans différentes situations ; valider les conditions de sa reconnaissance officielle ;
 - ✓ Evaluer la microinjection sur une large gamme de modèles arboricoles et de cibles (testée actuellement) sur pucerons cendrés du pommier, carpocapse du châtaignier.

Pour que ces essais (notamment la poursuite des évaluations des performances antidérive des équipements) soient conduits de manière optimale, et apportent des résultats à courts/moyens termes, des équipements spécifiques et un dispositif complet d'évaluation sont nécessaires pour conduire les essais en conditions contrôlées standardisées (sans contraintes des aléas des conditions extérieures). Certains éléments de ce dispositif sont déjà disponibles, il manque à ce jour un mur de vent artificiel et une partie du verger artificiel.

En vigne, il est prévu de programmer des expérimentations sur le banc d'essai EoleDrift 2020. Le banc d'essai EoleDrift (voir Chapitre « Dispositifs ») a été développé afin d'évaluer la capacité du matériel de pulvérisation viticole à réduire la dérive en s'affranchissant des lourdes contraintes imposées par le protocole de mesure décrit dans la norme ISO 22 866. La première campagne de mesures sur le banc d'essai (saison 2019), a permis, d'une part, d'obtenir des résultats prometteurs sur sa capacité à positionner les matériels dans les différentes classes du cadre européen et, d'autre part, l'allègement de la quantité de travail à fournir par rapport à des mesures au champ. Les essais réalisés au cours de la campagne 2020 auront pour objectif central de finaliser la validation d'un protocole de mesure en routine afin de s'assurer de la répétabilité des mesures. Il s'agira d'obtenir la fiabilité des mesures requise pour classer les matériels dans les classes de réduction de la dérive européennes (valider la répétabilité pour des types de pulvérisateurs aux caractéristiques contrastées). Il s'agira également d'évaluer la capacité de diverses techniques de pulvérisation pressenties dans la bibliographie à effectivement réduire cette dérive.

Le détail des essais prévus apparaît en Annexe 10.5.

7.1.2. Travaux à moyen/ long terme

Un point d'attention à travailler est celui de la transposition des données obtenues dans des expérimentations sur la dérive avec des traceurs ou directement avec de l'eau, par rapport à des situations réelles d'application des PPP formulés. Les co-formulants, ainsi que les adjuvants, modifient en effet les propriétés physicochimiques des solutions (tension superficielle, ...) avec un impact potentiel sur les caractéristiques des gouttes de pulvérisation et leur comportement dans l'atmosphère. Cette analyse peut être réalisée via des campagnes de mesures dédiées.

Des questions relatives à la taille des gouttes et à leur devenir restent à élucider. En effet, le devenir des gouttes les plus fines est encore mal caractérisé alors que ce sont celles qui sont susceptibles de se déplacer le plus loin de la parcelle traitée. Ainsi leur « temps de séjour » dans l'atmosphère les soumet à une évaporation rapide les transformant en particules, avec émission in situ d'une fraction vapeur, difficile à mesurer sur le terrain (en lien avec la difficulté d'établir la contribution de la volatilisation depuis les gouttes de celle depuis la surface traitée à la quantité en phase gazeuse potentiellement mesurée). Les modèles de dispersion et dépôt permettent de faire une estimation des relations taille – potentiel de transfert / dépôt, pour analyser les conséquences en termes d'exposition en fonction de la distance, mais le point de blocage est l'obtention de données nécessitant des systèmes de piégeage pour l'échantillonnage et l'analyse de la granulométrie de ces gouttes. Ainsi, des campagnes d'évaluation des spectres de gouttes émises par le pulvérisateur et de leur évolution lors du déplacement du nuage de pulvérisation mais également de comparaison de capteurs doivent être menées à moyen terme pour évaluer la capacité des méthodes actuelles à mesurer ces fines gouttes et au besoin d'adapter les méthodes.

Ces travaux doivent également inclure une analyse fine des facteurs techniques liés à la pulvérisation (pression, type de buses, adjuvants, ...) et aux conditions environnementales (température,

hygrométrie, vent) qui affectent les caractéristiques des produits appliqués (diamètre et stabilité des gouttelettes, vitesse d'éjection, ...). Dans ce sens, le type de questions à travailler sont par exemple : les déterminants techniques influençant la taille des gouttes à la sortie des buses, le comportement des gouttes au contact de la végétation ou du sol, l'effet des conditions d'humidité relative sur l'évaporation des gouttes, l'effet de la hauteur et de la rugosité de la culture sur les concentrations à différentes distances de l'application. Par ailleurs, le bilan de la répartition de la pulvérisation entre la cible (sol et/ou feuillage) et l'air au moment de l'application est très incertain et reste difficile.

En ce qui concerne plus particulièrement l'acquisition des données météorologiques, si la dérive est liée aux conditions de vent (entre-autres), la variabilité des résultats de dépôts obtenue questionne sur la manière d'analyser les données de vent (et les autres données météorologiques) souvent acquises à une fréquence de 1 Hz (préconisation ISO 22866). Dans la plupart des cas, et faute de critère plus pertinent, seule une moyenne de la vitesse de vent mesurée sur un pas de temps d'une ou deux heures est indiquée dans les jeux de données (cf Figure 8, Holtermann *et al.*, 2018). Ainsi la recherche d'un indicateur météorologique plus explicatif est primordial afin de mieux analyser et comparer des essais réalisés dans des conditions de terrain différentes mais également de pouvoir mieux prédire les conditions les plus risquées pour les utilisateurs.

En parallèle de ces travaux expérimentaux, des modèles pour évaluer la dérive aérienne ont été développés (e.g. IDEFICS au Pays-Bas, ...) ou sont en cours de développement, notamment en France (voir Annexe 10.3). Ils doivent être confrontés à moyen terme à une plus large gamme de jeux de données et leurs modalités d'utilisation pour l'évaluation des risques mieux définies. Par ailleurs, étudier le lien entre dérive sédimentaire et aérienne est nécessaire pour mieux estimer la pertinence de leviers identifiés pour l'un et applicable à l'autre et donc la pertinence de l'application des mêmes taux d'abattelements en fonction des distances de transfert. Par contre, ces modèles requièrent des données d'entrée en termes de vitesse initiale et spectres de gouttes de pulvérisation qui ne sont que rarement disponibles (les travaux proposés ci-dessus devraient permettre de pallier à ce problème).

7.2. Travaux de recherche pour réduire l'exposition aux PPP émis par volatilisation

7.2.1. Travaux à court/moyen terme

Dans le cadre d'une prise en compte plus complète de l'exposition des riverains, en particulier intégrant des temps plus longs, il est important de considérer la contribution de la phase gazeuse (émise en post-application depuis les surfaces traitées). La grandeur recherchée pour évaluer l'exposition des riverains est la concentration dans l'air qui dépend de l'intensité de l'émission à partir de la parcelle traitée, des conditions météorologiques (le vent étant le principal vecteur de transport), de la distance à la limite du traitement et de l'organisation spatiale intégrant la parcelle dans son environnement (localisation de la parcelle, présence d'obstacles aux transferts).

Des modèles sont disponibles pour évaluer la volatilisation des substances actives, surtout pour les grandes cultures, et sont en cours de développement pour la vigne. La dispersion atmosphérique des PPP en phase gazeuse à l'échelle locale peut être décrite avec les modèles développés pour décrire la dispersion d'autres polluants atmosphériques, y compris en intégrant des barrières physiques (voir Annexe 10.3). Dans ce dernier cas, il reste cependant à valider la capacité d'interception des PPP par ces obstacles. A noter qu'il n'existe pas actuellement de potentiels d'émission standards qui permettraient d'alimenter ces modèles de dispersion par une source prédéfinie. La source doit alors être calculée par un modèle de volatilisation qui présente de plus l'avantage de décrire la dynamique temporelle de l'émission. Ces outils pourraient être mobilisés, à court/moyen terme, pour caractériser, sur un certain nombre de scénarios prédéfinis, l'évolution des concentrations dans l'air en fonction du temps (sur plusieurs jours) et de la distance à la parcelle traitée et donc l'efficacité des distances non traitées pour réduire l'exposition des riverains.

7.2.2. Travaux à long terme

Des outils de prédiction de la volatilisation des PPP ne sont pas disponibles pour tous les systèmes agricoles : en cours de développement pour la vigne, ils doivent être plus largement évalués en les confrontant à des mesures. Ils doivent encore être développés en ce qui concerne l'arboriculture.

Les propriétés intrinsèques des substances actives (volatilité) peuvent être modifiées dans les produits formulés en fonction de l'état des substances actives et de la présence de co-formulants et des adjuvants, mais très peu d'informations sont disponibles, la plupart des données se référant aux

substances actives sans prise en compte du conditionnement des produits. Des travaux portant sur les effets de la formulation sur la volatilisation sont nécessaires ce qui nécessite un partenariat avec les fabricants des PPP qui pourraient aussi être intéressés pour utiliser la formulation comme un levier pour réduire les pertes par volatilisation. Par ailleurs, en termes de modélisation, des verrous subsistent quant à la description de processus ayant lieu sur les feuilles (l'adsorption et la pénétration notamment) ce qui rend la prédiction de la volatilisation depuis le couvert végétal encore incertaine. Des travaux sont à poursuivre pour améliorer les connaissances sur ce volet.

7.3. Travaux de recherche portant sur les deux voies d'exposition

7.3.1. Travaux à court/moyen terme

La prise en compte des déterminants des émissions et des transferts, comme par exemple, le rayonnement, la température, la stabilité atmosphérique ou la vitesse du vent, pourraient être à la base de préconisations pour limiter les transferts (par exemple, traitements de nuit, diminution des seuils de vent de Beaufort 3 à Beaufort 2). Cependant, ces leviers potentiels doivent être plus documentés à court/moyen terme, pour une diversité de situations via l'utilisation de modèles (par exemple en effectuant des analyses de sensibilité), en s'appuyant également sur une analyse statistique des données existantes. Il s'agira également d'évaluer la faisabilité de ces préconisations. Il s'agit notamment de voir dans quelle mesure ils impactent les fenêtres de traitement possibles et, en conséquence, la faisabilité pour l'agriculteur et les risques vis-à-vis de la protection des cultures.

➤ Aménagements de bordure de parcelle

Haies : Des travaux doivent pouvoir être conduits sur des haies en place afin de mesurer leur capacité à réduire la dérive. Sur le court terme, il s'agit de construire une méthodologie qui permette de caractériser la haie, de mesurer son effet de filtre sur la dispersion de la dérive aérienne et l'impact de la dérive sur les auxiliaires (et les éventuels ravageurs hébergés), puis de tester cette méthodologie sur quelques situations. Une fois stabilisé, le protocole d'étude doit pouvoir ensuite être assez largement déployé auprès de techniciens formés afin de disposer d'un réseau d'essais. A moyen/long terme, il semble essentiel d'élargir la méthodologie à d'autres facteurs d'étude et notamment en vue d'évaluer l'ensemble des services agroécologiques de la haie (notion de haie multiservices) et également les éventuelles modifications résultant de la proximité des traitements.

Filets : Un autre axe vise à évaluer des filets « Alt'Dérives » dans des conditions variées et notamment en arboriculture et grandes cultures. L'objectif est également de vérifier leur capacité de limitation de la dérive aérienne et les modalités de fonctionnement.

Sur vigne, le détail des travaux expérimentaux prévus apparaît en Annexe 10.5.

Ces dispositifs -naturels ou artificiels- devront être mieux caractérisés en termes de hauteur, épaisseur, porosité, capacité de rétention et réactivité (notamment selon les stades phénologiques et l'âge d'une haie), localisation par rapport aux sources, en mobilisant au besoin des outils de modélisation (outils à tester sur des jeux de données au préalable). En effet ; l'évaluation sur le terrain étant souvent complexe et peu générique vu la multiplicité des processus et des facteurs d'influence, la modélisation pourra être utilisée, d'une part pour effectuer directement des estimations de l'efficacité des aménagements, d'autre part pour guider l'expérimentation ou les méthodes de caractérisation des aménagements. On pourrait dès à présent mettre en œuvre des modèles simulant explicitement les transferts turbulents dans la basse atmosphère sur une large gamme de conditions météorologiques et capables de prendre en compte la présence d'obstacles dans l'écoulement du nuage de gouttes et de gaz résultant de la pulvérisation.

7.3.2. Travaux à moyen/long terme

La prise en compte des transferts atmosphériques et des positions relatives de la parcelle traitée et de la cible considérée doit permettre de proposer, à moyen terme, pour des scénarios identifiés, des « facteurs de transfert atmosphérique sous forme de gaz ou de particule » en fonction de facteurs clefs (météorologiques, organisation spatiale) pour passer de concentrations au niveau des sources à des concentrations au niveau de la personne exposée ; ces concentrations seraient à comparer à des valeurs seuils à définir. En effet, la traduction finale de ce type d'évaluation pourrait consister à la définition des valeurs seuils de concentrations dans l'air. Cela requiert l'intégration de l'ensemble des voies d'exposition sur des périodes de temps suffisamment longs, en y intégrant des phénomènes

cumulatifs. Mais cela nécessite des valeurs toxiques de référence (VTR) peu disponibles à l'heure actuelle (s'appuyer par exemple sur le travail réalisé pour l'analyse des mesures réalisées lors de la Campagne Nationale Exploratoire des Pesticides (Anses/LCSQA/AASQA) ou la campagne à venir PestiRiv (ANSES/SpF)).

L'ensemble de ces travaux sur les déterminants liés à la nature des produits et aux conditions de leur utilisation vont contribuer à préciser les « facteurs d'émission » à partir d'une parcelle traitée et pour un usage donné. La proposition de protocoles en conditions standards doit permettre d'établir des potentiels d'émission et de dispersion en fonction des produits utilisés (substance active vs produits formulés) et de la surface traitée (sol vs couvert végétal) pour établir des typologies en fonction des produits et des formulations.

Le constat général est que les jeux de données disponibles obtenus en conditions réelles, que cela soit sur la dérive aérienne ou sur la volatilisation, sont peu nombreux par rapport à la diversité des situations rencontrées (matériel, conditions météorologiques, environnement du champ ...). Il est nécessaire d'étendre la gamme de conditions actuellement explorées (après une définition en amont d'une stratégie pour couvrir au « meilleur prix » l'ensemble des situations, en lien avec l'identification des scénarios/cas types), au moins pour les pratiques les plus courantes et non encore explorées (par exemple, mesures de volatilisation pour le contexte arboricole, viticole) via des campagnes de mesures dédiées selon un nombre limité de scénarios définis. L'obtention de ces données permettra d'évaluer les approches et les paramétrisations actuelles des modèles qui, pour le moment, ont été validés dans certains modèles, sur des jeux de données anciens avec des produits ou des conditions d'usage obsolètes.

Enfin, outre des jeux de données pour la paramétrisation des modèles, il est nécessaire de proposer des démarches de validation (confrontation des évaluations à des mesures), permettant par ailleurs d'identifier les besoins en termes d'amélioration de modèles. Les campagnes des mesures « riverains », dont certaines sont conduites par les AASQA, peuvent servir à cela.

In fine, il serait nécessaire d'étudier l'exposition de riverains en intégrant l'ensemble des potentielles parcelles sources distribuées autour des résidences. Ces travaux peuvent s'appuyer sur 1) des mesures in situ en renseignant les pratiques dans une zone définie autour de la résidence (par exemple dans un rayon de 1 km), et 2) des approches de modélisation à des échelles plus large (comme celles en cours de développement (Voltz *et al.* 2019).

L'approche classique par processus laisse cependant apparaître un certain nombre de limites car ces processus ne sont pas complètement étanches ni indépendants :

- il est concevable d'imaginer que de la volatilisation apparaisse au moment de l'application, par évaporation depuis les gouttes de pulvérisation ;
- on ne caractérise la dérive qu'à partir de protocoles définis qui ne couvrent qu'une partie du volet spatio-temporel de la dérive ;
- le développement de protocoles de mesure de la dérive aérienne laisse entrevoir des convergences car la mesure est centrée sur le transport atmosphérique. La dérive sédimentaire, quant à elle, est focalisée sur les dépôts pas toujours très bien expliqués par des conditions atmosphériques décrites trop sommairement.

Ainsi une approche plus globale nécessiterait de reconsidérer l'ensemble de chaîne de causalité entre une concentration dans l'atmosphère (des différentes phases : gouttes, vapeurs, particules) issue de d'émissions sous différentes formes, les cinétiques de dispersion en trois dimensions pour mieux limiter l'exposition aiguë et chronique.

7.4. Conclusion

En conclusion, des dispositifs ont été développés pour réaliser des mesures de dérive dans des conditions moins contraignantes que les conditions réelles. Ils doivent être mobilisés à court terme pour participer à l'évaluation quantitative des mesures proposées en termes d'agroéquipements ou d'aménagements paysagers pour réduire la dérive et donc l'exposition des riverains aux gouttes de pulvérisation. Cette évaluation peut être complétée en mobilisant les modèles déjà disponibles et en continuant à les développer afin de pouvoir couvrir une plus large gamme de conditions. Cependant, les jeux de données, tant au laboratoire qu'au champ, sur le comportement des produits dans des conditions agropédoclimatiques diversifiés est très restreint. Il est important de valider les mesures

actuelles via 1) une analyse des intérêts et limites des capteurs utilisés (actifs vs passifs, usage de traceurs ; mesure des gouttes les plus fines), 2) une caractérisation des conditions expérimentales de ces études (des distances ou hauteurs des mesures de concentrations jusqu'alors explorées, des conditions météorologiques, aboutissant ainsi à une analyse des gammes de validité et de la représentativité des mesures faites jusqu'ici), 3) la synthèse sur les matériels utilisés, y compris les dispositifs antidérive préconisés pour en évaluer l'efficacité au regard de cette analyse.

La stratégie proposée pour répondre aux questions clés pourrait se décliner de la manière suivante (1) bien préciser les protocoles de mesure de la dérive adaptés et de la volatilisation dont la mesure est à systématiser (s'appuyer sur les protocoles standards récemment proposés); systématiser les mesures de caractéristiques de gouttes à l'émission et leur évolution (évaporation); (2) se donner les moyens de valider des modèles développés ou en cours de développement (campagnes de mesures) ; (3) caractériser l'exposition des riverains dans la durée et évaluer l'impact des voies d'exposition. Cela requiert de mener des campagnes d'inter comparaison de méthodes, d'acquérir des jeux de données de validation avec du matériel adapté en impliquant les « spécialistes de l'atmosphère » ainsi que des études pilotes (pour explorer les voies d'exposition) en impliquant la communauté des épidémiologistes / toxicologues. A noter que, quelle que soit la voie de transfert, il existe une multitude de situations à considérer (cultures/matériels de pulvérisation y compris matériels anti-dérive préconisés/hauteur de traitement/produits utilisés/conditions météorologiques/organisation spatiale / distances / durée) ce qui requiert de définir des scénarios pertinents qui servent de cadre pour la conception d'expérimentations, les simulations par des modèles et l'analyse et la synthèse des données.

Enfin, les phénomènes intervenants dans les deux principaux processus ne sont pas complètement cloisonnés. La protection des riverains nécessite une approche globale de la contamination de l'air et de leur exposition qui combine à la fois les différentes phases (liquide/gaz/solide) à différentes échelles spatiales et temporelles.

8. CONCLUSION GENERALE

L'état des lieux réalisé dans le cadre de cette synthèse montre qu'il existe un ensemble de références mobilisables pour comprendre les mécanismes liés à l'exposition des riverains par dérive de pulvérisation et volatilisation de post-application et qu'un certain nombre de leviers sont déjà envisageables pour les réduire. Cet état des lieux montre aussi que certains champs de connaissances sont encore mal ou insuffisamment couverts et qu'ils nécessitent des travaux complémentaires pour aboutir à des recommandations pratiques. Les leviers mobilisables et les recherches envisagés pourraient se traduire par un aménagement des distances de sécurité mises en place par la réglementation pour la gestion des risques d'exposition. Avant toute chose, le contrôle et le réglage du matériel ainsi que le choix de conditions climatiques appropriées (vent, hygrométrie) constituent le socle des bonnes conditions d'utilisation du matériel permettant de limiter la dérive vers les riverains.

Au-delà de ces bonnes pratiques d'application, d'autres leviers peuvent être mobilisés pour aller plus loin en termes de réduction de l'exposition des riverains des parcelles traitées.

Les équipements et en particulier les types de buses ont fait l'objet d'évaluations techniques et peuvent être utilisés plus fréquemment dans la pratique pour limiter les transferts de produits. Toutefois des innovations sur les équipements sont encore attendues (nouveaux types de buses, nouveaux systèmes de pulvérisation ...) et doivent faire l'objet d'évaluations prioritaires pour compléter la gamme des solutions mobilisables par les agriculteurs.

Les aménagements dans la parcelle et son environnement (haies, filets, ...) ont fait l'objet de moins de tests et d'évaluation, les conditions d'expérimentation étant plus complexes à mettre en place. C'est aussi une voie à explorer d'avantage en vue de mieux définir des conditions d'utilisation généralisables pour ces aménagements.

Un nombre restreint d'adjuvants de pulvérisation ont fait l'objet d'évaluations mais leurs effets sur la dérive sont variables (plus ou moins favorables à la réduction de la dérive) et peu généralisables. Il peut être intéressant de rester en veille sur ce point bien qu'aucune conclusion claire, donc aucune recommandation, n'ait pu être tirée avec les références disponibles.

La combinaison de leviers (ex buse à faible dérive associée à une haie en bordure de parcelle) reste peu étudiée par l'expérimentation et pourrait être une voie à explorer pour mieux répondre aux attentes des agriculteurs et des riverains.

Dans les actions expérimentales complémentaires à conduire le groupe d'experts recommande de distinguer les actions à court terme pouvant déboucher rapidement sur des recommandations pratiques et des actions à long terme qui permettront de perfectionner la compréhension des mécanismes et d'établir de nouvelles recommandations (sous réserve de disposer des moyens matériels et humains nécessaires)

Actions à court terme :

- Définition de scénarios-types d'exposition des riverains, avec et sans aménagements de bords de parcelles, et évaluation de leur pertinence par utilisation de modèles de dispersion et dépôts de gouttes de pulvérisation de différentes tailles.
- Evaluation des nouveaux équipements, notamment les nouvelles buses de pulvérisation. Cette évaluation devra permettre de mesurer leur potentiel de réduction de dérive mais aussi leur efficacité au champ vis-à-vis des produits appliqués.
- Evaluation des combinaisons de leviers, en particulier les équipements couplés à des aménagements sur la parcelle (buses à limitation de dérive combinées à des haies ou filets) au moyen de l'expérimentation et/ou de la modélisation.

Actions à long terme :

- Elaboration de modèle de dérive multifactoriels.
- Evaluation d'autres formes d'impact comme la volatilisation et élaboration d'un modèle intégrant l'ensemble des voies d'exposition des riverains.
- Etude de l'impact de la formulation (+ co-formulants et adjuvants) pour l'évaluation du potentiel de dérive et de volatilisation pendant l'application depuis les gouttes de pulvérisation et en post-application sur le sol ou la végétation.

Au-delà des besoins identifiés de mieux caractériser et modéliser les processus individuels (dérive et volatilisation), les exigences de réponses à l'exposition des riverains vont probablement imposer de redéfinir les impacts conjugués des deux processus vers des indicateurs plus intégratifs d'exposition.

Enfin cette synthèse montre l'intérêt de constituer un groupe pluridisciplinaire d'experts indépendants du marché sur la pulvérisation et l'exposition des riverains. Ce groupe constituant une réserve de compétences sur un sujet très spécifique, peut apporter des éclairages techniques en gardant une vision globale de la problématique, suivre l'avancement des travaux sur la maîtrise de la dérive et de ses conséquences, en assurer une forme de cohérence et exercer une veille technique internationale sur le sujet.

9. REFERENCES

- Aheidary, M., Douzals, J.P., Sinfort, C., Vallet, A., 2016. Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: a literature review. *Crop Protection*. 63, 120-130.
- Aubertot, J.N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., Voltz, M., 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux., Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref (France), 902p.
- Bedos C, Douzals J.P., van den Berg E., 2019. *Projet ADEME Cortea PREPARE, PRotocol de mesure des Emissions des Pesticides vers l'Atmosphère. Rapport Final*, 32p.
- Brandle, J.R., Hodges, L., Zhou, X.H., 2004. Windbreaks in North American agricultural systems. *Agroforestry Systems* 61, 65-78.
- Butler Ellis, M.C., van de Zande, J.C., van den Berg, F., Kennedy, M.C., O'Sullivan, C.M., Jacobs, C.M., Fragkoulis, G., Spanoghe, P., Gerritsen-Ebben, R., Frewer, L.J., Charistou, A., 2017. The BROWSE model for predicting exposures of residents and bystanders to agricultural use of plant protection products: An overview. *Biosystems Engineering* 154, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.017>
- Collectif. 2005. L'utilisation des adjuvants se raisonne au cas par cas, *Perspectives Agricoles*, 317, 56-65.
- Cornacchia, I., Tomas, S., Douzals, JP., Courault, D., 2020. Assessment of Airborne Transport of Potential Contaminants in a Wind Tunnel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 146(1) :04019031.
- Davy, A., 2017. Filets anti-dérive, évaluation de leur efficacité. *Union Girondine des Vins de Bordeaux*, p.62-63.
- De Schamphelre, M., Nuyttens, D., Dekeyser, D., Verboven, P., Spanoghe, P., Cornelis, W., Gabriels, D., Steurbaut, W., 2009. Deposition of spray drift behind border structures. *Crop Protection* 28, 1061-1075.
- Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal officiel n° L327 du 22/12/2000* 0001-0073.
- Doruchowski, G., Świechowski, R., Godyń, A., 2019. Reduction of spray drift by hail net over apple orchard. 15th Workshop on Spray Application and Precision Technology in Fruit Growing 16-18 July, East Malling, UK.
- Garcin, E., Zavagli, F., 2006. Haies, filets paragrêle et buses anti-dérive en arboriculture fruitière, des moyens pour limiter la dérive de pulvérisation ?. *InfoCTIFL n°224*, p.18-23.
- Gil Y., C. Sinfort, C., 2005. Emission of pesticides to the air during sprayer application: A bibliographic review. *Atmospheric Environment* 39, 5183-5193.
- Gregorio E., Torrent X., Planas de Martí S., Solanelles F., Sanz R., Rocadenbosch F., Masip J., Ribes-Dasi M., Rosell-Polo J. R., 2016. Measurement of Spray Drift with a Specifically Designed Lidar System, *Sensors*, 16 (4), 499.
- Guiral, C., Bedos, C., Ruelle, B., Basset-Mens, C., Douzals, J.P., Cellier, P., Barriuso, E., 2016. Les émissions de produits phytopharmaceutiques dans l'air. Facteurs d'émissions, outils d'estimation des émissions, évaluations environnementales et perspectives de recherche – Rapport Complet. Ademe. 271p
- Hamel, C., 2010. La haie brise-vent : ses effets sur la réduction de la dérive et de la migration des pesticides- Fédération des producteurs maraîchers du Québec.
- Holterman, H.J, van de Zande, J.C., Porskamp, H.A.J., Huijsmans, J.F.M., 1997. Modelling spray drift from boom sprayers, *Computers and Electronics in Agriculture*, 19, 1-22, DOI/10.1016/S0168-1699(97)00018-5.
- Holterman, H.J., 2003. Kinetics and evaporation of water drops in air. *IMAG report 2003 – 12 Wageningen UR*. July 2003, 67p.
- Holterman, H.J., van de Zande, J.C., Huijsmans, J.F.M., Wenneker, M., 2018. Development of a spray drift model for spray applications in fruit orchards. Report WPR 256. DOI: 10.18174/442091
- Houbraken, M., Senaeve, D., Fevery, D., Spanoghe, P., 2015. Influence of adjuvants on the dissipation of fenpropimorph, pyrimethanil, chlorpyrifos and lindane on the solid/gas interface. *Chemosphere* 138, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.040>
- ISO 22866, 2005. Matériel de protection des cultures — Mesurage de la dérive du jet au champ. 19p.
- ISO 22856, 2008. Matériel de protection des cultures — Méthodes de mesurage en laboratoire de la dérive du jet — Souffleries, 15p.
- ISO 22401, 2015. Matériel de protection des cultures — Méthode de mesurage de la dérive potentielle des pulvérisateurs à rampe horizontale au moyen d'un banc d'essai, 12p.

- Kincaid, D.C. Longley, T.S., 1989. A water droplet evaporation and temperature model. *Transaction of the ASAE*. 32, 457-463.
- Kooij, S., Sijts R., Denn, M. M., Villermaux, E., Bonn, D., 2018. What Determines the Drop Size in Sprays. *Physical Review X*8, 031019, 13p.
- Lan, Y., Hoffmann, W.C., Fritz, B., Martin, D., Lopez, J.D., 2008. Spray Drift Mitigation with Spray Mix Adjuvants, *Appl. Engineer. Agric.* 24, 5-10.
- Lichiheb, N., Bedos, C., Personne, E., Benoit, P., Bergheaud, V., Fanucci, O., Bouhlel, J., Barriuso, E., 2015. Measuring Leaf Penetration and Volatilization of Chlorothalonil and Epoxiconazole Applied on Wheat Leaves in a Laboratory-Scale Experiment. *Journal of Environment Quality*, 44 : 1782–1790.
- Liet, O, Polveche V, 2009. Etude pour l'optimisation de l'utilisation des pesticides et fertilisants, DGAL, Etude 07.F4.04.01, 152p.
- Mackay et al., 2018. The SETAC DRA workshops- aims, approaches and progress to date. *Aspects of Applied Biology* 137, 2018. P. 343-351.
- Massinon, M, De Cock, N, Forster, W.A, Nairn, J.J., McCue,S.W., Zabkiewicz, J.A., Lebeau, F, 2017. Spray droplet impactation outcomes for different plant species and spray formulations, *Crop Prot*, 99, 65-75,
- Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Verboven, P., Brusselman, E., Dekeyse,r D., 2007. Droplet Size and Velocity Characteristics of Agricultural Sprays. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers* 52, 1471-1480
- Perriot, B. Yeme, P.Y., Fleury, C., Gaudillat, D, 2012. Bien choisir ses buses et son volume de bouillie pour un désherbage efficace en grandes cultures. *AFFP-CIETAP* 2012.
- Polveche, V., Crete, X., Chapuis G., Douzals, J.P., 2011. Effects of Nozzle Types, Windbreak and Vegetation Stage on Drift Performance Issued from an Orchard Sprayer, *Suprofruit conference, Bergerac, June 2011.*
- Raupach, M.R., Woods, N., Dorr, G., Leys, J.F., Cleugh, H.A., 2001. The entrapment of particles by windbreaks. *Atmospheric Environment* 35, 3373-3383.
- Rautmann, D. Strelake, M. Winkler, R., 2001. In: *Workshop on risk assessment and risk mitigation measures in the context of the authorization of plant protection products*, 383, 133-141
- Reichenberger, S., Bach, M., Skitschak, A., Frede, H.-G., 2007. Mitigation strategies to reduce pesticide inputs into ground- and surface water and their effectiveness; A review. *Science of the Total Environment*, 384: 1-35.
- de Ruiter, H, Holterman, HJ, Kempenaar C., Mol H.J., de Vlieger, J.J., van de Zande, J.C., 2003. Influence of adjuvants and formulations on the emission of pesticides to the atmosphere: a literature study for the Dutch Research Programme Pesticides and the Environment (DWK) theme C-2. Report 59. 48p.
- Ruthy I., Remy, S., Veschkens M., Huyghebaert B., Herman J.L., Pigeon E., Schiffers B., Fripiat C., Nadin, C., Bémelmans C., 2019. Rapport PROPULPPP objectivation de l'exposition des populations aux pulvérisations de produits phytopharmaceutiques en Wallonie et des mesures de protection destinées à limiter cette exposition. Rapport n°04460/2018. <https://www.issep.be/events/event/etude-propulppp-resume-des-resultats-recommandations-et-perspectives/>
- Schweizer, S., Kauf, P., Höhn, H., Naef, A., 2013. Réduction de la dérive : essai pratique. *Recherche Agronomique Suisse* 4 (11-12), 484-491.
- Sijts, R., Bonn, D., 2020. The effect of adjuvants on spray droplet size from hydraulic nozzles. *Pest Manag. Sci.*, January 2020. DOI: 10.1002/ps.5742
- Silsoe Research Institute, 2003. The characterisation of windbreaks for the reduction of drift during orchard and hop spraying. Final Projet report, DEFRA PA1723.
- Stainier, C., Destain, MF., Schiffers, B., Lebeau, F., 2006. Droplet size spectra and drift effect of two phenmedipham formulations and four adjuvants mixtures. *Crop Prot.* 25, 1238-1243.
- Tate, R.W., Marshall, W.R., 1953. Atomization by centrifugal nozzles. *Chemical Engineering Progress* 49,169-174
- Ucar, T., Hall, F.R., 2001. Windbreaks as pesticide drift mitigation strategy: a review. *Pest Management Science* 57, 663-675.
- Van de Zande, J.C., Michielsen, J.M.G.P., Stallinga, H., Wenneker, M., Heijne, B., 2004. Hedgerow Filtration and Barrier Vegetation. *International Conference on Pesticide Application for Drift Management, Waikoloa, Hawaii*
- Van de Zande, J.C., Holterman, H.J., Wenneker, M., 2008. Nozzle Classification in Orchard Spraying: Identification of Drift Reduction Class Threshold Nozzles. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript ALNARP 08 0013, Vol X, May 2008.*

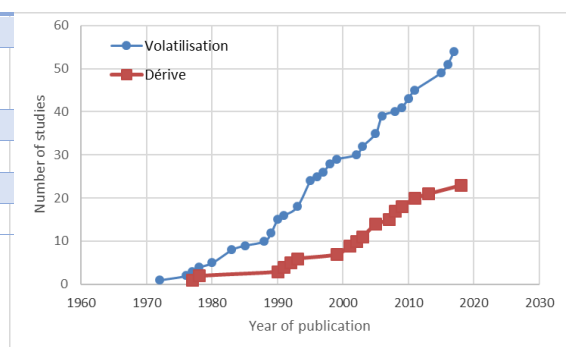
- Vermeulen, R.C.H., Gooijer, Y.M., Hoftijser, G.W., Lageschaar, L.C.C., Oerlemans, A., Scheepers, P.T.J., Kivits, C.M., Duyzer, J., Gerritsen-Ebben, M.G., Figueiredo, D.M., Huss, A., Krop, E.J.M., van den Berg, F., Holterman, H.J., Jacobs, C., Kruijne, R., Mol, J.G.J., Wenneker, M., Van de Zande, J.C., Sauer, P.J.J., 2019. Research on exposure of residents to pesticides in the Netherlands OBO flower bulbs. <https://www.bestrijdingsmiddelen-omwonenden.nl/nieuws/better-insight-into-local-residents-exposure-to-pesticides>
- Verpont, F., Le Berre, F., Ballion, S., Vincent, D., 2019. Solid Set Canopy System in France: the PULVEFIX project. Proceedings of Suprofruit workshop, 16-18 July 2019 East Malling Research, UK.
- Voltz, M., Bedos, C., Crevoisier, D., Dagès, C., Fabre, J.C., Lafolie, F., Loubet, B., Personne, E., Casellas, E., Chabrier, P., Chataigner, M., Chambon, C., Nouguier, C., Bankhwal, P., Barriuso, E., Benoit, P., Brunet, Y., Douzals, J.P., Drouet, J.L., Mamy, L., Moitrier, N., Pot, V., Raynal, H., Ruelle, B., Samouelian, A., Saudreau, M., 2019. Integrated Modelling of pesticide fate in agricultural landscapes: the MIPP Project. Presented at the 21st International Fresenius AGRO Conference Behaviour of Pesticides in Air, Soil and Water, Mainz (Germany).
- Womac, A. R., Hart, W. E., Maynard R. A., 1998. Drop spectra for pneumatic atomizers at low discharge rates. Transactions of the ASAE. VOL. 41(4), 941-949.

10. ANNEXES

10.1. ANNEXE 1 : Jeux de données acquis en conditions réelles pour quantifier les émissions

D'après le projet PREPARE (Bedos et al., 2019), 23 jeux de données sont disponibles dans la littérature internationale concernant la dérive aérienne, 68 pour la volatilisation (dont 48 établis dans des conditions de sol nu, 18 en grandes cultures, 1 en arboriculture, 1 en riziculture + 1 récent en viticulture). La difficulté est que souvent les jeux de données de dérive ne sont pas publiés tels quels mais uniquement des résultats agrégés. Les objectifs concernent la comparaison de matériels ou l'exposition des opérateurs, des travailleurs ou des riverains.

Type de culture	Dérive		Volatilisation
	Sédimentaire	aérienne	
Grandes cultures	+++++	+	+++
Viticulture	+++++	+	1 récemment
Arboriculture	+	+	1
Maraichage	*	?	?
Rizière**	?	?	1



* Quelques données « carotte de plein champ » dans le cadre du projet OPTIMA sont en cours d'acquisition, les matériels sont identiques à ceux utilisés en grandes cultures.

**Attention, en rizière il n'y a pas de ZNT aquatiques, donc pas de besoin de faire des expérimentations de dérive. Les matériels utilisés correspondent à la situation grandes cultures.

Références :

Bedos C, Douzals J.P., van den Berg E., 2019. *Projet ADEME Cortea PREPARE, PRotocol de mesure des Emissions des Pesticides vers l'Atmosphère. Rapport Final*, 32p.

10.2. ANNEXE 2 : Etudes existantes

10.2.1. Des études intégrées des voies de contamination de pesticides

Deux études récentes (OBO, NL Vermeulen *et al.*, 2019 ; PropulPPP, BE, Ruthy *et al.*, 2019) ont été réalisées dans le but de mieux caractériser les voies de contamination des riverains de zones agricoles aux pesticides. Dans les deux cas l'approche était très inclusive, intégrant plusieurs composés, plusieurs voies d'exposition, et mesurant à la fois l'exposition et la contamination dans les urines et les cheveux. Ces deux études rapportent également des mesures d'émissions et de concentration de pesticides dans l'atmosphère, sous forme gazeuse et de gouttes. Ces études n'ont pas évalué les éventuels effets sur la santé.

Le rapport OBO présente 4 résultats obtenus à proximité de champs de tulipes pour une vingtaine de composés (au final 18 présentés) : l'analyse des métabolites dans les urines, la mesure de l'exposition et de la contamination de résidents, la mesure de la dérive aérienne et du dépôt au sol des pesticides aux abords d'une application sur sol nu, et la mesure de la volatilisation post-application. Le rapport PropulPPP procède d'une même approche, en proximité de grandes cultures, mais se limite à l'exposition par des mesures en bordure de champ (< 50 m), des mesures de dérive, et des mesures à plus longue distance et long terme. Les méthodes mises en œuvre dans ces deux études ont été publiées, et représentent l'état de l'art actuel (ce qui ne veut pas dire que l'on ne peut pas les améliorer). La significativité a été déterminée par des tests statistiques adéquats.

Notes : nous nous focalisons ici sur les deux études les plus récentes. Pour une synthèse bibliographique plus approfondie, nous pourrions compléter cette analyse avec les travaux menés dans le cadre du projet BROWSE par exemple (Butler-Elis *et al.*, 2017).

10.2.2. Des résultats qui montrent l'importance de la contamination aérienne locale

L'étude OBO. L'étude des métabolites dans les urines, montre que pour la plupart des composés étudiés (tebuconazole, chlorpropham, prochloraz, asulam et carbendazim), le taux de métabolites excrété lors d'ingestion est de 3 à 4 ordres de grandeur plus élevé que le niveau de fond et d'un à deux ordres de grandeur plus élevé que le taux excrété suite à l'exposition dermique. Ce taux reste supérieur d'un ordre de grandeur au moins au niveau de fond au bout de 48h.

Des concentrations plus élevées de plusieurs pesticides ont été constatées dans les échantillons prélevés à l'intérieur et à l'extérieur du domicile des résidents vivant à moins de 250 m des zones d'application par rapport aux concentrations dans les maisons plus éloignées (témoins). Ces concentrations plus élevées de pesticides ont été observées dans les habitations à proximité des zones d'application, tant en période d'utilisation qu'en période de non-utilisation. Les biomarqueurs de deux des cinq pesticides analysés ont été trouvés dans plus de la moitié des échantillons d'urine provenant de personnes, y compris de (jeunes) enfants, tant pour les résidents que pour les contrôles. Cela a été observé tant durant qu'hors périodes d'utilisation des pesticides. Les relations entre les concentrations de ces deux pesticides dans l'urine et la distance par rapport aux champs ou périodes de pulvérisation n'ont pas été systématiquement observées. Cependant, les concentrations trouvées dans les urines sont corrélées avec les concentrations de pesticides à l'intérieur et à l'extérieur des habitations. La dérive aérienne pouvait atteindre des altitudes plus élevées (6 m) et des distances (50 m) plus importantes que ce que l'on pensait auparavant. La quantité de pesticides transportés par le vent (dérive aérienne) est typiquement 100 fois plus grande que la quantité déposée (dérive sédimentaire). Les buses antidérives diminuent d'un facteur 10 les dérives aériennes et sédimentaires.

Les auteurs du rapport OBO ont évalué par calcul que la volatilisation des pesticides du champ après la pulvérisation et les pesticides dans la poussière domestique sont probablement les voies les plus importantes pour l'exposition aux pesticides des résidents vivant à proximité des champs dans cette

étude. Ceci explique pourquoi la présence de pesticides dans les urines n'est pas systématiquement corrélée aux périodes d'application.

Complément de l'étude PropulPPP. Comme l'étude OBO, l'étude PropulPPP montre que les buses antidérive 50% diminuent d'un facteur 2 la dérive aérienne. Elle montre également qu'un écran diminue d'un facteur 2 la quantité de pesticides qui se dépose à 10 m, mais que la quantité qui est dispersée par le vent à 50 m augmente d'un facteur 2 également dans 3 cas sur 6. Cette étude montre également que le dépôt de pesticides à proximité d'une zone traitée est mesurable au-delà de la période d'application, suggérant un phénomène de volatilisation-dépôt ou d'érosion. Enfin la mesure chez les riverains montre la présence de multiples pesticides dans les dépôts cumulés ($\sim 100 \mu\text{g m}^{-2}$, comparables à celles mesurées en bordure d'un champ), et dans les concentrations ($\sim 2 \text{ ng m}^{-3}$ en moyenne).

10.2.3. Conclusion : quantifier la contamination par voie aérienne locale est une nécessité

Les deux rapports montrent que la dérive aérienne et la volatilisation sont les sources probables de contamination des résidents aux abords des zones traitées. Ils montrent que les zones contaminées s'étendent jusqu'à 250 m. **Ces deux rapports indiquent donc qu'il est nécessaire de bien mesurer la dérive aérienne et la volatilisation.** Cela implique de mesurer sur des périodes longues car la volatilisation est un processus qui s'intègre dans le temps. **Par ailleurs ces deux rapports montrent la nécessité de développer des connaissances sur le lien entre exposition aérienne, contamination et toxicité.**

10.2.4. Corolaire : pour quantifier cette contamination il faut des méthodes fiables

La méthode de mesure de la dérive aérienne n'est actuellement pas complètement fiabilisée car les plus petites particules ne vont pas être piégées sur les capteurs dits « passifs », une fraction du flux correspondant aux particules les plus petites, et donc les plus susceptibles d'être inhalées profondément, étant alors occultée. Le fait que la mesure active de la dérive aérienne soit systématiquement plus élevée que la mesure passive tend à démontrer exactement cet effet. Il faut également noter que la définition même de la dérive aérienne, mesurée avec capteurs passifs ou actifs, exprimée comme un flux horizontal (dit « d'advection »), n'est pas satisfaisante. En effet la mesure d'un flux horizontal nécessite la mesure simultanée de la vitesse du vent et de la concentration ou bien des capteurs qui intègrent ces deux composantes sans les biaiser (or la mesure passive est biaisée et la mesure active ne tient pas compte du profil de vent) (Hassouna *et al.*, 2015).

Par ailleurs, la mesure de la volatilisation doit être plus systématique et pourrait nécessiter des développements pour la rendre plus autonome. De plus, les données de distribution de taille et vitesse des gouttes émises par les systèmes de pulvérisation doivent être déterminés de façon systématique jusqu'au tailles les plus fines (PM10).

Références

- Butler Ellis, M.C., van de Zande, J.C., van den Berg, F., Kennedy, M.C., O'Sullivan, C.M., Jacobs, C.M., Fragkoulis, G., Spanoghe, P., Gerritsen-Ebben, R., Frewer, L.J., Charistou, A., 2017. The BROWSE model for predicting exposures of residents and bystanders to agricultural use of plant protection products: An overview. *Biosystems Engineering* 154, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.017>
- Hassouna, M., Eglin, T., Cellier, P., P., Colomb, V., Cohan, J.-P., Decuq, C., C., Delabuis, M., Edouard, N., Espagnol, S., Eugène, M., Fauvel, Y., Fernandes, E., Fischer, N., Flechard, C., C., Genermont, S., Godbout, S., Guingand, N., Guyader, J., Lagadec, S., Laville, P., P., Lorinquer, E., Loubet, B., B., Loyon, L., Martin, C., Meda, B., B., Morvan, T., T., Oster, D., Didier, O., Personne, E., E., Planchais, J., Ponchant, P., Renand, G., G., Robin, P., P., Rochette, Y.: *Mesurer les émissions gazeuses en élevage : gaz à effet de serre, ammoniac et oxydes d'azote*, INRA-ADEME (France), 2015.

Ruthy I., Remy, S., Veschkens M., Huyghebaert B., Herman J.L., Pigeon E., Schiffers B., Fripiat C., Nadin, C., Bémelmans C., 2019. Rapport PROPULPPP objectivation de l'exposition des populations aux pulvérisations de produits phytopharmaceutiques en Wallonie et des mesures de protection destinées à limiter cette exposition. Rapport n°04460/2018. <https://www.issep.be/events/event/etude-propulppp-resume-des-resultats-recommandations-et-perspectives/>

Vermeulen, R.C.H., Gooijer, Y.M., Hoftijser, G.W., Lageschaar, L.C.C., Oerlemans, A., Scheepers, P.T.J., Kivits, C.M., Duyzer, J., Gerritsen-Ebben, M.G., Figueiredo, D.M., Huss, A., Krop, E.J.M., van den Berg, F., Holterman, H.J., Jacobs, C., Kruijne, R., Mol, J.G.J., Wenneker, M., Van de Zande, J.C., Sauer, P.J.J., 2019. Research on exposure of residents to pesticides in the Netherlands OBO flower bulbs. <https://www.bestrijdingsmiddelen-omwonenden.nl/nieuws/better-insight-into-local-residents-exposure-to-pesticides>

10.3. ANNEXE 3 : Modèles existants

(d'après Guiral *et al.* 2016, synthèse)

Concernant les modèles dédiés à la prédiction des émissions vers l'atmosphère, nous distinguons généralement les pertes par dérive des gouttes pendant l'application et les des pertes par volatilisation en post-application. En effet, peu de modèles intègrent à la fois ces deux sources d'émissions (Raupach *et al.*, 2001). A noter que la description des processus des pertes à l'application a été davantage appliquée aux cultures pérennes, en particulier les vignes, tandis que celle des pertes en post-application l'a été aux grandes cultures et/ou au sol nu.

10.3.1. Dérive des gouttes pendant l'application

La dispersion aérienne des gouttes de pulvérisation est simulée selon essentiellement deux types de paramétrisations : le panache gaussien ou la modélisation des trajectoires de gouttes via des modèles lagrangiens (pour information, il existe aussi un troisième type de modèles, les modèles eulériens, pour décrire et prédire la dispersion des polluants atmosphériques dans l'atmosphère mais ils ont été peu utilisés en ce qui concerne la dérive des gouttes de pulvérisation).

- Le modèle **AGDRIFT** (Bird *et al.*, 1997) basé sur AGDISP (modèle lagrangien testé sur des jeux de données) décrit la dérive sédimentaire et la dérive aérienne certaines pour des applications par avion ou hélicoptère. Par contre, pour les pulvérisations classiques terrestre en grandes cultures et arboriculture, seule la dérive sédimentaire est décrite et ce, à partir de relations empiriques uniquement.
- Le modèle de trajectoire **IDEFICS** (Holterman *et al.*, 1997) calcule en fonction de la distance 1) la distribution dans le sens du vent des gouttes déposées sur la parcelle traitée et hors de la parcelle traitée sur le sol (ou sur une surface aquatique) (de 0 à 15 m), et 2) la distribution verticale des gouttes encore présentes dans l'air. A noter qu'une fraction de PPP émise pendant l'application est fixée en fonction du type de buses, sans que cette valeur ne soit réellement argumentée.
- Le modèle de **Raupach *et al.* (2001)** simule à la fois le dépôt sur des surfaces aquatiques par dérive sédimentaire et par dépôt gazeux de PPP volatilisé via un modèle gaussien. Ce modèle a été appliqué au cas de l'endosulfan.
- Le modèle dit « à complexité réduite » **DRIFT-X** (Brun, 2007) s'appuie sur la décroissance exponentielle de la concentration de produit dans la végétation (vigne) pour calculer les flux verticaux vers l'atmosphère suivant deux étapes : calcul du flux d'air et de concentrations au niveau du pulvérisateur puis devenir du jet pulvérisé dans l'air et la végétation dans la parcelle traitée. Ce modèle a été repris par Bozon et Mohammadi (2009) pour calculer la dispersion horizontale de ces flux dans un plan horizontal, en fonction des conditions de vent et de la topographie du terrain.
- Une modélisation plus fine des champs de vent au sein d'une parcelle de vigne, comprenant l'effet des caractéristiques du jet de pulvérisation sur la dispersion du nuage de gouttelettes à l'échelle du rang de vigne et de la parcelle, ainsi qu'une modélisation de la dispersion à l'échelle du paysage (par couplage avec les travaux issus des développements de Brun (2007)) a été proposée par Chahine *et al.* (2014) à partir de modèles Large Eddy Simulation (modèle ARPS) couplés à une modélisation lagrangienne de la trajectoire des gouttes. Cet outil permet d'analyser l'effet de facteurs clefs tels que la structure de la vigne ou le type de buse utilisée. Développé pour la vigne, cet outil, dont l'approche est générique, pourrait être adapté à d'autres types de cultures. Cependant, c'est un outil assez lourd à mettre en œuvre et dont la confrontation aux données reste nécessaire. Un modèle est en cours de développement dans le cadre d'un travail de thèse à partir d'une approche lagrangienne avec pour objectif d'implémenter ce modèle dans une plateforme de modélisation à l'échelle du paysage (Voltz *et al.*, 2019).

10.3.2. Volatilisation en post-application

- Le modèle **BAM** (Behavior Assessment Model ; Jury *et al.*, 1983) est un modèle de screening destiné à établir des classes de produits chimiques selon leur susceptibilité aux

différentes voies de dispersion dans le sol et dans l'air (lessivage, dégradation, volatilisation) dans des conditions pédologiques et environnementales données et ce, pour un sol nu sans couvert végétal. Pour le transfert vers l'air, il classe les pesticides en 3 catégories selon la valeur de la constante de Henry. Le concept de paramétrisation du flux de volatilisation du modèle BAM a été largement repris dans d'autres modèles.

- Le modèle **PEM** (Pesticide Emission Model) a été développé par Scholtz *et al.* (2002), avec une approche mécaniste, pour décrire la volatilisation de substances actives contenues dans les PPP appliqués au champ, en surface, sur le sol ou les couverts végétaux, ou incorporés dans le sol. Le modèle PEM a été utilisé pour développer des inventaires d'émissions des PPP par maille à des échelles continentales et globales. A noter que le code source de ce modèle n'est pas disponible.
- Le modèle **Volt'Air-Pesticides** (Garcia *et al.*, 2014) est un modèle de volatilisation depuis un sol nu des substances actives contenues dans les PPP appliqués au champ. Il est adapté du modèle Volt'Air-NH₃. Le modèle **SURFATM-Pesticides** (Lichiheb *et al.*, 2015 ; 2016) est un modèle de volatilisation depuis une surface foliaire des substances actives contenues dans les PPP appliqués au champ (grandes cultures), qui a été adapté du modèle biophysique SURFATM. Ce dernier adopte une approche mécaniste en décrivant les échanges d'énergie, d'eau et de composés entre le sol, la végétation et l'atmosphère à l'échelle de la parcelle. Y a été ajouté le calcul de la volatilisation après l'application ainsi que l'adsorption et la pénétration dans la cuticule des feuilles et la photodégradation des substances actives. Un couplage de Volt'Air-Pesticides et de SURFATM- Pesticides (Volt'Air-Veg) est actuellement utilisé pour fournir des émissions à l'échelle d'une région dans le cadre d'un projet en cours. Une version de ce modèle est en adaptation pour les traitements en vigne.
- Enfin, un certain nombre de modèles décrivant le comportement des PPP dans l'environnement ont vu le jour depuis plus de deux décennies, dont certains sont utilisés pour les évaluations des risques lors des procédures d'homologation pour l'autorisation de mise sur le marché au niveau européen (ex. PRZM, MACRO, PEARL). Pour certains d'entre eux, les développeurs ont introduit un module décrivant la volatilisation afin de compléter le bilan des transferts. Pour ce faire, les paramétrisations choisies se sont basées soit sur les relations empiriques, soit sur la paramétrisation du modèle BAM ou des schémas numériques plus fins, PEARL notamment, basés sur des concepts résistifs proches de ceux appliqués dans les modèles cités ci-dessus.

10.3.3. Dispersion atmosphérique à l'échelle locale

L'échelle locale considérée ici couvre des distances de moins d'un km de la parcelle traitée (échelle la plus pertinente pour étudier l'exposition des riverains). Divers modèles ont été développés par la communauté des atmosphériciens pour décrire la dispersion des gaz ou des aérosols à l'échelle locale. Nous n'en ferons pas ici une présentation exhaustive mais nous allons nous focaliser sur les modèles appliqués à la dispersion des PPP :

- **OPS** : ce modèle est basé sur le concept standard de panache gaussien, en prenant en compte les conditions de stabilité/instabilité. Dans le cadre du projet BROWSE (2017), les modèles PEARL et OPS ont été couplés ; PEARL est utilisé pour calculer le taux de volatilisation des pesticides après application, qui définit la force de la source dans l'OPS sur une base horaire. Le modèle OPS détermine alors les changements de concentrations dans l'atmosphère afin d'évaluer l'exposition des riverains (van den Berg *et al.*, 2016).
- **FIDES** : ce modèle couple un modèle de dispersion avec un modèle tenant compte de l'échange de scalaires (NH₃, PPP ...) entre la hauteur de rugosité z_0 et la surface. Le modèle de dispersion repose sur une solution analytique de l'advection-diffusion. Une hypothèse sous-jacente dans FIDES est de considérer des configurations spatiales homogènes en termes de longueur de rugosité et de vitesse du vent. La dégradation du pesticide dans l'atmosphère et son lessivage par la pluie sont négligés, ce qui est une hypothèse raisonnable compte tenu de la faible durée du transport aux distances considérées. FIDES a été testé en mode inverse (c'est-à-dire pour prédire des émissions par volatilisation depuis une source à partir d'une donnée de concentration dans l'air et des conditions météorologiques) pour les PPP et a également été couplé au modèle Volt'Air pour prédire le dépôt gazeux de PPP sur une surface aquatique disposée en aval d'une parcelle traitée (Bedos *et al.*, 2013) ainsi qu'au modèle PEARL avec les mêmes objectifs (Durand, 2010).

- **MODDAS** : c'est un modèle mécaniste lagrangien stochastique. A l'origine, MODDAS a été développé pour simuler la dispersion et le dépôt d'ammoniac (Loubet, 2000) ensuite il a été adapté aux PPP. Il a été couplé à Volt'Air pour étudier le dépôt gazeux sur des surfaces aquatiques disposées en aval d'une parcelle traitée dans des configurations hétérogènes (par exemple, avec présence de haies) (Chakkour, 2015 ; Bedos *et al.*, 2016) ou pour calculer la contribution de la voie atmosphérique et de la volatilisation d'écosystèmes non cibles (Djoughri *et al.*, 2019 ; Pelosi *et al.*, 2019).

Références

- Bedos, C., Loubet, B., Decuq, C., Durand, B., Fanucci, O., Chakkour, S., Lecuyer, V., Deschamps, M., Barriuso, E., Générumont, S., Personne, E., 2016. Contamination des eaux de surface par les pesticides : extension et évaluation d'un outil d'évaluation de la part des apports gazeux aériens. (Rapport final Onema).
- Bedos, C., Loubet, B., Barriuso, E., 2013. Gaseous deposition contributes to the contamination of surface waters by pesticides close to treated fields. a process-based model study. *Environmental Science & Technology* 47, 14250–14257.
- Bird, L., S. G. Perry, S. L. Ray, M. E. Teske, et P. N. Scherer. 1997. « An evaluation of AgDrift 1.0 model for use in aerial applications. » National Exposure Research Laboratory, US EPA, Athens, GA, USA,
- Bozon, N., et B. Mohammadi. 2009. GIS-based atmospheric dispersion modelling. *Applied Geomatics*, 1, 59-74.
- Brun, J.-M. 2007. « Modélisation à complexité réduite de la dérive. » Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 192p.
- Butler Ellis, M.C., van de Zande, J.C., van den Berg, F., Kennedy, M.C., O'Sullivan, C.M., Jacobs, C.M., Fragkoulis, G., Spanoghe, P., Gerritsen-Ebben, R., Frewer, L.J., Charistou, A., 2017. The BROWSE model for predicting exposures of residents and bystanders to agricultural use of plant protection products: An overview. *Biosystems Engineering* 154, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.017>
- Chahine, A., S. Dupont, C. Sinfort, et Y. Brunet. 2014. Wind-flow dynamics over a vineyard. *Boundary Layer Meteorology*, pp 557–577. Cours des Comptes (2015) Les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air. Rapport Cours des Comptes, 123p.
- Chakkour, S., 2015. Modélisation de la dispersion atmosphérique et de dépôt sec des pesticides sur les eaux de surface à proximité des parcelles agricoles. (Fin de stage M2 Eau, spécialité Eau et Agriculture). Montpellier.
- Djoughri, M., Loubet, B., Benoit, P., Mamy, L., Bedos, C., 2019. Modélisation de l'effet de la configuration paysagère et des pratiques culturales sur la dispersion et le dépôt des pesticides utilisés en agriculture. 49ième congrès du Groupe Français des pesticides, Montpellier (France).
- Durand, E., 2010. Modélisation de la volatilisation, du transport atmosphérique et du dépôt des pesticides à proximité de champ traité. (Master 2 Environnement Spécialité Evaluation et gestion des risques sanitaires liés à l'environnement).
- Garcia, L., C. Bedos, S. Générumont, P. Benoit, E. Barriuso, et P. Cellier. 2014. « Modeling pesticide volatilization: Testing the additional effect of gaseous adsorption on soil solid surfaces ». *Environmental Science & Technology* 48 (9): 4991-4998. doi:10.1021/es5000879.
- Guiral, C., Bedos, C., Ruelle, B., Basset-Mens, C., Douzals, J.P., Cellier, P., Barriuso, E., 2016. Les émissions de produits phytopharmaceutiques dans l'air. Facteurs d'émissions, outils d'estimation des émissions, évaluations environnementales et perspectives de recherche – Synthèse. Ademe.
- Holterman, H. J., van de Zande, J. C., Porskamp, H. A. J., Huijsmans, J. F. M.. 1997. « Modelling spray drift from boom sprayers ». *Computers and Electronics in Agriculture* 19: 1-22. doi:10.1016/S0168-1699(97)00018-5.
- Jury, W. A.; Spencer, W. F.; Farmer, W. J., 1983. Behavior, Assesment Model for Trace Organics in Soil : I. Model Description. *Journal of Environmental Quality*, 12: 558–564.
- Lichiheb, N., Bedos, C., Personne, E., Benoit, P., Bergheaud, V., Fanucci, O., Bouhlel, J., Barriuso, E., 2015. « Measuring leaf penetration and volatilization of chlorothalonil and epoxiconazole applied on wheat leaves in a laboratory-scale experiment ». *Journal of Environment Quality* 44, 1782-1790. doi:10.2134/jeq2015.03.0165.
- Lichiheb, N., Personne, E., Bedos, C., van den Berg, F., Barriuso E.. 2016. Implementation of the effects of physicochemical properties on the foliar penetration of pesticides and its potential for estimating pesticide volatilization from plants. *Science of the Total Environment* 550, 1022-1031.
- Loubet, B., 2000. Modélisation du dépôt sec d'ammoniac atmosphérique à proximité des sources. Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Pelosi, C., Fritsch, C., Appenzeller, B., Bedos, C., Benoit, P., Bertrand, C., Bonthoux, S., Bretagnolle, V., Caria, G., Coeurdasier, M., Damy, S., Daniele, G., Gaba, S., Loubet, B., Mamy, L., Nelieu, S., Raoul, F., Sceifler, R., Vulliet, E., Zagatti, P., 2019. RESCAPE Résistance des paysages agricoles aux transferts de pesticides dans les sols et les organismes vivants. (Rapport de projet Rescape, APR Pesticides).
- Raupach, M.R., Briggs, P.R., Ford, P.W., Leys, J.F., Muschal, M., Cooper, B., Edge, V.E., 2001. Endosulfan transport I: Integrative assessment of airborne and waterborne pathways. *Journal of Environmental Quality* 30, 714–728.
- Scholtz, M.T., Voldner, E., McMillan, A.C., Van Heyst, B.J., 2002. A pesticide emission model (PEM) Part I: model development. *Atmospheric Environment* 36, 5005–5013.
- van den Berg, F., Jacobs, C.M.J., Butler Ellis, M.C., Spanoghe, P., Doan Ngoc, K., Fragkoulis, G., 2016. Modelling exposure of workers, residents and bystanders to vapour of plant protection products after application to crops. *Science of The Total Environment* 573, 1010–1020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.180>

Voltz, M., Bedos, C., Crevoisier, D., Dagès, C., Fabre, J.C., Lafolie, F., Loubet, B., Personne, E., Casellas, E., Chabrier, P., Chataigner, M., Chambon, C., Nouguier, C., Bankhwal, P., Barriuso, E., Benoit, P., Brunet, Y., Douzals, J.P., Drouet, J.L., Mamy, L., Moitrier, N., Pot, V., Raynal, H., Ruelle, B., Samouelian, A., Saudreau, M., 2019. Integrated Modelling of pesticide fate in agricultural landscapes: the MIPP Project. Presented at the 21st International Fresenius AGRO Conference Behaviour of Pesticides in Air, Soil and Water, Mainz (Germany).

10.4. ANNEXE 4 : Contexte réglementaire : définitions, requis réglementaires dans le cadre du règlement (CE) N°1107/2009 et méthodologie d'évaluation des risques applicable aux personnes présentes et aux résidents

10.4.1. Définitions, requis réglementaires dans le cadre du règlement (CE) N°1107/2009

- **Définitions**

En application du Règlement (CE) n°1107/2009, le Règlement d'exécution (UE) n°284/2013 introduit la définition des résidents conjointement à celle préexistante des personnes présentes.

- **personnes présentes** les personnes qui se trouvent fortuitement dans un espace où un produit phytopharmaceutique est ou a été appliqué, ou dans un espace adjacent, à une fin autre que celle de travailler dans l'espace traité ou avec le produit traité ;
- **les résidents** sont des personnes qui habitent, travaillent ou fréquentent une institution à proximité des espaces traités avec des produits phytopharmaceutiques, à une fin autre que celle de travailler dans l'espace traité ou avec les produits traités.

- **Estimation des expositions dans le cadre du règlement (UE) n°284/2013**

Selon le Règlement d'exécution (UE) n°284/2013 dont un extrait est présenté ci-après, des informations permettant l'estimation de l'exposition des personnes présentes et de celle des résidents sont requises dans le cadre des demandes d'autorisation.

Une estimation de l'exposition des personnes présentes et des résidents doit être faite pour chaque type de méthode d'application pertinent. Des informations spécifiques incluant la dose totale et la concentration de pulvérisation maximales doivent être incluses. L'estimation doit se fonder sur l'hypothèse selon laquelle les personnes présentes et les résidents ne portent aucun équipement de protection individuelle.

- **Evaluation des risques et critères décisionnels dans le cadre du règlement (UE) n°546/2011**

Le processus décisionnel qui peut conduire à la délivrance d'une AMM repose sur l'évaluation des risques, ainsi les estimations quantitatives des expositions en relation avec l'usage sont comparées à des valeurs toxicologiques de référence (AOEL¹¹, AAOEL¹²) fixée(s) lors de l'approbation des substances actives.

Selon le règlement (UE) n°546/2011¹³ portant sur les principes uniformes d'évaluation et d'autorisation des produits phytopharmaceutiques, une autorisation peut être délivrée si :

-l'exposition des personnes présentes sur les lieux ou des travailleurs exposés après l'application du produit phytopharmaceutique n'excède pas l'AOEL établi pour la substance active

-il n'est pas accordé d'autorisation si la concentration de la substance active dans l'atmosphère dans les conditions d'utilisation proposées est telle que l'AOEL ou les valeurs limites fixées pour les opérateurs, travailleurs ou personnes présentes sur les lieux sont dépassés

¹¹ AOEL (Niveau acceptable d'exposition de l'opérateur) est la valeur de référence par rapport à laquelle les expositions non-alimentaires aux pesticides sont actuellement comparées. Il est destiné à définir un niveau d'exposition quotidienne au long d'une saison de pulvérisation, d'année en année, en dessous duquel aucun effet systémique indésirable sur la santé n'est attendu. L'AOEL est normalement obtenu en appliquant un facteur de sécurité (le plus souvent 100) à une dose sans effet néfaste observé (NOAEL) (le cas échéant corrigée pour une absorption orale incomplète) à partir d'une étude toxicologique dans lequel les animaux ont reçu une dose quotidienne pendant 90 jours ou plus. Moins souvent, le NOAEL critique provient d'une étude avec une période d'exposition plus courte (par exemple, une étude sur le développement).

¹² AAOEL (Niveau aigu acceptable d'exposition de l'opérateur) est le terme utilisé dans le document de l'EFSA 2014 pour décrire une valeur de référence par rapport à laquelle l'exposition non alimentaire aiguë (c'est-à-dire celle qui pourrait se produire en une seule journée) pourrait être comparée.

¹³ Règlement (UE) n° 546/2011 de la Commission du 10 juin 2011 portant application du règlement (CE) n° 1107/2009 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les principes uniformes d'évaluation et d'autorisation des produits phytopharmaceutiques.

10.4.2. Méthodologie d'évaluation des risques applicable aux personnes présentes et aux résidents.

La méthodologie actuellement utilisée dans le cadre de l'évaluation des dossiers de demande d'autorisation de mise sur le marché de produits phytopharmaceutiques est basée sur le document guide de l'EFSA (EFSA, 2014)¹⁴ et la note de la Commission¹⁵.

En ce qui concerne les personnes présentes et les résidents, le document guide de l'EFSA décrit actuellement une méthodologie d'évaluation s'appliquant uniquement à un mode d'application par pulvérisation. Pour les autres types de traitement dont la mise en œuvre est moins courante, comme par exemple la fumigation et le poudrage, les données d'exposition disponibles sont peu nombreuses et sont généralement spécifiques aux substances et aux dispositifs utilisés.

Il est à noter que l'EFSA a engagé des travaux relatifs à l'actualisation du document guide sur l'estimation des expositions des opérateurs, travailleurs, personnes présentes et résidents.

Par ailleurs, plusieurs travaux finalisés ou en cours sur cette thématique intègrent également des mesures de réduction de l'exposition, il s'agit notamment du projet BROWSE^{16,17} du 7^{ème} programme cadre de recherche de l'Union européenne, des études produites par les metteurs en marché qui sont en cours d'analyse par les autorités du Royaume-Uni, et de données générées dans le cadre du projet PROPULPPP¹⁸.

Principe de la méthodologie d'évaluation

Ci-après sont présentés les points les plus importants de la méthodologie, la méthodologie complète est présentée dans le document guide de l'EFSA,

Dans le cadre de la méthodologie de l'EFSA, les quatre voies d'exposition présentées ci-après sont prises en considération pour l'évaluation de l'exposition des personnes présentes et des résidents.

Les voies d'exposition sont liées :

- à la dérive de pulvérisation au moment de l'application du produit,
- aux vapeurs qui peuvent se produire après l'application du produit,
- au contact avec une surface contaminée (en dehors des cultures traitées),
- au contact lors de la rentrée dans les cultures traitées.

- **Exposition par voie cutanée et par inhalation à la dérive de pulvérisation au moment de l'application du produit**

L'estimation de l'exposition spécifique des résidents est fondée sur le 75^{ème} percentile des valeurs mesurées dans des études de terrain conduite dans des conditions réelles d'utilisation.

Les valeurs au 75^{ème} percentile et les valeurs moyennes sont calculées pour chaque voie d'exposition du résident (exposition par voie cutanée et par inhalation à la dérive de pulvérisation au moment de l'application du produit).

La méthodologie de l'EFSA conduit dans tous les cas à intégrer des distances et potentiellement des mesures de réduction de la dérive de pulvérisation dans l'évaluation quantitative des expositions des résidents et des personnes présentes.

- **Exposition par inhalation aux vapeurs qui peuvent se produire après l'application du produit**

¹⁴ Guidance of EFSA. Guidance of the assessment of exposure for Operators, Workers, Residents and Bystanders in risk assessment for plant protection Products. EFSA, 2014.

¹⁵ COMMISSION GUIDANCE DOCUMENT. SANTE-10832-2015 rev. 1.7. 24 January 2017. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment for plant protection products.

¹⁶ BROWSE disponible à <https://secure.fera.defra.gov.uk/browse/index.cfm>.

¹⁷ Ellis *et al.* 2017 DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2016.08.017](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.017)

¹⁸ Le projet PROPULPPP a pour objet « l'objectivation de l'exposition des populations aux pulvérisations de produits phytopharmaceutiques en Wallonie et des mesures de protection destinées à limiter cette exposition ». <http://environnement.sante.wallonie.be/home/expert/projets/propulppp.html> ;

L'exposition par inhalation des résidents aux pesticides volatilisés est estimée selon la formule de calcul suivante :

SER_i = (VC x IR x IA) /BW	
SER _i = exposition systémique de la personne présente par inhalation mg/kg de poids corporel/j	
VC = concentration de substance active volatilisée (mg de substance active/ m ³)	IA = absorption par inhalation (%)
IR = volume d'air respiré par jour en m ³ /j	BW = poids corporel (60 ou 10 kg)

Une concentration de la substance active dans l'air égale à 1 µg m⁻³ pour les substances peu ou semi volatiles (pression de vapeur inférieure à 5 mPa) et à 15 µg m⁻³ pour les substances volatiles (pression de vapeur supérieure à 5 mPa) a été retenue.

- **Exposition lors du contact avec une surface contaminée**

La méthodologie est issue du modèle EPA 2001¹⁹.

Pour un adulte :

L'exposition est estimée en appliquant la formule suivante :

SEB_D = (AR x D x TTR x TC x H x AD)/BW	
SEB _D = exposition systémique du résident par voie cutanée en mg/kg de poids corporel/j	
AR = dose appliquée en mg de substance active/cm ²	
D = dérive en % pour 1 ou plusieurs applications	H = durée d'exposition (2h) *
TTR = résidus transférables à partir de la pelouse (5% pour les liquides et 1% pour les granulés)*	BW = poids corporel (60 ou 10 kg)
TC = coefficient de transfert en cm ² /h, 7300 pour un adulte et 2600 cm ² /h pour un enfant	AD = absorption dermale

*valeurs issues de BREAM²⁰

Pour un enfant :

L'exposition par voie orale est ajoutée à l'exposition cutanée. Ainsi, les expositions potentielles de l'enfant par voie orale qui porte les mains souillées à sa bouche et par le transfert d'un objet souillé à sa bouche sont prises en compte.

- **Estimation de l'exposition des résidents lors de la rentrée**

Lors de la rentrée dans les cultures traitées, qui résulte par exemple de la marche dans une parcelle traitée, seule l'estimation de l'exposition par voie cutanée est estimée. Dans ce cas de figure, l'exposition cutanée est estimée de la même manière que l'estimation de l'exposition du travailleur en considérant une durée d'exposition de 15 minutes seulement sans prendre en compte un éventuel délai pour la rentrée.

10.4.3. Estimation de l'exposition totale des résidents et des personnes présentes (adultes et enfants) et évaluation des risques dans le cadre de la méthodologie EFSA

- **Estimation de l'exposition totale des résidents**

Quatre voies d'exposition sont prises en compte dans l'estimation des expositions (dérive de pulvérisation, vapeur, dépôt en surface, rentrée dans les cultures traitées). Les valeurs du 75^{ème} percentile et de la moyenne doivent être calculées pour chaque type d'exposition résidentielle, le 75^{ème} percentile sera évalué séparément et les moyennes seront additionnées, l'exposition finale des résidents est la somme des valeurs moyennes de chaque voie d'exposition.

Exposition des adultes :

- 1) Exposition par voie cutanée et par inhalation à la dérive de pulvérisation au moment de l'application du produit phytopharmaceutique,
- 2) Exposition par inhalation aux vapeurs qui peuvent se produire après l'application du produit,
- 3) Exposition cutanée (indirecte) lors du contact avec une surface contaminée,
- 4) Estimation de l'exposition des résidents lors de la rentrée.

¹⁹ EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2001. Science Advisory Council for Exposure, Policy 1064 Number 12, Recommended Revisions to the Standard Operating Procedures (SOPs) for Residential 1065 Exposure Assessments. Office of Pesticide Programs, Health Effects Division. Washington D.C.

²⁰Kennedy MC, Butler Ellis MC, Miller PCH (2012) BREAM : A probabilistic bystander and resident exposure assessment model of spray drift from an agricultural boom sprayer. Computers and Electronics in Agriculture 88: 63-71. doi.org/10.1016/j.compag.2012.07.004

Exposition de l'enfant :

- 1) Exposition par voie cutanée et par inhalation à la dérive de pulvérisation au moment de l'application du produit phytopharmaceutique,
- 2) Exposition par inhalation aux vapeurs qui peuvent se produire après l'application du produit,
- 3) Exposition cutanée (indirecte) lors du contact avec une surface contaminée prenant en compte l'exposition par voie orale (port des mains souillées à la bouche et transfert d'un objet souillé à la bouche),
- 4) Estimation de l'exposition des résidents lors de la rentrée.

- **Estimation de l'exposition totale des personnes présentes**

L'exposition des personnes présentes est estimée selon le même principe que celle des résidents, à l'exception de l'exposition par voie cutanée et par inhalation à la dérive de pulvérisation qui utilise le 95^{ème} percentile des valeurs. Toutefois, les quatre voies exposition estimées sont maintenues séparées car, sur la base des données disponibles, il est peu probable que toutes les expositions des différentes voies se produisent simultanément.

- **Evaluation des risques pour les résidents et les personnes présentes**

Dans le cadre de l'évaluation des risques, les expositions estimées sont comparées à l'AOEL et à l'AAOEL si cette dernière a été fixée.

Dès lors que l'exposition estimée **incluant les différentes voies d'exposition** et en intégrant les mesures de gestion (distance et dispositif de réduction de la dérive) est **supérieure** à la valeur toxicologique de référence (AOEL ou AAOEL), les principes uniformes ne sont pas respectés et les conditions de délivrance d'une autorisation de mise sur le marché ne sont pas remplies.

Quand l'exposition estimée **incluant les différentes voies d'exposition** et en intégrant les mesures de gestion (distance et dispositif de réduction de la dérive) est **inférieure** à la valeur toxicologique de référence (AOEL ou AAOEL), les principes uniformes sont respectés et les conditions de délivrance d'une autorisation de mise sur le marché sont remplies.

10.5. ANNEXE 5 : Détails de travaux prévus à court terme en viticulture

Les essais 2020 auront pour objectif de 1) finaliser la validation d'un protocole de mesure en routine afin de s'assurer de la fiabilité des mesures requise pour classer les matériels dans les classes de réduction de la dérive européennes (valider la répétabilité pour des types de pulvérisateurs aux caractéristiques contrastées) Il s'agira notamment de réaliser plusieurs répétitions (au moins 5) des diverses modalités de techniques de pulvérisation qui seront testées afin de valider la répétabilité de la méthode de mesure et de déterminer un nombre de répétitions de mesure nécessaire et suffisant lors des essais de routine ultérieurs. Cette évaluation de la répétabilité sera conduite pour des types de pulvérisateurs aux caractéristiques contrastées afin que les conclusions puissent être extrapolées à toutes les situations, et 2) évaluer la capacité de diverses techniques de pulvérisation pressenties dans la bibliographie à effectivement réduire cette dérive. Il conviendra notamment de mieux caractériser la variabilité du niveau de dérive pris comme référence par rapport auquel des réductions seront mesurées, puis d'explorer diverses techniques de pulvérisation. Les techniques de pulvérisation qui feront l'objet de mesures en 2020 peuvent se classer dans les 4 catégories suivantes :

- Techniques de pulvérisation de référence (voûtes pneumatiques) ;
- Techniques de pulvérisation pressenties pour une réduction de la dérive et assez facilement accessibles aux viticulteurs (transformation d'appareils existants, choix de nouvelles buses, modification des pratiques et réglages notamment pour le traitement des premiers rangs à proximité des zones sensibles) ;
- Techniques de pulvérisation les plus prometteuses (panneaux récupérateurs) ;
- Mesures complémentaires aux techniques de pulvérisation proprement dites (filets brise-vent et haies végétales).

Le détail des essais prévus pour chacune des 4 catégories est présenté ci-dessous

Eléments de protocoles des expérimentations sur vigne

Agroéquipements

Le détail des essais prévus pour chacune des 4 catégories présentées est donné ci-après.

1. Programme d'essais avec des techniques de pulvérisation de référence.

Les matériels de pulvérisation de type voûte pneumatique représentent 70 à 80% du parc en vignes larges à ce jour, ce sera donc ce type de matériel qui sera considéré comme référence. Les essais 2020 seront effectués avec deux matériels de ce type, une variabilité des niveaux de dérive au sein de ce type étant possible. L'exploration d'autres modèles de ce même type devra d'ailleurs être poursuivie ultérieurement. De plus, à titre exploratoire pour l'une des deux machines, des essais en faisant varier fortement le volume par hectare seront effectués afin de prendre du recul sur l'influence potentielle de ce paramètre de réglage de la machine sur les niveaux de dérive (le volume par hectare influe sur la taille des gouttelettes produites en technologie pneumatique).

Le programme d'essais est le suivant :

- Voûte n°1:
 - Réglage standard, pleine végétation (PV), x 5 répétitions (vol/haRef = 150l/ha);
 - Réglage standard, début de végétation (DV), x 5 répétitions ;
 - Toutes choses égales par ailleurs, pleine végétation (PV) avec Vol/ha = 300 l/ha; x 2 répétitions et avec Vol/ha = 75 l/ha x 2 réps; (Evaluation de la sensibilité de la mesure à ce paramètre de réglage)
- Voûte n°2:
 - Réglage standard, pleine végétation (PV), x 5 répétitions ;
 - Réglage standard, début de végétation (DV), x 5 répétitions ;

2. Programme d'essai avec des techniques de pulvérisation ayant un potentiel de réduction de dérive et assez facilement accessibles aux viticulteurs.

Plusieurs techniques de pulvérisation dont le détail est donné ci-après seront évaluées :

a. Voûtes pneumatiques transformées en jet porté;

Certains constructeurs proposent des kits permettant de transformer les voûtes pneumatiques en jet porté. Un porte buse est adapté à côté des diffuseurs d'air. Cette transformation permet d'équiper les pulvérisateurs de buses à induction d'air ce qui permet d'augmenter la taille des gouttelettes fortement par rapport à celles produites en technologie pneumatique. Cela pourrait donc présenter un intérêt pour limiter la dérive tout en étant relativement simple de mise en œuvre. Le programme d'essais mis en œuvre visera à explorer le potentiel de ces transformations au travers du test de plusieurs buses associées.

Le programme d'essais est le suivant :

- Voûte n°1:
- Avec buse à induction d'air n°1, réglage standard (idem référence pneumatique) PV x 5 reps et DV x 5 reps;
- Avec buse à induction d'air n°2 (granulo > à buse n°1), réglage standard (idem référence pneumatique) PV x 5 reps et DV x 5 reps;
- Voûte n°2:
- Idem voûte n°1

b. Traitement des rangs de bordure de la parcelle en ne projetant la pulvérisation que vers l'intérieur de la parcelle.

Quelle que soit la technique de pulvérisation utilisée, il est possible (parfois en doublant les passages) de maintenir la dose de pulvérisation consacrée à un rang en ne pulvérisant que vers l'intérieur de la parcelle. Des essais menés en Allemagne ont démontré l'intérêt de cette pratique pour réduire la dérive. Le schéma ci-dessous présente les modalités de passage dans les quatre rangs de bordure de parcelle pour la technique de pulvérisation « voûte pneumatique tous les deux rangs » de manière conventionnelle à gauche et de manière à ne pulvériser que vers l'intérieur de la parcelle à droite. L'inconvénient de cette méthode de travail est de fortement dégrader l'homogénéité des profils de dépôts de pulvérisation dans la végétation mais ne nécessitant aucun investissement, si cette pratique s'avère efficace pour réduire la dérive, elle présenterait un vif intérêt. Cette technique de doublement des passages en traitant uniquement vers l'intérieur de la parcelle peut aussi s'appliquer aux matériels de type face par face.

Le programme d'essais est le suivant :

- Voûte pneumatique n°1, réglage standard, pulvérisation en « uniface » uniquement vers l'intérieur de la parcelle sur les 4 rangs du banc d'essai. x 5 reps en PV et 5 reps en DV.
- Face par face à jet porté, pulvérisation en « uniface » uniquement vers l'intérieur de la parcelle, avec buses à induction d'air, x 5 reps en DV et 5 reps en PV.

c. Optimisation du choix du couple (buse ; pression ; niveau d'assistance d'air) sur les matériels jet porté.

Le choix des buses est le moyen de réduire la dérive qui est privilégié en grandes cultures. En effet le choix des buses et de leur pression d'utilisation permet de modifier sensiblement la taille des gouttelettes de pulvérisation ce qui influence fortement la dérive. Toutefois les constats établis en grandes cultures ne peuvent être directement transposés en viticulture du fait de l'utilisation de matériels développant d'importantes assistances d'air dirigées vers le feuillage, donc proches de l'horizontale. Ceci étant, l'optimisation du choix des buses demeure une piste privilégiée, relativement simple à mettre en œuvre, pour permettre une réduction de la dérive. Le programme d'essais mis en œuvre visera donc à explorer tout le potentiel de réduction de dérive permis en viticulture par l'utilisation de buses à induction d'air.

D'après les données des fabricants, parmi les buses à induction d'air (dites antidérive) il existe une assez forte disparité en termes de granulométrie qui pourrait donc avoir une forte influence sur le potentiel de réduction de dérive et mérite exploration. Le choix des couples buses pression sera effectué suite à deux journées de mesures rapides de granulométrie à l'aide d'un équipement adéquat détenu par INRAE Montpellier (site de Lavalette).

Le programme est le suivant :

- Face par face à jet porté, avec buses classiques x 5 reps en PV et 5 reps en DV;
- Face par face à jet porté, avec buses à induction d'air x 2 couples (buse; pression) avec granulométries contrastées x 5 reps en PV et 5 reps en DV;
- Sans ventilation toutes choses égales par ailleurs pour l'un des deux couples (buse; pression) x 5 reps en PV et 5 reps en DV;
- Face par face à jet porté avec buses à chambre de décompression x 5 reps en PV et 5 reps en DV;

3. Programme d'essai avec les techniques de pulvérisation les plus prometteuses en matière de réduction de dérive (panneaux récupérateurs avec buses à induction d'air).

Les pulvérisateurs de type panneaux récupérateurs équipés de buses à induction d'air représentent les techniques de pulvérisation au plus fort potentiel de réduction de la dérive selon l'expertise actuelle. Ce sont d'ailleurs les matériels de ce type qui peuvent être inscrits sur dossier au bulletin officiel comme moyen réducteurs de dérive à 90%. Le programme d'essais 2020 visera donc à explorer le potentiel de ces techniques et à valider la capacité du banc d'essai à mesurer de manière fiable et répétable de faibles quantités de dérive.

Le programme d'essais avec ce type de matériel est le suivant :

- Panneaux récupérateurs à jet porté n°1:
- Avec buses classiques x 5 répétitions en DV et 5 répétitions en PV;
- Avec buses à induction d'air x 5 répétitions en DV et 5 répétitions en PV;
- Avec buses à chambre de décompression x 5 répétitions en DV et 5 répétitions en PV.
- Panneaux récupérateurs à jet porté n°2 (panneaux plus larges que n°1):
- Avec buses classiques x 5 répétitions en DV et 5 répétitions en PV;
- Avec buses à induction d'air x 5 répétitions en DV et 5 répétitions en PV;
- Avec buses à chambre de décompression x 5 répétitions en DV et 5 répétitions en PV.

Aménagements de bordure de parcelle

Les mesures complémentaires ne concernent pas directement les techniques de pulvérisation. Il s'agit d'aménagements des abords des parcelles en vue de limiter le phénomène de dérive. Deux d'entre elles sont notamment discutées : les filets artificiels de type brise vent et les haies végétales. Aucun consensus clair pour quantifier l'effet de ces mesures n'est à ce jour établi. De plus les caractéristiques idéales de ces installations (porosité, hauteur...) pour optimiser la réduction de la dérive ne sont pas connues.

a. Installation de filets en bord de parcelle.

Le programme d'essai est le suivant :

- Test d'un modèle de filets de 3 m de hauteur.
- Voûte pneumatique n°1, réglage standard x 5 reps en PV et 5 reps en DV;
- Voûte jet porté n°1, avec buses à induction d'air, x 5 reps en PV et 5 reps en DV;
- Panneaux récupérateurs n°2, avec buses à induction d'air, x 5 reps en PV et 5 reps en DV;

b. Effet des haies végétales sur la réduction de la dérive.

Projet d'installation d'une haie à bas d'arbres en pots ou coupés, à voir en partenariat avec un pépiniériste si l'intérêt est confirmé.

Ce travail d'expertise a été réalisé à la demande du Ministre en charge de l'agriculture dans le cadre des distances de sécurité lors de l'application des produits phytopharmaceutiques.

Composition du groupe de travail :

Barriuso Enrique (INRAE), Bedos Carole (INRAE), Bordes Jean-Paul (Acta), Cellier Pierre (INRAE), Chantelot Eric (IFV), Huyghe Christian (INRAE), Loubet Benjamin (INRAE), Mercier Thierry (Anses), Perriot Benjamin (Arvalis), Siné Mehdi (Acta), Verjux Nathalie (Arvalis), Verpont Florence (Ctifl)

Pour citer ce document :

Bedos C., Douzals J.P., Barriuso E., Bordes J.P., Chantelot E., Cellier P., Loubet B., Mercier T., Perriot B., Sine M., Verjux N., Verpont F., Huyghe C. (2020). Application des produits phytopharmaceutiques et protection des riverains : synthèse des connaissances pour définir les distances de sécurité. Rapport du groupe de travail Inrae-Anses-Acta. 70 pages

DOI : [10.15454/8w26-5w57](https://doi.org/10.15454/8w26-5w57)

Disponible en ligne :

DOI : [10.15454/8w26-5w57](https://doi.org/10.15454/8w26-5w57)