
Revue de littérature

Acquisition de connaissances sur l'application de pesticides par voie aérienne – hélicoptère.

Marlène Piché, ing. M.Sc.

Consultante

Pulvérisation – Protection des cultures et de l'environnement

« Ce projet a été réalisé dans le cadre du programme Prime-Vert, Sous-volet 3.1 – Approche régionale ».

2014-2105

Table des matières

1	OBJECTIF	4
2	HISTORIQUE	4
3	APPLICATION AERIENNE PAR HELICOPTERE	5
3.1	Utilisation	6
3.2	Paramètres opérationnels lors des applications par hélicoptère	7
3.2.1.1	Rabattement de l'air – « downwash »	7
3.2.1.2	Ratio rampe/rotor	7
3.2.1.3	Positionnement de la rampe et des buses	8
3.2.1.4	Orientation des buses	8
3.2.1.5	Choix de buse et taux d'application	9
3.2.1.6	Hauteur par rapport à la culture	9
3.2.1.7	Vitesse d'avancement	10
3.3	Préoccupation des utilisateurs	10
4	LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE	11
4.1	La dérive	11
4.2	Les modèles de mesure des risques de dérive	12
4.3	Dérive lors d'applications aériennes	13
4.3.1	Études comparatives – dépôt au sol	13
4.3.2	Études comparatives – calculs de bilan de masse	14
4.3.3	Impact de la formulation de la bouillie et des paramètres sur les gouttes et la dérive	15
4.3.4	Les zones tampons	16
4.4	Dépôt et couverture de feuillage – efficacité des pulvérisations	17
4.4.1	En verger	18
4.4.2	En vignoble	19
4.4.3	Applications en milieu non agricole	20
4.5	Technologies et agriculture de précision	21
5	MÉTHODES DE MESURE DE LA DÉRIVE	22
5.1	Traceur	22

5.2	Plan expérimental de mesures de dérive	23
5.3	Choix des échantillons	24
5.3.1	Dépôt au sol	24
5.3.2	Dérive aérienne	24
5.4	Données météorologiques	24
5.5	Utilisation des modèles	25
5.6	Exemples de méthodes	25
6	RÈGLEMENTATION	25
6.1	Zones tampons	26
6.2	Application par voie aérienne – avion ou hélicoptère	27
6.3	Règlementation canadienne et provinciale	28
7	APPLICATION AÉRIENNE PAR HÉLICOPTÈRE AU QUÉBEC	30
8	CONCLUSION	31
9	RÉFÉRENCES	32
10	ANNEXES	37
10.1	Annexe 1 Présentation des mouvements d’air	37
10.2	Annexe 2 Paramètres de pulvérisation	38
10.3	Annexe 3 Exemples de coteaux escarpés à pulvériser	40
10.4	Annexe 4 Exemples de dispositions de sites d’essais	41
10.5	Annexe 5 Règlementations	43
10.5.1	Tableau 1 : Épandage aérien au niveau européen : les procédures générales	43
10.5.2	Tableau 2 : Épandage aérien au niveau européen : les pratiques	44
10.5.3	Tableau 3 : Synthèse des pratiques d’épandage aérien internationales	45
10.6	Annexe 6 Catégories de prélèvement des eaux – MDDELCC (2015)	46
10.7	Annexe 7 Liste de prix détail pour Héli-mistral 2014	47

1 Objectif

Le présent document a pour objectif de répondre aux différentes préoccupations en lien avec l'application aérienne des pesticides en milieu agricole, plus spécifiquement par hélicoptère. Ce document traite de l'utilisation de l'hélicoptère pour faire les arrosages pesticides, des risques de dérive associés à ces applications, et regroupe les résultats de différentes études portant sur leur efficacité biologique ou phytosanitaire.

L'efficacité phytosanitaire est considérée comme étant la condition la plus importante d'un traitement en pulvérisation. Un deuxième facteur accompagne aussi cette condition : le contrôle de la dérive lors de l'arrosage. Cet aspect englobe l'impact du pesticide sur des zones non ciblées, sur la santé humaine, sur l'environnement en général et, dans ce cas précis, un facteur d'acceptation sociale. La conscientisation de la population aux effets probables des pesticides sur la santé ainsi que la proximité des zones urbaines aux zones agricoles favorisent ces nouvelles préoccupations.

2 Historique

L'utilisation de pesticides pour le traitement phytosanitaire des productions horticoles, des grandes cultures et des forêts, est une pratique qui a commencé il y a plus d'un siècle. Les méthodes d'application utilisées étaient variées et n'étaient pas optimisées, probablement liées à un manque de connaissances sur les risques à la santé que pouvaient occasionner les pesticides et à un manque de compréhension des mouvements d'air pouvant créer la dérive. Les applications par voie aérienne sont apparues principalement après la Première Guerre mondiale. Avant les années 40, les produits étaient encore principalement des substances inorganiques (sels) ou des produits dérivés de source naturelle (Unsworth 2010). La problématique était le haut taux d'application nécessaire pour obtenir une certaine efficacité avec ces produits et le manque de précision lors des pulvérisations (Akersson et Yates 1964). Les applications aériennes étaient cependant une méthode rapide, comparativement aux applications terrestres, pour traiter de grandes surfaces (Giles et al. 2008), et avec plus de 400 000 hectares pulvérisés par voie aérienne en Californie (Yates 1962). Au cours des années 40, la croissance du développement de pesticides synthétiques efficaces, à large spectre et peu coûteux, comme l'insecticide DDT et d'autres composés d'organophosphoré, crée une révolution dans les pulvérisations agricoles (Felsot 2005). Les équipements de pulvérisation se modernisent et permettent des arrosages mieux ciblés. Les pulvérisations manuelles sont remplacées par différents pulvérisateurs terrestres (p. ex. pulvérisateur à jet porté) et par les applications par avion et hélicoptère utilisant des systèmes de dispersion entraînés par l'air (Giles et al. 2008). Au cours des années 50, l'utilisation intense du DDT est répandue dans le monde entier, considérant sa grande efficacité contre une grande plage d'insectes et son faible taux d'application nécessaire comparativement aux autres produits inorganiques. Au cours de cette décennie, certaines études démontrent que les pesticides peuvent avoir un impact non ciblé, entre autres en mesurant la présence de DDT dans le lait de vache ayant été exposé (Felsot 2005), et en observant des pertes de rendement de culture chez les producteurs voisins

de champs pulvérisés avec un herbicide (Akesson et Yates 1964). Mais ce n'est que lorsque des résidus ont été trouvés dans les précipitations au Royaume-Uni que la notion de transport des produits pulvérisés, sur le sol ou le feuillage, par l'air turbulent, a vu le jour. La réalité de dérive des pesticides a été reconnue à la fin des années 60, stipulant que les résidus de pesticide pouvaient voyager hors de la zone traitée au cours d'une pulvérisation (Akesson et Yates 1964) et contaminer les cultures voisines ou éloignées (Ware et al. 1968). Dans les années 60, les surfaces pulvérisées par voie aérienne en Californie avaient atteint 2,8 millions d'hectares et 24 millions à travers les États-Unis (Yates 1962). Aucune réglementation n'était encore mise en place quant à l'utilisation des pesticides et les méthodes d'application, bien que la Californie avait émis, en 1927, la première règle en lien avec les résidus retrouvés sur la nourriture et les fourrages (Giles et al. 2008). La formation de l'agence « Environmental Protection Agency (EPA) » aux États-Unis en décembre 1970 a contribué à l'implémentation de certaines règles surtout axées sur les applications par voie aérienne. Au cours des années 70, on a vu apparaître des règles en lien avec l'utilisation de certains produits, particulièrement le DDT, dans différents pays du monde (Felsot 2005). À partir des années 80, on assiste au développement de produits moins nocifs et une notion beaucoup plus reconnue de la dérive des pesticides et de ses effets sur l'environnement en général (Unsworth 2010). Récemment, la tendance revient vers le développement et la commercialisation de pesticides aux ingrédients actifs d'origine naturelle (Giles et al. 2008). Le marché s'oriente vers les produits biologiques et la réglementation pour les applications pesticides se resserre. On reconnaît maintenant que la dérive de pesticide représente une source de contamination pour les cours d'eau, augmente les risques de présence de résidus non autorisés sur les produits à la consommation humaine et animale, et peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine (Felsot et al. 2011).

La dérive des pesticides représente une problématique mondiale, considérant la présence de certains pesticides (polluants organiques persistants — POPs) en Arctique lesquels sont actuellement proscrits d'usage au Canada, aux États-Unis et dans certains pays d'Europe. Ces POPs voyagent dans l'air par les forts courants atmosphériques entre l'Asie et l'Amérique du Nord (NCP 2013). Comme les applications aériennes produisent plus de dérive que les applications terrestres et qu'elles représentent un risque pour l'environnement, leur utilisation est proscrite dans certains pays (p. ex. Belgique, Pays-Bas) et très sévèrement réglementée dans d'autres (p. ex. Allemagne, Hongrie, Suisse, Californie). Au Canada, certaines règles existent pour les épandages aériens de pesticides et sont présentées dans la section « Réglementation » du présent document. Par voie aérienne, on entend avion ou hélicoptère.

3 Application aérienne par hélicoptère

Il est tout d'abord important de comprendre l'impact des paramètres opérationnels sur l'efficacité de la pulvérisation lors des applications par hélicoptère. Chaque paramètre a son importance dans toutes les pulvérisations. Cependant, dans le cas des applications aériennes, les paramètres sont extrêmes et peuvent varier sur des plages beaucoup plus grandes, par

exemple la vitesse d'avancement et la hauteur de pulvérisation, ajoutant un coefficient supplémentaire aux risques de dérive et d'inefficacité des arrosages.

3.1 Utilisation

Les arrosages par voie aérienne, hélicoptère et avion, sont parfois nécessaires pour les situations critiques et les régions caractéristiques difficiles d'accès, comme les terrains à forts dénivèlements, les pentes abruptes ou les forêts. Au Canada, moins de 10% des arrosages se font par voie aérienne (Felsot et al. 2011). Ce type d'arrosage est encore utilisé en Europe, bien que lourdement règlementé, et on note une diminution de 60% des surfaces traitées par voie aérienne entre 1985 et 2001 (De Rossi 2010). La pression sociale étant très lourde, l'application par voie aérienne y sera définitivement interdite en 2016, sauf pour certaines situations critiques de santé humaine. En France, on enregistrerait une moyenne annuelle de 165 000 hectares pulvérisés par hélicoptère en 2002, dont 70% en grandes cultures (représentant 23% de toutes les applications), 15% en sylviculture, 5% en vignes, 1% en arboriculture, et 9% pour le reste des activités (Boudet et Mandin 2005). En Allemagne, 6000 hectares de vignobles et 60 000 hectares de forêt étaient traités par hélicoptère en 1994 (Schmidt 1996). Aujourd'hui, ces arrosages sont permis seulement quand aucune autre méthode de pulvérisation ne peut être envisagée.

À l'opposé, les arrosages aériens sont très communs dans les pays de l'Amérique du Sud (Mercosur). Cependant, une réglementation sur les zones tampons près des zones sensibles doit être respectée avec des critères exigeants des largeurs de zones non traitées allant de 100 à 500 m et, dans certains cas, exigeant un appareil muni d'un système GPS (Felsot et al. 2011).

Les applications par voie aérienne, avion ou hélicoptère, sont habituellement privilégiées pour 1) traiter de grandes surfaces, 2) la rapidité d'exécution du travail, 3) traiter quand les conditions de terrain rendent l'accès d'un pulvérisateur terrestre impossible, 4) traiter un terrain trop accidenté pour permettre le passage d'un appareil terrestre, 5) faire des arrosages en forêt. Les applications par hélicoptère, comparativement aux applications par avion 1) permettent une plus grande précision lors des applications, 2) sont particulièrement appréciées pour les petites à moyennes surfaces et les endroits difficilement accessibles, 3) permettent une application à basse vitesse et près du sol (Schmidt 1996). Cependant, l'hélicoptère 1) est plus dispendieux à l'achat et à l'utilisation, 2) peut transporter une charge moins lourde, 3) requiert un plus grand degré d'habileté à faire voler et, 4) coûte plus cher d'entretien (Giles et al. 2008). Dans la littérature, certaines études concluent que le mouvement de rabattement de l'air vers le sol créé par le rotor augmente la pénétration de la pulvérisation dans le feuillage (Schmidt 1996). Dans plusieurs autres études, on conclut plutôt à une augmentation des risques de dérive associée à ce mouvement d'air (Felsot et al. 2011). Les composantes de l'hélicoptère ainsi que les paramètres opérationnels lors d'un arrosage sont très importants pour réussir une pulvérisation à faible risque de dérive.

Contrairement à l'avion, aucun hélicoptère n'est spécifiquement conçu pour les traitements aériens. Les manœuvres serrées avec de lourdes charges, lors de certains traitements aériens,

exigent d'excellentes aptitudes de la part du pilote et une bonne conception de l'équipement de dispersion. Toutefois, l'aptitude de l'hélicoptère à décoller et atterrir dans des endroits restreints, mais suffisamment grands pour laisser passer les rotors (y compris les plates-formes des camions de service) ainsi que la possibilité d'effectuer des virages plus serrés et de manœuvrer dans des espaces confinés compense souvent le fait de transporter des charges plus petites (Anon 2000).

3.2 Paramètres opérationnels lors des applications par hélicoptère

Comme pour toutes les applications, tous les facteurs et paramètres influençant l'efficacité d'une pulvérisation, autant phytosanitaires qu'environnementaux, doivent être pris en considération à chaque application. Aussi, un opérateur expérimenté est fondamental à la réussite d'une application limitant les risques à l'environnement. Par exemple, engager et désengager la pulvérisation au bon moment aux bordures de champ est crucial pour limiter les risques de dérive lors d'applications aériennes.

La pulvérisation par hélicoptère nécessite plusieurs adaptations aux différentes conditions environnementales pour permettre une application efficace et à faible risque de dérive. Il est aussi important de connaître les composantes de l'appareil utilisé – tels que le nombre d'hélices, leurs longueurs et géométries, la vitesse de rotation du rotor, son orientation et sa configuration, l'aérodynamisme du fuselage de l'appareil – pour prévoir les caractéristiques de rabattement de l'air et, incidemment, de l'entraînement des gouttelettes. Les composantes de l'appareil associées aux paramètres de pulvérisation auront un impact sur la distribution et la qualité de la pulvérisation.

3.2.1.1 Rabattement de l'air – « downwash »

La contribution aérodynamique de l'appareil ou les écoulements d'air autour de l'appareil en mouvement, affecte de façon importante le transport des gouttelettes. De plus, il existe un grand nombre de conceptions différentes rendant la quantification et la prédiction des vortex d'air très difficile (Wadcock et al. 2008). On observe un mouvement d'air hyperbolique sous l'appareil (rabattement de l'air) ainsi qu'un mouvement circulaire au bout des hélices (vortex), plus ou moins important en fonction de la longueur de l'hélice et de la vitesse de rotation du rotor (Annexe 1). Ces mouvements peuvent créer l'entraînement des gouttelettes hors de la zone ciblée lors d'une pulvérisation et, sous des conditions météorologiques très sèches ou lors de passage au-dessus d'une végétation libre ou poussiéreuse, réduire de façon considérable la visibilité de l'opérateur s'il doit circuler à basse altitude.

3.2.1.2 Ratio rampe/rotor

Dans les applications par hélicoptère, il est important de considérer le ratio entre la largeur de la rampe et le diamètre du rotor. Un vortex est généré à chaque extrémité du rotor et se concentre dans une région comprise entre 70% à 90% du diamètre de celui-ci. Les fines gouttes sont facilement entraînées dans cette masse d'air et représentent un risque élevé de dérive. Pour diminuer les risques d'entraînement des gouttes, la rampe de pulvérisation ne devrait pas excéder 70% de la largeur du rotor pour ne pas émettre de gouttelettes dans la région à

turbulence maximale (Riley et al. 1991; Gardisser et Kulhman 2001). Cette recommandation est obligatoire aux États-Unis (Barbosa 2010).

3.2.1.3 Positionnement de la rampe et des buses

Ce paramètre est particulièrement important dans les applications par avion, mais s'applique aussi aux applications par hélicoptère, en fonction de la vitesse d'avancement. Plus la rampe est localisée vers l'arrière, plus l'impact du vortex sera important pour entrainer les gouttes hors de la zone ciblée. Plus la rampe est localisée vers l'avant, combiné à une faible vitesse d'avancement, plus de temps auront les gouttelettes pour se déposer sur la cible entre l'émission des gouttes et l'influence du sillage du rotor (Quantick 1985). Mais la configuration de l'appareil, le type de buses, ainsi que la vitesse d'avancement sont tous reliés à l'impact du vortex (Gardisser et Kulhman 2001).

Une étude publiée en 1975 (Orchard et Markin 1975) a évalué différentes répartitions des buses sur la rampe. L'hélicoptère utilisé était un modèle à double rotor Boeing 107. L'auteur mentionne un effet de vortex moindre avec le double rotor, bien que cet aspect ne soit qu'une observation visuelle. La largeur du rotor était de 15,2 m et la largeur de la rampe de 29,6 m (ratio de 195%). Les buses étaient soit 1) distribuées dans les extrémités extérieures de la rampe presque 'entièrement hors de la largeur du rotor); 2) distribuées à l'intérieur, mais avec un ratio rampe/rotor plus grand que 100% presque 'entièrement sous le rotor); 3) distribuée uniformément sur la largeur de la rampe. L'efficacité était mesurée par le taux de récupération dans la zone pulvérisée. L'arrangement de buses extérieures a produit le plus faible taux de récupération au sol et l'arrangement de buses intérieures, le plus haut taux de récupération. Placer les buses à l'extérieur des rotors n'est donc pas une configuration gagnante pour diminuer les risques de dérive. Utiliser une rampe n'excédant pas 70% de la largeur du rotor avec une distribution uniforme des buses sur la largeur de la rampe permettra un meilleur taux de récupération.

3.2.1.4 Orientation des buses

On peut voir des options de buses orientées directement vers l'arrière, qu'on dit à 0° , orientées directement vers le sol, qu'on dit à 90° , et orientées vers l'avant. En orientant les buses vers l'avant ou vers le bas (90°), les gouttelettes sont davantage soumises au frottement de l'air. Ce frottement augmente le fractionnement des gouttes, produit un large spectre de grosseurs de gouttelettes et, conséquemment, un nombre plus élevé de fines gouttes (Barbosa 2010). Aussi, plus les gouttes sont grossières au moment de la pulvérisation, plus elles seront sensibles au frottement de l'air (Bird et al. 2002). Une orientation parallèle à la direction (0°) procurerait un fractionnement moindre des gouttes par l'air et permettrait de réduire les risques de dérive (Gardisser et Kulhman 2001; Barbosa 2010). Cependant, l'orientation des buses n'est pas une variable qu'on peut considérer seule. Il y a une interaction entre : l'orientation des buses, le type de buse ainsi que la vitesse de croisière de l'hélicoptère. Tous ces paramètres auront une influence sur la taille des gouttelettes au moment de l'impact.

3.2.1.5 Choix de buse et taux d'application

Toutes les buses produisent une plage de grosseurs de gouttelettes avec un « volume de diamètre moyen » (VMD) qui représente la moyenne des grosseurs de gouttes produites à une pression donnée. À l'intérieur de cette plage de gouttelettes produites, on veut diminuer la proportion de gouttelettes sous les 150 µm, puisque ce sont les plus à risque de dériver. Plus les gouttelettes sont fines, plus elles peuvent rester en suspension dans l'air longtemps, être influencées par le sillage du rotor et dériver sur de longues distances. Cependant, plus les gouttelettes sont grossières (>400 µm), plus elles se déposeront au sol rapidement, mais ne couvriront pas le feuillage de façon efficace (Quantick 1985). De plus, dans une application aérienne, il faut combiner l'effet du frottement du vent qui crée le fractionnement des gouttes. Puisque l'étiquette des produits contient des recommandations sur la finesse de pulvérisation pour chaque type de pulvérisation incluant aérienne, il est important que l'opérateur connaisse l'impact de la vitesse sur la taille des gouttes et puisse choisir la bonne buse ou les bons paramètres d'utilisation. Ces buses sont généralement différentes des buses utilisées sur une rampe de pulvérisation terrestre considérant que lors d'une application aérienne, les buses doivent produire un débit important pour obtenir le bon taux d'application malgré la vitesse d'avancement importante de l'appareil.

Un modèle de prédiction pour une application par hélicoptère a été développé par le USDA (AgDISP) dans lequel on inclut plus de 8 buses différentes, choisies en fonction d'un sondage réalisé auprès des opérateurs d'hélicoptère. Le modèle prédit la taille des gouttes et la proportion de gouttelettes dans la partie hautement susceptible à la dérive en fonction des paramètres opérationnels (Kirk 2002). On y retrouve la buse AccuFlow™ (AF) (buse à réduction de dérive), produisant des gouttelettes dans un spectre restreint autour de 500 µm, les buses CP (CP Products Company Inc.), Micronair (UK), etc. Certains pays (principalement en Europe) obligent les applicateurs à utiliser les modèles pour planifier les applications. Cette pratique n'est pas obligatoire au Canada.

Selon la littérature, une pression typique pour une application par hélicoptère est de 2 bar et un taux d'application type peut varier entre 12 et 56 L/ha (Hewitt et al. 2002), mais a été répertorié allant de 50 à 150 L/ha en Allemagne dans les années 90 (Schmidt 1996).

3.2.1.6 Hauteur par rapport à la culture

En pulvérisation, plus la distance est grande entre la buse et la cible, plus les risques de dérive sont élevés. Il faut donc ajuster la hauteur de passage au-dessus de la culture pour minimiser la distance entre les buses et la cible tout en permettant le déploiement complet du patron de pulvérisation des buses. Les études ont démontré qu'augmenter la hauteur de pulvérisation de 0,5 m à 2 m au-dessus d'une surface gazonnée augmente la dérive par un facteur de 2 (Göhlich 1983). Cependant, cette mesure n'est pas absolue; elle est relative aux composantes de l'appareil. Le rabattement de l'air au sol par le rotor de l'hélicoptère emprunte une courbe hyperbolique : l'air descend verticalement vers la surface sous le rotor et tourne pour devenir parallèle au sol, dirigé vers l'extérieur, à une distance égale au rayon du rotor (Teske et Thistle 1999) (Annexe 1). Par exemple, pour un rotor de 5,6 m de diamètre, la hauteur de « transition »

serait de 2,8 m. En fonction des paramètres de l'appareil et de la rampe utilisée, une hauteur d'application au-dessus de la culture correspondant à la hauteur de transition serait à éviter : la hauteur de pulvérisation devrait être en deçà de la hauteur de transition, soit la moitié de la largeur du rotor. La majorité des applications aériennes au-dessus d'une culture basse se font entre 1,5 et 3 m au-dessus du couvert végétal (Hewitt et al. 2002).

3.2.1.7 Vitesse d'avancement

La vitesse d'avancement de l'hélicoptère a aussi un impact sur la taille des gouttelettes et la qualité de la pulvérisation. En augmentant la vitesse d'avancement, on diminue la taille des gouttelettes, pour une même buse à la même pression d'utilisation, due au frottement de l'air (Fritz et al. 2010; Hewitt et al. 2009). À de faibles vitesses (moins de 65 km/h), le mouvement d'air vers le bas et l'arrière (dans le sillage du rotor) peut servir à disperser la pulvérisation dans la canopée (Fritz et al. 2010). À des vitesses de plus de 155 km/h, le profil de dispersion dans le sillage de l'hélicoptère s'apparente à celui de l'avion (Anon 2000). Fritz et al. (2010) mentionne une réduction de 30% de la taille des gouttes pour une augmentation de la vitesse de 40% (162 à 227 km/h). La vitesse moyenne d'opération pour un hélicoptère varie entre 40 et 120 km/h (Hewitt et al. 2002).

3.3 Préoccupation des utilisateurs

Un sondage visant à évaluer l'attitude et la sensibilisation des opérateurs de pulvérisateur (applicateurs), des commerçants et des producteurs face aux impacts possibles de la pulvérisation de pesticides sur l'environnement et la santé humaine a été effectué par l'Université Purdue en Indiana (E.U.) avec environ 1000 répondants (Reimer et Prokopy 2012). Le sondage ciblait 3 types d'opération : les applications industrielles (contre les mauvaises herbes), les applications agricoles (terrestre) et les applications aériennes (principalement pour l'agriculture). De façon générale, les opérateurs ont démontré une attitude positive face à l'environnement, mais très peu de préoccupations à l'égard de la dérive des pesticides dans l'environnement. Les « applicateurs aériens » démontrent le moins de préoccupations pour le surdosage de pesticides en milieu agricole, la dérive des pesticides et la pollution en général. Cependant, ils sont souvent hautement spécialisés et axés sur la technologie. Malgré leur attitude peu volontaire, ils intègrent de bonnes pratiques et de nouveaux équipements favorisant la réduction de la dérive – par exemple : buses antidérive, capteurs de précision, utilisation de logiciels de mesure des zones tampons, etc. L'adoption de mesures pour réduire la dérive est moins élevée par les opérateurs d'applications commerciales et ce sont les producteurs qui démontrent la plus grande volonté à améliorer les méthodes d'applications par un souci de bon voisinage et de bonne gestion d'entreprise.

4 Littérature scientifique

4.1 La dérive

La dérive des pesticides est le transport par voie aérienne de gouttelettes ou de vapeurs de pesticides hors de la zone ciblée par le traitement. Plus les particules sont fines, plus la distance parcourue est grande avant leur dépôt (Piché 2008). L'entrée de pesticide agricole dans l'atmosphère dépend en partie de la méthode d'application, de la taille des gouttelettes au moment de la pulvérisation, des conditions météorologiques, de la formulation du pesticide – pouvant influencer les caractéristiques physiques du liquide comme la viscosité et la tension de surface – et parfois, de la zone pulvérisée – p. ex. zone escarpée à risque ou arbres avant le développement foliaire (Göhlich 1983). Donc, la méthode d'application influence la distance que doit parcourir la gouttelette entre la buse et la cible; plus la distance est grande, plus les risques de dérive sont élevés.

La dérive des pesticides peut-être évaluée par :

- 1) *le dépôt au sol* – la proportion du pesticide pulvérisé qui se dépose au sol sous la zone de pulvérisation et sous le vent, sur une plus ou moins longue distance de la zone pulvérisée;
- 2) *la dérive aérienne* – la proportion du pesticide pulvérisé qui est mesurée dans l'air hors de la zone pulvérisée, sous le vent. Cette mesure se prend à une certaine distance de la bande de pulvérisation.

Certaines études vont combiner les deux approches. On obtient alors le total des pertes hors cible, au sol et aérienne, qu'on appelle « bilan total » ou « bilan de masse ». Ce bilan permet de quantifier le pourcentage de perte totale lors d'une application. Il procure une valeur quantifiable et plus objective.

La dérive produite par une application aérienne, par avion ou par hélicoptère, a été mesurée à plusieurs reprises dans différentes études ayant des objectifs très variés, par différentes méthodes lors de pulvérisations dans différentes cultures ou par simulation sur banc d'essai en laboratoire. Les paramètres opérationnels sont aussi très variables et peuvent avoir un énorme impact sur la qualité de la pulvérisation et des résultats obtenus. Les comparaisons sont donc difficiles et parfois non pertinentes.

En résumé et à ne pas oublier : les valeurs de dérive mesurée et probable ainsi que l'efficacité des applications varient grandement entre chaque étude. Les paramètres opérationnels et météorologiques, les caractéristiques de la culture et la géographie du terrain, surtout pour les applications par voie aérienne, ont un impact important sur ces valeurs. C'est pourquoi les opinions divergent sur la qualité et l'efficacité de certaines méthodes de pulvérisation. Chaque étude apporte un aspect important à considérer lors des applications et il est difficile d'en arriver à une seule conclusion, positive ou négative. Les études seront présentées objectivement et devront être considérées relativement aux conditions spécifiques pour lesquelles elles ont été conçues ou selon lesquelles elles ont eu lieu. Ceci met en évidence qu'il est essentiel d'évaluer les

méthodes de pulvérisation en fonction de la situation spécifique d'un environnement, d'une culture, d'un produit ou d'une réglementation.

4.2 Les modèles de mesure des risques de dérive

Plusieurs modèles existent pour prédire les risques de dérive lors des applications de pesticides. Les modèles prennent en considération les conditions atmosphériques ainsi que les paramètres opérationnels des appareils et, dans certains cas, le type de culture. Les modèles ont leurs limites et l'utilisateur doit en être conscient. Plusieurs modèles sont développés en se basant sur des conditions atmosphériques constantes ainsi que pour des terrains plats et sans barrière végétative à proximité (brise-vent). Il faut parfois faire des extrapolations pour adapter les conditions opérationnelles et de terrain, au modèle utilisé. Par exemple, les buses identifiées dans un modèle ne représentent pas « toutes » les buses offertes sur le marché. L'utilisateur peut avoir des composantes comparables à ce qui est présenté dans le modèle et doit être en mesure de faire l'équivalence. Les modèles disponibles pour les applications par voie aérienne regroupent peu de données scientifiques « terrain » comparativement aux modèles pour les applications terrestres, impliquant une estimation théorique de la dérive moins fiable.

Le modèle AgDISP (Agricultural Dispersal) permet de prédire le mouvement des gouttelettes pulvérisées lors d'une application par voie aérienne, précisant avion ou hélicoptère. Ce modèle théorique a été développé et financé par le USDA Forest Service, principalement pour les applications en foresterie (Bilanin et al. 1981), et il a ensuite été validé par des expériences terrain (Bilanin et al. 1989). Dans ce modèle, pour une application par hélicoptère, on prend en considération l'effet combiné des vortex de bouts d'hélices ainsi que le rabattement de l'air par le rotor selon la courbe hyperbolique, les deux principales sources de turbulence dans l'écoulement d'air (voir Annexe 1). Depuis 2003, une version améliorée du modèle AgDISP est disponible, incluant dans ses calculs des valeurs de stabilité/turbulence atmosphérique, des caractéristiques de terrain, de canopée, de brise-vent et des matières actives (Teske et al. 2003).

Suite au développement de la base de données Spray Drift Task Force (SDTF) pour les applications aériennes, de son utilisation pour estimer les mouvements de gouttelettes lors d'applications aériennes et évaluer les risques de contamination, on établit que les variables dominantes affectant la dérive sont la grosseur des gouttelettes, la hauteur et largeur de rampe et les paramètres de vent, direction et vitesse (Hewitt et al. 2002). Un nouveau modèle est proposé, AgDRIFT, utilisant la méthode de calcul du modèle AgDISP (2002) tout en y ajoutant plusieurs caractéristiques importantes qui améliorent la vitesse et la justesse des prédictions (Teske et al. 2002). Selon Bird et al. (2002) le modèle AgDISP (2002) permettrait une meilleure estimation de la dérive que le modèle AgDRIFT, à une grande distance de la zone pulvérisée. Le modèle AgDRIFT aurait tendance à sous-estimer la valeur de dépôt au sol à une courte distance (moins de 50 m), particulièrement pour les gouttelettes grossières. Il surestimerait le dépôt de fines gouttelettes à une distance de 50 m de la zone pulvérisée, et le dépôt de gouttelettes moyennes et grossières à une distance de plus de 100 m.

D'autres modèles existent et sont utilisés à plus petite échelle. Par exemple, le modèle Driftsim a été testé au Brésil pour prédire les risques de dérive lors d'arrosages par voie aérienne et l'évaluation des largeurs de zones tampons (Rodrigues Da Cunha et De Alvarenga 2008).

4.3 Dérive lors d'applications aériennes

Les résultats d'études sont présentés sans inclure tous les paramètres opérationnels ainsi que les méthodes de mesure. On peut retrouver les informations (lorsque pertinent), en Annexe 2.

Les applications aériennes par avion vont produire plus de dérive que les applications par hélicoptère et ces dernières produiront plus de dérive que la rampe de pulvérisation au sol (Frank et al. 1994). Cette affirmation se retrouve dans la majorité des études portant sur une comparaison entre la rampe au sol et l'application aérienne.

En 1970, on publiait que la dérive lors d'une application par avion peut représenter 1% à 31% de la bouillie pulvérisée en fonction des conditions d'application, comparativement à 0,5% à 8% pour une application par rampe de pulvérisation (De Rossi 2010). De plus, on mentionnait qu'il était possible de retrouver un dépôt important au sol jusqu'à une distance de 910 m de la zone pulvérisée sous des vents de 4,5 m/s (Coutts et Yates 1968). Aux Pays-Bas, les valeurs estimées de dérive utilisées jusqu'en 1996 (avant l'introduction des buses antidérive) pour la réglementation des différentes méthodes d'application étaient : rampe, culture de champ moins de 50 cm – 2%; rampe, culture de champ plus de 50 cm et grandes cultures – 5%; jet porté, arbres fruitiers – 10%; application en serre – 0,1%; application aérienne – 100% (Felsot et al. 2011). La valeur estimée pour l'application aérienne n'est pas changée aujourd'hui considérant l'importance des cours d'eau aux Pays-Bas. Antuniassi et al. (2014) après une étude exhaustive, a conclu à un bilan de masse de 19,5% de dérive (gouttelettes moyennes) pour les applications par avion au-dessus d'une culture de 2 m de hauteur (canne à sucre) et sur une distance allant jusqu'à 2000 m de la bande pulvérisée avec 3,2% à 3,9% (de ce 19,5%), mesurée à 2000 m. Une étude similaire présentait des valeurs de 9,4% à 40,9%, pulvérisation moyenne et fine respectivement (Caldwell 2006).

4.3.1 Études comparatives – dépôt au sol

En France, une étude comparative d'applications par avion, hélicoptère et pulvérisations terrestres (rampe et pulvérisateur à jet porté) a été effectuée pour établir des recommandations d'application dans les conditions de culture française (Polvêche et Liet 2009). Les essais se sont déroulés en plantations de bananes, vignes, maïs et cultures basses. Les mesures de dérive se prenaient par le dépôt au sol sur une distance allant jusqu'à 70 m de la zone pulvérisée. Pour les arrosages par hélicoptère, l'étude regroupe 7 sites d'essais dans toutes les cultures pour près de 8800 analyses. Les arrosages par avion ont été faits sur 2 sites, dans la banane et la culture basse, pour près de 6600 analyses. Pour chaque pulvérisation, on variait, en fonction des cultures, le moment d'application (à différents stades végétatifs) et les paramètres opérationnels : type de buses, nombre de buses et orientation, largeur de rampe, hauteur de vol. Les résultats obtenus ont permis d'établir que, pour une application par hélicoptère, en réduisant la largeur de rampe à 60% de la largeur du rotor, en volant à une hauteur maximale de

2 m au-dessus de la culture et en utilisant des buses à induction d'air, il est possible de réduire la dérive à des valeurs comparables obtenues par des applications terrestres. Cependant, le contraire est observé pour une hauteur de vol au-dessus de la végétation de 3 m et plus. L'utilisation seule de la buse antidérive réduit de 2 à 3 fois la dérive produite comparativement à la buse à turbulence standard. Dans les essais en vigne, l'application par hélicoptère utilisant la buse antidérive produit une dérive comparable à l'application terrestre au stade végétatif avancé, mais produit 3 fois plus de dérive au stade végétatif précoce, considérant la faible densité de feuillage pour intercepter la pulvérisation. Pour les essais en arboriculture, on observe des quantités de dérive comparables pour les applications par hélicoptère et terrestres près de la zone pulvérisée tout en obtenant des niveaux supérieurs pour les distances supérieures à 20 m pour l'application par hélicoptère. Les résultats obtenus sur les cultures basses n'ont pas été favorables aux applications aériennes. Pour les applications par avion, la vitesse de vol élevée ainsi que la hauteur de survol nécessaire ont engendré des mouvements d'air importants et une dérive plus élevée dans toutes les situations.

4.3.2 Études comparatives – calculs de bilan de masse

Une étude d'évaluation de la dérive pour les applications dans un vignoble en terrain escarpé a été faite en Allemagne pour évaluer le bilan de dérive produit par 1) un pulvérisateur à jet porté, 2) un pulvérisateur à lance (type canon), 3) une pulvérisation aérienne par hélicoptère (Göhlich 1983). Considérant la topographie du terrain, la distance entre les buses et la cible était très grande pour le pulvérisateur à jet porté. Les gouttelettes transportées par le jet d'air, restaient en suspension pour une longue période et, devenaient plus fines dues à l'évaporation. À une distance de 50 m de la zone pulvérisée, l'utilisation de l'hélicoptère a permis un bilan de dérive de 6,5% sous des vents de 2,4 m/s et de 10,5% sous des vents de 4,8 m/s. Le pulvérisateur à jet porté a produit plus de dérive que l'hélicoptère sous des vents de 4 à 5 m/s, mais pour des vents de 1 à 2 m/s, l'inverse a été observé. À une distance de 150 m, la majorité de la dérive a été produite par le pulvérisateur à lance.

En Ontario, une étude comparative de la dérive produite entre les applications fongicides et insecticides par avion, hélicoptère et rampe de pulvérisation à haute et basse pression, a été effectuée (Frank et al. 1994). Des essais ont été faits sur 26 sites différents sur une période de 3 ans. Les résultats démontrent la présence de pesticides à une distance de 84 m de la bande pulvérisée pour les applications par hélicoptère dans la culture du maïs sucré avec le plus gros dépôt observé à 21 m. Pour l'application par avion dans la pomme de terre, la présence de pesticides a été observée jusqu'à 18 m de la bande pulvérisée et la quantité mesurée était 10 fois plus importante que pour l'application par hélicoptère. Dans le cas des applications terrestres, la présence de pesticides a été observée à des distances maximales de a) 38 m dans la tomate (pulvérisateur à jet porté), avec des quantités comparables à l'application par avion; b) 46 m dans un verger de pommes (pulvérisateur à jet porté), avec des quantités très variables suggérant un mauvais fonctionnement de l'appareil; c) 8 à 61 m dans la tomate (rampe haute pression); d) 15 m dans une végétation non spécifiée (rampe basse pression). Les résultats combinent les applications pour 3 hélicoptères de marque différente, ayant des composantes

très différentes. Dans la conclusion, on attribue la variance aux propriétés physiques des produits chimiques. Cependant, le ratio rampe/rotor varie de 135% à 72%. Cet aspect n'est pas considéré dans la discussion et est pourtant un facteur très important dans la qualité de la pulvérisation par hélicoptère. Toutes études devraient prendre en considération les paramètres de l'appareil.

En Nouvelle-Zélande, plusieurs applications d'herbicides sont faites en forêt. Une étude d'évaluation des risques de dérive (bilan total) lors d'applications a été faite (Richardson et al. 1996). L'objectif était de choisir les paramètres permettant le moins de dérive entre une buse D8 (dirigée vers l'arrière, VMD 1246 μm), une buse moussante (dirigée vers l'arrière, VMD 591 μm) et une buse D8-45 (dirigée vers le bas, VMD 314 μm). Le pourcentage de gouttelettes de moins de 150 μm pour chaque buse a été évalué à 0,8%, 5,1% et 14,1%, respectivement. Les mesures de dépôt au sol ont été prises à partir de 50 m en amont et jusqu'à une distance de 300 m de la bande pulvérisée sous le vent. La dérive aérienne a été mesurée jusqu'à 225 m sous le vent, à une hauteur de 1,5 m. Les résultats démontrent que la dérive aérienne est moindre en utilisant la buse D8 < buse moussante < D8-45, ce qui correspond à la taille des gouttelettes et le pourcentage de fines gouttes. Le dépôt au sol est plus élevé à proximité de la ligne de pulvérisation en utilisant D8 > buse moussante > D8-45, mais il n'est pas différent à une distance de 300 m. Les résultats de cette étude présentent des valeurs de dérive plus élevées qu'observées dans d'autres études. Les forts vents et la hauteur de pulvérisation peuvent être en cause, mais représentaient une situation idéale pour un test de comparaison de la dérive. Aussi, l'efficacité à réduire la dérive de la buse D8, produisant des gouttelettes de plus de 1000 μm , doit être considérée d'un point de vue pratique : l'efficacité biologique ainsi que la qualité de la distribution des gouttes n'ont pas été évaluées. Cependant, ces aspects pourraient être améliorés par l'utilisation d'additifs appropriés.

4.3.3 Impact de la formulation de la bouillie et des paramètres sur les gouttes et la dérive

Certains paramètres tels que le type de buse, la formulation du pesticide et la vitesse d'avancement, vont avoir une influence sur la taille des gouttes et incidemment, sur la quantité de dérive produite.

L'effet de l'ajout d'additifs dans la formulation de pesticides sur la dérive produite a été testé en laboratoire dans un système de soufflerie. Différentes formulations de glyphosate ont été évaluées pour établir le potentiel de dérive (Hewitt et al. 2009). La pulvérisation a été faite pour la buse AccuFlow™ (AF) (buse à réduction de dérive) sous des vitesses d'avancement simulées entre 253 et 333 km/h (comparables aux applications par avion), et modélisée selon le modèle AgDISP. Les résultats ont démontré qu'en augmentant la vitesse de 253 à 333 km/h pour une bouillie (eau+glyphosate+surfactant) contenant 0%, 5% et 44% de glyphosate, les gouttes passaient de 253 à 217 μm pour le 0%, de 194 à 139 μm pour le 5%, et de 219 à 128 μm pour le 44%. Selon le modèle AgDISP, la largeur de zone tampon appropriée serait de 50 à 120 m pour un scénario d'application de glyphosate aux différentes vitesses d'application.

Deux configurations de buses (à 377 µm), 4 formulations (avec ajout de surfactant), 2 taux d'application (18,7 et 46,8 L/ha) et 9 vitesses (entre 162 et 227 km/h) ont été évalués (108 essais) (Fritz et al. 2010). Les essais visaient à mesurer le dépôt à une distance de 30 m de la zone pulvérisée. Les résultats ont démontré qu'en augmentant la vitesse de 162 à 227 km/h, le diamètre des gouttes diminue de 30% à 50% et, selon le modèle AgDISP, augmente le dépôt au sol à 30 m de la zone pulvérisée. Le modèle AgDISP démontre aussi qu'en faisant des passes à moindre vitesse le long de la bordure du champ pulvérisé par hélicoptère (largeur de 2 à 3 passes), il est possible de réduire les risques de dérive totale de 6% à 10%.

4.3.4 Les zones tampons

Les applications d'herbicide par voie aérienne représentent un risque pour les cultures avoisinantes aux surfaces pulvérisées. Au Canada, certains herbicides sont interdits d'application par voie aérienne sur certaines cultures, comme certaines formulations de glyphosate dans le maïs, le soya et le canola (consultation <http://www.sagepesticides.gc.ca> pour les étiquettes de produits homologués). Au Royaume-Uni, l'application par hélicoptère est couramment utilisée pour le contrôle des fougères. Depuis plusieurs années, des études ont évalué les largeurs de zone tampon nécessaires à la protection des zones sensibles. Des mesures de dérive ont été prises pour évaluer les largeurs de zones tampons nécessaires à inscrire dans la réglementation pour les applications par hélicoptère. Marrs et al. (1992) ont mesuré la dérive – dépôt sur des cartons hydrosensibles – jusqu'à une distance de 240 m de la bande pulvérisée et ont évalué les dommages d'herbicide sur des plantes sensibles. Ils ont obtenu des résultats démontrant un dépôt de 10% à 33 m et 0,2% à 240 m de la bande pulvérisée. Le pourcentage de feuilles endommagées était de 10% à 131 m et le niveau considéré « sans dommage » était observé à 161 m, avec 5% des feuilles affectées. Trois expériences supplémentaires ont été entreprises sur 3 années consécutives (Marrs et Frost 1996). Les mesures de dérive étaient prises en amont et en aval du vent dominant, perpendiculaire à la bande pulvérisée. Les résultats ont démontré la présence d'herbicide en amont du vent et un surdosage dans les bouts de parcelle (sens de passage de l'hélicoptère) signifiant un manque d'efficacité de l'opérateur à engager et désengager la pulvérisation. Le niveau « sans dommage » a été observé à la distance de 180 m. Les cartons hydrosensibles restent une méthode rudimentaire permettant une évaluation brute et non quantitative du dépôt de gouttelettes, surtout à si grande distance de la source, et ne devraient pas servir à établir des largeurs de bande tampon.

Robinson et al. (2000) (Royaume-Uni) ont évalué les largeurs de zone tampon pour les applications par hélicoptère en mesurant le bilan total de dérive hors de la zone traitée. Les essais ont été faits sur 2 sites au-dessus d'une végétation variant de 50 à 100 cm de hauteur et une hauteur d'application de 2 à 3 m au-dessus de la végétation. Le dépôt au sol et la dérive aérienne étaient mesurés jusqu'à une distance de 200 m de la bande pulvérisée. Selon les résultats obtenus 1) les applications par hélicoptère ne sont pas aussi précises que les applications par pulvérisateur à rampe, 2) à une distance de 30 m de la zone pulvérisée, le bilan de dérive pour l'application par hélicoptère passe à moins de 1% (valeur maximale permise) en utilisant des buses à faible dérive. Malgré ces résultats, le Scottish Environmental Protection

Agency a décidé d'adopter une largeur de zone tampon de 50 m pour les applications par hélicoptère pour s'assurer de couvrir les arrosages pouvant être faits dans des conditions venteuses (les pires situations). La largeur requise pour les applications par rampe au sol est de 6 à 10 m et de 200 à 750 m pour les applications par avion, l'avion produisant 10 fois plus de dérive que l'hélicoptère (Payne 1992).

Au Nouveau-Brunswick (Canada), des applications d'herbicides par hélicoptère sont faites en bordure de forêt pour le contrôle de certaines espèces de plantes envahissantes. La largeur des zones tampons établie (65 m) pour les applications aériennes est basée sur des arrosages insecticides par avion qui ne se comparent pas directement aux arrosages herbicides en forêt. Une étude a été faite pour déterminer le dépôt au sol lors d'une application herbicide par hélicoptère sur une distance allant de 10 m en amont et jusqu'à 200 m sous le vent, de la zone pulvérisée (Riley et al. 1991). Les arrosages ont été faits de 15 à 20 m au-dessus d'une végétation de moins de 2 m de hauteur et à une vitesse de 130 km/h. Les mesures étaient qualitatives (taille des gouttes) et quantitatives (chromatographie). Les résultats ont démontré une diminution du diamètre des gouttelettes déposées au sol avec l'augmentation de la distance par rapport à la cible. La taille des gouttes observée à 100, 150 et 200 m sous le vent était de 280, 180 et 150 μm , respectivement. Le pourcentage de dépôt au sol (% du taux d'application) était de 10% à une distance de 30 m et de moins de 5% à une distance de 200 m. Le ratio rampe/rotor étant de 132%. Selon cette considération, les gouttelettes ont probablement été entraînées par le vortex du rotor, expliquant 1) le dépôt de gouttes relativement grosses à une distance de 100 m de la bande pulvérisée et 2) un pourcentage de dérive aussi élevé. De plus, le dépôt au sol dans la zone de pulvérisation n'a pas été uniforme, probablement attribuable à une vitesse d'avancement trop élevée. Les valeurs de dérive mesurées étant plus élevées que les valeurs acceptées par la réglementation à une distance de 65 m (maximum de 5,6%), aucun changement n'a été apporté.

4.4 Dépôt et couverture de feuillage – efficacité des pulvérisations

L'efficacité phytosanitaire est l'objectif premier de toutes pulvérisations. La méthode d'application doit être bien adaptée à la culture et aux conditions environnementales pour permettre la réalisation d'un arrosage efficace et à risque agroenvironnemental limité. Les applications aériennes sont souvent un recours pour des applications qu'on veut rapides et qui doivent être faites dans des conditions climatiques difficiles (pluie ou terrain détrempe) ou pour les terrains difficiles, accidentés ou escarpés. Plusieurs facteurs influencent l'efficacité d'une pulvérisation aérienne et sont d'autant plus complexes qu'ils interagissent entre eux. Les recherches pour améliorer ou évaluer l'efficacité des applications aériennes remontent à plus de 45 ans.

L'efficacité d'une pulvérisation est donc la combinaison entre l'optimisation de la couverture du feuillage et une faible dérive. Très peu d'études combinent la quantification de la dérive et le taux de récupération sur le feuillage. Cette combinaison devrait permettre une évaluation globale de la distribution du taux d'application en déterminant le pourcentage perdu dans

l'environnement comparativement au pourcentage récupéré sur le feuillage ou sur la cible. Une étude française (Cotteux et Douzals 2012) a évalué les deux aspects permettant d'établir que lors d'une application aérienne, en fonction de la bouillie utilisée, il est possible d'avoir de fortes pertes au sol, possiblement dû à l'utilisation d'une pulvérisation très grossière, même avec de faibles valeurs de dérive mesurée hors de la zone pulvérisée. En conclusion, l'utilisation seule du pourcentage de dérive n'est pas suffisante pour évaluer les risques agroenvironnementaux.

4.4.1 En verger

Yates et al. (1974) a présenté une étude évaluant la possibilité d'utiliser l'hélicoptère pour l'application de fongicides dans un verger de pêches. L'efficacité entre le pulvérisateur à jet porté conventionnel et la pulvérisation par hélicoptère a été comparée pour différentes configurations. On a mesuré le mouvement d'air vertical créé par une application par hélicoptère à 26 et 72 km/h ainsi que deux hauteurs d'application par rapport à la culture, 6 et 9 m. Les résultats ont démontré un mouvement d'air plus grand pour la faible vitesse et la faible hauteur (6 m). À un taux d'application de 200 L/ha, pour les deux méthodes d'application, le pulvérisateur à jet porté a permis un dépôt sur le feuillage supérieur à la pulvérisation par hélicoptère.

Une étude en verger d'amandiers a été effectuée en Californie au cours de deux saisons pour évaluer la qualité de la distribution de la pulvérisation aérienne (hélicoptère et avion) à 3 stades phénologiques différents (MacNichol et al. 1997). Il n'y a aucune information concernant le ratio rampe/rotor ainsi que la vitesse et la hauteur de pulvérisation par rapport à la culture. Les résultats obtenus concluent que 1) l'hélicoptère procure une meilleure couverture (36% plus élevée) à travers la canopée plein feuillage que l'avion; 2) la différence entre l'application par hélicoptère et par avion n'est pas significative pour les applications aux stades bourgeons et boutons floraux malgré des valeurs plus élevées de couverture pour l'hélicoptère; 3) la distribution sur la hauteur de l'arbre est plus uniforme pour l'application par hélicoptère, peu importe le stade de développement, et est plus élevée dans le haut que dans le bas de l'arbre pour l'application par avion; 4) l'application de grosses gouttes combinée au mouvement d'air vertical créé par l'hélicoptère semble faciliter la pénétration des gouttes jusqu'au bas de l'arbre.

Aucune directive n'existe pour les applications aériennes dans les vergers d'avocatiers. Ces arbres au feuillage très dense font 12 m de hauteur. Les applications terrestres requièrent de grandes quantités d'eau pour bien couvrir la canopée. Les applications par voie aérienne deviennent populaires considérant les ravageurs présents dans cette culture et le nombre d'interventions nécessaires. Une étude a évalué la qualité de la distribution de la pulvérisation par hélicoptère dans un verger d'avocatiers en Nouvelle-Zélande (Gaskin et al. 2011). Le dépôt sur le feuillage ainsi que sur les fruits a été mesuré pour différentes solutions diluées à 600 L/ha ou concentrées à 200 et 300 L/ha avec l'ajout d'un adjuvant. Les résultats ont démontré que les différentes solutions appliquées par hélicoptère vont couvrir le haut et le pourtour des arbres de façon acceptable. Cependant, le centre de l'arbre ainsi que le pourtour du centre et bas de l'arbre ne sont pas aussi bien couverts. Cette culture nécessiterait une application au sol supplémentaire pour assurer une couverture complète des arbres.

4.4.2 En vignoble

Les applications en vignoble sur les coteaux escarpés en Suisse sont un défi pour bien des producteurs (voir exemple de vignoble en Annexe 3). Les applications traditionnelles au sol sont laborieuses et les nombreux obstacles naturels rendent l'engagement d'hélicoptère difficile. Malgré tout, en 2003, 17% des surfaces cultivées en vigne sont traitées par hélicoptère avec 4 à 6 traitements fongicides nécessaires sur une saison (Viret et al. 2003). L'utilisation de l'hélicoptère est critiquée considérant les risques de dérive élevés, l'impact négatif sur l'environnement et l'efficacité médiocre des différents traitements.

Une étude a été faite pour déterminer l'efficacité biologique de l'arrosage par hélicoptère (Antonin et Schmid 1983) basé sur 1) la répartition du produit sur les feuilles et les grappes; 2) l'efficacité contre les maladies et ravageurs (fongicides, insecticides et acaricides), au cours de deux saisons de traitements complets en comparaison avec une application traditionnelle au sol. Les résultats ont démontré que 1) contre le mildiou – les traitements par hélicoptère ont permis un contrôle satisfaisant (très faible pression au cours des deux saisons); 2) contre l'oïdium – les traitements par hélicoptère n'ont pas été efficaces et trois traitements supplémentaires au sol ont été nécessaires pour sauver la récolte; 3) contre le Botrytis – la présence était trop faible pour évaluer l'efficacité biologique, mais la répartition de la bouillie sur les grappes pour l'application par hélicoptère démontre une trop faible quantité de produit pour obtenir une bonne protection en cas d'infection; 4) contre le vers de la grappe – pour la première génération, l'efficacité du traitement par hélicoptère a permis un contrôle entre 55% et 85%, ce qui est un peu inférieur au traitement conventionnel et pour la 2^e génération, considérant la virulence des vers de la grappe, les essais par hélicoptère ne sont pas utilisés; 5) contre les acariens – plusieurs interventions par hélicoptère ont été nécessaires pour maintenir l'infestation à un niveau acceptable alors que seulement une à deux interventions sont nécessaires au sol.

Une étude a été faite pour déterminer la qualité de la distribution de la pulvérisation dans le feuillage de vigne pour différents pulvérisateurs : à jet porté, hélicoptère, enjambeur, tour, tunnel et à main (Viret et al. 2003). Les essais se sont déroulés dans deux vignobles, en terrain plat et en terrain escarpé. Les résultats ont démontré qu'on obtient 1) le plus bas bilan total de dérive (pertes au sol et dérive aérienne) avec les pulvérisateurs tunnel, début saison et plein feuillage; 2) le plus haut bilan total de dérive, début saison et plein feuillage, avec le pulvérisateur à jet porté et l'hélicoptère; 3) un plus haut dépôt sur les feuilles en début de saison pour les applications avec le pulvérisateur : à main (17%) et tunnel (16%) > tour (8%) et enjambeur (7%) > à jet porté et hélicoptère (1% – 3%); 4) la meilleure distribution de la bouillie sur l'ensemble du feuillage par le pulvérisateur tunnel; 5) un contrôle du mildiou acceptable pour tous les pulvérisateurs, à l'exception du pulvérisateur à jet porté et de l'hélicoptère, considérant la nécessité d'obtenir une couverture uniforme sur les deux côtés de la feuille.

Considérant les différents résultats de recherche (Antonin et Schmid 1983; Gaskin et al. 2011) il semble que les arrosages par hélicoptère demeurent un complément aux arrosages traditionnels lorsque des situations exceptionnelles se présentent – p. ex. affection fongique qui

nécessite une intervention immédiate, mais un terrain détrempe – et qu’une intervention aérienne pourrait aider à sauver la récolte ou lorsqu’une intervention aérienne ne gêne en rien l’environnement immédiat et procure une aide rapide et immédiate au producteur.

4.4.3 Applications en milieu non agricole

Les applications pesticides sont parfois nécessaires pour des situations de nuisance à la santé humaine, comme pour les pathogènes pouvant être transmis par les moustiques ou pour le contrôle d’espèces végétales envahissantes. Cependant, certains de ces arrosages sont faits dans des endroits où les risques environnementaux sont très élevés, et requièrent des données élaborées sur l’efficacité de la méthode de pulvérisation et du produit utilisé.

Une étude a été faite en Grèce pour déterminer l’efficacité de la pulvérisation par hélicoptère utilisant différentes formulations de produits, sur le contrôle des moustiques (Chaskopoulou et al. 2011). L’hélicoptère était muni d’un système de positionnement global (GPS) et d’un enregistreur de données météorologiques en temps réel. Le modèle de dispersion de la pulvérisation AgDISP a aussi été utilisé pour traiter avec précision les parcelles expérimentales en ajustant la ligne de pulvérisation en fonction des conditions météorologiques. Les applications contre les moustiques se font au coucher du soleil à une altitude de 61 m et à une vitesse de 145 km/h. L’efficacité a été mesurée par le contrôle des moustiques placés dans des cages suspendues à 1,2 m du sol sous la zone pulvérisée. Les résultats n’ont démontré aucune différence d’efficacité entre les 2 formulations de pesticides (2% ou 5% de formulation aqueuse). L’utilisation du modèle AgDISP, en combinaison avec un système GPS, a permis dans la majorité des cas, d’obtenir un traitement uniforme et précis sur le contrôle (haut taux de mortalité) des moustiques.

Certaines espèces envahissantes en Nouvelle-Zélande, comme les conifères *Pinus contorta*, *mugo*, *sylvestris* et certaines graminées menacent les écosystèmes et la biodiversité. Beaucoup d’efforts sont déployés pour en contrôler la propagation tout en protégeant les espèces indigènes. Les applications par hélicoptère sont privilégiées dans les régions de grandes étendues, de terrain accidenté et pour la précision des applications. Cependant, les arrosages n’ont pas permis de contrôler l’infestation et différentes études visent à revoir les méthodes d’application, le taux d’application lors des arrosages ainsi que le type d’herbicide utilisé. Pour les conifères envahissants, l’efficacité des traitements herbicides est mesurée par le taux de dommage au feuillage ainsi que le taux de mortalité après 12 à 24 mois de l’arrosage. Ce dernier doit être de plus de 85% pour être considéré efficace. Aucune étude n’a remis en question l’utilisation de l’hélicoptère pour le traitement des espèces envahissantes. Gous et al. (2012) a évalué l’efficacité de quatre différentes formulations d’herbicide (combinaisons de différentes matières actives) appliquées par rampe sous un hélicoptère, à un taux de 400 L/ha et avec des gouttelettes de 400 µm. Les résultats ont démontré un contrôle significativement plus élevé pour les traitements contenant une matière active systémique, avec un taux de mortalité de 85,2% et 86,6% et un taux de dommage au feuillage de 98,5% et 98,6%. Gous et al. (2014) a évalué l’efficacité d’un herbicide de contact à 300 L/ha et un herbicide systémique à 150 L/ha, gouttelettes de 720 µm, sur le contrôle des espèces envahissantes *Pinus contorta* et *Pinus*

mugo. Les résultats ont démontré une meilleure efficacité par l'herbicide systémique comparativement à l'herbicide de contact, mais aucun traitement n'a permis un contrôle acceptable de la cible. L'auteur conclut à une mauvaise couverture de feuillage résultant du faible taux d'application et des larges gouttelettes. Gous et al. (2015) a évalué l'application localisée avec une lance manuelle (à partir de l'hélicoptère) de différentes formulations d'herbicide. Les traitements consistaient à arroser 1 L de bouillie en un jet direct, 4 m au-dessus de la couronne de l'arbre, le rabattement créé par le vortex de l'hélicoptère forçant le liquide à l'intérieur de la canopée. Les arbres traités variaient en taille de 0,5 à 16 m de hauteur. Les résultats ont démontré une efficacité relative à la taille de l'arbre et à l'espèce, certaines espèces étant plus résistantes. De façon générale, il y a une baisse significative de l'efficacité du traitement avec l'augmentation de la taille de l'arbre pour toutes les espèces. La hauteur maximale de l'arbre pour obtenir le taux de mortalité efficace de 85% est de 7,4 à 10 m en fonction de l'espèce. Comparativement à d'autres études, les taux d'application utilisés pour des arrosages par hélicoptère sont élevés, et, la grosseur des gouttelettes importantes. Cependant, les alternatives ne semblent pas nombreuses. Par les résultats présentés, une intervention hâtive semble impérative pour éviter les infestations problématiques, peu importe la méthode et le produit utilisés.

Dans le désert de l'Arizona (Etats-Unis), on retrouve une graminée envahissante, *Cenchrus ciliaris*, qui a des conséquences écologiques catastrophiques. L'intervention dans un climat aussi chaud, sec et instable que le désert est un grand défi, en plus de la topographie de terrain accidenté et de la nécessité de bien cibler l'arrosage. Un projet pilote de pulvérisation de glyphosate par hélicoptère a été fait en pulvérisant des gouttelettes très grossières, de 600 à 800 µm de diamètre, et à un taux d'application de 94 L/ha, pour évaluer la faisabilité d'arrêter la propagation du *Cenchrus ciliaris* (Thistle et al. 2014). Les arrosages ont été faits à la distance minimale possible au-dessus du sol (15 m) considérant les obstacles à éviter et à une vitesse variant entre 72 et 108 km/h. Les résultats démontrent que 1) l'utilisation d'une pulvérisation très grossière tôt le matin réduit l'effet des conditions instables; 2) aucune dérive n'a été observée à plus de 25 m de la zone pulvérisée; 3) le dépôt et la couverture semblent raisonnables; 4) la propagation de la plante envahissante peut être ralentie. On observe également des dommages aux plantes non ciblées.

4.5 Technologies et agriculture de précision

En Alberta (Canada), des applications herbicides ont été utilisées à des fins d'aménagement forestier entre 1995 et 2009 (Mihajlovich et al. 2012). Le processus d'intervention a nécessité l'élaboration d'un plan d'évaluation des risques et de mesures d'atténuation. En résumé, les mesures les plus efficaces ont été d'utiliser le modèle AgDRIFT de SprayAdvisor qui permet de réduire les risques de dérive lors des arrosages en considérant les conditions météorologiques, la largeur des zones tampons, le type d'appareil utilisé (avion, hélicoptère, ratio des dimensions) et les buses de pulvérisation. L'hélicoptère muni d'équipements de pointe (GPS, moniteur météo, buse antidérive AccuFlow™) permet aussi de réduire les risques de dérive. La buse

AccuFlow™ permet d'obtenir des gouttelettes d'un spectre uniforme de 500 µm et est la buse standard recommandée pour les applications herbicides en foresterie en Alberta depuis 2002.

5 Méthodes de mesure de la dérive

La mesure de la dérive regroupe la réalisation de plusieurs activités. Pour faire des essais de dérive des pesticides, il faut tout d'abord déterminer si on veut utiliser des mesures de dépôt au sol, des mesures de contamination aérienne ou un bilan total. Dans tous les cas, cela requiert de grandes surfaces terrain, un design expérimental exhaustif, un échantillonnage important et des conditions météorologiques favorables. Certains standards existent et on y retrouvera entre autres des spécifications sur les dimensions de la surface pulvérisée, sur le positionnement et le nombre d'échantillons nécessaires, ainsi que des informations sur le pulvérisateur standard à utiliser ainsi que ses paramètres opérationnels. Cette application standard permet de créer une référence avec laquelle les pulvérisations testées peuvent être comparées et éventuellement, pourrait permettre la comparaison entre différentes études basées sur le même standard. Cependant, bien peu d'études utilisent les standards par manque de ressources ou de temps. On fera alors des mesures « comparatives » dans une même étude, en comparant différentes méthodes de pulvérisation ou différents paramètres, en variant la hauteur de pulvérisation par exemple ou en pulvérisant sous différentes conditions météorologiques.

Les protocoles standard de mesure de la dérive recommandent des applications au-dessus de l'herbe courte (végétation courte et uniforme à moins de 10 à 15 cm de hauteur) ce qui représente le pire des cas pour la dérive. Cependant, certaines études se feront au-dessus de la végétation pour inclure au protocole une évaluation du dépôt sur le feuillage et déterminer la répartition du taux d'application dans la végétation et dans l'environnement. Dans d'autres essais, mesurant la toxicité de la dérive, on utilisera en plus des échantillons « vivants » (insectes, plantes, etc.) pour évaluer l'effet de la dérive.

Tous les protocoles portant sur des mesures de la dérive doivent inclure des paramètres météorologiques. La prise de données météo est fondamentale pour obtenir des essais pertinents et valables. On doit minimalement avoir des valeurs de vitesse de vent à une hauteur déterminée au-dessus du sol, de direction du vent et d'humidité relative et ce, pour la durée de l'expérience ou des arrosages. Idéalement, on inclut des données de turbulence atmosphérique qui sont d'autant plus importantes pour les essais par voie aérienne. Si on veut associer des valeurs de dérive à un arrosage, on doit aussi pouvoir y associer des données météorologiques pertinentes.

5.1 Traceur

Pour l'arrosage, on peut choisir de quantifier le pesticide lui-même, différents types de traceurs ou de l'eau. Si on utilise le pesticide, la méthode d'analyse doit permettre des lectures de chromatographie. Cette méthode de mesures est précise, mais coûteuse. De plus, elle implique que les utilisateurs travailleront en contact avec des pesticides. Bien que certaines études considèrent la formulation de la matière active du pesticide ayant un impact sur la distribution

de la bouillie, d'autres concluent que l'additif (adjuvant ou autre) joue le premier rôle sur la distribution. Il est donc possible d'obtenir le même effet dans la bouillie, sans l'utilisation du pesticide lui-même.

L'utilisation d'un traceur fluorescent (p. ex. BSF ou Rhodamine) ou d'un colorant alimentaire p. ex. Tartrazine ou Amarante) requiert l'analyse par fluorescence ou spectrophotométrie, respectivement. Le traceur fluorescent est efficace, requiert une faible concentration du produit par litre de solution (de 0,5% à 2%), mais se dégrade rapidement à la lumière. Il faut donc que la récolte se fasse rapidement au champ pour protéger les échantillons et éviter de fausser les résultats. L'extraction du traceur doit se faire par l'utilisation de différents produits chimiques, habituellement un alcool (méthanol, éthanol, acétone). Au moment de l'extraction, il est difficile d'évaluer si cette dernière est complète puisque certains traceurs ne sont pas visibles à l'œil.

Le colorant alimentaire est habituellement visible à l'œil et est très stable dans le temps. Son extraction est facilement évaluable et le meilleur solvant pour l'extraire est l'eau. Cependant, le colorant alimentaire requiert des doses plus importantes pour permettre des lectures de faibles concentrations et est relativement dispendieux.

Certaines études ont pris des mesures de couverture ou de qualité de distribution de la bouillie sur des cartons hydrosensibles. Cette méthode n'est pas adaptée pour faire ce type de travail (mesures de dérive) et n'apporte pas une valeur scientifique. L'impact d'une fine gouttelette, moins de 50 μm , n'est pas observable sur un carton hydrosensible. De plus, si on travaille en milieu humide, la qualité des impacts sera amoindrie. Cette méthode est utilisée pour évaluer grossièrement la répartition à l'intérieur du couvert végétal pour déterminer la qualité relative de la distribution, mais ne devrait pas être utilisée pour quantifier la dérive produite par une méthode d'application.

5.2 Plan expérimental de mesures de dérive

On doit tout d'abord déterminer le lieu des essais et l'orientation des parcelles. L'orientation des passes d'arrosage doit toujours être perpendiculaire au vent à $\pm 30^\circ$. Les lignes d'échantillonnage ou de collecte de données doivent s'éloigner de la zone pulvérisée, sous le vent. Les dimensions de la surface pulvérisée seront variables en fonction de la méthode de pulvérisation utilisée ainsi que des surfaces disponibles. Le standard sur les mesures de dérive de l'ASAE recommande que la longueur de la surface pulvérisée soit au moins 0,6 fois la longueur de la surface échantillonnée (ASABE 2013). Habituellement, on procèdera à plusieurs passes d'arrosage au-dessus de la zone de pulvérisation, soit en superposition ou en passes latérales, pour s'assurer d'obtenir suffisamment de bouillie sur les échantillonneurs. Le taux d'application sera pris en considération au moment des analyses.

De façon générale, la dérive sera mesurée sous la surface pulvérisée par les mesures de dépôt au sol et sous le vent, jusqu'à des distances variant de 30, 50, 100, 1000 m et même 2000 m de la zone pulvérisée. Dans certaines études, on fera aussi des mesures additionnelles en amont des vents de la zone pulvérisée, sur une courte distance, pour évaluer le mouvement d'air

autour de la bande de pulvérisation. Les mesures sont prises sur au moins trois lignes perpendiculaires à la zone pulvérisée et en plusieurs points (voir Annexe 4). Pour la dérive aérienne, elle sera généralement mesurée en un point à une certaine distance de la zone pulvérisée, entre 30 et 50 m, ou en quelques points à différentes distances sous le vent, mais pas trop près de la zone pulvérisée. Cette mesure sera aussi prise sur au moins trois lignes perpendiculaires à la bande de pulvérisation. La dérive aérienne sera mesurée à une ou plusieurs hauteurs au-dessus du sol, pour une hauteur maximale autour de 10 m.

5.3 Choix des échantillons

Les échantillons utilisés pour capter la dérive sont relatifs au type de dérive mesurée. L'important est de connaître le matériau à la surface de l'échantillon, la superficie exposée à la pulvérisation (p. ex. mm²) et d'avoir déterminé, au préalable, le taux de récupération du traceur. Certains types de matériau associés aux différentes formulations de bouillie ou aux solvants utilisés ne permettront pas 100% de récupération de la matière active présente sur la surface au moment de l'extraction. Ces mesures devront être évaluées et quantifiées avant les essais.

5.3.1 Dépôt au sol

Les pétris munis de filtres sont souvent utilisés. On récupère ensuite le filtre pour l'extraction. Il y a aussi le papier Mylar® (téréphtalate de polyéthylène) qui est utilisé, de différents diamètres. Ce type de surface lisse et non absorbante est facilement lavable, tellement qu'on doit prendre des précautions au moment de la « récolte » pour ne pas perdre du produit séché sur la surface. Il est aussi possible d'utiliser des plaquettes ou des tapis, de surface métallique ou caoutchouteuse, des plaques de gel de silice, des plats de verre, qui tous seront lavables par le bon solvant.

5.3.2 Dérive aérienne

Il est possible d'utiliser des capteurs de dérive de type Rotorod qu'on appelle des mesures dynamiques. Ces capteurs permettent une quantification du nuage de gouttelettes traversant une surface calculée (Piché et al. 2000). Cependant, le calcul mathématique pour évaluer le taux de dérive en fonction du taux d'application est très ardu et complexe. Plusieurs choisiront l'utilisation de mesures statiques ou passives. Ces dernières peuvent être prises sur des fils de nylon (fils à pêche) qui seront fixés sur des cadres ou entre des structures verticales, ou sur des sphères (métalliques ou polypropylènes) qui seront fixées sur des mâts.

5.4 Données météorologiques

Pour des essais de dérive, on doit toujours avoir des données météorologiques enregistrées en continu au cours de l'essai. On installe habituellement une tour météo qui supportera un certain nombre d'appareils de mesure. On place cette tour en amont de la zone pulvérisée pour ne pas influencer le mouvement des gouttelettes sous le vent. Les données sont souvent prises à différentes hauteurs au-dessus du sol, à une hauteur entre 1,5 et 2 m (ce qui représente la hauteur d'une personne) et pouvant aller jusqu'à 10 m au-dessus du sol. Souvent, on combinera des valeurs à 2 m et 6 ou 8 m. On peut utiliser différents appareils de mesure en fonction du budget disponible. Il existe plusieurs types d'anémomètres peu dispendieux – thermique, à

hélice, à coupelles – mais on utilisera l’anémomètre sonique 2D ou 3D pour des valeurs précises et en continu.

5.5 Utilisation des modèles

Pour planifier des essais de mesure de la dérive ou des arrosages commerciaux, il est possible d'utiliser un modèle de prédiction de la dérive pour évaluer les risques potentiels à l'arrosage. Les modèles ne permettent pas seulement la prédiction de la dérive; ils représentent aussi un outil intéressant de conscientisation et d'optimisation des applications. L'opérateur doit avoir en main toute l'information nécessaire à son arrosage avant d'ouvrir l'interface d'utilisation. Dans le modèle, on doit fournir – entre autres – le type d'appareil utilisé (bibliothèque de 30 hélicoptères – si l'appareil n'est pas inscrit, on doit savoir le diamètre du rotor, la vitesse de rotation du rotor, le poids de l'appareil), la largeur de la rampe (une largeur représentant 70% du rotor est proposée par défaut), la position des buses, la hauteur d'application (la hauteur optimale en fonction de l'appareil est proposée par défaut), le nombre de passages, l'espace entre deux lignes de passage, le taux de matière active, le taux d'application, la vitesse et la direction du vent, la température, hauteur de la végétation, proximité des zones sensibles, etc. On obtiendra une simulation du taux de dérive. On pourrait ensuite, en fonction des conditions météorologiques ou d'application, changer le type de buses pour diminuer les prédictions de risque de dérive. L'utilisation d'un modèle pour planifier les arrosages n'est pas obligatoire au Canada.

5.6 Exemples de méthodes

L'institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (irstea) de Montpellier (France) a publié une étude comparative simple et efficace de la dérive produite (bilan global – dépôt au sol et dérive aérienne) entre l'application par avion et par hélicoptère (Cotteux et Douzals 2012). Cette étude se base sur la norme NF ISO 22866 – 2005 qui détermine les conditions de mesure de la dérive basées sur 1) les conditions de traitement de la parcelle; 2) la méthode de mesure de la dérive hors parcelle; 3) les conditions météorologiques acceptables permettant de valider les essais. Une autre étude présente une méthode de mesure de dépôt au sol (Polvêche et Liet, 2009).

L'étude produite par Hewitt et al. (2002) présente une méthode exhaustive et comparable au standard de l'American Society of Agricultural Engineering S-561. La revue présentée par Felsot et al. (2011) regroupe les différentes méthodes (en survol) aussi présentées dans ce document.

6 Règlementation

La règlementation sur les applications de pesticide est principalement basée sur l'évaluation des risques liés à la dérive ainsi qu'à ses impacts sur l'environnement et la santé humaine (Felsot et al. 2011). Différentes lignes de pensée sont utilisées pour en arriver à diminuer les risques. Au Canada, l'étiquette des produits est la première considération lors d'une pulvérisation, obligeant par exemple l'utilisation spécifique d'une méthode d'application, d'une grosseur de gouttelettes

et du respect de largeurs de bande non traitée près de zones sensibles (zones tampons). Un résumé de différentes réglementations est présenté à l'Annexe 5.

En Europe, on inclut dans la réglementation l'inspection des pulvérisateurs. Tous les pulvérisateurs doivent être inspectés sur une base périodique, variant entre 1 à 3 ans en fonction du pays, pour permettre aux producteurs de les utiliser et d'y apposer l'autocollant officiel de certification. L'inspection se fait par un inspecteur accrédité selon une série importante de critères, incluant la qualité de la pompe et des différentes composantes, l'évaluation de chaque buse individuellement sur un banc d'essai, la propreté, la peinture, etc. Le pulvérisateur non conforme doit être remis en condition à l'intérieur de 1 à 3 mois (en fonction des normes du pays) ou sera mis au rebut. Cette mesure a débuté en 1997 et un regroupement Européen travaille à l'uniformisation des règles entre les pays de l'Union Européenne depuis 2004. Cette règle se nomme le « Standardised Procedure for the Inspection of Sprayers in Europe » (SPISE) et devrait être uniformisée pour tous les pays en décembre 2016.

6.1 Zones tampons

Dans certaines législations, par exemple au Royaume-Uni, le LERAP (guide des bonnes pratiques) oblige des bandes non traitées, mais inclut des options de réduction de largeur des zones tampons pour un producteur utilisant un pulvérisateur ou de l'équipement à faible risque de dérive, ou un produit à faible risque environnemental. De même, au Canada, l'ARLA inclut des largeurs de bande non traitée sur l'étiquette des produits et permet, selon certains critères, une réduction de ces largeurs en fonction d'une pulvérisation à faible risque de dérive. On peut aussi, dans certaines réglementations, obliger l'opérateur à utiliser un modèle de prédiction de la dérive pour établir le moment idéal d'un arrosage ainsi que les paramètres à respecter.

Pour établir les largeurs de bandes non traitées en fonction du type de pulvérisation, différentes méthodes sont utilisées. Les modèles de prédiction de la dérive pour la protection des cours d'eau développés en collaboration avec le United States Department of Agriculture (USDA), AgDISP® et AgDRIFT® sont largement utilisés. Ces modèles sont disponibles sur Internet et regroupent différents modules applicables à différents types de pulvérisateur. Un des modules s'applique particulièrement aux applications aériennes, incluant la simulation d'applications par hélicoptère. Ces applications sont largement utilisées dans plusieurs pays pour établir les largeurs de zones tampons ou pour prédire les risques de dérive et de contamination lors d'arrosages, que leur utilisation soit obligatoire ou recommandée. Aux États-Unis, AgDRIFT est souvent utilisé par le Environmental Protection Agency (EPA) pour caractériser les risques écotoxicologiques et établir les largeurs de zones tampons. En Europe, un groupe nommé FOCUS a évalué les modèles et les stratégies pour réduire les risques liés aux applications pesticides. Le modèle utilisé pour établir les risques pour les cours d'eau provient d'une combinaison entre le AgDRIFT et des tables de dérive produites par le Julius Kühn-Institut (JKI) en Allemagne (Ganzelmeier et al. 1995). Au Canada, le modèle AgDISP est utilisé par l'ARLA pour prédire et diminuer les risques de dérive lors d'application aérienne (Thompson et al. 2012). Différents jeux de données, provenant du Canada et de l'Allemagne, sont utilisés pour

déterminer les risques de dérive lors d'applications terrestres (Felsot et al. 2011). En Australie, on utilise aussi le modèle AgDISP pour prédire les risques de dérive.

6.2 Application par voie aérienne – avion ou hélicoptère

Les applications par voie aérienne sont largement réglementées. En Europe, il y a la directive EU 2009/128/EC (Official Journal of the European Union – 24.11.2009 L309/71) visant l'établissement d'un cadre d'action communautaire pour l'utilisation durable des pesticides et à laquelle tous les pays membres de l'Union Européenne devront se conformer d'ici 2018. Cette directive stipule que les arrosages par voie aérienne ont un potentiel élevé à causer des dommages importants à la santé humaine et à l'environnement, particulièrement par la dérive qu'elles produisent. Considérant cela, les applications par voie aérienne ne devraient avoir lieu qu'en cas d'extrême nécessité – si aucune autre méthode d'application n'est possible ou si l'application par voie aérienne représente un avantage pour la santé humaine ou l'environnement – et avec l'autorisation spéciale des autorités, pour chaque cas, convenant que les technologies de réduction des risques de dérive sont utilisées. De plus, l'opérateur ainsi que la compagnie fournissant le service d'arrosage doivent être certifiés pour l'application aérienne de pesticides. Déjà à ce jour, les applications par voie aérienne sont totalement interdites au Danemark, en Estonie et en Slovénie. Elles sont interdites, sauf exception pour des raisons de santé humaine ou de sites inaccessibles par d'autres modes d'application, en Italie, sur l'île de Chypre, en Autriche, et aux Pays-Bas (www.sklkeuring.nl Ares(2012)1424565—- 30/11/2012). On retrouve des restrictions sévères en France (permis obligatoire et restriction de certaines substances), en Belgique (par hélicoptère seulement), en Irlande, et au Royaume-Uni (Boudet et Mandin 2005). En Allemagne, la règle stipule que seules les applications par hélicoptère sont permises dans deux situations : l'application d'insecticide en foresterie et l'application de fongicide dans les vignobles à flanc de montagne. Par exemple, pour chaque arrosage par hélicoptère 1) les autorités et le voisinage doivent être avisés 14 jours avant les opérations, 2) le plan précis de l'arrosage doit être présenté pour assurer la protection des zones sensibles selon 50 m de bande tampon, 3) le ou les produits de la formulation doivent être connus, 4) le modèle de l'appareil et le nom du pilote doivent être inscrits, 5) au moment de l'arrosage, les conditions météorologiques doivent être adéquates, vent de moins de 5 m/s et température de moins de 25°C, et 6) une station de service (remplissage) doit être disponible au sol, au lieu de l'arrosage. Cette règle existe en Allemagne depuis 1995 (Schmidt 1996). Cependant, pour certains pays (p. ex. la Pologne ou les pays du Mercosur) les applications aériennes sont largement utilisées pour des considérations de larges territoires (forêts) ou pour des raisons géographiques (terrains escarpés).

En Hongrie, l'application par voie aérienne est la méthode traditionnelle d'application et, bien qu'en diminution, représente encore une partie importante des pulvérisations avec entre 800 000 et 1 million d'hectares traités (www.oecd.org/env/spraydrift/48402936.pdf). On y retrouve les règles de base comme : un opérateur formé, la connaissance des zones sensibles, l'application d'un produit approuvé ainsi que l'avis d'arrosage présenté aux organismes légaux.

On retrouve des règles similaires en Suisse (www.oecd.org/env/spraydrift/48402954.pdf) et en Australie (EPA 2005).

6.3 Règlementation canadienne et provinciale

Au Canada, un producteur agricole ou toute personne procédant à un arrosage pesticide en milieu agricole, est tenu de respecter la réglementation canadienne, la réglementation de la province dans laquelle il veut procéder à l'arrosage et la réglementation municipale. Cette dernière peut inclure des règles sur les applications pesticides, dont l'interdiction de pulvériser par voie aérienne.

La réglementation canadienne sur l'épandage aérien de pesticides produit par l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) définit les situations pour lesquelles ce type d'épandage convient et certaines informations générales. Dans tous les cas, depuis le 1^{er} janvier 2000, si l'étiquette du pesticide ne fait pas mention d'un mode d'emploi pour l'épandage aérien, ce mode d'application ne pourra pas être mis en pratique. Si l'épandage aérien est homologué, son application doit se faire par un avion ou hélicoptère réglé et étalonné, et conformément aux recommandations de l'étiquette du produit (taux d'application, volume d'eau, type de buses, etc.) (ARLA 1996). Les informations sur la largeur de zones tampons à respecter seront aussi inscrites sur l'étiquette du produit. Aucune norme canadienne générale n'existe sur les largeurs de zones tampons sauf concernant 1) l'interdiction de pulvériser au-dessus d'une étendue d'eau, 2) le respect d'un rayon minimal de 30 m en bordure d'une zone résidentielle. Au Canada, les étiquettes de pesticides sont des documents ayant valeur juridique. Quiconque ne respecte pas ces directives commet une infraction au sens de la loi (Anon 2000).

En parallèle, la pulvérisation aérienne de pesticides doit être conforme au « Règlement de l'air canadien » (RAC) qui stipule que :

« Un aéronef servant aux traitements aériens doit être piloté par un pilote détenant un permis de pilote professionnel, à l'exception des agriculteurs détenant un permis de pilote privé, s'ils respectent les conditions suivantes : 1) que leurs opérations se déroulent à l'intérieur d'un rayon de 25 milles nautiques du centre de leur ferme; 2) qu'ils soient propriétaires de l'aéronef; 3) qu'ils utilisent des pesticides uniquement à des fins de production agricole.

Voir à consulter les organismes provinciaux de réglementation pertinents pour connaître les exigences relatives aux permis, aux zones tampons et aux avis publics. »

Au Québec, Le Code de gestion des pesticides mis à jour en septembre 2015 par le Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) présente les articles 75 à 86 qui régissent l'application d'un pesticide au moyen d'un aéronef en milieu agricole. En résumé, les trois articles suivants concernent le milieu agricole (voir Annexe 6 pour définition des catégories de prélèvement des eaux) :

« 76. Il est interdit d'appliquer un pesticide:

1° à moins de 100 m d'un site de prélèvement d'eau de catégorie 1 ou 2... ou d'un site de prélèvement d'eau destinée à la production d'eau de source ou minérale...;

2° à moins de 30 m d'un site de prélèvement d'eau de catégorie 3...;

3° à moins de 3 m de tout autre site de prélèvement d'eau souterraine.

77. Celui qui projette d'appliquer un pesticide doit, préalablement à toute application, identifier, à l'aide de balises ou d'un système de guidage des lignes de vol, les limites des zones d'application y compris, le cas échéant, les limites des superficies sur lesquelles l'application du pesticide est interdite..., qui sont contiguës aux limites de la zone d'application du pesticide ou qui se retrouvent à l'intérieur de celle-ci.

78. Le pilote qui applique un pesticide au moyen d'un aéronef ou une personne qui en supervise l'application à partir d'un autre avion doit avoir à portée de sa vue une carte ou une photographie aérienne identifiant la zone d'application du pesticide et les superficies à l'intérieur de cette zone sur lesquelles l'application de pesticides est interdite... et une bande de 300 m au pourtour de cette zone.

Fins agricoles et milieu autre que forestier

86. L'application d'un pesticide autre que le *Bacillus thuringiensis* (variété *kurstaki*), à des fins agricoles et dans un milieu autre que le milieu forestier, doit s'effectuer à plus de 30 m d'un cours ou plan d'eau ou d'un immeuble protégé lorsque la hauteur du dispositif d'application, par rapport au sol, est inférieure à 5 m et à plus de 60 m d'un cours ou plan d'eau ou d'un immeuble protégé lorsque la hauteur du dispositif d'application, par rapport au sol, est de 5 m ou plus.

Pour l'application du premier alinéa, les cours d'eau visés dans l'expression «cours ou plan d'eau» sont les parties d'un cours d'eau dont la largeur est supérieure à 4 m; cette largeur se mesure à partir de la ligne naturelle des hautes eaux de celui-ci telle que définie dans la Politique visée au deuxième alinéa de l'article 1. Pour les cours d'eau dont la largeur est inférieure à 4 m, l'interdiction prévue à l'article 30 continue de s'appliquer.

L'application du *Bacillus thuringiensis* (variété *kurstaki*), à des fins agricoles et dans un milieu autre que le milieu forestier, doit s'effectuer à une distance d'un immeuble protégé équivalent à au moins une largeur de ligne de vol de traitement que peut effectuer l'aéronef.

Si l'application du pesticide s'effectue par le propriétaire de l'immeuble protégé ou par l'exploitant qui l'habite ou, à la demande de l'un d'eux, celui-ci n'est pas assujéti à ces obligations. »

7 Application aérienne par hélicoptère au Québec

Les applications par hélicoptère gagnent en popularité au Québec. Dans les régions de l'est du Québec, les surfaces pulvérisées par hélicoptère sont passées de 740 hectares en 2011 à 4500 hectares en 2013 (Cayer 2015).

Ce mode d'application est principalement utilisé au Québec pour des arrosages de fongicide et l'application d'engrais en grande culture. Pourquoi? Probablement dû à l'apparition de nouvelles maladies et de nouveaux ravageurs, telle que la fusariose dans le blé. L'application par voie aérienne permet 1) un arrosage « sans trace » dans une culture au stade végétatif plein feuillage, tel que le maïs ou le blé, 2) d'effectuer l'arrosage peu importe les conditions de sol, 3) une rapidité pour couvrir de grandes surfaces. La réduction de la compaction du sol n'est pas un argument convaincant ou déterminant : certaines rampes de pulvérisation peuvent couvrir 120 m de largeur par passage. Ajouter un arrosage terrestre au champ en cours de saison ne fera pas toute la différence de compaction et le pulvérisateur ne circulera pas si les conditions de sol ne sont pas adéquates.

Principalement, on peut obtenir un service d'arrosage par hélicoptère par l'entremise de notre COOP locale. Dans les régions du Bas-St-Laurent, Chaudière-Appalaches, Québec, Charlevoix et Estrie, c'est la compagnie Héli Mistral Service qui est le fournisseur officiel. Cette compagnie française est installée au Québec depuis 2007 (Downey 2014). L'entreprise assure qu'elle respecte les normes du Code de Gestion des pesticides du MDDELCC ainsi que les zones tampons par l'utilisation GPS pour la localisation des champs et des zones sensibles. Une station de service se trouve au sol pour assurer le service de l'appareil. L'étalonnage de la rampe de pulvérisation est effectué tous les mois. L'entreprise garantit une hauteur de pulvérisation au-dessus de la culture variant de 1 à 1,25 m pour diminuer les risques de dérive et s'apparenter aux conditions d'application d'un pulvérisateur terrestre.

L'application par hélicoptère augmente les coûts d'application comparativement aux applications conventionnelles (liste de prix 2014 à l'Annexe 7). Pour une application granulaire de fertilisant, on note une augmentation des coûts allant jusqu'à 30%. Pour une application d'engrais liquide, la différence va jusqu'à 65%, et 27% a été calculé pour une application de fongicide dans le soya (Downey 2014). Dans certaines cultures, comme la production d'arbres de Noël, l'utilisation de l'hélicoptère peut diminuer grandement le temps requis d'application et faciliter le travail du producteur. Cependant, la quantité de produits appliqués est supérieure à ce qui serait appliqué par voie terrestre. Les plantations ne sont pas toujours complètes (en partie récoltées) et par l'application conventionnelle, le producteur peut facilement choisir les sections à pulvériser en fermant son appareil au besoin. Par hélicoptère, on doit couvrir la surface entière, ce qui implique une utilisation accrue et inutile de produit. De plus, l'application aérienne augmente les risques de dérive de pesticides. Il est fondamental, pour diminuer les risques, de voler uniquement quand les conditions météorologiques sont optimales et en appliquant toutes les mesures de réduction des risques. Il faut aussi considérer le facteur social : le voisinage des zones pulvérisées se sent concerné par les applications aériennes de pesticide.

La durabilité des arrosages par voie aérienne réside en partie sur le respect des zones habitées et des zones sensibles pour faciliter l'acceptation globale.

8 Conclusion

Les applications aériennes sont en diminution dans le monde en générale, mis à part au Québec où elles gagnent en popularité. La réglementation sévère des autres pays indique une certaine crainte face aux impacts de ces applications. Généralement, on permet les applications aériennes pour des situations bien particulières où il y a soit urgence ou une problématique liée à la santé humaine. Plusieurs études démontrent aussi que l'efficacité phytosanitaire d'une application par hélicoptère est réduite par rapport à l'application terrestre et requiert une ou plusieurs interventions terrestres supplémentaires pour assurer un contrôle adéquat de l'ennemi de culture. Bien que rapide, ces applications augmentent les coûts de production.

La littérature démontre que la dérive produite par les applications aériennes, par avion ou par hélicoptère, est plus importante que ce qui est mesurée pour tous les autres types d'application terrestre. Les applications par hélicoptère pourraient diminuer les risques à l'environnement par rapport à l'application par avion si elles sont faites adéquatement. Comme aucun hélicoptère n'est spécifiquement conçu pour des arrosages aériens, chaque appareil est unique et requiert une grande connaissance des composantes et de leur impact sur la qualité de la pulvérisation. Certaines composantes ont un impact plus important sur les risques de dérive. Par exemple, le diamètre du rotor définit la largeur de rampe à utiliser et la hauteur de pulvérisation. Puisque chaque appareil possède des composantes différentes, les paramètres d'application ne peuvent pas être standardisées.

Sans certaines compétences, un utilisateur pourrait augmenter grandement la dérive produite lors d'une application par hélicoptère. Considérant les risques associés à ces arrosages, il serait important de bien encadrer cette pratique

9 Références

- AGDISP® (version 8.76). Disponible en ligne : <http://www2.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/models-pesticide-risk-assessment#agdisp>
- AgDRIFT® (version 2.1.1). Disponible en ligne : <http://www2.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/models-pesticide-risk-assessment#agdrift>
- Akesson, N.B. et W.E. Yates. 1964. Problems relating to application of agricultural chemicals and resulting drift residues. *Ann. Review of Entomology* 9:285-318.
- Anon. 2000. Guide national d'apprentissage – Application de pesticides par aéronef. – Édition du millénaire. Collaboration ARLA-FPT. 195 pages.
- Antonin, P. et A. Schmid. 1983. Traitements du vignoble par hélicoptère. Résultats obtenus en Suisse romande en 1979 et 1980. *Bulletin OEPP* 13(3) : 391-397.
- Antuniassi, U.R., A.A.B. Motta, R.G. Chechetto, F.K. Carvalho, E.D. Velini et C.A. Carbonari. 2014. Spray drift from aerial application. *Aspect of Applied Biology – International Advances in Pesticide Application* 122: 279-284.
- ARLA. 1996. Épandage aérien des pesticides. Directive d'homologation Dir96-04. 8 pages. Disponible en ligne : http://www.hc-sc.gc.ca/cps-spc/pubs/pest/_pol-guide/dir96-04/index-fra.php.
- ASABE. 2013. Procedure for measuring drift deposits from ground, orchard, and aerial sprayers. Standard ASAE S561.1 APR2004 (R2013). 6 pages.
- Barbosa, R. 2010. Equipment setup for aerial application of liquid pesticides. Publication 3160, Louisiana State University Agricultural Center. Disponible en ligne : www.lsuagcenter.com
- Bilanin, A.J., M.E. Teske et D.J. Morris. 1981. Predicting aerially applied particle deposition by computer. ASAE Paper No. 810607.
- Bilanin, A.J., M.E. Teske, J.W. Barry et R.B. Ekblad. 1989. AGDISP : The aircraft spray dispersion model, code development and experimental validation. *Transactions of the ASAE* 32(1) : 327-334.
- Bird, S.L., S.G. Perry, S.L. Ray et M.E. Teske. 2002. Evaluation of the AgDISP aerial spray algorithms in the AgDRIFT model. *Environmental Toxicology and Chemistry* 21(3) : 672-681.
- Boudet, C. et C. Mandin. 2005. L'épandage aérien de produits anti-parasitaires – Rapport du groupe de travail institutionnel en charge de la saisine AFSSE. Rapport d'expertise scientifique France AFSSE/INERIS No. CB-CM/06/2005– version 12. 206 pages.

- Caldwell, D.M. 2006. Quantification of spray drift from aerial applications of pesticides. MSc. Thesis. University of Saskatchewan. Canada.
- Cayer, E. 2015. Épandage du haut des cieux! Acte divin? Pas tout à fait... Le Coopérateur Agricole, Édition Avril 2015, 44(4) :1-3.
- Chaskopoulou, A., M.D. Latham, R.M. Pereira, R. Connelly, J.A.S. Bonds et P.G. Koehler. 2011. Efficacy of aerial ultra-low volume applications of novel water-based formulations of unsynergized pyrethroids against riceland mosquitoes in Greece. *Journal of the American Mosquito Control Association* 27(4) : 414-422.
- Cotteux, E. et J.P. Douzals. 2012. Evaluation agro-environnementale pour différentes configurations de traitements aériens en bananeraie. Rapport version 7 juin 2012, irstea— Centre de Montpellier, Montpellier, France. 9 pages.
- Coutts, H.H. et W.E. Yates. 1968. Analysis of spray droplet distribution from agricultural aircraft. *Transactions of the ASAE* 25-27.
- De Rossi, C. 2010. Pesticides in the atmosphere – Occurrence, distribution and behaviour of selected pesticides in the vinicultural area of Trier, Germany. Thèse de Doctorat. Université de Trier, Allemagne. 153 pages.
- Downey, J. 2014. Advantages and disadvantages of aerial applications. Unpublished project report, McGill University, Septembre 2014.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2005. EPA Guidelines for responsible pesticide use. ISBN 1 921125 05 5. 87 pages. Disponible en ligne : www.epa.sa.gov.au.
- Felsot, A.S. 2005. Evaluation and mitigation of spray drift. Disponible en ligne : <http://feql.wsu.edu/esrp531/fall05/felsotcostaricadrift.pdf>.
- Felsot, A.S., J.B. Unsworth, J. B.H.J. Linders, G. Roberts, D. Rautman, C. Harris et H. Carazo. 2011. Agrochemical spray drift; assessment and mitigation – A review. *Journal of Environmental Science and Health Part B*. 46 : 1-23.
- Frank, R., B.D. Ripley, W. Lampman, D. Morrow, G.R. Gammond et P. McCubbin. 1994. Comparative spray drift studies of aerial and ground applications 1983-1985. *Environmental Monitoring and Assessment* 29 : 167-181.
- Fritz, B.K., W.C. Hoffmann et W.E. Bagley. 2010. Effects of spray mixtures on droplet size under aerial application conditions and implications on drift. *Applied Engineering in Agriculture* 26(1) : 21-29.
- Ganzelmeier, H., D. Rautmann, R. Spangenberg, M. Streloke, M. Herrmann, H.J. Wenzelburger et H.F. Walter. 1995. Studies on the spray drift of plant protection products. Heft 305, Balckwell Wissenschafts-Verlag GmbH : Berlin.

- Gardisser, D.R. et D.K. Kulhman. 2001. Agricultural aircraft calibration and setup for spraying. Bulletin MF-1059, Cooperative Extension Service, Kansas State University. 17 pages.
- Gaskin, R.E., K.D. Steele et G.S. Elliott. 2011. Concentrated, low-volume aerial sprays to improve spray distribution in large avocado trees. *New Zealand Plant Protection* 64 : 107-111.
- Giles, D.K., N.B. Akesson et W.E. Yates. 2008. Pesticide application technology : research and development and the growth of the industry. *Transactions of the ASABE* 51(2) : 397-403.
- Göhlich, H. 1983. Assessment of spray drift in sloping vineyards. *Crop Protection* 2(1) : 37-49.
- Gous, S., P. Raal et M. Watt. 2012. Aerial herbicide spraying to control wilding *Pinus contorta* in New Zealand. *NZ Journal of Forestry* 57(2) : 35-37.
- Gous, S., P. Raal et M.S. Watt. 2014. Dense wilding conifer control with aerially applied herbicides in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 44 :4. .
- Gous, S., P. Raal, M.O. Kimberley et M.S. Watt. 2015. Chemical control of isolated invasive conifers using a novel aerial spot application method. *European Weed Research Society* 55 : 380-386.
- Hewitt, A.J., D.R. Johnson, J.D. Fish, C.G. Hermansky et D.L. Valcore. 2002. Development of the spray drift task force database for aerial applications. *Environmental Toxicology and Chemistry* 21(3) : 648-658.
- Hewitt, A.J., K.R. Solomon et E.J.P. Marshall. 2009. Spray droplet size, drift potential, and risks to nontarget organisms from aerially applied glyphosate for coca control in Colombia. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 72 :921-929.
- Kirk, I.W. 2002. Measurement and prediction of helicopter spray nozzle atomization. *Transactions of the ASAE* 45(1) : 27-37.
- MacNichol, A.Z., M.E. Teske et J.W. Barry. 1997. A technique to characterize spray deposit in orchard and tree canopies. *Transactions of the ASAE* 40(6) : 1529-1536.
- Marrs, R.H., A.J. Frost, R.A. Plant et P. Lunnis. 1992. Aerial applications of asulam : A bioassay technique for assessing buffer zones to protect sensitive sites in upland Britain. *Biological Conservation* 59 : 19-23.
- Marrs, R.H. et A.J. Frost. 1996. Techniques to reduce the impact of Asulam drift from helicopter sprayers on native vegetation. *Journal of Environmental Management*. 46 : 373-393.
- Mihajlovich, M., S. Odsen et D. Chicoine. 2012. Review of herbicide use for forest management in Alberta. *The Forestry Chronicle* 88(3) : 328-339.

NCP. 2013. Canadian Arctic Contaminants Assessment Report On Persistent Organic Pollutants – 2013. Muir D, Kurt-Karakus P, Stow J. (Eds). Northern Contaminants Program, Aboriginal Affairs and Northern Development Canada, Ottawa ON. xxiii + 487 pp + Annex.

Orchard, R.D. et G.P. Markin. 1975. Evaluation of the Boeing-Vertol 107 helicopter and spray system for forest application of insecticide. USDA Forest Service PNW-264. 12 pages.

Payne, N. J. 1992. OV-target glyphosate from aerial silvicultural applications, and buffer zones required around sensitive areas. *Pesticide Science* 34, 1–87.

Piché, M., B. Panneton et R. Thériault. 2000. Reduced drift from air-assisted spraying. *Can. Agr. Eng.* 42(3): 117-122.

Piché, M. 2008. La dérive des pesticides : prudence et solutions. Ed. CRAAQ. Bibliothèque Nationale du Canada, Publication n° 08-0075. 15 pages.

Polvêche, V. et O. Liet. 2009. Étude pour l'optimisation des usages de pesticides et des fertilisants – Traitements par aéronefs. République Française— Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, Étude 07.F4.04.02. 47 pages.

Quantick, H.R. 1985. Aviation in crop protection, pollution and insect control. Collins, London, U.K. 428 pages.

Reimer, A.P. et L.S. Prokopy. 2012. Environmental attitudes and drift reduction behavior among commercial pesticide applicators in a U.S. agricultural landscape. *Journal of Environmental Management* 113 (2012) : 361-369.

Richardson, J.R., A. Vanner, N. Davenport et K. Miller. 1996. Nozzles for minimising aerial herbicide spray drift. *New Zealand Journal of Forestry Science* 26(3) : 438-448.

Riley, C.M., C.J. Wiesner et W.A. Sexsmith. 1991. Estimating off-target spray deposition on the ground following the aerial application of Glyphosate for conifer release in New Brunswick. *J. Environ. Sci. Health B26(2)* : 185-208.

Robinson, R.C., R.G. Parsons, G. Barbe, P.T. Patel et S. Murphy. 2000. Drift control and buffer zones for helicopter spraying of bracken (*Pteridium aquilinum*). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 79 : 215-231.

Rodrigues Da Cunha, J.P.A. et C.B. De Alvarenga. 2008. Simulation of pesticide drift potentials under different application methods. CIGR – International Conference of Agricultural Engineering XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – Conbea 2008, Brazil, August 31 to September 4.

Schmidt, K. 1996. Application of plant protection products by helicopter in Germany (legislation, requirements, guidelines, use in vineyards and forests, drift). *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 26 : 117-122.

Teske, M.E. et H.W. Thistle. 1999. A simulation of release height and wind speed effects for drift minimization. Transactions of the ASAE 42(3) : 583-591.

Teske, M.E., S.L. Bird, D.M. Esterly, T.B. Curbishley, S.L. Ray et S.G. Perry. 2002. AgDRIFT : a model for estimating near-field spray drift from aerial applications. Environmental Toxicology and Chemistry 21(3) : 659-671.

Teske, M.E., H.W. Thistle et G.G. Ice. 2003. Technical advances in modeling aerially applied sprays. Transactions of the ASAE 46(4) : 985-996.

Thistle, H.W., J.A. White, D.M. Backer, J.H. Ghent, W.E. Throop, T.M. Bean, D. Siegel et J.L. Psillas. 2014. A buffelgrass aerial spraying pilot project : spray application and deposition. Applied Engineering in Agriculture 30(1) : 17-24.

Unsworth, J. 2010. History of pesticide use. Disponible en ligne : <http://agrochemicals.iupac.org/>.

Viret, O., W. Siegfried, E. Holliger et U. Raisigl. 2003. Comparison of spray deposits and efficacy against powdery mildew of aerial and ground-based spraying equipment in viticulture. Crop protection 22 : 1023-1032.

Wadcock, A.J., L.A. Ewing, E. Solis, M. Potsdam et G. Rajagopalan. 2008. Rotocraft downwash flow field study to understand the aerodynamics of helicopter brownout. Paper presented at : American Helicopter Society Southwest Region Technical Specialists' Meeting, « Technologies for the Next Generation of Vertical Lift Aircraft », Dallas-Fort Worth, TX, October 15-17. 2008.

Ware, G.W., B.J. Estes et W.P. Cahill. 1968. An ecological study of DDT residues in Arizona soils and alfalfa. Pesticides Monitoring Journal 2: 129-132.

Yates, W.E. 1962. Spray pattern analysis and evaluation of deposits from agricultural aircraft. Transaction of the ASAE 1962: 49-53.

Yates, W.E., J.M. Ogawa et N.B. Akesson. 1974. Spray distributions in peach orchards from helicopter and ground applications. Transactions of the ASAE (1974) : 633-644.

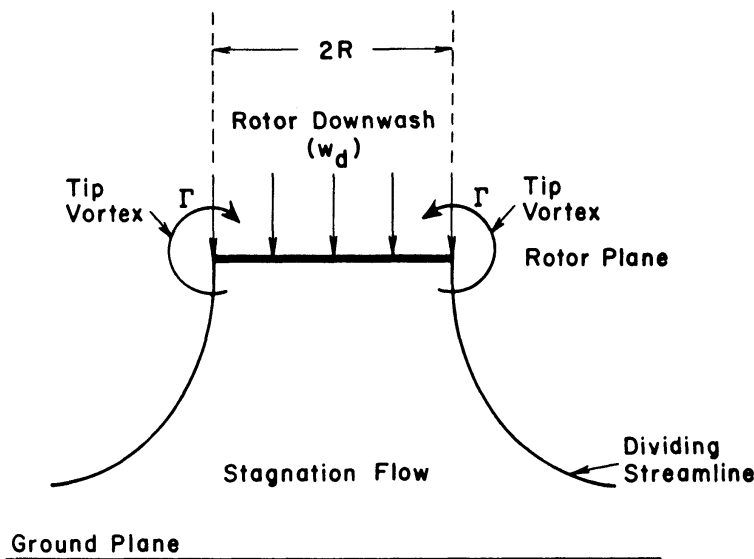
Lexique

Pulvérisateur à rampe : Rampe de pulvérisation, trainée ou portée, au sol.

10 Annexes

10.1 Annexe 1 Présentation des mouvements d'air

Swirl velocity generated by the propeller is assumed to be linear in R out to its maximum value (obtained by integrating the axial flux), and then zero for larger radial locations. The integration yields a speed at radius R (Bilanin and Teske, 1984). Le champ d'écoulement d'air de l'hélice combine l'écoulement généré par les pales de l'hélice en rotation, et l'écoulement axial et radial généré par le jet turbulent circulaire de la poussée du moteur. L'hélice exerce une force de rotation sur l'air, résultant en un flux axial de mouvement angulaire vers le bas. La vitesse du tourbillon généré par l'hélice est supposée être linéaire au rayon (obtenue en intégrant le flux axial), puis zéro pour des emplacements radiaux plus importants. L'intégration donne une vitesse au rayon R (Bilanin et Teske, 1984).



10.2 Annexe 2 Paramètres de pulvérisation

Antuniassi et al. (2014) : Avion EMB 202. Vitesse 177 km/h. Taux d'application 30 L/ha. Buses 32x D8-46 Teejet Hollow cone. VMD moyen. Orientation *inconnue*. Application 2 m au-dessus de la végétation. Bande de pulvérisation 15 m de largeur. Vitesse de vent variant de 3 à 17.7 km/h. Traceur Rhodamine + herbicide.

Frank et al. (1994) : 1- Hélicoptère Bell Jet Ranger 2066. Ratio rampe/rotor 135%. Buses 62x D6 swirl. 2- Hélicoptère Bell 47-G2. Ratio rampe/rotor 97%. Buses 33x D6 swirl. 3- Hélicoptère Sikorsky S55. Ratio rampe/rotor 72%. Buse 57x D6 swirl. (1, 2, 3)--- Vitesse *inconnue*. Taux d'application *inconnu*. Orientation 45° vers l'arrière. Traceur Insecticide. Culture maïs sucré. Application 2 à 5 m au-dessus de la végétation. 4- Avion Piper Pawnee-D. Vitesse 155 km/h. Buses 32x D&B 45° swirl. Traceur Insecticide. Culture pomme de terre. Application 3 à 5 m au-dessus de la végétation. 5- Pulvérisateur à jet porté. Taux d'application 500 à 600 L/ha. Traceurs Insecticide et fongicide. Cultures tomate et verger. (1, 2, 3, 4, 5) Vitesse de vent de moins de 11 km/h. 6- Rampe de pulvérisation haute pression. Taux d'application 500 à 600 L/ha. Traceur Bravo 500. Culture tomate. 7- Rampe de pulvérisation basse pression.

Gaskin et al. (2011) : Hélicoptère Squirrel AS350 BA. Ratio rampe/rotor 75%. Buse TeeJet XR8010SS. Taux d'application 200, 300 et 600 L/ha. Traceur tartrazine. Vitesse de vent 5 – 10 km/h.

Gous et al. (2012) : Hélicoptère MD 520N NOTAR. Ratio rampe/rotor 80%. Buse 36x D6-46. VMD 400 µm. Application 10 m au-dessus végétation. Vitesse 56 km/h. Herbicide.

Gous et al. (2014) : Hélicoptère Robinson R44. Ratio rampe/rotor 79%. Buse 30x TF5. VMD 720 µm. Orientation vers l'arrière. Application 10 m au-dessus de la végétation. Vitesse 56 km/h. Herbicide.

MacNichol et al. (1997) : Avion Schweizer Ag-Cat. Buse AU5000. Taux d'application 37.4 L/ha. Hélicoptère Hiller 12E. Buse DC. Taux d'application 37.4 L/ha et 280.6 L/ha. Hélicoptère Bell 206. Buse CP. Orientation vers l'arrière. Taux d'application 46.8 L/ha et 140.3 L/ha.

Marrs et al. (1992) : Hélicoptère Bell 47-G3B1. Ratio rampe/rotor 177%. Buses 72x Raindrop. Application 5 à 10 m au-dessus de la végétation. Culture fougère. Arrosage Herbicide. Vitesse de vent 6 à 10 m/s.

Richardson et al. (1996) : Hélicoptère Bell 206 Jet Ranger. Ratio rampe/rotor 80%. Buses D8, Foaming, D8-45. Vitesse 83 km/h. Traceur fluorescent et colorimétrique. Culture rase. Application à 10 m au-dessus de la végétation.

Riley et al. (1991) : Hélicoptère Bell 206B. Ratio rampe/rotor 132%. Buses 44x D10-45. Orientation vers le bas. Taux d'application 37.3 L/ha. Vitesse 130 km/h. Application 15 à 20 m du sol. Vent 8.5 m/s.

Robinson et al. (2000) : 1- Hélicoptère Bell 47-G3B1. Ratio rampe/rotor 93%. Buses 36x D5-25. Orientation 90°. Vitesse 80 km/h. Application 2 à 3 m au-dessus de la végétation. 2- Hélicoptère Robinson R22B. Ratio rampe/rotor 111%. Buses 16x D8-45. 130°. Vitesse 70 km/h. Application 3 à 5 m au-dessus de la végétation. 3- Rampe au sol 12 m de largeur. (1, 2, 3) Vitesse de vent 14.6 à 17.9 km/h.

Yates et al. (1974) : Hélicoptère Bell 47G-5. Ratio rampe/rotor 133%. Buses 48x D4-25, VMD 270 μ m. Orientation vers le bas et 45°.

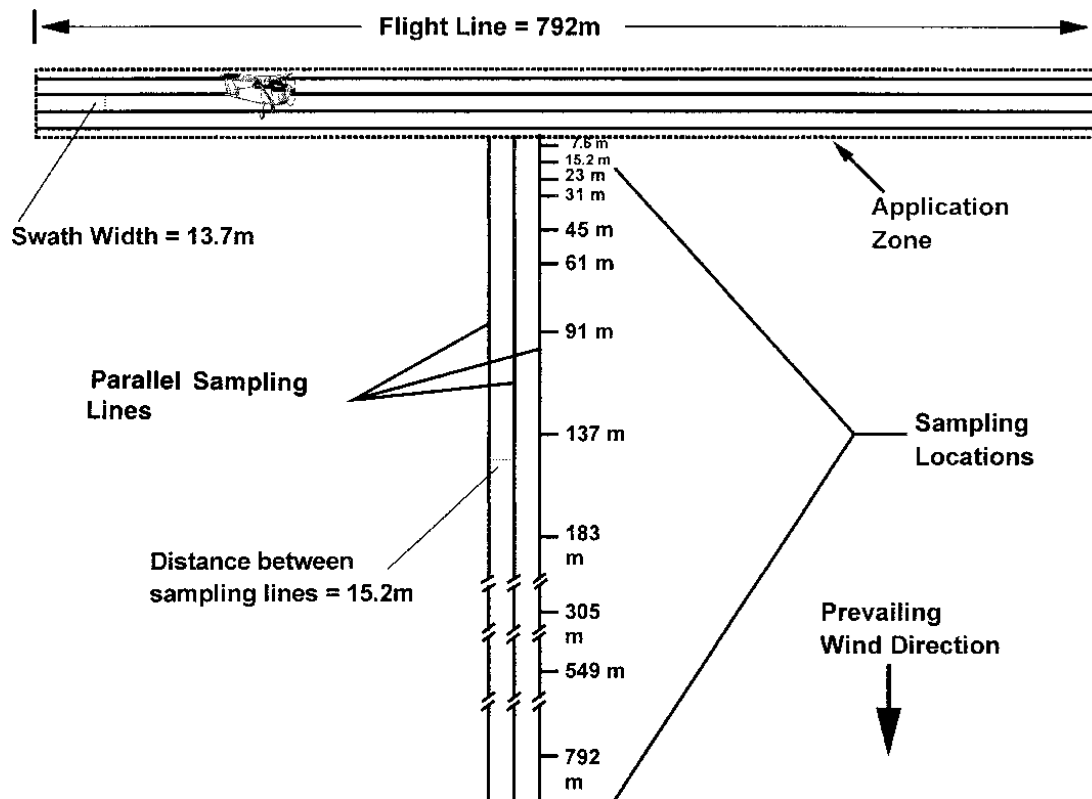
10.3 Annexe 3 Exemples de coteaux escarpés à pulvériser



Dirk Rautmann, Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz (JKI), Braunschweig. September 2012.

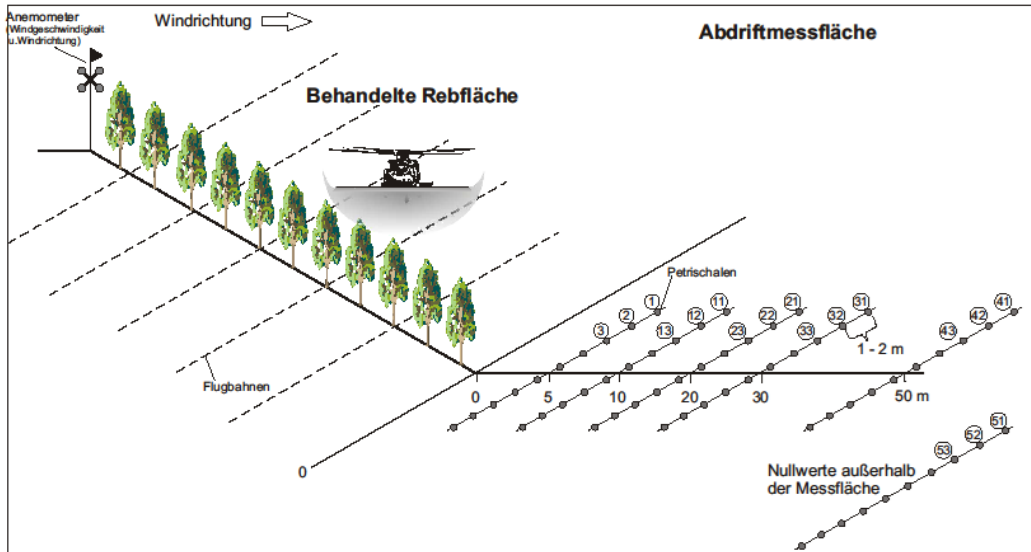
10.4 Annexe 4 Exemples de dispositions de sites d'essais

Fig. 1. Layout of test site for aerial field studies showing flight and sampling lines and sample station locations from 8 to 792 m downwind. Although not shown here, a sample station was also located at a distance of 10 m upwind of the spray block. Four swaths were flown on field for each application.



From Hewitt et al. (2002)

Versuchsanordnung zur Messung der Abdrift bei Hubschrauberapplikation im Rebsteilhang



Institut für Anwendungstechnik des JKI
Dr.-Ing. H. Ganzelmeier

Stand: August 2011

10.5 Annexe 5 Règlements

10.5.1 Tableau 1 : Épandage aérien au niveau européen : les procédures générales

	FR	DK	NL	UK	SL	IT	BE	EE	CY	IE	MT
Interdiction totale		☐			☐			☐			
Interdiction sauf exception						☐			☐		
Restrictions sévères											
Permis meilleure pratique Conditions de sécurité	☐		☐	☐			☐			☐	
Restrictions non sévères											☐

Boudet et Mandin 2005

France, DK : Danemark, NL : Pays-Bas, UK : Royaume-Uni, SL : Slovénie, IT : Italie, BE : Belgique, EE : Estonie, CY : Chypre, IE : Irlande, MT : Malte

10.5.2 Tableau 2 : Épandage aérien au niveau européen : les pratiques

Pays	Interdiction	Restriction sur le type de produit	Pilotes entraînés et certifiés	Autorisation ou Déclaration préalable
Allemagne	Non (seulement autorisé pour insecticides en forêt et fongicides en vignobles en terrain accidenté) Oui, par avion	Oui	Oui	autorisation + déclaration préalable
France	Non	Oui (T et T+) + mélanges en cuve	Oui	déclaration préalable + rapport après application
Royaume- Uni	Non (seulement autorisée pour le contrôle des fougères)	Autorisation spéciale PPP	Oui	autorisation + déclaration préalable + rapport
Belgique	Non, par hélicoptère ; Oui, par avion	Oui (produits classés A et phytohormone)	Oui	autorisation + déclaration préalable
Grèce	Non (seulement autorisée en forêt, riz, maïs)	Oui (processus d'autorisation)	Oui (100 heures d'expérience demandées)	autorisation + supervision par un expert
Autriche	Oui			
Portugal	Non	Autorisation spéciale PPP	En cours	déclaration préalable

Boudet et Mandin 2005.

PPP : produits phytopharmaceutiques ; T : toxique ; T+ : hautement toxique