



HAL
open science

Des technologiques innovantes pour optimiser le désherbage de précision

Thibault Maillot, Gawain Jones, Jean-Baptiste Vioix, Nathalie Colbach

► To cite this version:

Thibault Maillot, Gawain Jones, Jean-Baptiste Vioix, Nathalie Colbach. Des technologiques innovantes pour optimiser le désherbage de précision. *Innovations Agronomiques*, 2020, 81, pp.101-116. 10.15454/3t27-5f37 . hal-03256904

HAL Id: hal-03256904

<https://hal.inrae.fr/hal-03256904v1>

Submitted on 10 Jun 2021

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Des technologies innovantes pour optimiser le désherbage de précision

Maillot T.¹, Jones G.¹, Vioix J.-B.¹, Colbach N.¹

¹ UMR Agroécologie, AgroSup Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon

Correspondance : thibault.maillot@agrosupdijon.fr

Résumé

Dans un objectif de réduction de l'intensité d'usage des herbicides, la variabilité intra-parcellaire des adventices peut être prise en compte pour effectuer un désherbage de précision : la pulvérisation n'est effectuée qu'aux endroits où les adventices sont présentes. Avant d'effectuer cette pulvérisation localisée, il faut être en mesure de détecter, voire cartographier, les adventices. L'information de présence d'adventices est utilisée pour commander un système de pulvérisation afin d'apporter l'herbicide seulement aux endroits où cela est nécessaire.

Dans cet article, après une présentation de méthodes de détection des adventices utilisées dans le projet ANR CoSAC, deux stratégies permettant la gestion d'un désherbage de précision sont présentées : 1) un système de pulvérisation localisée, basé sur une solution commerciale, qui permet de détecter et d'appliquer le produit herbicide, en un seul passage ; 2) un système de pulvérisation basé sur la construction d'une carte de présence d'adventice, utilisable a posteriori pour contrôler l'ouverture et la fermeture des tronçons de rampe d'un pulvérisateur.

Enfin, la durabilité et l'efficacité de ce type de désherbage sont évaluées à l'aide du modèle de « parcelle virtuelle » FLORSYS qui simule le développement des adventices et cultures en fonction du système de culture et de la météo.

Mots-clés : Pulvérisation localisée, Gestion des adventices, Traitement d'images, Simulation numérique

Abstract : Innovative technologies to optimize precision spraying

The reduction of herbicide use intensity can benefit from the patchy distribution of weeds in fields by shifting from whole-field to precision spraying. Herbicides are then only applied where weeds are present. To do this, we need to detect and map weeds in fields. The resulting weed presence information is then used to direct a spraying system in order to apply herbicides only where needed.

This paper first presents the weed-detection methods used in the ANR CoSAC project (aiming to design sustainable weed management strategies in a changing context) and then two precision-spraying systems: 1) an autonomous system based on a commercial solution (the WeedSeeker system by Trimble) which detects weeds and sprays the herbicide in a single passage, 2) a system based on establishing a weed-presence map which is used a posteriori to control the opening and closure of nozzles on the sprayer booms. For this second method, only the weed mapping part will be presented.

Finally, the long-term sustainability and efficiency of precision spraying was evaluated with simulations with the virtual-field models which predicts multiannual weed dynamics and crop production at a daily time step from cropping-system inputs and weather data.

Keywords : Patch spraying, Weed management, Image processing, Numerical simulations.

Introduction

Le concept d'agriculture de précision a vu le jour à la fin des années 1980 avec l'idée que, en grande culture, la parcelle n'était pas nécessairement l'unité adaptée pour construire un itinéraire technique du fait d'une variabilité non négligeable au sein de celle-ci. Bien que déjà connue, la caractérisation et l'exploitation de cette variabilité a été rendue possible par le développement de technologies permettant l'acquisition de connaissances sur les systèmes de production agricole (Tisseyre, 2012). Ces technologies peuvent être regroupées en trois catégories :

- Des systèmes de mesure, fixes ou embarqués, permettant de collecter de l'information sur la culture et son environnement,
- Un système de positionnement absolu par satellite permettant la géolocalisation des données (GPS),
- Un ensemble de systèmes permettant de stocker, traiter, visualiser et d'échanger les données obtenues.

L'objectif principal de cette obtention de connaissances est de permettre la spatialisation des opérations culturales en modulant et/ou en localisant les apports. Une nouvelle définition de cette agriculture de précision a été proposée par l'ISPA (International Society for Precision Agriculture) :

*"Precision Agriculture is a management strategy that gathers, processes and analyzes temporal, spatial and individual data and combines it with other information to support management decisions according to estimated variability for improved resource use efficiency, productivity, quality, profitability and sustainability of agricultural production."*¹

Plusieurs étapes de l'itinéraire technique peuvent être spatialisées si la variabilité intra-parcellaire le justifie. La fertilisation azotée est, aujourd'hui, l'opération culturale la plus modulée (Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019), elle permet d'optimiser l'usage des intrants en réduisant l'impact de ces apports sur l'environnement. La gestion des adventices, majoritairement chimique dans les agricultures industrialisées, est également une opération pour laquelle l'agriculture de précision peut permettre la diminution de l'usage de produit. En effet, les adventices sont majoritairement réparties en taches à l'intérieur de chaque champ (Rew et Cousens, 2001). Cette diminution a un impact direct sur les charges attenantes à la production agricole ainsi que sur l'impact environnemental de celle-ci, les herbicides étant aujourd'hui un polluant majeur des eaux souterraines et superficielles (Dubois et Lacouture, 2011). La diminution de l'usage de produits phytosanitaires a donc des conséquences économiques, environnementales, sanitaires et devrait également limiter l'apparition de résistances à ces produits pour les adventices ciblées (Aubertot et al., 2007 ; Baldi et al., 2013 ; Butault et al., 2011).

L'agriculture de précision appliquée à la gestion des adventices consiste à localiser les apports de produits phytosanitaires sur les adventices préalablement détectées. Différentes étapes sont nécessaires pour arriver à ce résultat :

- L'acquisition de données provenant du champ à traiter, souvent sous forme d'images ou de signal optique,
- Le traitement de données, permettant de faire la distinction entre végétation et sol puis entre cultures et adventices,
- La création d'une carte d'application tenant compte de la précision des données et du matériel,
- L'application localisée, nécessitant l'usage d'un pulvérisateur adapté.

¹ L'agriculture de précision est une stratégie de gestion qui rassemble, traite et analyse, les données spatiales, temporelles et individuelles et les combine avec d'autres informations pour orienter les décisions de gestion en fonction de la variabilité en vue d'améliorer l'efficacité des ressources, la productivité, la qualité, la rentabilité, et la durabilité de la production agricole.

Deux grandes stratégies existent pour mener à bien ces différentes étapes. La première consiste à les effectuer « en ligne », ou « en temps-réel », et mobilise les technologies les plus simples pour permettre un traitement instantané. La seconde stratégie dite « différée » sépare les trois premières étapes de l'étape d'application et permet de mobiliser des données et des méthodes nécessitant un temps de traitement plus important. Dans la suite, ces deux stratégies seront présentées et leurs impacts sur la population adventices évalués par simulation. L'architecture de cet article suit les différentes étapes présentées ci-dessus : après avoir présenté l'acquisition et le traitement des données pour la création d'une carte d'application, l'application localisée sera évaluée, par simulation numérique.

1. Systèmes optiques pour la détection des adventices

L'apparition des drones (véhicules aériens sans pilote embarqué, plus ou moins autonome) dans les années 2000 a permis d'obtenir rapidement des images aériennes avec une résolution satisfaisante. Cette solution évitait le passage d'un engin à roues (quad, ...) dans les parcelles. Des premiers travaux ont été faits avec des appareils photographiques argentiques et une numérisation (par un scanner) des pellicules (Everitt et al., 1992). Les appareils photographiques numériques les ont très vite remplacés. Ces capteurs fournissent des images proches de la perception humaine, donc dans le spectre de la lumière visible (Everitt et al., 1995, 1992).

Des capteurs dédiés aux problématiques agronomiques ont rapidement été étudiés pour profiter des particularités des plantes (Backes et Jacobi, 2006 ; Lamb et al., 1999). La réflectance des plantes étant beaucoup plus importante dans le proche infra-rouge (Bousquet, 2007).

Sur les images acquises, afin de détecter les adventices présentes, trois classes d'objets doivent être identifiées : le sol nu, les cultures et les adventices. Dans la majorité des travaux, un traitement en deux étapes est effectué : 1) séparation des pixels de sol et de végétation puis 2) identification des cultures et des adventices dans la végétation.

1.1 Discrimination sol/végétation

La séparation du sol et de la végétation doit être suffisamment robuste pour pouvoir traiter de nombreux types de sol et de végétation. Les nuances de sols peuvent être très variées : craies très claires, argiles (jaunes, vertes...), foncés (matières organiques) ... A cela s'ajoute la présence éventuelle de pierres ou de résidus végétaux... Le sol présente donc de grandes variations chromatiques qui seront difficiles à exploiter.

Dans les premiers travaux, seules des images acquises dans le visible étaient disponibles. Plusieurs auteurs ont développé des indices de végétation, calculés à partir des informations chromatiques, pour reconnaître la végétation (Bannari et al., 1995). La prédominance de la couleur verte par rapport à la couleur rouge était utilisée (Woebbecke et al., 1995). L'utilisation de système d'acquisition adapté aux problématiques agronomiques a permis de prendre en compte d'autres informations comme la réflectance dans le proche infrarouge et un indice de végétation qui la mobilise : le NDVI - Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al., 1973 ; Tucker, 1979).

La scène observée, *i.e.* le champ, est éclairée par le soleil qui émet sur un spectre bien plus large que celui du domaine visible. La perception d'un objet éclairé (ici, la plante ou le sol) dépend du spectre de la lumière reçue par celui-ci. Ainsi, de nombreux indices sont basés sur le calcul de réflectance qui est défini comme le rapport entre le flux lumineux réfléchi par l'objet et le flux lumineux qu'il a reçu. Les végétaux absorbent une grande partie de la lumière visible mais reflètent majoritairement la lumière infra-rouge. Des dispositifs d'acquisition utilisant cette caractéristique ont été développés au début des années 2000 (Vioix, 2004). Les images comportent alors une « couleur » supplémentaire : le proche infra-rouge (longueur d'onde comprise entre 650 et 900 nm). Cette information était déjà exploitée dans les satellites

d'observation comme SPOT (Chevrel et al., 1981). En utilisant ces nouvelles informations chromatiques, de nouveaux indices de végétation ont été développés (Meyer et Neto, 2008). L'indice le plus utilisé dans des applications agronomiques est le NDVI, calculé en utilisant la formule suivante :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

avec PIR, la réflectance (sans unité) mesurée dans le proche infra-rouge, et R, la réflectance mesurée dans le rouge. Les végétaux ayant une réflectance élevée dans le proche infra-rouge (alors qu'ils absorbent les radiations rouges), le NDVI est élevé et positif pour ces derniers. La Figure 1 montre ainsi ces étapes sur une parcelle de maïs. Pour chaque pixel de cette image, le NDVI a été calculé. Une opération de seuillage a ensuite été effectuée pour n'afficher, à droite, que les pixels représentant de la végétation, en blanc. On y distingue bien les rangs de maïs et des adventices de différentes tailles et formes dans l'inter rang.

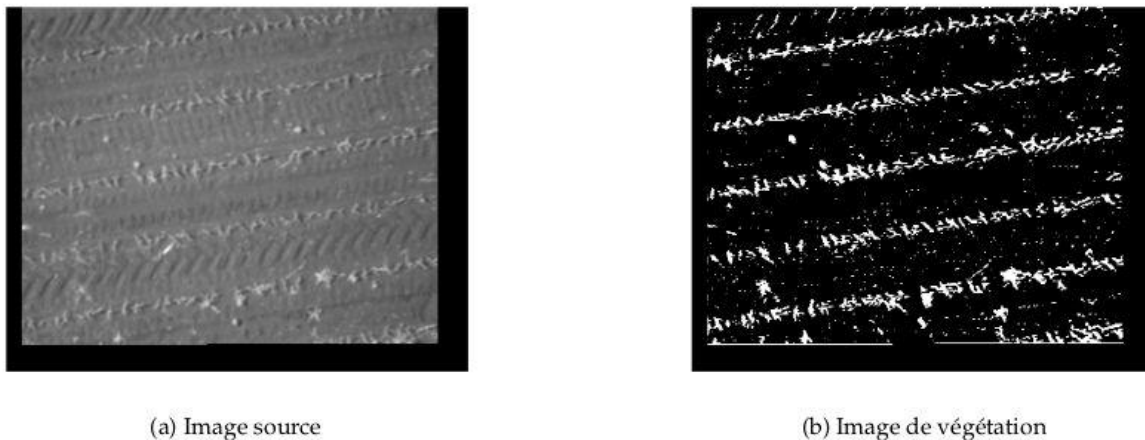


Figure 1 : Image d'une parcelle de maïs (juin 2003), en niveau de gris (a) et résultat d'une détection de la végétation, par seuillage, sur l'indice NDVI calculé (b). Sur l'image de résultat (b), les pixels représentant de la végétation sont en blanc.

1.2 Discrimination culture/adventice

Chaque pixel détecté comme étant un élément de la végétation peut, en réalité, représenter un individu de types d'espèces ou classes différentes : culture et adventice. Les réponses spectrales des différentes espèces de plantes étant très proches, la séparation de ces deux classes est plus difficile que la séparation du sol et de la végétation. Cependant, il est possible, dans certains cas, de séparer les cultures des adventices en utilisant les informations spectrales. Par exemple, dans le proche infra-rouge, il existe des différences entre les plantes monocotylédones et dicotylédones (Bousquet, 2007 ; Gausman, 1985 ; Rabatel et al., 2011). Ces différences sont toutefois plus difficiles à exploiter sur des images acquises en conditions non contrôlées et demandent la mise en place d'algorithmes plus complexes. De plus, la discrimination n'est possible que si les adventices n'appartiennent pas au même clade (*i.e.* monocotylédones vs dicotylédones) que les cultures. Dans la suite, deux situations de discrimination cultures/adventices sont présentées : dans l'inter-rang et sur le rang.

1.2.1 Inter-rang

Les cultures sont généralement semées en lignes avec un espacement régulier entre les rangs. Deux approches algorithmiques ont été proposées à partir de ces informations : détecter les éléments régulièrement espacés (les cultures sont semées à intervalles réguliers) ou détecter des lignes (les cultures sont semées en rangs). Sur l'image de végétation construite en Figure 1, les éléments répartis

périodiquement dans l'image peuvent être distingués en utilisant la transformée de Fourier : un outil mathématique permettant d'extraire l'information fréquentiel d'un signal ou d'une image (Gasquet et Witomski, 2000). Il est ensuite possible de réaliser une opération de filtrage pour ne conserver que les points appartenant à des structures répétitives. La Figure 2 présente le résultat de cette opération de filtrage appliqué sur l'image de végétation de la Figure 1. Les couleurs chaudes (rouge, orange, ...) représentent les points appartenant à une structure répétitive, ce sont principalement des cultures (et les adventices présentes dans le rang). Les couleurs plus froides (bleue, ...) sont les points de végétation qui ne sont pas dans des structures répétitives (les rangs) et sont donc considérés comme des adventices.

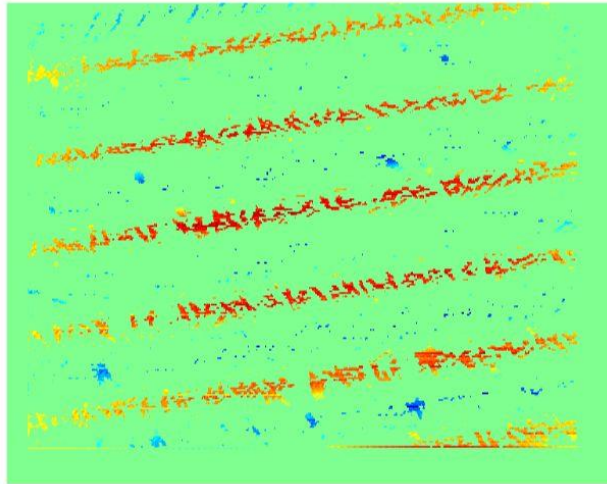


Figure 2 : Détection des lignes de semis par filtrage appliqué à l'image de la végétation de la Figure 1. Les couleurs chaudes (rouge, orange, ...) représentent les points appartenant à une structure répétitive (les rangs). Les couleurs plus froides (bleue, ...) sont les points de végétation qui ne sont pas dans des structures répétitives.

La détection de lignes dans les images peut aussi être réalisée avec la transformée de Hough (Duda et Hart, 1972 ; Hough, 1962), un outil mathématique permettant de détecter, dans des images, des structures géométriques (lignes, cercles, éclipses). Sur une image de végétation, les structures linéaires sont recherchées et identifiées comme étant les lignes de semis. Les éléments de végétation n'appartenant pas à ces structures sont considérés comme étant des adventices.

Les deux approches présentées ci-dessus ne peuvent détecter que les adventices présentes hors du rang de cultures. De même, si la culture est trop développée, les rangs n'apparaissent plus et ces deux approches sont alors inefficaces. Ces approches ne sont donc adaptées que pour des détections précoces d'adventices, dans des cultures à inter-rang large. Des méthodes plus complexes doivent alors être utilisées plus tard dans le cycle de la culture, comme celles faisant la distinction, dans le rang, entre les plants de cultures et les adventices.

1.2.2 Intra-rang

Afin de permettre la détection des adventices sur le rang nous avons besoin de caractéristiques discriminantes supplémentaires et la signature spectrale des plantes peut remplir ce rôle (Boochs et al., 1990 ; Gausman, 1985 ; Smith et al., 2004). Pour réaliser cette classification deux grandes familles d'algorithmes existent : les méthodes supervisées et celles qui ne le sont pas. Les méthodes supervisées permettent une classification plus fine d'objets ayant des caractéristiques proches mais nécessitent une base de données exhaustive, générée manuellement, de ces caractéristiques pour fonctionner. Il est complexe de créer une base de données adaptée à un grand nombre de situations agronomiques tenant compte de la diversité des cultures et adventices associées, des stades de végétation, des stress hydrique/azoté...

Dans le cadre du projet CoSAC, nous avons proposé une approche permettant d'utiliser la puissance des méthodes supervisées sans avoir la contrainte de la création manuelle de la base de données normalement nécessaire (Louargant et al., 2018). Une première étape consiste à utiliser l'information spatiale (les cultures sont semées en rangs) pour définir trois premières classes (Culture, Adventices et Non déterminé) et construire automatiquement une base de données à l'aide des deux premières classes. Cette base de données est ensuite utilisée lors de la deuxième étape pour affiner la séparation culture/adventices sur le rang (Figure 3).

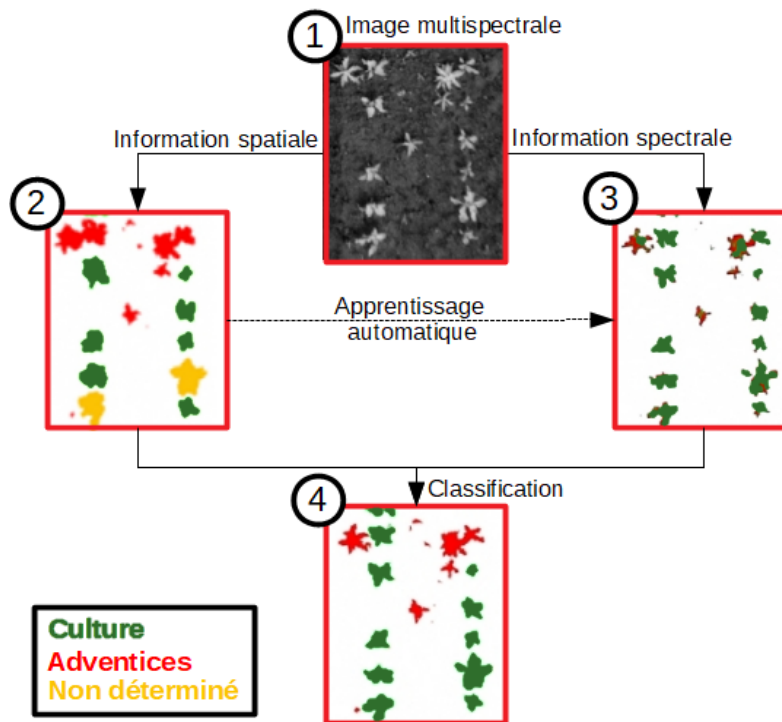


Figure 3 : Démarche générale pour la détection non-supervisée des adventices à l'aide d'une combinaison de l'information spatiale et spectrale. Utilisation d'une image multispectrale (1) puis première séparation culture/adventices à l'aide de l'information spatiale (2) permettant la création automatisée d'une base de données utilisée pour discriminer culture et adventice à l'aide d'informations spectrales (3). La combinaison des résultats obtenus en (2) et (3) permet la classification finale obtenue en (4).

Cette méthode a été évaluée en comparant les résultats de la discrimination automatisée à ceux obtenus par une discrimination manuelle par un humain ("vérité terrain") sur 14 images prises en cultures de betteraves et de maïs. Les images ont été prises à l'aide d'un capteur multispectral installé sur une perche représentant des informations chromatiques dans le visible et le proche infra-rouge (550 [40] nm, 660 [40] nm, 735 [10] nm et 790 [40] nm) avec une haute résolution spatiale (6 mm/pixel pour une hauteur de 3 m). La vérité terrain manuelle a été réalisée en délimitant et étiquetant manuellement sur les photos chaque ensemble de pixels de végétation comme Culture ou Adventice (Tableau 1).

La combinaison de l'information spatiale et spectrale offre des résultats intéressants avec une augmentation de +10% du taux de pixels d'adventices correctement détectés par rapport à la méthode spatiale utilisée seule. Cette meilleure détection réduit donc le risque d'oublier de pulvériser des adventices. Cela se fait au détriment de la qualité de classification des cultures (-18%) détectées comme adventices, avec une surconsommation d'herbicides en pulvérisant des zones indemnes d'adventice. Dans l'objectif d'une pulvérisation localisée, cette sur-détection associée à une meilleure détection des adventices est préférable afin de ne pas prendre de risque de contrôle insuffisant des adventices.

Tableau 1 : Résultats de classification sur 14 images de maïs et de betteraves avec μ_{TVC} le taux moyen de détection des cultures et μ_{TVA} le taux moyen de détection des adventices.

Méthodes pour images avec une résolution de 6 mm/pixel	μ_{TVC}	μ_{TVA}	Moyenne
Spatiale	96%	83%	89%
Combinaison spatiale et spectrale	78%	93%	86%

2. Systèmes pour une pulvérisation localisée

Dans la suite, nous considérerons qu'un système de pulvérisation localisée désigne un couple formé d'un système de détection d'adventices et d'un système de pulvérisation. Dans cette partie, deux systèmes de pulvérisation localisée sont présentés.

2.1 Construction et utilisation d'une carte de présence d'adventice

Les méthodes de classification vues dans les parties précédentes ne permettent pas une pulvérisation localisée en parcelles et une carte de préconisation doit être construite pour cela. Cette carte doit être adaptée aux spécificités du pulvérisateur utilisé (largeur de rampe/tronçons, temps de latence d'ouverture de buses) et doit également prendre en compte les erreurs de positionnement dues à la précision du système de positionnement utilisé lors de l'acquisition des images. Un travail conduit avec la société Airinov (Louargant, 2016) a permis de définir une zone tampon de 5 m de rayon autour des adventices (2 m de marge d'erreur associée au processus de création de l'orthophotographie², 0.50 m issu de l'incertitude du positionnement de la machine et 2.50 m provenant de la dynamique d'ouverture des buses). La Figure 4 montre le passage d'une orthophotographie représentant les variations d'un indice NDVI, dans une parcelle, à une carte de préconisation intégrant ces zones tampon.

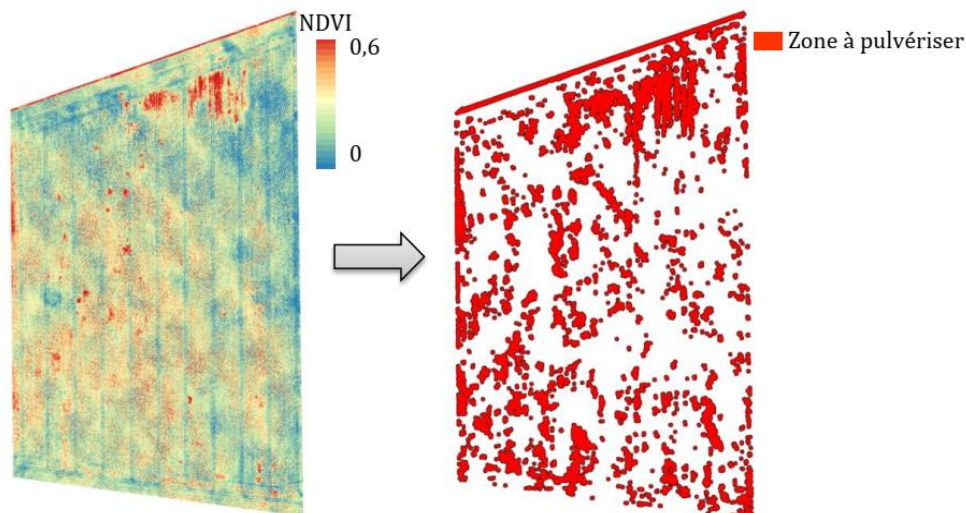


Figure 4 : Orthophotographie de maïs (printemps 2016) en NDVI (à gauche) et carte de préconisation de pulvérisation (à droite).

² Assemblage d'images aériennes rectifiées géométriquement et égalisées radiométriquement.

Cette zone tampon est peu problématique pour des parcelles essentiellement infestées par des adventices regroupées mais elle engendre une augmentation importante de la surface traitée pour des adventices réparties sur l'ensemble de la parcelle. Plusieurs pistes sont envisagées pour diminuer ce phénomène, comme l'utilisation d'un système de positionnement avec une précision accrue (GPS RTK) et la modification des zones tampon en ovale avec une marge de 2.5 m en largeur et de 5 m dans le sens de l'avancement (Figure 5).

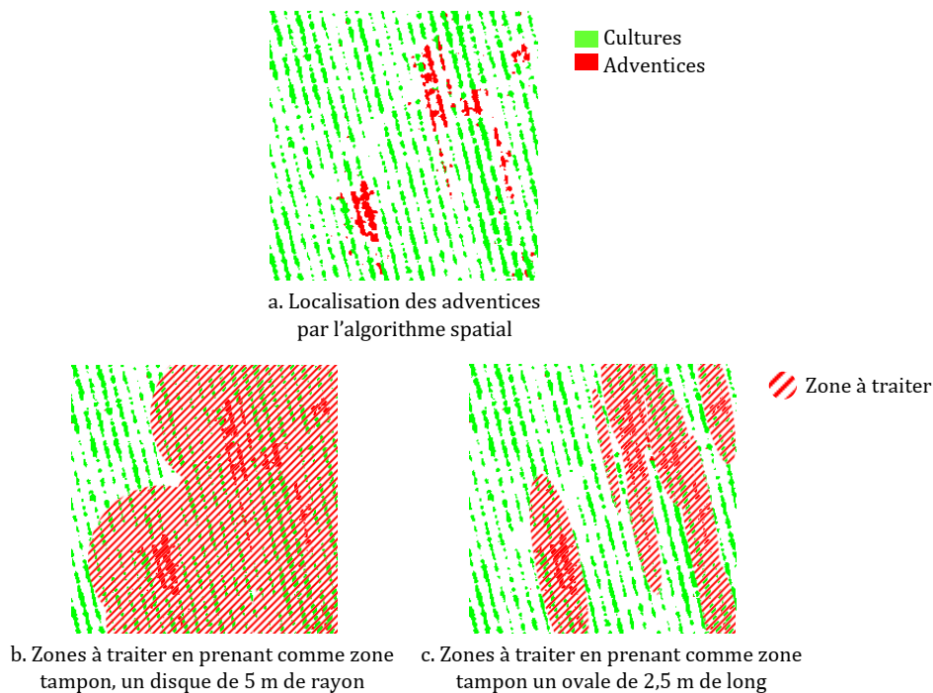


Figure 5 : Zones tampons pour une image de maïs (a) avec un cercle de 5 m de rayon autour des adventices détectées (b) et un ovale de 2.5 m de sécurité en largeur et 5 m dans le sens de l'avancement (c).

Un essai conduit par Terres Inovia dans le cadre du projet H2020 IWMPRAISE (Lucas et al., 2019) a permis de mobiliser l'ensemble de la chaîne, de l'acquisition d'images par drone à la pulvérisation localisée. Ce travail, réalisé sur une parcelle de colza de 2 ha, très fortement infestée (jusqu'à 467 géraniums par m² et jusqu'à 128 repousses d'orge par m²), a permis de montrer l'aspect fonctionnel de la solution : le traitement a été efficace avec la destruction de 97% des graminées et 81% des géraniums. La forte infestation de cette parcelle a conduit à une réduction de seulement 18% des produits phytosanitaires utilisés par rapport à un traitement du champ en entier. L'étude met donc en avant le besoin de critères simples pour estimer l'intérêt d'une pulvérisation localisée sur une parcelle (surface infestée, répartition des adventices...).

2.2 Système de pulvérisation localisée, basé sur une solution commerciale

Dans l'objectif d'analyser les performances d'un système temps-réel de pulvérisation localisée commerciale, une plateforme mobile autonome de détection et traitement a été conçue. Celle-ci a la capacité de se mouvoir dans les champs, entre les rangs de semis de cultures sarclées avec un écartement d'au moins 0.75 m, et d'effectuer de manière autonome une tâche de désherbage chimique localisé, dans l'inter-rang. Sur le rang, une pulvérisation en plein est effectuée. Pour la pulvérisation dans l'inter-rang, la plateforme est équipée d'un système WeedSeeker (Trimble) incluant un capteur optique et une buse de pulvérisation. Ce système commercial permet de détecter et d'appliquer le produit herbicide, en un seul passage. Il est capable de distinguer les plantes vertes du sol en utilisant leurs propriétés

spectrales. Pour cela, il utilise sa propre émission lumineuse et mesure la réflexion spectrale dans le rouge et le proche infrarouge pour calculer un indice de végétation (Rees et al., 2013).

Ce système de pulvérisation localisée a été testé au début de l'été 2016 sur une culture de maïs (Maillot et al., 2016). Ces expériences ont été menées sur une parcelle de 120 m² au sein des parcelles pédagogiques d'AgroSup Dijon. Le maïs a été semé mi-juin avec un écartement entre les rangs de 0.75 m. Un désherbage mécanique a été effectué après levée, au stade 3-4 feuilles. Les tests de pulvérisation localisée ont été faits au stade 4-6 feuilles. Les résultats présentés ci-après sont issus de 24 passages de la plateforme mobile autonome dans 3 inter-rangs différents de 12 m de longueur. La calibration et la configuration du capteur optique sont effectuées grâce au panneau de contrôle du WeedSeeker, sur sol nu. Ce panneau de contrôle permet de choisir parmi 10 valeurs de réglage de la sensibilité de détection des adventices (de 1=très sensible à 10=peu sensible) : plus la valeur choisie est basse, et plus une petite variation de couleur déclenche la pulvérisation. Au cours des essais, plusieurs valeurs de réglage de la sensibilité du capteur ont été testées. Pour ces expérimentations, seules les sensibilités 5 à 10 ont été prises en compte : les valeurs plus faibles entraînent un nombre trop important de « fausse détection » de plantes (*i.e.*, des faux positifs) et donc de pulvérisation inutile.

Afin d'analyser la qualité de la détection du WeedSeeker dans l'inter-rang, une carte des adventices détectées a été construite, en utilisant les signaux de détection fournis par le système. Ce résultat a été comparé à celui déduit d'images de la parcelle, obtenues à l'aide d'un capteur multispectral installé sur une perche, via un indice agronomique (Meyer et Neto, 2008). Cette comparaison est effectuée en analysant la sensibilité, la spécificité et la précision globale de la détection du WeedSeeker. La précision globale correspond au pourcentage de pixels bien classés (Adventices ou Culture/Sol). La sensibilité (resp. spécificité) de la détection correspond au pourcentage de pixels signalés comme appartenant à une adventice (resp. à de la culture ou du sol), quand c'est le cas (resp. ce n'est pas le cas). Lors de notre évaluation de la détection d'adventices par le WeedSeeker, nous constatons que le réglage de sensibilité *Sens. 7* du WeedSeeker offre un bon compromis entre la sensibilité et spécificité moyennes (Tableau 2). La sensibilité correspond au nombre d'adventices correctement détectées et donc traitées. Elle est stable jusqu'à la configuration *Sens. 7*, puis diminue fortement au-delà. La spécificité, quant à elle, indique la capacité du système à éviter les faux positifs (sol ou résidus considérés comme une plante). Dans le cas d'une pulvérisation localisée, une valeur de spécificité élevée indique une pulvérisation idéale, uniquement ciblée sur les plantes adventices ; c'est donc une économie de produits phytopharmaceutiques mais aussi une réduction de l'impact environnemental.

Cette configuration 7 du WeedSeeker avait déjà été remarquée pour sa capacité à détecter les plantes en champ (Rees et al., 2013 ; Sui et al., 2008). Les résultats du Tableau 2 ont permis de mettre en avant que les erreurs du système de guidage de la plateforme mobile autonome ont peu d'impact sur les performances du système.

Tableau 2 : Résultats de sensibilité, spécificité et précision globale du système de pulvérisation basé sur un WeedSeeker. Chaque ligne du tableau correspond à un réglage différent de la sensibilité du WeedSeeker.

Configuration	Sensibilité moyenne (%)	Spécificité moyenne (%)	Précision globale (%)
Sens. 5	79	81	81
Sens. 6	77	82	82
Sens. 7	78	83	82
Sens. 8	66	88	87
Sens. 9	65	89	84
Sens. 10	44	92	84

Cependant, ces tests indiquent aussi que, quelle que soit la configuration du WeedSeeker utilisée, le système va ignorer des adventices (22% dans le cas de la configuration Sens.7) qui ne seront donc pas traitées. Elles seront en compétition avec la culture en place pour les ressources et donc probablement à l'origine d'une perte de rendement. Pire encore, elles se reproduiront et alimenteront le stock semencier du sol, augmentant ainsi le risque de perdre le contrôle de la flore adventice dans les cultures à venir. C'est pour apprécier ce risque à moyen et long terme que nous avons réalisé les simulations présentées dans la section suivante.

3. Impact à long terme d'un système de pulvérisation localisée

Suite aux analyses de performances des systèmes de pulvérisation localisée, qui peuvent ignorer des adventices, la question de l'impact à long terme sur la population adventice de l'utilisation de ces systèmes est abordée dans cette partie. Pour cela, des simulations numériques sont utilisées.

3.1 La parcelle virtuelle FLORSYS

FLORSYS (Colbach et al., 2019, 2014) est une parcelle virtuelle où des systèmes de culture peuvent être testés et évalués en termes de production et de services et dys-services dus aux adventices. L'utilisateur entre une liste d'opérations sur une rotation similaire à l'enregistrement des opérations d'une parcelle d'une station expérimentale ou d'une exploitation agricole, le tout accompagné de la météo journalière et de caractéristiques du sol. Cette liste comprend toutes les opérations (travail du sol, semis, désherbage mécanique, fertilisation, pesticides, fauche, récolte) décrites en détail en termes de dates et d'options.

Ces données d'entrées affectent le cycle de vie des cultures et adventices en fonction de différents processus (survie, dormance, germination des semences, levée, développement, croissance et plasticité morphologique des plantes). Ces processus sont modulés en fonction des techniques culturales, des caractéristiques biologiques de chaque semence ou plante, de leur environnement qui dépend lui-même du pédoclimat, des techniques culturales et de la présence de plantes voisines. Les sorties détaillées journalières et en 3D sont traduites en indicateurs de services et dys-services des adventices (ex. perte de rendement de la culture, offre trophique pour abeilles). Le modèle est actuellement paramétré pour 26 espèces adventices fréquentes et contrastées ainsi que 33 espèces cultivées (de rente et de service) de grandes cultures. La version utilisée ici néglige la résistance aux herbicides.

3.2 La pulvérisation localisée dans FLORSYS

Une opération de pulvérisation est décrite par la date, le produit appliqué et sa dose, et la zone traitée : le champ en entier, uniquement le rang ou l'inter-rang (en indiquant la largeur de la bande traitée), ou bien encore uniquement les taches d'adventices. Pour cette dernière option (Figure 6), l'utilisateur indique :

- Le taux de détection des adventices sur le rang et dans l'inter-rang, en fonction du diamètre des plantes adventices,
- Le taux de fausse détection (la probabilité de considérer une plante cultivée comme adventice),
- La largeur de la bande traitée,
- La distance à laquelle la pulvérisation commence en amont de la plante, et s'arrête après la plante.

L'efficacité d'une pulvérisation sur une plante d'une espèce adventice donnée dépend (outre qu'elle doit être détectée et/ou être dans une zone traitée pour les pulvérisations localisées) :

- De l'efficacité du produit appliqué à pleine dose sur l'espèce en conditions optimales,
- De la dose effectivement appliquée,

- Des conditions au moment de l'application, avec notamment une réduction de l'efficacité en fonction de la densité du couvert, de la taille de l'adventice (pour les herbicides foliaires) ou de la profondeur des semences adventices (pour les herbicides racinaires).

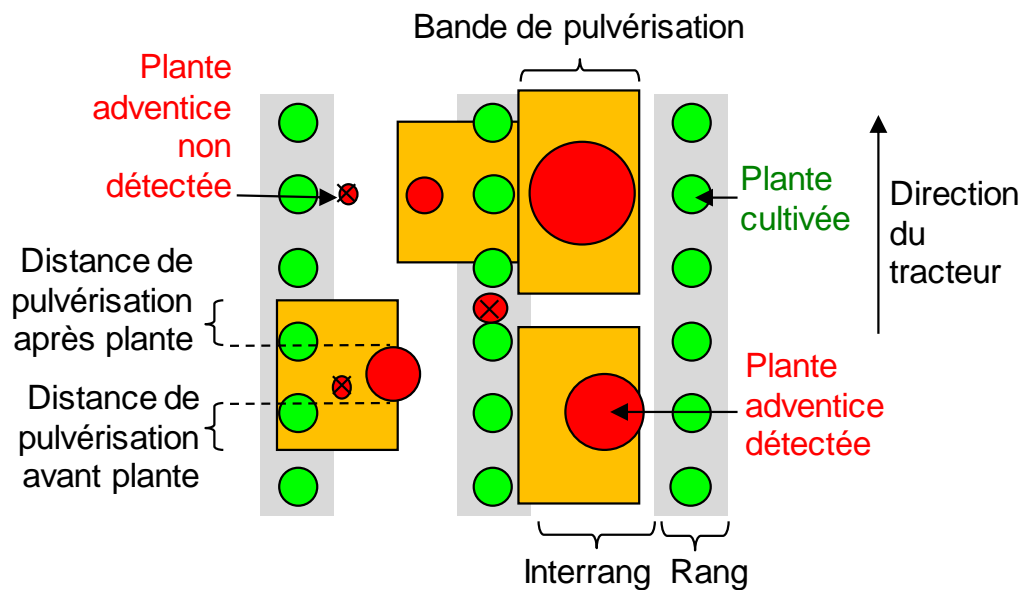


Figure 6 : Représentation schématique de la pulvérisation localisée sur taches d'adventices dans le modèle de simulation FLORSYS.

3.3 Plan de simulation et résultats

Afin d'évaluer l'intérêt sur le long terme d'une pulvérisation localisée d'herbicides, les résultats présentés dans le Tableau 2 sont utilisés, via la parcelle virtuelle FLORSYS, pour simuler l'action combinée d'un système de pulvérisation localisée, dans l'inter-rang, et d'une pulvérisation en plein sur le rang, et ce dans une monoculture de maïs en Aquitaine.

La bande de pulvérisation du système de pulvérisation localisée a été fixée à 35 cm (Trimble, 2010). La largeur de la bande traitée, sur le rang est de 20 cm. Cette pratique de pulvérisation localisée est simulée sur 30 ans et son intérêt est analysé au regard d'indicateurs de (dys)services des adventices : la richesse spécifique de la flore adventice, le salissement de la parcelle par les adventices, le rendement en grain, le ratio de biomasse entre culture et adventices au stade floraison qui est un bon proxy de la perte de rendement due aux adventices (Colbach et Cordeau, 2018), le pourcentage de la surface traitée et l'indicateur de fréquence de traitement herbicide (IFT). Afin de tester les différentes configurations du WeedSeeker présentées dans le Tableau 2, six parcelles virtuelles FLORSYS en monoculture de maïs ont été utilisées. Une septième parcelle virtuelle a été configurée pour simuler l'effet d'une pulvérisation en plein. Afin de prendre en compte différentes conditions climatiques, les simulations des parcelles virtuelles ont été répétées 10 fois avec des conditions météorologiques différentes provenant d'Aquitaine. Les simulations ont été initialisées avec un stock semencier comprenant les espèces adventices typiques du maïs en Aquitaine.

Les différentes analyses statistiques (analyses de variances, comparaison de moyennes) ont montré que le type de pulvérisation (pulvérisation en plein vs les différentes configurations du système de pulvérisation localisée) utilisé est le facteur qui a le plus d'influence sur presque tous les indicateurs de (dys)services des adventices (l'éta-carré partiel le plus important de cette variable est obtenu pour l'indicateur associé à la surface pulvérisée et vaut $\eta^2 \approx 0.20$). Seule la richesse spécifique de la flore adventice dépend majoritairement de l'année de la simulation ($\eta^2 \approx 0.29$) et non pas du type de pulvérisation ($\eta^2 \approx 0.003$). Pour trois indicateurs (le salissement de la parcelle par les adventices, le

rendement en grain, le ratio de biomasse entre culture et adventices au stade floraison), bien que le type de pulvérisation soit la variable ayant le plus d'influence, celle-ci reste faible (par exemple, pour l'indicateur de salissement de la parcelle par les adventices, $\eta^2 \approx 0.01$ pour la variable du type de pulvérisation utilisée). Seuls l'indicateur de pourcentage de la surface traitée et l'indicateur de fréquence de traitement herbicide sont fortement liés au type de pulvérisation simulée (par exemple, pour l'IFT, $\eta^2 \approx 0.20$ pour la variable du type de pulvérisation utilisée).

En moyenne, sur les 30 ans simulés, par rapport à une pulvérisation en plein, une réduction d'environ 40 à 45% de la surface pulvérisée est observée, en fonction de la configuration du système de pulvérisation localisée. Cette réduction d'utilisation de produit herbicide n'a pas d'influence sur les moyennes, sur 30 ans, des rendements de la culture et des ratios de biomasse entre culture et adventices au stade floraison (Figure 7). Cependant, les valeurs des indicateurs varient plus fortement entre années dans le cas d'une pulvérisation localisée, donc aussi le rendement et donc le revenu de l'agriculteur. Les pics d'infestation adventice sont néanmoins maîtrisés et l'infestation globale reste stable sur le long terme (Figure 8). De plus, des pics d'infestation sont également possibles pour un traitement en plein (années 5 et 21) et il faut alors plusieurs années (ex. années 6 à 9) pour que l'infestation se stabilise de nouveau (années 10 à 20).

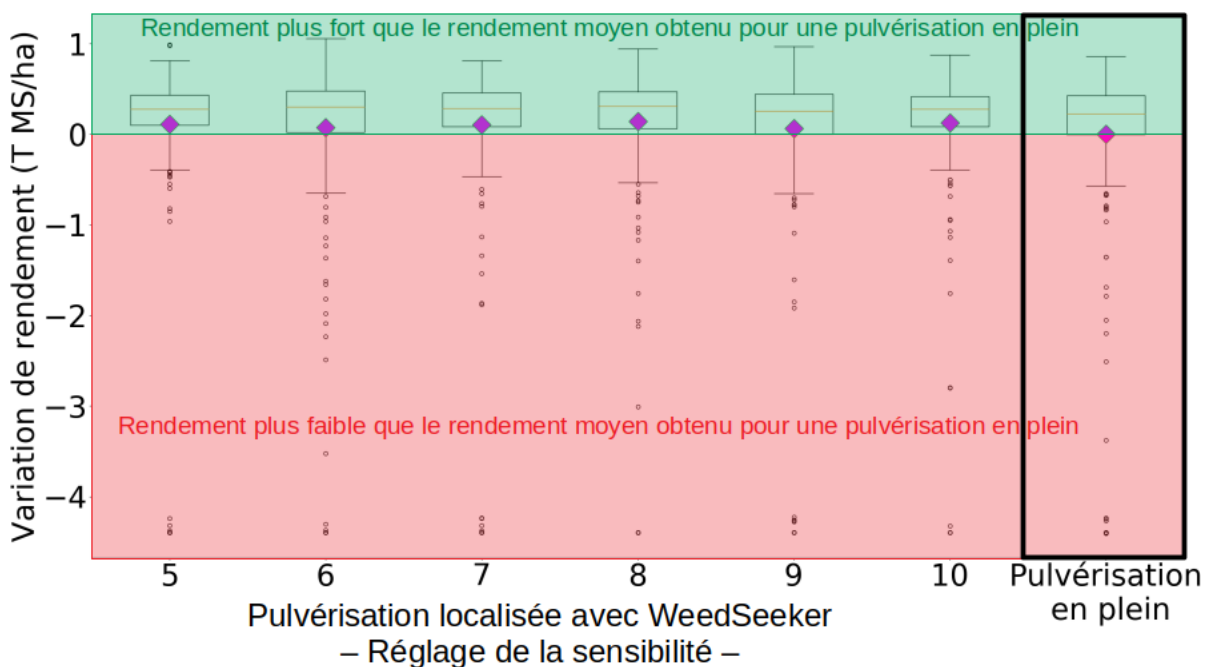


Figure 7 : Variation annuelle de rendement, pour chaque stratégie de pulvérisation simulée, par rapport au rendement moyen obtenu avec une pulvérisation en plein. Résultats de 30 années de simulation en monoculture de maïs x 10 répétitions météo. Les sensibilités de 5 à 10 correspondent aux réglages du système WeedSeeker : plus la valeur de sensibilité est faible, plus le système de pulvérisation est sensible aux variations de couleurs. Les points violets représentent les moyennes des variations de rendement obtenues, pour chaque simulation.

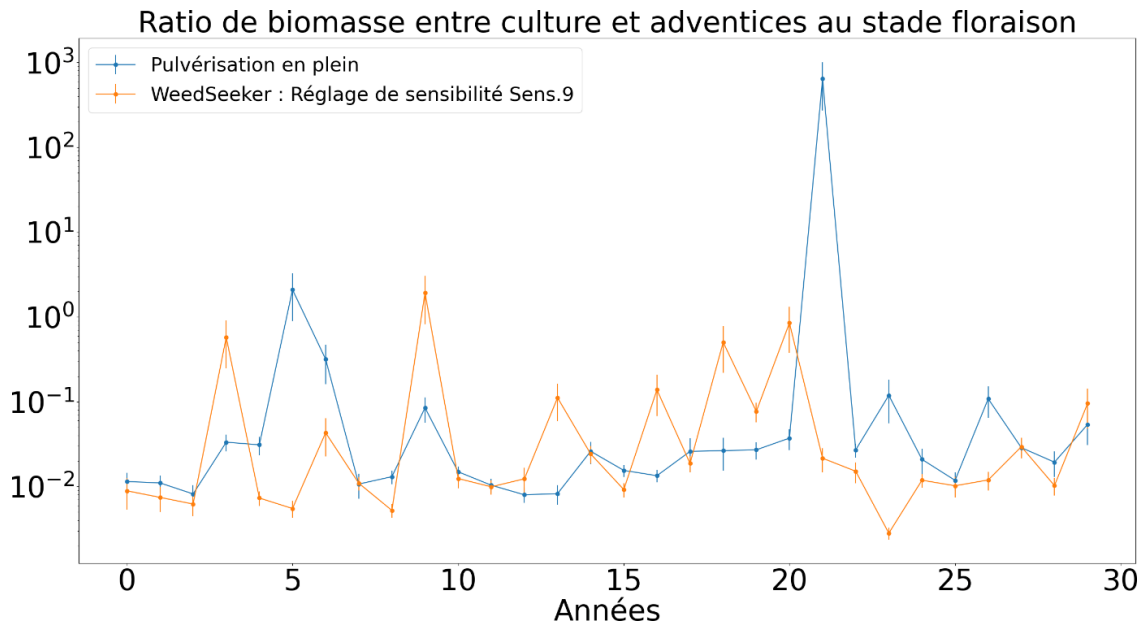


Figure 8 : Evolution annuelle du ratio de biomasse entre culture et adventices, au stade floraison, dans une monoculture de maïs en Aquitaine en fonction du type de pulvérisation (bleu = en plein, orange = pulvérisation localisée basée sur le système WeedSeeker avec configuration de sensibilité Sens.9). Les segments verticaux représentent l'intervalle de confiance à 68%, résultant des 10 répétitions météorologiques.

4. Discussion et conclusions

Les travaux présentés concernent l'application de l'agriculture de précision à la gestion des adventices et plus particulièrement à la gestion d'une pulvérisation localisée de produits phytosanitaires. La fusion de l'information spatiale et spectrale, contenues dans des images, montrent l'intérêt d'une telle solution pour détecter les adventices au sein du rang de culture. La méthode développée permet la mise en œuvre de méthodes supervisées sans intervention humaine, avec une base de données de référence adaptée au contexte agronomique.

Plusieurs facteurs impactent fortement la séparabilité culture/adventices lors de l'utilisation de cette méthode : la résolution spatiale qui doit être adaptée à la taille des adventices et la famille des plantes considérées (Louargant et al., 2017). L'utilisation de la signature spectrale des plantes offre un potentiel de séparabilité satisfaisant lorsque deux clades (mono et dicotylédones) sont présents mais ne permet pas de séparer deux plantes issues du même clade. Un travail a donc été initié dans le cadre du projet H2020 IWMPRAISE (<https://iwmpraise.eu/>) afin d'évaluer les critères permettant d'améliorer la séparabilité culture/adventices dans diverses situations. Nous nous intéressons ainsi à la résolution des images, aux bandes spectrales utilisées et au stade de développement des plantes. Des images ainsi obtenues seront extraites des critères spatiaux, spectraux, texturaux et de forme pour chaque plante. L'impact de ces différentes variables sur la qualité de classification sera évalué afin de permettre un choix optimal des paramètres d'acquisition et des méthodes de traitement d'image pour une situation donnée. Les résultats de ces travaux seront mobilisés dans le cadre de l'ANR Challenge Rose (<https://challenge-rose.fr/>) qui a pour objectif le développement d'une solution complète permettant la gestion des adventices sur le rang. Cette étude a aussi mis en avant le besoin de critères simples pour estimer l'intérêt d'une pulvérisation localisée sur une parcelle (surface infestée, répartition des adventices...). Dans le cadre de récents travaux, des résultats préliminaires ont été obtenus dans ce sens (Villette et al., 2019).

Des premiers résultats prometteurs sur l'impact d'une pulvérisation localisée ont été obtenus, montrant un contrôle à long terme de la flore adventice et la préservation du rendement, tout en réduisant

considérablement la quantité d'herbicides pulvérisée (jusqu'à 45%, dans notre étude de simulations, pour une monoculture de maïs, en Aquitaine). Ce succès était indépendant de la sensibilité du système de détection des adventices et valable pour une diversité de scénarios météo. Cependant, les simulations ont détecté une variabilité interannuelle plus importante de la performance des systèmes de culture alors que les agriculteurs ont besoin d'un revenu stable et prévisible. De plus, il s'agissait ici d'un cas d'étude unique, dans une seule région, avec un système simple (une monoculture) ayant généralement une bonne maîtrise des adventices. Il est donc indispensable d'élargir notre étude de simulation pour évaluer les bénéfices et risques de la pulvérisation dans d'autres régions et systèmes et identifier les déterminants de sa réussite.

Remerciements

Ces travaux ont été financés par INRAE, AgroSup Dijon, l'ANR CoSAC (ANR-15-CE18-0007) et le projet H2020 IWM PRAISE (N 727321).

Références bibliographiques

- Aubertot J.-N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.-N., Guichard L., Lucas P., Savary S., Voltz M., 2007. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Expertise scientifique collective Inra-Cemagref (décembre 2005).
- Backes M., Jacobi J., 2006. Classification of weed patches in Quickbird images: verification by ground truth data. *EARSel eProceedings* 5, 173–179.
- Baldi I., Cordier S., Coumoul X., Elbaz A., Gamet-Payrastré L., Le Bailly P., Multigner L., Rahmani R., Spinosi J., Van Maele-Fabry G., 2013. Pesticides: effets sur la santé. INSERM, Institut national de la santé et de la recherche médicale, Paris.
- Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A., 1995. A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews* 13, 95-120.
- Boochs F., Kupfer G., Dockter K., Kühbauch W., 1990. Shape of the red edge as vitality indicator for plants. *International Journal of Remote Sensing* 11, 1741-1753. <https://doi.org/10.1080/01431169008955127>
- Bousquet L.A., 2007. Mesure et modélisation des propriétés optiques spectrales et directionnelles des feuilles (PhD Thesis). Paris 7.
- Butault J., Delame N., Jacquet F., Zardet G., 2011. L'utilisation des pesticides en France: état des lieux et perspectives de réduction. *Notes et études socio-économiques* 35, 1-24.
- Chevrel M., Courtois M., Weill G., 1981. The SPOT satellite remote sensing mission. *PgERS* 47, 1163-1171.
- Colbach N., Biju-Duval L., Gardarin A., Granger S., Guyot S.H.M., Mezière D., Munier-Jolain N., Petit Michaut S., 2014. The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. *Weed Research* 54, 541–555. <https://doi.org/10.1111/wre.12112>
- Colbach N., Cordeau S., 2018. Reduced herbicide use does not increase crop yield loss if it is compensated by alternative preventive and curative measures. *European Journal of Agronomy* 94, 67-78.
- Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., Maillot T., Villerd J., Moreau D., 2019. Du champ virtuel au champ réel-ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies durables de gestion des adventices et reconcevoir des systèmes de culture? *Agronomie, Environnement & Sociétés* 9.
- Dubois A., Lacouture L., 2011. Bilan de présence des micropolluants dans les milieux aquatiques continentaux. *Études et documents*.
- Duda R.O., Hart P.E., 1972. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM* 15, 11-15.

- Everitt J.H., Alaniz M.A., Escobar D.E., Davis M.R., 1992. Using remote sensing to distinguish common (*Isocoma coronopifolia*) and Drummond goldenweed (*Isocoma drummondii*). *Weed Science* 621-628.
- Everitt J.H., Anderson G.L., Escobar D.E., Davis M.R., Spencer N.R., Andrascik R.J., 1995. Use of remote sensing for detecting and mapping leafy spurge (*Euphorbia esula*). *Weed Technology* 599-609.
- Gasquet C., Witomski P., 2000. Analyse de Fourier et applications: filtrage, calcul numérique, ondelettes, Sciences sup. Dunod.
- Gausman H.W., 1985. Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light. Graduate studies / Texas Tech University (USA).
- Hough P.V., 1962. Method and means for recognizing complex patterns. Google Patents.
- Lamb D., Weedon M., Rew L., 1999. Evaluating the accuracy of mapping weeds in seedling crops using airborne digital imaging: Avena spp. in seedling triticale. *Weed research* (Print) 39, 481-492.
- Louargant M., 2016. Proximité des adventices par imagerie aérienne : Vers un service de gestion par drone. (Thesis). Université de Bourgogne.
- Louargant M., Jones G., Faroux R., Paoli J.-N., Maillot T., Gée C., Villette S., 2018. Unsupervised Classification Algorithm for Early Weed Detection in Row-Crops by Combining Spatial and Spectral Information. *Remote Sensing* 10, 761. <https://doi.org/10.3390/rs10050761>
- Louargant M., Villette S., Jones G., Vigneau N., Paoli J.-N., Gée C., 2017. Weed detection by UAV: simulation of the impact of spectral mixing in multispectral images. *Precision Agriculture* 18, 932-951. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9528-3>
- Lowenberg-DeBoer J., Erickson B., 2019. Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption. *Agronomy Journal* 111, 1552-1569. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
- Lucas J.L., Vuillemin F., Sergent-Bouty C., Jolly G., Thierry L., Geloën M., Kazemipour-Ricci F., Jones G., 2019. Targeted spraying on weed spots detected by drone in rapeseed. 24e Conférence du COLUMA : Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, Orléans, France, 3, 4 et 5 décembre 2019.
- Maillot T., Gee C., Gobin B., Villette S., Vioix J.-B., Jones G., Paoli J.-N., 2016. I-Weed Robot : un outil pour l'étude de population de plantes adventices. 23e Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes.
- Meyer G.E., Neto J.C., 2008. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 63, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.009>
- Rabatel G., Ougache F., Gorretta N., Ecarnot M., 2011. Hyperspectral imagery to discriminate weeds in wheat. In: Robotics and Associated High Technologies and Equipment for Agriculture (RHEA-2011). Pablo Gonzalez de Santos & Gilles Rabatel, p. p35.
- Rees S., McCarthy C., Fillols E., Baille C., Staier T., 2013. Evaluating commercially available precision weed spraying technology for detecting weeds in sugarcane farming systems. *Sugar research, Pest, Disease and Weed Management*.
- Rew L.J., Cousens R.D., 2001. Spatial distribution of weeds in arable crops: are current sampling and analytical methods appropriate? *Weed Research* 41, 1-18.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.
- Smith K.L., Steven M.D., Colls J.J., 2004. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. *Remote Sensing of Environment* 92, 207-217. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.002>
- Sui R., Thomasson J.A., Hanks J., Wooten J., 2008. Ground-based sensing system for weed mapping in cotton. *Computers and Electronics in Agriculture* 60, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.002>
- Tisseyre B., 2012. Is it possible to apply the concept of precision farming to vine growing ? (Thesis). HDR.
- Trimble, 2010. INSTALLATION AND OPERATION GUIDE WeedSeeker Automatic Spot Spray System.

Tucker C., 1979. Red and photographic infrared linear combinations monitoring vegetation. *J Remote Sens Environ* 8 (2): 127-150.

Villette S., Maillot T., Douzals J.-P., Guillemin J.-P., 2019. Simulateur de pulvérisation localisée d'herbicide. Presented at the 24e Conférence du COLUMA : Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes.

Vioix J.-B., 2004. Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multispectrale embarqué: du capteur aux traitements pour la détection d'adventices (Thèse). Dijon.

Woebbecke D.M., Meyer G.E., Von Bargen K., Mortensen D.A., 1995. Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions. *Transactions of the ASAE* 38, 259-269. <https://doi.org/10.13031/2013.27838>

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).