

MECANISMES DE DEPOTS ET D'IMPACTS DE GOUTTES DE PULVERISATION

F. LEBEAU ⁽¹⁾ et N. DE COCK⁽¹⁾

⁽¹⁾ BioDynE, Biosystems Engineering Department, Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, Belgium, Mél: f.lebeau@ulg.ac.be

RÉSUMÉ

Le développement d'un modèle complet de l'application des produits de protection des plantes est une tâche complexe d'intégration des connaissances existantes et d'identification des questions scientifiques en suspens. Une approche multi-échelles de modélisation qui combine la physique sous-jacente à l'échelle de la goutte avec les échelles agronomiques et environnementales apparaît judicieuse en vue de mieux guider les industriels dans leurs développements, le législateur dans ses choix réglementaires et les agriculteurs dans l'exécution de leurs traitements.

La rupture des veines fluides et nappes liquides, le transport aérien au-dessus de la parcelle, le transport et l'interception par les plantes au sein de la canopée soulèvent encore des questionnements. La rétention a profité des développements théoriques qui clarifient le sort des gouttes lors de l'impact. L'intégration de l'ensemble de ces connaissances vise à mieux évaluer les impacts des choix technologiques sur l'efficacité des traitements et sur l'environnement.

Mots-clés : Rétention, goutte, transport, pulvérisation, impact.

ABSTRACT

DROP DEPOSITION AND IMPACT MECHANISMS

The development of a complete model of plant protection products application is a complex task of integrating former knowledge and identifying pending scientific issues. A multiscale approach that combines underlying physics at the drop level with agronomical and environmental scale appear relevant to guide the industrials in their developments, the legislator in his regulation choices and the farmers in the execution of their treatments

The break-up of ligaments and liquid sheets, the aerial transportation above the crop, the transportation and interception by plants inside the canopy still rise questions. The retention has benefited from theoretical developments that clarify the fate of drops when impacting. The integration of these knowledges aims at a better evaluation of the impact of technological choices on efficacy of treatments and on the environment.

Keywords: Impaction, Deposits, Droplet, Spray application, Retention.

INTRODUCTION

L'application des produits phytosanitaires sur les plantes est un processus complexe qui comprend de nombreuses phases; fractionnement du liquide en gouttes, transport dans l'air et la canopée, impact sur les cibles. Par ailleurs, une fraction importante, qu'il convient de limiter, n'atteint pas la cible.

Du point de vue de la contamination de l'environnement, l'exposition des populations a pour origine divers mécanismes de transfert qui, s'il sont étudiés individuellement, sont encore difficiles à relativiser entre eux de manière à guider le choix des mesures de gestion du risque et de réduction de l'exposition les plus pertinentes. A titre d'exemple, la contamination de l'environnement résulte de la dérive directe sous forme de gouttes hors de la zone cible. Il en résulte une contamination de l'air par des particules fines issues de l'évaporation de gouttes ou par mises en suspension ultérieurement, une volatilisation possible post-traitement, et une exposition possible de personne aux produits sous forme de gouttelettes ou de particules atmosphériques.

On comprend dès lors que maximiser la fraction de matière active atteignant son site d'action, et ce faisant, ouvrir la porte à une meilleure efficacité du traitement, ne suffit pas nécessairement à minimiser les impacts sur l'environnement.

Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées sur ces divers points mais peu de travaux font le lien entre ces différentes phases interdépendantes. Il apparaît par conséquent nécessaire de développer une compréhension globale du procédé pour analyser les interactions entre les différentes phases en vue de mitiger l'impact environnemental et l'objectif de protection des cultures. Le propos est limité ici à la problématique de l'application de produits de protection sur les plantes, omettant volontairement les phases ultérieures du devenir des dépôts sur les plantes telles que le lessivage, la dégradation ou les éventuelles pénétration et translocation de la matière active.

MECANISMES PHYSIQUES IMPLIQUES

Depuis la fin du 18^{ème} siècle, l'application des produits de protection des plantes est majoritairement réalisée sous forme de bouillie au moyen d'une phase porteuse aqueuse bien que d'autres modalités soient apparues comme l'usage d'huiles, l'enrobage de semences ou l'intégration au génome. Cette modalité s'est imposée historiquement avec le support de l'industrie phytopharmaceutique pour assurer une bonne couverture et une faible dérive avec des volumes d'application de bouillie historiquement très élevés. La reconnaissance des problèmes de ruissellement de bouillie de pulvérisation et le souci d'amélioration des rendements de chantier ont progressivement mené à une réduction des volumes de bouillie appliquées par hectare. Des volumes inférieurs à 200 litres par hectare sont maintenant la norme en grandes cultures. Poussés par les contraintes environnementales, les petites gouttes sont progressivement bannies. Derrière ces évolutions, divers mécanismes physiques conditionnent les conséquences agronomiques et environnementales de ces contraintes ; la pulvérisation, le transport et la rétention des gouttes.

PULVERISATION

La bouillie, qu'elle soit préparée par incorporation en cuve ou en ligne par injection directe, est habituellement fractionnée en gouttes au moyen de buses hydrauliques. Ces orifices calibrés assurent l'accélération de la veine fluide par transformation de la pression produite par la pompe en énergie cinétique. Ils assurent ainsi la formation d'une nappe liquide fonction de leur géométrie qui vise à assurer une répartition dans l'espace des jets des différents orifices placés sur la rampe.

La production d'une nappe liquide à des vitesses qui avoisinent les 20 m/s résulte en une pulvérisation induite par le cisaillement entre les phases liquide et gazeuse qui déstabilise la nappe. En conséquence, elle se rompt en ligaments puis en gouttes. De ces phénomènes aléatoires successifs résulte une large gamme de tailles de gouttes qui se caractérise par une population très dispersée autour du diamètre volumétrique médian. Cette dispersion est dans le domaine de la pulvérisation agricole habituellement quantifiée par un coefficient d'uniformité de la distribution granulométrique cumulée, le « span » ,

calculé par la différence entre les tailles de goutte caractéristiques des 90% et 10 % en volume du jet normé par le diamètre volumétrique médian (DVM). Ce « span » est habituellement supérieur à l'unité, ce qui se traduit par une dizaine de pourcent du volume de jet inférieur à la moitié du DVM et une dizaine supérieur à 150 % du DVM.

La qualité du jet qui fait l'objet d'un classement par rapport à des buses de référence distingue les qualités de jets très fine, fine, moyenne, grossière, très grossière et extrêmement grossière. Les buses classiques sont habituellement de classe fine à moyenne. Il en résulte une forte proportion de gouttes inférieure à 100 μm , en effet une qualité fine produit typiquement 10% du volume en gouttes inférieures à 100 μm . Par ailleurs, la grande majorité du volume des gouttes se situe dans une gamme de 100 à 300 μm et 10 % du volume excède cette limite supérieure.

Divers efforts ont été mis en œuvre pour réduire la quantité de fines gouttes, en particulier en raison de la baisse des volumes par hectare qui nécessite de réduire la taille des orifices et simultanément la taille des gouttes. Les buses anti-dérive utilisent divers mécanismes tels que l'injection d'air pour forcer une rupture précoce de la veine fluide et ainsi augmenter la taille des gouttes produites. Elles offrent typiquement des qualités grossières à très grossières, soit un DVM de l'ordre de 350 à 450 μm . En conséquence les proportions de fines gouttes sont très réduites, typiquement d'un facteur 10 ou supérieur ce qui réduit la sensibilité du jet à la dérive. En corolaire, la proportion de grosses gouttes augmente fortement ce qui réduit drastiquement leur nombre. Ces considérations ont été identifiées très rapidement comme un point critique du développement de techniques d'application efficaces, les buses hydrauliques constituant un moyen bon marché et robuste de production de gouttes mais limité dans sa capacité intrinsèque à cibler une population de goutte précise. Pour répondre à ce constat, l'application contrôlée de gouttes ou CDA au moyen d'atomiseurs rotatifs ont été développée dans la seconde moitié du vingtième siècle mais n'ont pas connu un succès durable en raison de leur surcoût et probablement également d'un manque de maîtrise de leur usage. Les domaines de l'application aérienne et le traitement du coton sont des exceptions notoires en raison des problèmes d'évaporation et de pénétration dans la canopée.

Les propriétés physico-chimiques de la bouillie constituent un autre point critique lors de la production des gouttes. Spanoghe et al. (2007) montrent sur base d'un grand nombre d'études que l'effet de la tension de surface et la viscosité varie selon le type de buse utilisé. Il peut soit se réduire soit augmenter par rapport aux essais de référence réalisés avec de l'eau. Par ailleurs, les adjuvants extemporanés multiplient la diversité des situations rencontrées sur le terrain. A de rares exceptions près, la diminution du DVM est corrélée à l'augmentation des gouttes inférieures à 100 μm , illustrant une certaine stabilité du « span ». A l'exception notable des polymères qui peuvent augmenter drastiquement la taille des gouttes, la modification du DVM se limite à une vingtaine de pourcent et est fréquemment plus faible. Il convient de rester prudent envers les assertions formulées sur l'effet bénéfique de formulations sur le spectre de gouttes car les diverses techniques de mesure peuvent présenter des sensibilités différentes aux propriétés optiques du liquide, compliquant notablement les mesures. Les débats ont longtemps autant porté sur les techniques de mesure de la granulométrie des jets adaptées que sur l'effet des paramètres opératoires sur la granulométrie, ce qui complique fortement la synthèse des essais de différentes études.

Le choix de la buse et de la pression restent en tout état de cause le moyen le plus simple et direct de contrôler la granulométrie du traitement mais la connaissance précise du spectre de goutte pour une combinaison buse/bouillie passe encore par une validation expérimentale même si certaines tendances sont bien établies. En conséquence pour un traitement spécifique, il conviendrait idéalement de spécifier les buses et pressions offrant la granulométrie optimale. Le développement des buses produisant une population de gouttes plus contrôlée et indépendante de la formulation offre une alternative à ces limitations (Ouled taleb Salah et al., 2018).

TRANSPORT

La rupture des ligaments apparaît classiquement à quelques centimètres de distance de l'orifice. Les gouttes produites ont une vitesse initiale équivalente à celle de la nappe liquide. Les frottements visqueux avec l'air vont ralentir les gouttes et produire une accélération concomitante de l'air environnant. Par ailleurs, cet air est sujet à une advection et une turbulence fonction des conditions météorologiques et de la nature de la surface traitée.

Comme les jets de pulvérisation présentent typiquement une vitesse initiale d'une vingtaine de mètres par seconde, il en résulte que les gouttes subissent une décélération dans l'air en fonction de leur diamètre et vont progressivement s'approcher de leur vitesse de sédimentation. Le temps de relaxation varie fortement avec la taille des gouttes, les plus petites atteignent leur vitesse terminale en une fraction de secondes tandis que les plus grosses seront arrivées au sol avant d'avoir atteint cette dernière (De Cock, 2017). La transition entre ces deux scénarii se situe aux alentours de 200 μm . L'air entraîné peut limiter cette décélération. La plupart des études cherchant à caractériser l'air entraîné ont été réalisées pour des buses statiques, ce qui est favorable à l'établissement d'un écoulement d'air sous forme d'un vortex recirculant qui amplifie le phénomène. L'air entraîné au centre du panache est un phénomène métastable qui disparaît pour de faibles vitesses d'avancement (Young, 1990). De nos jours l'application des produits de protection des plantes en grandes cultures est généralement réalisée en bas volume (50 - 200 l/ha). Il en résulte que le couplage entre l'air et les gouttes est relativement faible. Pour une hauteur de pulvérisation de 0,5 m le rapport entre la masse de bouillie et la masse d'air dans laquelle elle est appliquée est de l'ordre de quelques pourcents. En considérant une vitesse verticale moyenne de l'ordre de 10m/s pour tenir compte de l'angle d'ouverture des buses, la faible quantité de mouvement transmise à l'air limite au maximum à quelques dixièmes de mètres par seconde la vitesse de l'air entraîné. Certains modèles de transport utilisent des relations empiriques pour quantifier le phénomène mais ils sont souvent basés sur des mesures statiques de l'air entraîné et tendent à surestimer le phénomène par rapport à une buse en mouvement. Ces simulations peuvent dès lors s'avérer trompeuses sur l'ampleur du phénomène en situation réelle d'application. Pour dépasser cette limitation, il convient soit de recourir à des modèles de mécanique des fluides de l'écoulement diphasique avec couplage des phases (Ghosh and Hunt, 1998) soit de se baser sur des campagnes de mesure en situation dynamique pour établir des relations empiriques pertinentes. Face à la complexité du sujet, il apparaît que la quantification précise de l'effet de l'air entraîné nécessite encore des recherches, en particulier pour la fraction la plus fine du jet. En particulier, il convient de faire la part des choses entre la contribution de cet effet à la diminution de la hauteur d'éjection effective et à l'augmentation de la turbulence pour une grande variété de conditions opératoires ; forme du jet, débit, qualité du jet, vitesse d'avancement, hauteur de pulvérisation.

Par ailleurs, la structure de la rampe, le véhicule, les dispositifs à assistance d'air passifs (déflecteur) ou actifs (ventilateurs) sont autant de variables supplémentaires qui affectent l'écoulement d'air en aval des buses. L'assistance d'air qu'elle soit passive (Ozkan et al., 1997) ou active (Piche et al., 2000) a démontré son intérêt pour réduire le temps de vol, en particulier des fines gouttes. La diversité de ces dispositifs nécessite toutefois une étude spécifique à chaque situation, de préférence dans des conditions maîtrisées.

Outre la composante balistique, les gouttes sont soumises aux conditions d'écoulement de l'air au-dessus de la parcelle à traiter. Aux faibles hauteurs de pulvérisation en application terrestre, il est généralement admis que l'écoulement présente les caractéristiques d'un profil neutre, indépendamment de la stabilité atmosphérique. Dans ces conditions, le déplacement vertical des gouttes s'effectue perpendiculairement à un profil logarithmique moyen de vent selon la hauteur dont la forme est conditionnée par la hauteur de rugosité de la surface et l'intensité par la vitesse de vent à une hauteur déterminée. Le cisaillement entre les masses d'air aux différentes hauteurs génère de

turbulences verticales et horizontales qui contribuent à la diffusion turbulente dans la couche de surface.

Le temps de relaxation et la vitesse terminale des gouttes sont des indicateurs de leur sensibilité à un déplacement latéral complémentaire à la composante balistique et par conséquent à la dérive en dehors de la zone cible. Certaines gouttes dont la vitesse terminale est sensiblement plus faible que la composante verticale de la turbulence peuvent théoriquement avoir une distance de transport infinie ce qui résulte en un panache de dérive avec une empreinte infinie. Les gouttes qui ont une vitesse de sédimentation sensiblement supérieure à la vitesse de turbulence voient quant à elle leur distance de transport délimitée. La dérive peut être limitée par l'augmentation de la taille des gouttes. Naturellement la convection latérale des gouttes ne peut être totalement évitée et par conséquent la limitation de la dérive implique une limite de la distance de dispersion prise en compte.

La phase porteuse constituée d'eau liquide est sujette à évaporation durant le transport. Les fines gouttes sont naturellement plus sensibles à ce phénomène en raison de leur surface spécifique importante, ce qui tend à augmenter la dérive. La fraction des plus fines gouttes s'évapore complètement pour former un aérosol. Il est probable que cette fraction soit à l'origine des fractions manquantes lors des bilans massiques des études de dérive mais elle reste peu documentée, probablement en raison de la difficulté de mesure. Cette problématique importante dans le cadre de l'évaluation de l'exposition des riverains et de la contamination de l'air fait l'objet d'un nombre croissant de recherches qui devraient clarifier ce point dans le futur. Les simulations numériques qui permettent de quantifier le phénomène sous certaines hypothèses simplificatrices illustrent l'importance de ce phénomène mais le couplage des phases permettant de prendre en compte l'évolution de l'humidité de l'air dans l'environnement du nuage de pulvérisation est rarement réalisé à grande échelle, ce qui constitue un scénario pessimiste. L'effet de la formulation sur l'évaporation des gouttes en vol est mal connu et son éventuel effet est probablement masqué par les modifications de granulométrie initiales lors de la rupture de la nappe liquide.

Si elles ne se sont pas évaporées et ne sont pas sorties de la zone cible antérieurement, les gouttes pénètrent ensuite dans la canopée. On considère habituellement que le plan de déplacement nul du profil logarithmique de vent se situe au deux tiers de la hauteur de la végétation, une hypothèse simplificatrice qui peut être affinée en prenant en compte la densité du couvert végétal. Si le profil logarithmique est une hypothèse largement validée au-dessus de la culture, l'écoulement au sein de la canopée présente un profil spécifique qui doit être pris en compte pour décrire correctement la phase de transport en son sein (Cox et al., 2000). La nature de cet écoulement est particulièrement critique pour la pénétration du nuage de pulvérisation dans la culture et la localisation des dépôts. Il est probablement encore nécessaire de nourrir les connaissances dans ce domaine. Les techniques actuelles de mesure et de simulation de mécanique des fluides disponibles devraient permettre de progresser significativement à ce niveau. La diversité des plantes et stade végétatifs nécessitent probablement d'identifier les paramètres réduits descripteurs de la canopée les plus influents sur l'écoulement au sein du couvert végétal. Les modèles structuraux de plantes (Griffon et al., 2014) et les outils de phénotypage actuels offrent d'intéressantes perspectives pour renforcer les connaissances dans ce domaine et faciliter les expérimentations numériques.

RETENTION

La bonne couverture des surfaces végétales par la pulvérisation fait l'objet d'une attention continue depuis l'origine des traitements des cultures. Dans un premier temps, de hauts volumes par hectare ont assuré ce rôle mais les bas volumes étant maintenant la norme, une attention particulière est portée à la compréhension des mécanismes de rétention des gouttes de bouillie par les plantes. La tension de surface élevée de l'eau a rapidement été identifiée comme un obstacle à la rétention, les gouttes ayant tendance à rebondir, voire à se fractionner pour les plus grosses, sur les feuilles

superhydrophobes. En conséquence, l'usage de tensioactifs pour baisser la tension de surface dynamique est une pratique largement répandue qui a démontré son efficacité pour améliorer la rétention à l'échelle de la plante mais peut induire des risques de ruissellement.

Des études fondamentales sont également mises en œuvre à l'échelle de la goutte pour quantifier au laboratoire l'effet de la formulation ou des adjuvants sur la rétention. Les générateurs de gouttes sont classiquement utilisés pour déterminer le seuil de transition entre le rebond et l'adhésion sur les surfaces végétales en fonction de la bouillie utilisée. Une goutte de taille submillimétrique est habituellement produite à une hauteur variable pour déterminer la vitesse où apparaît la transition entre adhésion et rebond. Cela borne le domaine d'exploration à la vitesse terminale de ces gouttes. Des gouttes millimétriques permettent d'observer l'apparition du fractionnement. La transition entre les différents comportements est observée par l'opérateur ou mesurée par une caméra.

Une approche alternative recourt à un jet de pulvérisation polydisperse classique à bas volume et filme au moyen d'une caméra rapide les impacts primaires des gouttes de différents diamètres sur la surface. Cette approche moins fastidieuse à mettre en œuvre permet de couvrir rapidement la gamme des diamètres et vitesse représentative des gouttes et d'établir des diagrammes de phase mettant en évidence la variabilité statistique des transitions entre les divers comportements (Massinon et al., 2012).

L'adhésion est caractéristique des gouttes ayant un diamètre de moins de 100 microns sur les surfaces superhydrophobes pour l'eau. Les tensioactifs les plus performants peuvent repousser cette transition au-delà de 200 microns sur les surfaces foliaires très peu mouillables. Sur les surfaces facilement mouillables, les gouttes jusqu'à 250 microns peuvent adhérer au premier impact. Au-delà d'environ 250 microns, le fractionnement des gouttes en gouttelettes secondaires apparaît pour des vitesses d'impact de l'ordre du mètre par seconde.

Des efforts de recherche sont en cours pour intégrer ces observations au sein de modèles multi-échelle de rétention (Massinon et al., 2015 ; Zabkiewicz et al., 2016) qui intègrent la trajectoire du spectre de gouttes, l'architecture de la plante et le comportement à l'impact. Ces expérimentations *in silico* facilitent la quantification de l'effet des paramètres impliqués dans la rétention mais un certain nombre de simplifications actuelles sont discutables et devraient faire l'objet de développements futurs. L'impact des petites gouttes se base sur l'interception de la trajectoire de la goutte avec le plan du feuillage sans couplage entre les phases solides et gazeuses. Cette hypothèse est irréaliste pour les plus fines gouttes fortement influencées par l'écoulement dans la couche limite et, par conséquent celle-ci sous-estime probablement leur diffusion à l'intérieur de canopées denses. Des modèles d'efficacité de capture par différentes géométries d'obstacle pourraient sans doute offrir des approximations raisonnables de la probabilité d'interception sans recourir à une résolution complète des équations au sein de la canopée. En présence d'évaporation, l'efficacité de capture de ces particules solides par les organes végétaux a également une grande importance dans le développement de modèles d'application de produits phytosanitaires fiables. Ce dernier point est critique pour l'évaluation de la contamination de l'air par les aérosols résultant d'évaporation complète de fines gouttes et de la capacité des canopées à servir de piège à cette fraction de la dérive.

Les gouttes qui rebondissent perdent habituellement une grande partie de leur énergie dans les frottements visqueux lors de l'impact. Des approches de bilan énergétique permettent d'estimer les conditions initiales au rebond avec un certain succès. A l'extrémité supérieure du spectre, la description du fractionnement des gouttes reste encore embryonnaire. La détermination précise du nombre de gouttes secondaires a fait des progrès sur les surfaces modèle mais des phénomènes tels que la présence d'anisotropie de la surface sur certaines espèces, l'effet de l'angle d'impact, la fragmentation partielle, l'effet des adjuvants, la transition entre prompt et corona splash doivent encore être mieux compris et intégrés dans les modèles. Une bonne compréhension de la production des gouttes secondaires et de leur devenir au sein de la canopée est en effet critique face à la généralisation de l'emploi de jets de qualité grossière pour lutter contre la dérive et la compréhension des mécanismes assurant l'efficacité biologique de tels traitements. Par ailleurs, les gouttes secondaires peuvent éventuellement contribuer à la dérive à la volatilisation directe.

DISCUSSION

L'application des produits de protection des plantes doit offrir une protection efficace tout en limitant la contamination de l'environnement. Cela passe nécessairement par une optimisation des propriétés des gouttes utilisées. Il est couramment admis que l'efficacité du traitement est synonyme d'une réduction des tailles de gouttes pour offrir une meilleure couverture. Cela se fait au détriment de la contrôlabilité de la trajectoire des gouttes et de leur résistance à l'évaporation. L'usage de gouttes plus grosses et rapides améliore la contrôlabilité mais rend la nature des dépôts beaucoup plus sensible à la nature des cibles et des produits utilisés. Dans les études de terrain, l'efficacité des buses anti-dérive s'avère souvent efficace même à de bas volumes par hectare. Cela réduit incontestablement la dérive directe mais il est difficile de dresser un tableau global des conséquences environnementales, la réduction de la dérive n'étant pas nécessairement synonyme de moindre contamination des sols et même de l'air car d'autres mécanismes comme la volatilisation peuvent être impliqués. Après tant de décennies de recherche sur les techniques d'application, il reste étonnamment difficile d'avoir une compréhension claire de toutes les conséquences des choix technologiques posés lors de l'application des produits de protection des plantes tant elles sont potentiellement nombreuses et multifactorielles. Une étape importante est la compréhension du devenir de chaque goutte pulvérisée au-dessus d'une culture en fonction des paramètres environnementaux, structuraux, physiques et chimiques impliqués. Longtemps, des modèles analytiques globaux ont été développés et utilisés (Bache & Johnstone, 1992) pour évaluer les techniques d'application en combinaison avec des mesures de terrain. Les puissances de calcul maintenant disponibles permettent de conduire la modélisation à l'échelle de la goutte, niveau fondamental où se déroulent les phénomènes conditionnant tant l'efficacité des traitements des produits de protection des plantes que leurs devenir dans l'environnement. Ce niveau de résolution nécessite de décomposer le processus en autant de phénomènes indépendants et pour chacun d'établir des modèles précis de leur sensibilité aux variables physiques, chimiques et environnementales rencontrées en pratique. Il est probable que les modèles multi-échelles de l'application des produits de protection des plantes puissent contribuer par la décomposition en procédés fondamentaux et explicites à objectiver les choix et quantifier leurs conséquences sur la qualité du traitement et sur l'environnement.

CONCLUSION

Quantité d'études ont été réalisées durant plus d'un siècle sur les techniques d'application, reflétant à chaque époque les préoccupations de la société, depuis l'efficacité des traitements, leur efficacité économique, la réduction des impacts sur l'environnement, la sécurité de l'opérateur et des riverains jusqu'à l'impact sur la santé publique. Il apparaît de plus en plus difficile de concilier les attentes des différentes parties prenantes qui peuvent apparaître contradictoires. Dans ce contexte, la mitigation des impacts de la protection des cultures devra prendre en compte des scénarii de plus en plus représentatifs de mécanismes physiques et chimiques fondamentaux sous-jacents au devenir des produits de protection des plantes une fois qu'ils sont relargués sur le terrain. A cette fin des modèles globaux, robustes et validés, devront synthétiser l'état de l'art pour guider de manière cohérente et scientifique vers les pratiques les plus performantes. L'approche multi-échelles peut y contribuer en agrégeant les connaissances fondamentales dans les nombreux domaines scientifiques impliqués afin de dégager une vue macroscopique de leurs interactions et de structurer l'effort collectif de recherche nécessaire autour de la thématique de l'application des produits de protection des plantes. Outre, les 3 phases développées ci-dessous, elle offre également le socle de développement ultérieurs pour intégrer les aspects complémentaires de l'efficacité que sont la pénétration et la translocation ou du devenir dans l'environnement tels que le lessivage, la volatilisation ou la photodégradation.

BIBLIOGRAPHIE

Bache D. H. Johnstone D. R., 1992, Microclimate and spray dispersion, Hellis Horwood Series in Environmental Management, Science and Technology, Hellis Horwood Limited, Chichester

Cox S. J., Salt D. W., Lee B. E., Ford M. G., 2000, A model for the capture of aerially sprayed pesticide by barley, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 87 pp. 217-230

De Cock N., Massinon M.; Ouled Taleb Salah S., Lebeau F., 2017, Investigation on optimal spray properties for ground based agricultural applications using deposition and retention models, *Biosystems Engineering* 162, pp. 99-111

Ghosh S. And Hunt J. C. R., 1998, Spray jets in a cross-flow, *J. Fluid Mech.* 365, pp. 109-136

Ozkan H. E, Miralles A., Sinfort C., Zhu H., Fox R.D., 1997, Shields to reduce spray drift, *Journal of agricultural engineering research* 67 (4), pp. 311-322

Griffon S., de Coligny F., 2014. AMAPstudio: an Editing and Simulation Software Suite for Plants Architecture Modelling. *Ecological Modelling*, 290: pp. 3-10

Massinon, M., & Lebeau, F., 2012, Experimental method for the assessment of agricultural spray retention based on high-speed imaging of drop impact on a synthetic superhydrophobic surface, *Biosystems Engineering* 112 pp. 56-64

Massinon M., Dumont B. , De Cock N., Ouled Taleb Salah S., Lebeau F., 2015, Study of retention variability on an early growth stage herbaceous plant using a 3D virtual spraying model *Crop Protection*, vol. 78, pp. 63-71

Ouled Taleb Salah S., De Cock N., Massinon N., Duscesne A., Lebeau, F., Dorbolo S., 2018. Design of a narrow span nozzle : a round jet impacting a disk engraved with radial grooves, *Aspects of Applied Biology* 137, *International Advances in Pesticide Application* pp. 245-250

Petroff A., Mailliat A., Amielh M., Anselmet F., 2008, Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge. Review article, *Atmospheric Environment*, 42 (16), pp. 3625-3653

Piche, M., Panneton, B. and Theriault, R. Reduced drift from air assisted spraying. 2000. *Can. Agric. Eng.* 42 (I), pp 17-122

Young B. W., 1990, Droplets dynamics in hydraulic nozzle spray clouds, Pesticide formulations and application systems : 10 th volume, ASTM SP 1078 eds Bode L.E., Hanzen J. L., Chasin D. G., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

Zabkiewicz J. A., Forster W. A., Dorr G., Turner I. W., McCue S. W., Belward J. A., Kempthorne D. M., Young L. C., Hanan J. S. 2016. Virtual Plants-Virtual Spray Retention Models. *Aspects of applied Biology* 132, *International Advances in Pesticide Application*, pp 97-105