

Végéphyll – 24^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
ORLÉANS – 3, 4 et 5 DÉCEMBRE 2019

SIMULATEUR DE PULVERISATION LOCALISEE D'HERBICIDE

S. VILLETTE ⁽¹⁾, T. MAILLOT ⁽¹⁾, J-P. DOUZALS ⁽²⁾, J-P. GUILLEMIN ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Agroécologie, AgroSup Dijon, Inra, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

⁽²⁾ UMR ITAP, Irstea Montpellier SupAgro, Univ. Montpellier, 361 Rue Jean-François Breton, BP 5095, F-34196 Montpellier cedex 05, France

RÉSUMÉ

La pulvérisation localisée constitue un levier technologique pour réduire les quantités d'herbicides utilisées dans la lutte chimique contre les adventices. Aujourd'hui, les technologies de détection et de commande permettent d'asservir la pulvérisation à la présence des adventices et offrent ainsi une alternative à une application homogène sur toute la surface du champ. Pour évaluer cette pratique, un simulateur numérique a été développé. Il permet de combiner des cartes d'infestation virtuelles avec différents schémas théoriques de pulvérisation. Les simulations sont utilisées pour spatialiser les applications et quantifier la réduction d'herbicide en fonction de la répartition spatiale des adventices et de la largeur des unités indépendantes de pulvérisation (tronçons de rampe ou buses individuelles). Par ailleurs, selon le type de buses utilisées, l'apparition de zones de sous-dosages (potentiellement préjudiciables au contrôle des adventices) est étudiée en prenant en compte la répartition transversale du produit sous la buse.

Mots-clés : adventice, largeur de tronçon, répartition transversale, réduction d'herbicide, sous-dosage

ABSTRACT

Site-specific spraying is a technological lever to reduce the herbicide amount used in the case of chemical control of weeds. At the present time, detection and control technologies are available to apply herbicide only where weeds are present and thus provide an alternative to homogeneous application of chemicals on the entire surface of the field. In order to assess this practice, a digital simulator has been developed combining virtual infestation maps with different theoretical sprayer configurations. Simulations were used to localize herbicide applications and quantify herbicide reduction based on the spatial distribution of weeds and the width of independent spray units (boom sections or individual nozzles). Moreover, depending on the type of nozzle, the occurrence of under-application (with a risk of weed-control failure) is studied by taking into account the transverse distribution of the herbicide under the nozzle.

Keywords: weed, width section, spray pattern, herbicide reduction, under-application

INTRODUCTION

Dans un objectif de maintien des rendements et de la qualité des récoltes, la réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques reste un défi. L'un des moyens permettant de réduire les quantités d'herbicides consiste à réaliser une application localisée (Timmermann *et al*, 2003 ; Weis *et al*, 2008) en pulvérisant le produit uniquement là où les adventices sont présentes. Des technologies de pulvérisation localisée ont ainsi été développées depuis les années 90 (Stafford et Miller 1993 ; Lee *et al*, 1999 ; Gerhards et Oebel 2006 ; Nordmeyer 2006 ; Gutjahr *et al*, 2012). Aujourd'hui, des systèmes de détection d'adventices peuvent fournir au pulvérisateur une information en temps réel ou une carte d'infestation préétablie en amont du traitement. Des unités de contrôle peuvent quant à elles commander l'application locale d'herbicide en activant et désactivant de manière indépendante les tronçons voire les buses individuelles de la rampe de pulvérisation en fonction de la localisation des plantes adventices. Bien que certaines technologies soient disponibles depuis plusieurs décennies, leur taux d'adoption par les agriculteurs est encore extrêmement faible. L'un des freins est le coût des technologies requises ainsi que l'incertitude concernant l'efficacité et le retour sur investissement. Les coûts technologiques augmentent lorsque la largeur des tronçons diminue (en particulier pour des tronçons de moins d'une demi-douzaine de buses) mais la réduction de la largeur des tronçons améliore la résolution spatiale de l'application. Un compromis est donc à trouver concernant le choix de la largeur des tronçons d'application. Ainsi, lorsque la largeur des tronçons diminue, on s'attend à ce que la surface effectivement traitée se rapproche de la surface réellement couverte par les adventices, entraînant une réduction d'autant plus importante de la quantité d'herbicide utilisée (par rapport à une application en plein). Cependant, l'évaluation au champ de cette relation nécessiterait des essais fastidieux, coûteux et en pratique peu réalistes.

Pour contourner la difficulté de mise en œuvre de ce type d'expérimentation, l'étude peut être envisagée au moyen d'expériences virtuelles basées sur des simulations numériques. Récemment, Franco *et al* (2017) ont réalisé des simulations pour aborder le problème du choix de la résolution spatiale appropriée à une pulvérisation localisée d'herbicide sur adventices. Ces auteurs ont effectué des simulations sur deux petites zones de pulvérisation virtuelles infestées par des adventices réparties en petites ou importantes taches circulaires. Dans leurs simulations, le plus petit tronçon de pulvérisation considéré était de 1 m de largeur avec une distribution purement rectangulaire du produit sous la rampe. Leurs travaux ont montré que la réduction potentielle d'herbicide dépend non seulement de la résolution de la pulvérisation mais également de la densité et de la distribution spatiale des adventices. À l'heure actuelle, l'interaction des paramètres qui affectent les économies d'herbicides reste peu documentée. De plus, aucune étude ne s'est intéressée aux variations locales de doses de produit potentiellement induites par la pulvérisation localisée.

L'objectif des travaux décrits dans cet article est d'étudier l'influence de la largeur de tronçon, de la répartition du produit sous buse, du taux d'infestation et de la répartition spatiale des adventices sur la réduction de la quantité d'herbicide utilisée, ainsi que sur l'augmentation potentielle de la surface exposée à un sous-dosage. L'étude s'appuie sur des expériences virtuelles issues de simulations numériques.

MATERIEL ET METHODES

Dans cette étude, les applications d'herbicides ont été calculées en combinant des cartes d'infestation virtuelles et des simulations de pulvérisation localisée. Les simulations ont été mises en œuvre à l'aide du logiciel Matlab®.

1. Cartes d'infestation virtuelles

Des cartes binaires d'infestation d'adventices ont été créées en simulant des taches d'adventices par des surfaces elliptiques distribuées aléatoirement sur une parcelle rectangulaire virtuelle. Chaque parcelle a une largeur de 72 m et une longueur de 20 000 m, elle est discrétisée selon une résolution spatiale de $0,025 \times 0,025$ m / pix (*i.e.* pixels de $6,25$ cm²). La largeur de la parcelle correspond à un passage central de pulvérisateur avec une largeur de travail de 24 m et à deux passages adjacents. La zone couverte par le passage central est celle qui sera utilisée pour le calcul des indicateurs d'évaluation de la pulvérisation. La longueur de la parcelle a été choisie suffisamment grande pour assurer la convergence des valeurs calculées pour les indicateurs considérés dans l'étude (*cf.* II.3). Les formes elliptiques sur lesquelles les adventices sont supposées être présentes sont définies par leur largeur (w_e) et leur longueur (l_e). Les ellipses sont orientées telles que leurs axes principaux soient alignés avec l'axe longitudinal de la parcelle et donc la direction de passage des outils mis en œuvre dans les opérations culturales. Cette forme et cette orientation ont été choisies en posant comme hypothèse que la dispersion des semences d'adventices résultait de la combinaison de processus naturels et liés au passage des outils notamment de travail du sol et de récolte (Longchamps *et al*, 2016).

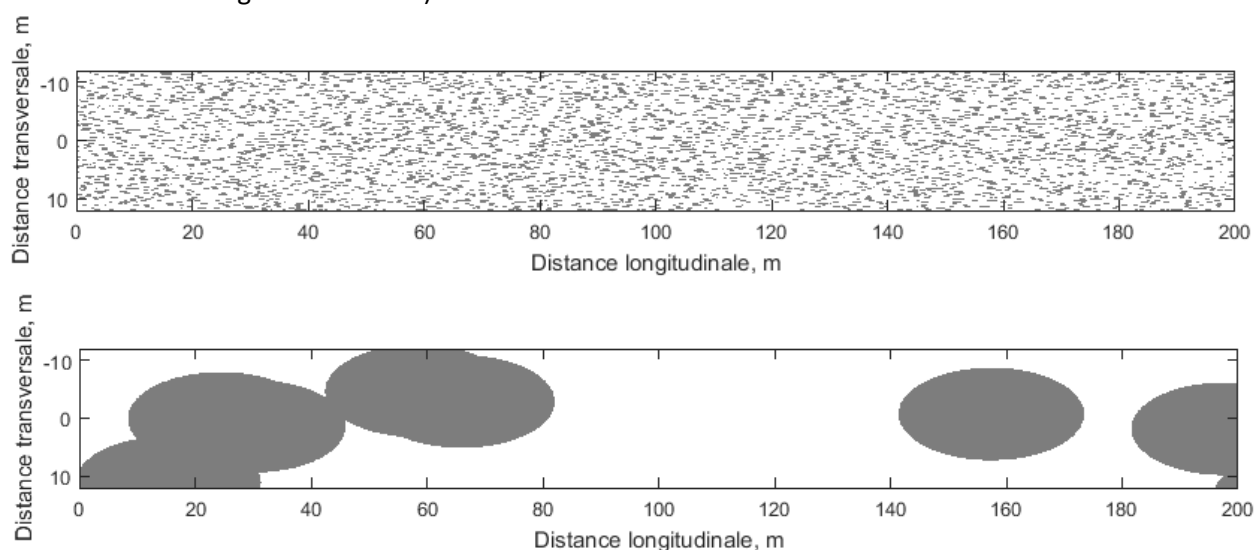
Un ensemble de parcelles a été simulé pour différents taux de couverture d'adventices fixés à 5, 10, 20, 30, 40 et 50% de la surface de la parcelle ; différentes longueurs de taches fixées à 0,5, 1, 4, 8, 16 et 32 m ; et différents rapports w_e/l_e fixés à 0,2, 0,5 et 1 (les ellipses correspondent à des cercles lorsque ce rapport est de 1). Ainsi, un ensemble de cartes d'infestation virtuelles a été créé représentant différents taux d'infestation et degrés d'agrégation.

Dans cette étude, les taches elliptiques présentes sur les cartes virtuelles d'infestation simulent des zones issues d'un processus de détection d'adventices et pour lesquelles l'application d'un herbicide a été décidée. Le processus de détection est supposé localiser parfaitement les zones infestées quelles que soient les densités d'adventices dans ces zones.

La figure 1 présente deux exemples de cartes virtuelles d'infestation obtenues pour le même taux global de couverture mais pour deux niveaux d'agrégation différents.

Figure 1 : Exemple de zones extraites de cartes d'infestation simulées pour des petites taches elliptiques ($l_e = 1$ m, $w_e = 0,2$ m) (haut) et de grandes taches elliptiques ($l_e = 32$ m, $w_e = 16$ m) (bas) avec un taux de couverture de 20 %.

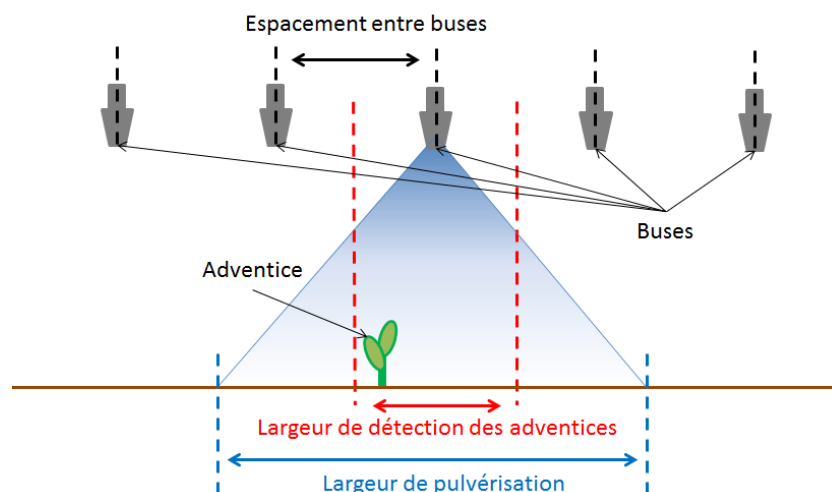
(Example of areas extracted from weed maps simulated for small ellipse ($l_e = 1$ m, $w_e = 0.2$ m) patches (upper row) and large ellipse ($l_e = 32$ m, $w_e = 16$ m) patches (bottom row) with a coverage rate of 20 %.)



2. Simulateur de pulvérisation localisée

Dans cette étude, le simulateur de pulvérisation localisée considère une rampe de pulvérisation équipée de buses espacées de 0,5 m. La rampe est divisée en tronçons contrôlés indépendamment et composés d'un nombre de buses proportionnel à la largeur du tronçon (espacement constant des buses). Des simulations ont été réalisées avec des tronçons de 1, 2, 4, 6, 12, 24 et 48 buses, correspondant à des largeurs de tronçons de 0,5 à 24 m. Concernant l'application d'herbicide, chaque tronçon est activé uniquement aux endroits où des adventices sont présentes sous la « largeur de détection » du tronçon considéré. Par exemple, dans le cas de buses contrôlées individuellement, les largeurs de détection et de pulvérisation ont été définies comme présenté sur la figure 2. Étant donné que les buses sont espacées de 0,5 m, la largeur de détection d'adventices d'un tronçon composé de N_N buses est toujours de $N_N \times 0.5$ m alors que la largeur de pulvérisation dépend de la répartition transversale de la buse considérée. Ainsi, le simulateur de pulvérisation a été conçu pour prendre en compte le recouvrement entre buses adjacentes, entre tronçons adjacents ou entre les passages adjacents du pulvérisateur. La pulvérisation d'herbicide est supposée instantanée (sans temps de réaction du système de pulvérisation) et appliquée sous forme d'un échelon (sans variation progressive de la quantité d'herbicide dans le sens du déplacement).

Figure 2 : Largeur de détection des adventices et largeur de pulvérisation dans le cas de buses commandées individuellement.
(Weed detection width and section spray width in the case of nozzles controlled individually.)



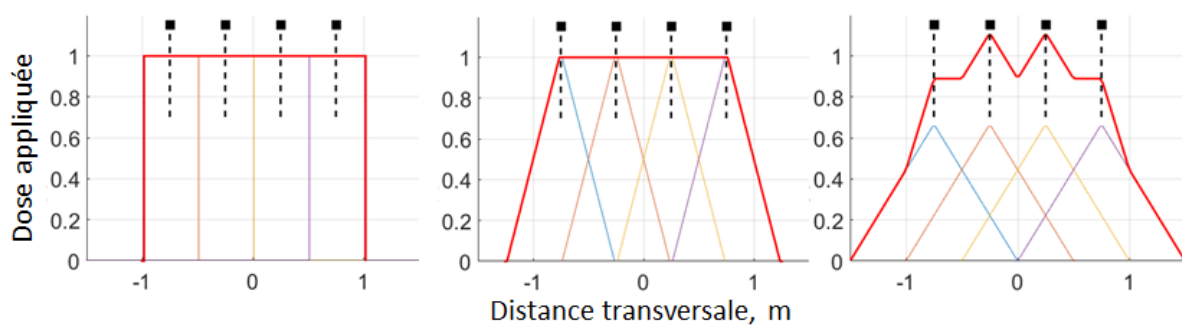
Concernant la direction orthogonale à l'avancement, trois répartitions transversales théoriques ont été simulées : i) une répartition rectangulaire avec une largeur de pulvérisation de 0,5 m (ce qui pourrait s'apparenter à une buse ayant une répartition théorique uniforme, placée à 0,6 m de hauteur), ii) une répartition triangulaire ayant une largeur de pulvérisation de 1 m (ce qui pourrait s'apparenter à une buse classique à jet plat avec un angle de pulvérisation compris entre 80 et 90°, placée à une hauteur de 0,6 m) et iii) une répartition triangulaire ayant une largeur de pulvérisation de 1,5 m (ce qui pourrait s'apparenter à une buse classique à jet plat avec un angle de pulvérisation compris entre 110 et 120°, placée à une hauteur de 0,6 m). La figure 3 présente les répartitions transversales des différentes buses considérées (*i.e.* la répartition de la quantité d'herbicide appliquée perpendiculairement au sens d'avancement) et les répartitions transversales obtenues pour un tronçon de 4 buses.

La forme de chaque répartition transversale a été choisie pour que : i) la quantité d'herbicide appliquée par buse (*i.e.* intégrale de courbe de répartition transversale) soit unitaire, en Unité Arbitraire, ii) la valeur moyenne de la dose obtenue après recouvrement soit unitaire, en Unité Arbitraire. Ainsi,

l'application d'herbicide correspond à la dose préconisée lorsque la valeur des pixels de la carte d'application est à 1 (en Unité Arbitraire). Les cartes d'application issues des simulations de pulvérisation sont calculées avec la même résolution spatiale que les cartes d'infestation (*i.e.* 0,025 x 0,025 m).

Figure 3 : Répartition transversale du produit sous les buses et dose appliquée (en Unité Arbitraire) après recouvrement (gras) pour un tronçon de 4 buses pour une répartition rectangulaire de 0,5 m de large (gauche), une répartition triangulaire de 1 m de large (centre) et une répartition triangulaire de 1,5 m de large (droite). Les carrés et pointillés noirs indiquent la position des axes verticaux des buses.

(Nozzle spray patterns and transverse application rates (in Arbitrary Unit) after overlapping (bold) for a section of 4 nozzles with rectangular pattern of 0.5 m width (left), triangular pattern of 1 m width (middle) and triangular pattern of 1.5 m width (right). Black squares and dashed lines correspond to the nozzles and their vertical axes.)



3. Indicateurs de performance

Plusieurs paramètres de sortie et indicateurs de performance ont été définis dans le but d'évaluer la réduction de l'utilisation d'herbicides ainsi que l'efficacité de l'application. Ces paramètres ont été calculés sur la surface correspondant au passage central du pulvérisateur (dont la largeur de travail est de 24 m). Les paramètres utilisés dans cette étude ont été définis comme suit :

- S_T (en m^2) est la surface de la zone étudiée, correspondant au passage central du pulvérisateur ;
- S_W (en m^2) est la surface recouverte par des adventices sur la zone étudiée ;
- $S_{W>\alpha\%}$ (en m^2) est la surface d'adventices sur laquelle la dose est supérieure à α % de la dose préconisée ;
- S_S (en m^2) est la surface pulvérisée (surface soumise à un dépôt d'herbicide) ;
- $S_{S<\beta\%}$ (en m^2) est la surface pulvérisée sur laquelle la dose est inférieure à β % de la dose préconisée ;
- Q_S (en L) est la quantité d'herbicide utilisée dans le cas d'une application localisée ;
- Q_T (en L) est la quantité d'herbicide utilisée dans le cas d'une pulvérisation uniforme, à la dose préconisée, sur l'intégralité de la surface de la zone étudiée.

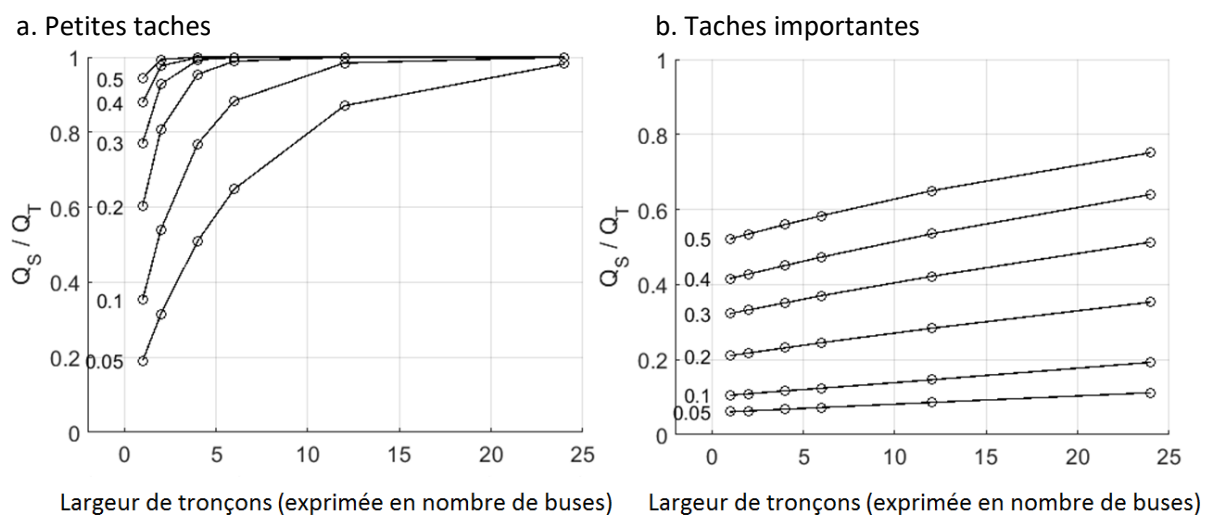
Ces indicateurs ont été utilisés pour calculer les ratios (sans dimension) suivants : S_S/S_T , Q_S/Q_T , $S_{W>85\%}/S_W$ et $S_{S<50\%}/S_S$. Dans cet article, les seuils α et β ont été fixés arbitrairement à 85 % et 50 % pour fournir des indicateurs simples, liés à la proportion d'adventices recevant une dose d'herbicide jugée suffisamment élevée pour être létale et, d'autre part, à la proportion de superficie exposée à une dose sublétales et présentant ainsi des conditions pouvant potentiellement contribuer au développement de résistance en particulier non liée à la cible. La valeur du seuil α a été choisie de telle sorte qu'elle soit inférieure à la valeur minimale de la dose obtenue après recouvrement (Figure 3).

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Réduction de la quantité d'herbicides

Les résultats de simulations ont tout d'abord été utilisés pour étudier l'évolution du ratio de quantité d'herbicide pulvérisée (Q_S/Q_T) en fonction des différents paramètres d'entrée. Pour des valeurs constantes de taux de couverture d'adventices, de largeur de tronçon et de répartition transversale, les simulations ont montré que le ratio de quantité pulvérisée Q_S/Q_T ne dépend que de la largeur des taches, peu importe leurs longueurs dans le sens d'avancement. Ce résultat s'explique par le fait que : i) le nombre de tronçons activés ne dépend que de la largeur des taches et ii) la surface cumulée des taches d'adventices est constante pour un taux d'infestation donnée. Ainsi, les simulations confirment que la caractéristique la plus importante des formes des taches d'adventices est leur largeur dans la direction perpendiculaire au sens d'avancement. Cependant, dans ce travail, les formes elliptiques des taches étaient allongées dans le sens d'avancement du pulvérisateur. Des simulations supplémentaires seront donc nécessaires pour étendre les conclusions concernant l'impact de la forme des taches (pour un taux de couverture d'adventices donné) sur le potentiel de réduction de l'utilisation des herbicides. Pour deux tailles de taches, la figure 4 illustre l'évolution du ratio de quantité pulvérisée (Q_S/Q_T) en fonction de la largeur des tronçons de rampe et du taux de couverture des adventices. Calculées pour les trois répartitions transversales de buses (*i.e.* rectangulaire de 0,5 m de largeur, triangulaire de 1 m de largeur ou triangulaire de 1,5 m de largeur) les courbes donnant le ratio Q_S/Q_T en fonction de la largeur des tronçons se superposent toutes pour une forme de tache et un taux de couverture donné. Ce résultat est lié au choix des répartitions transversales (figure 3) qui ont été faits pour éviter les biais lors des comparaisons (même quantité appliquée par chaque buse et même dose appliquée après recouvrement).

Figure 4 : Ratio de quantité appliquée en fonction de la largeur des tronçons (exprimée en nombre de buses) pour (a) de petites taches ($l_e = 1$ m, $w_e = 0.2$ m) et (b) de taches importantes ($l_e = 32$ m, $w_e = 16$ m). Le taux de couverture est indiqué à côté des courbes.
(Sprayed amount ratio with respect to section width (expressed in number of nozzles) for (a) small ellipse patches ($l_e = 1$ m, $w_e = 0.2$ m) and (b) large ellipse patches ($l_e = 32$ m, $w_e = 16$ m). The coverage rate is indicated next to the curves.)



La figure 4 montre clairement que le ratio Q_S/Q_T augmente avec la largeur de tronçon et le taux de couverture d'adventices. De plus, en considérant un même taux de couverture, la réduction de l'utilisation d'herbicide est plus importante dans le cas de grandes taches. La taille des taches affecte

directement la sensibilité de la réduction d'herbicide à la largeur de tronçons et au taux de couverture d'adventices. Par exemple, dans le cas de petites taches ($l_e = 1$ m, $w_e = 0,2$ m) avec un faible taux de couverture de 5%, la quantité d'herbicide requise est très sensible à la largeur des tronçons : le ratio Q_S/Q_T est seulement de 20 % pour des tronçons composés d'une seule buse alors qu'il est de 50 % pour des tronçons de 4 buses et de 90 % pour des tronçons de 12 buses. De plus, dans le cas de petites taches, le ratio Q_S/Q_T augmente rapidement avec le taux d'infestation : il atteint environ 60 % et 90 % pour des tronçons respectivement de 1 et 4 buses, quand le taux de couverture est de 20 %. Dans le cas de grandes taches ($l_e = 32$ m, $w_e = 16$ m), la réduction de l'utilisation d'herbicide est plus importante, quels que soient la largeur des tronçons et le taux de couverture considérés. Par ailleurs, la différence observée sur le ratio Q_S/Q_T lors de l'utilisation de petites ou de grandes largeurs de tronçons est fortement réduite. Par exemple, quand le taux de couverture d'adventices est de 10 %, le ratio Q_S/Q_T est de 10 % avec des tronçons composés d'une seule buse, de 15 % avec des tronçons de 12 buses et un peu moins de 20 % avec des tronçons de 24 buses. De plus, la plage de variation de ce ratio diminue avec la largeur des taches. Par exemple, pour un taux de couverture des adventices de 50 %, dans le cas de grandes taches ($l_e = 32$ m, $w_e = 16$ m), le ratio Q_S/Q_T est d'environ 52 % avec des tronçons composés d'une seule buse, de 63 % avec des tronçons de 12 buses et de 75 % pour des tronçons de 24 buses (Figure 4).

2. Risques de sous dosage

Pour une carte d'infestation donnée et une largeur de tronçons fixée, les précédents résultats ont montré que les trois répartitions transversales de pulvérisation (Figure 3) permettent d'obtenir la même réduction d'herbicide. Pour compléter les comparaisons, il est important d'examiner également comment la répartition transversale affecte la dose appliquée par rapport à la dose préconisée en quantifiant les zones de sous-dosage.

Dans le cas d'une répartition purement rectangulaire, le taux d'application théorique est le même sur toute la surface pulvérisée, quel que soit le nombre de buses adjacentes activées simultanément. Cette situation serait celle d'une buse produisant une répartition parfaitement uniforme (cas d'une buse théorique de type « Even »). Dans le cas de répartitions triangulaires, représentant la plupart des buses classiques à jet plat, la répartition sous la buse est nécessairement plus large et la dose appliquée est plus faible que la dose préconisée au niveau où les recouvrements sont limités voire inexistants. Dans le cas d'adventices réparties en petites taches ($l_e = 1$ m, $w_e = 0.2$ m), les figures 5 et 6 montrent l'incidence de la largeur de tronçons sur la proportion de surface sous-dosée. Deux ratios de surface ont été calculés pour analyser ces sous-dosages : la proportion de la surface d'adventice sur laquelle la dose est supérieure à 85% de la dose préconisée ($S_{W>85\%}/S_W$) et la proportion de surface traitée recevant moins de la moitié de la dose recommandée ($S_{S<50\%}/S_S$).

Le rapport $S_{W>85\%}/S_W$ diminue lorsque les tronçons sont moins larges et lorsque la répartition transversale des buses individuelles est plus large (*i.e.* 1,5 m) (Figure 5). Dans le cas d'adventices disséminées en petites taches, une proportion importante de la surface d'adventices pourrait donc recevoir une dose d'herbicide inférieure à la dose préconisée. Par exemple, avec une répartition triangulaire large (1,5 m), la proportion de la surface d'adventices exposée à une dose supérieure à 85% de la dose recommandée peut chuter en dessous de 50% lorsque les buses sont contrôlées individuellement.

Figure 5. Ratio $S_{S<50\%}/S_S$ de surface exposée à une dose d'herbicide inférieure à 50% de la dose préconisée dans le cas de petites taches d'adventices ($l_e = 1$ m, $w_e = 0,2$ m) et d'une pulvérisation avec une répartition triangulaire d'une largeur de 1 m (a) ou 1,5 m (b). Le taux de couverture est indiqué à côté des courbes.

(Ratio of sprayed surface on which the application rate is lower than 50% of the rated dosage in the case of small patches ($l_e = 1$ m, $w_e = 0.2$ m) and triangular spray patterns with spray width of 1 m (a) and 1.5 m (b). The coverage rate is indicated next to the curves.)

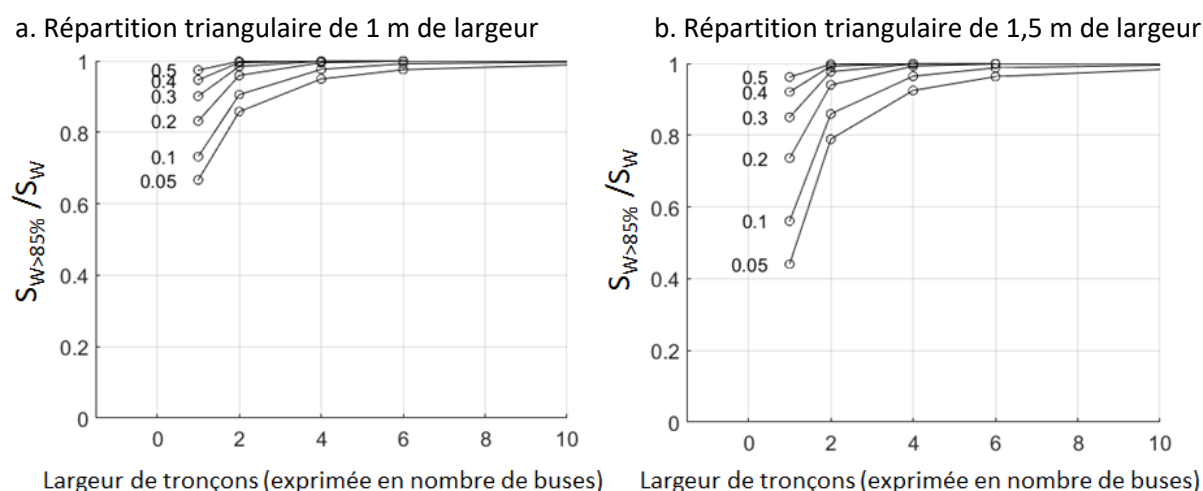
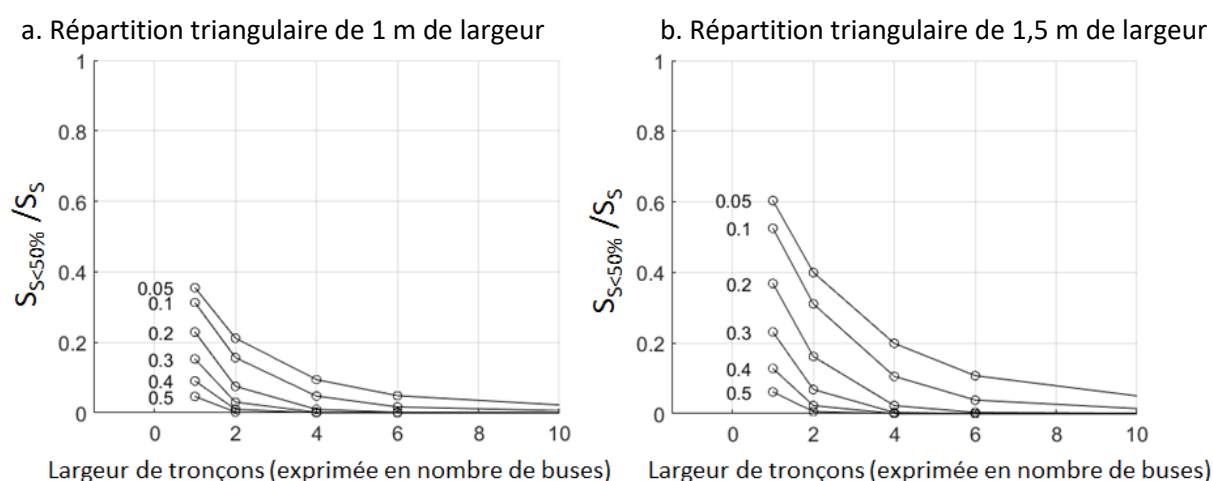


Figure 6 : Ratio $S_{S<50\%}/S_S$ de surface d'adventices exposée à une dose d'herbicide supérieure à 85% de la dose préconisée dans le cas de petites taches d'adventices ($l_e = 1$ m, $w_e = 0,2$ m) et d'une pulvérisation avec une répartition triangulaire d'une largeur de 1 m (a) ou 1,5 m (b). Le taux de couverture est indiqué à côté des courbes.

(Ratio of weed surface on which the application rate is higher than 85% of the rated dosage in the case of small patches ($l_e = 1$ m, $w_e = 0.2$ m) and triangular spray patterns with spray width of 1 m (a) and 1.5 m (b). The coverage rate is indicated next to the curves.)



Pour la même distribution d'adventices, la proportion de surface pulvérisée recevant moins de la moitié de la dose préconisée est non négligeable et augmente lorsque la largeur des tronçons est réduite et que la répartition transversale des buses individuelles est plus large (Figure 6). Le rapport $S_{S<50\%}/S_S$ atteint ainsi 60% dans le cas de buses commandées individuellement avec une répartition transversale triangulaire de 1,5 m de large (Figure 6). L'application d'herbicide à dose réduite et non

létale sur certaines surfaces est à examiner avec attention au regard des conditions génératrices de risque de développement de résistance en particulier non liée à la cible.

À ce stade, diverses solutions peuvent être envisagées pour réduire la proportion de surface soumise à un sous-dosage telles que l'augmentation de la dose appliquée localement lorsque des buses indépendantes ou des sections étroites sont activées (*i.e.* situations avec faibles recouvrements) ; l'élargissement de la section de pulvérisation de part et d'autre de la zone de détection d'adventices ; la sélection automatique de buses à distribution uniforme en cas d'activation de buses individuelles et en absence de recouvrement.

CONCLUSION

L'utilisation de cartes d'infestation virtuelles et d'un simulateur de pulvérisation est un moyen pertinent pour étudier des paramètres susceptibles d'influencer sur le niveau d'économies d'herbicide qui peuvent être attendues par la mise en œuvre d'un traitement localisé asservi à la présence des adventices. L'étude a montré que la réduction d'herbicide obtenue par la réduction de la largeur des tronçons de pulvérisations (commandés indépendamment) est fortement influencée par le taux d'infestation et la répartition spatiale des adventices. Le choix de tronçons à haute résolution spatiale, constitués d'une à quelques buses, apparaît ainsi nécessaire pour réduire significativement la quantité d'herbicide dans le cas d'adventices très dispersées sur toute la parcelle alors que des tronçons de largeur modérée sont suffisants dans le cas de distributions en taches de plus grande taille.

Par ailleurs l'étude montre que la mise en œuvre de pulvérisateur à haute résolution doit s'accompagner d'une réflexion sur les variations locales de doses sur les surfaces traitées. En effet, la pulvérisation d'herbicide au moyen de buses individuelles à « distribution latérale non-uniforme » ou de petits tronçons commandés indépendamment induit une augmentation de la proportion de surface traitée exposée à des sous-dosages (potentiellement préjudiciables au regard du contrôle des adventices et de l'induction de phénomène de résistance aux herbicides). L'utilisation des simulations a notamment permis de mettre en évidence l'influence combinée du choix de la buse (répartition du produit sous la buse), de la largeur du tronçon et de la répartition des adventices sur la proportion des surfaces sous-dosées. Le modèle de pulvérisation localisée et l'approche par expérimentations virtuelles pourront également être mis à profit pour évaluer les stratégies permettant potentiellement de réduire ces sous-dosages (augmentation locale de dose, sélection automatique de buse, ...).

Les évolutions envisagées pour le simulateur de pulvérisation localisée concernent l'amélioration de la modélisation de la répartition des adventices, l'intégration de répartitions transversales expérimentales ainsi que la définition de marges de sécurité autour des adventices cibles.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été soutenu par l'institut national supérieur des sciences agronomiques, de l'alimentation et de l'environnement (AgroSup Dijon), l'Unité Mixte de Recherche Agroécologie (AgroSup Dijon, Inra, Univ. Bourgogne Franche-Comté) et l'institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea).

BIBLIOGRAPHIE

- Franco C., Pedersen S. M., Papaharalampos H., Ørum J. E., 2017 - The value of precision for image-based decision support in weed management. *Precision Agriculture*, 18, 3, 366-382.
- Gerhards R., Oebel H., 2006 - Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying *Weed Research*, 46, 3, 185-193.
- Gutjahr C., Sokefeld M., Gerhards R., 2012 - Evaluation of two patch spraying systems in winter wheat and maize. *Weed Research*, 52, 6, 510-519.

- Lee W. S., Slaughter D., Giles D., 1999 - Robotic weed control system for tomatoes. *Precision Agriculture*, 1, 1, 95-113.
- Longchamps L., Panneton B., Reich R., Simard M.-J., Leroux G. D., 2016 - Spatial Pattern of Weeds Based on Multispecies Infestation Maps Created by Imagery. *Weed Science*, 64, 3, 474-485.
- Nordmeyer H., 2006 - Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals. *Precision Agriculture*, 7, 3, 219-231.
- Stafford J., Miller P., 1993 - Spatially selective application of herbicide to cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 9, 3, 217-229.
- Timmermann C., Gerhards R., Kühbauch W., 2003 - The Economic Impact of Site-Specific Weed Control. *Precision Agriculture*, 4, 3, 249-260.
- Weis M., Gutjahr C., Ayala V. R., Gerhards R., Ritter C., Schölderle F., 2008 - Precision farming for weed management: techniques. *Gesunde Pflanzen*, 60, 4, 171-181.