



HAL
open science

Systèmes de vision numérique appliqués à la gestion d'intrants en agriculture : vers le contrôle de la pulvérisation et de l'épandage

Sylvain Villette, Christelle Gée, Emmanuel Piron, Jérémie Bossu, Gawain Jones, Richard Martin, Denis Miclet, Frédéric Cointault, Bilal Hijazi, Jean-Noël Paoli

► To cite this version:

Sylvain Villette, Christelle Gée, Emmanuel Piron, Jérémie Bossu, Gawain Jones, et al.. Systèmes de vision numérique appliqués à la gestion d'intrants en agriculture : vers le contrôle de la pulvérisation et de l'épandage. UB-Sciences, 2009. hal-01840843

HAL Id: hal-01840843

<https://hal.science/hal-01840843>

Submitted on 29 Jan 2019

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.

Systèmes de vision numérique appliqués à la gestion des intrants en agriculture : Vers le contrôle de la pulvérisation et de l'épandage

Sylvain Villette¹, Christelle Gée¹, Emmanuel Piron², Jérémie Bossu¹, Gawain Jones¹, Richard Martin¹, Denis Miclet², Frédéric Cointault¹, Bilal Hijazi¹, Jean-Noël Paoli¹

¹ AgroSup Dijon, ENESAD, Unité Propre de Recherche GAP "Génie des Agroéquipements et des Procédés", 26, bd Dr Petitjean – BP 87999 – 21079 Dijon Cedex – France.
Correspondance : S.Villette (tél : 03-80-77-29-33 ; courriel : s.villette@enesad.fr)

² Cemagref, Equipe GEPAND "Génie des épandages", Les Palaquins – 03150 Montoldre – France

INTRODUCTION : maîtriser les apports d'intrants chimiques

Les pratiques agricoles traditionnelles considèrent la parcelle cultivée comme une entité homogène sur laquelle l'apport d'intrants (semences, produits phytosanitaires, engrais, ...) est effectué de manière uniforme pour répondre au besoin global de la culture. Les apports, déterminés sur la base de ce besoin moyen, conduisent alors à des surdosages dans les zones à faible demande et à des sous-dosages dans les zones à demande élevée. Les excédents constituent généralement une source de pollution alors que les déficits ne permettent pas d'exploiter pleinement le potentiel local. Dans les années 1980, l'utilisation de nouvelles technologies pour le recueil d'informations spatiales a permis de mettre en évidence diverses variabilités intra-parcellaires (composition des sols, comportement hydrique, incidence topographique, ...) ; elles démontrent ainsi l'intérêt d'une modulation spatiale des apports au sein de la parcelle.

En agriculture, les enjeux de développement durable sont très présents dans un contexte marqué par des besoins accrus de protection de l'environnement, de sécurisation de la filière agro-alimentaire et de pérennité économique des exploitations. Dans ce contexte, il faut intégrer le fait qu'une parcelle doit être considérée comme un milieu hétérogène et gérer ponctuellement l'apport d'intrants par l'utilisation de machines sophistiquées, dotées de capteurs et de systèmes automatisés. L'agriculture de précision et les technologies de l'information ont ainsi pris racine dans le secteur des agroéquipements et sont de plus en plus appelées à se développer en réponse aux pressions subies par les agriculteurs/producteurs pour réduire les nuisances environnementales et améliorer la qualité des productions.

Dans le cadre de ses activités de recherche, l'UP-GAP (**Encadré 1**) de l'ENESAD conçoit et développe de nouvelles technologies (principalement orientées vers des systèmes de vision numérique) pour mieux gérer les apports d'intrants au sein d'une parcelle cultivée. Ces activités permettent d'envisager des transferts technologiques en vue de répondre aux besoins des industriels et des instituts techniques du secteur agricole. La prise en compte des attentes des constructeurs et des utilisateurs de machines agricoles, nous a conduit à développer des travaux de recherche sur deux thématiques : les technologies de caractérisation des cultures et les technologies et procédés d'épandage.

Cet article présente deux systèmes de vision en cours de développement. Le premier est conçu en partenariat avec la Société de pulvérisateurs agricoles TECNOMA (**Encadré 1**) dans le but de mieux gérer les apports de produits phytosanitaires (herbicides, insecticides, fongicides...) sur les cultures. Le second est conçu en collaboration avec l'équipe GEPAND « Génie des épandages » du Cemagref (**Encadré 1**) dans le but d'améliorer la qualité des épandages d'engrais. Les travaux ont également été menés en collaboration avec le LE2I de l'Université de Bourgogne.

Les deux systèmes de vision présentés ici ont pour objectif, à terme, d'être embarqués sur les machines agricoles pour en optimiser le fonctionnement au champ. L'ensemble de ce travail repose sur l'analyse détaillée d'images et l'utilisation d'outils mathématiques pour extraire une information spécifique pour une prise de décision (par exemple localisation de mauvaises herbes ou identification de trajectoires d'engrais).

1 - Développement et évaluation d'un système de vision pour la pulvérisation d'herbicides

Contexte et Motivations

Les pulvérisateurs utilisés en grande culture pour réaliser les traitements phytosanitaires sont équipés d'une rampe horizontale (**Figure 1**) qui sert de support à une série de buses régulièrement espacées. La bouillie préparée dans la cuve est conduite sous pression jusqu'aux buses d'où elle s'échappe sous forme d'un jet aspergeant le sol et la végétation en place. Traditionnellement, la pulvérisation du produit est réalisée de manière simultanée sur toute la largeur de la rampe.



Fig 1 : Photo d'un pulvérisateur attelé à un tracteur

En matière de désherbage chimique, les études ont montré un potentiel de réduction de l'ordre de 40 à 70 % de la quantité d'herbicides lorsque ceux-ci sont appliqués uniquement sur les zones infestées (Biller, 1998). Cela suppose la possibilité de repérer les zones infestées à l'aide d'outils de localisation (GPS : Global Positioning System) et de traiter ces zones infestées à l'aide d'un équipement spécifique (pilotage buse par buse ou tronçon par tronçon de rampe).

Dans le cadre d'un désherbage chimique « en post-levée » (peu après la germination des plantes), nos travaux consistent à développer des systèmes d'imagerie pour caractériser les plantes (au stade de 2/3 feuilles) dans le but de réaliser une discrimination culture/adventices (adventices = mauvaises herbes) afin d'asservir la pulvérisation d'herbicides à la présence effective d'adventices.

Conception et construction de prototypes

En 2004, suite à une collaboration avec ARVALIS - Institut du végétal, le développement d'un imageur multi-spectral embarqué dans un petit avion radiocommandé (Vioix, 2004) a permis de réaliser des cartes d'infestation en mauvaises herbes d'une parcelle cultivée permettant leur localisation. Puis en 2007, l'approche temps réel a été abordée par la réalisation d'un système de vision pour une pulvérisation spécifique (Bossu, 2007) en partenariat avec la Société de pulvérisateurs agricoles TECNOMA. Actuellement, nous finalisons un prototype de pulvérisation de précision fonctionnant en temps réel basé sur un système de vision pour lequel la gestion des buses est automatisée suite à l'analyse des images prises devant le tracteur par une caméra standard.

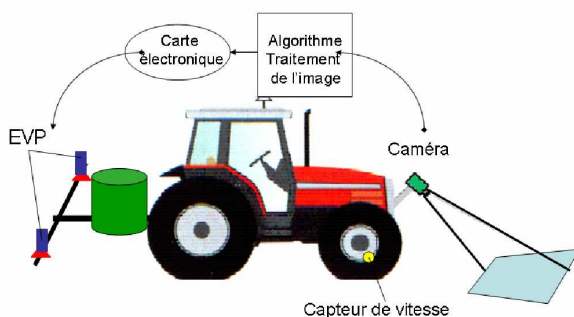


Fig 2 : Présentation du dispositif expérimental.

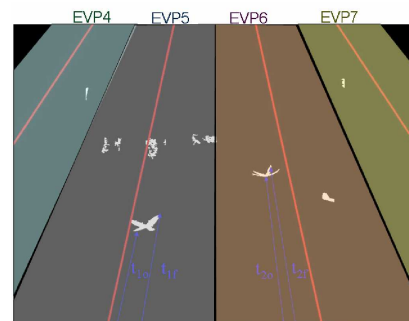


Fig 3 : Exemple de carte d'infestation en mauvaises herbes.

Sur le prototype (**Figure 2**), une caméra placée à l'avant du tracteur et un ordinateur embarqué permettent le traitement de l'information. Une carte électronique pilote le déclenchement en temps réel et le temps d'ouverture de chaque buse (commandée par une électrovanne pneumatique) de la rampe

d'un pulvérisateur. La carte d'infestation (**Figure 3**) obtenue suite aux traitements algorithmiques pour détecter les adventices dans une parcelle cultivée permet, selon la taille des adventices, de réaliser un chronogramme d'ouverture des électrovannes pneumatiques (EVP).

Dans le cadre de la réalisation de cartes d'infestation par imagerie, les traitements de l'image acquise reposent sur une information spatiale de la végétation. Les résultats de ces traitements ont montré qu'il est relativement aisé de discerner les mauvaises herbes de la culture selon leur répartition spatiale : la culture est semée périodiquement, alors que les adventices ont une distribution spatiale aléatoire ponctuelle ou agrégative. Les principaux algorithmes spatiaux de détection de la culture par rapport aux mauvaises herbes reposent sur la détection de lignes de semis (Transformée de Hough), la détection d'une périodicité (Transformée de Fourier et Filtre de Gabor bi-directionnel) ou sur une analyse spatio-temporelle (Transformée en ondelettes). Ces outils mathématiques de traitement de données permettent de décomposer un signal global (une image) en signaux élémentaires utiles à la localisation des mauvaises herbes (Gée *et al.*, 2008). Jusqu'à présent, dans l'objectif d'un transfert technologique, nous avons toujours privilégié le Filtre de Gabor (**Encadré 2**).

Développement d'une méthode d'évaluation

Pour mener à bien l'étude sur l'efficacité des algorithmes de discrimination culture/adventices dans le but de choisir l'algorithme le mieux adapté pour une situation donnée (taux d'adventices) ou pour une culture particulière (blé, tournesol, maïs), les méthodes les plus couramment utilisées nécessitent un travail fastidieux. Parmi celles-ci, nous noterons celles qui consistent à comparer les résultats de discrimination d'un algorithme à une vérité de terrain via un comptage manuel des plantes sur le terrain. Il s'agit ensuite de vérifier que la densité (nombre de pieds/m²) de plantes (adventice ou culture) estimée par l'algorithme correspond à celle mesurée par l'opérateur. Une autre approche tout aussi fastidieuse serait de comparer pixel à pixel les résultats de l'algorithme avec une analyse visuelle des images : l'opérateur sépare manuellement les pixels de végétation en 2 classes : culture et adventices ; l'image initiale servant de référence. Face à la masse de données à traiter (des milliers d'images) pour tester en détail le comportement des différents algorithmes, les méthodes préalablement décrites sont inenvisageables. La solution retenue et développée au laboratoire est de réaliser des images virtuelles modélisant les scènes agronomiques photographiées par un système optique (Jones *et al.*, 2009a) en ne considérant, dans un premier temps, que les propriétés spatiales des végétaux (**Encadré 3**). Nombreux sont les modèles théoriques de reconstruction ou de croissance de feuilles ou de plantes (Streit *et al.*, 2005 ; Prusinkiewicz et Lindenmayer, 1992). Cependant, ces modèles issus du monde agronomique sont souvent trop perfectionnés, trop complexes et inadaptés à notre champ d'étude pour modéliser la photographie d'un champ virtuel. Nous ne chercherons pas dans ce modèle à caractériser finement des feuilles (couleur, texture, forme...) ou des plantes ni même leur interaction ou leur dynamique de croissance mais nous nous attacherons tout d'abord à positionner spatialement des germes dans une parcelle ; germes qui sont indépendants les uns des autres et sur lesquels un motif de plantes a été positionnés pour un meilleur rendu visuel. Actuellement, la distribution spatiale des populations végétales présentes dans le champ virtuel est modélisée selon différentes lois de probabilité :

- distribution uniforme et périodique (fréquence inter-rang) de la culture,
- distribution ponctuelle (loi de Poisson) ou agrégative (loi de Neyman-Scott) pour les adventices.

Puis, un cliché (ou image) sera pris en positionnant dans cette parcelle une caméra virtuelle aux caractéristiques pré-définies (focale, hauteur, ...).

Grâce à ces images modélisées, dont on connaît parfaitement les paramètres de construction (nombre de pixels de culture, nombre de pixels d'adventices et taux d'infestation) il est possible 1) d'optimiser et développer de nouveaux algorithmes de détection d'adventices à partir d'une très grande quantité d'images modélisées 2) d'évaluer et comparer, l'efficacité des algorithmes pour la reconnaissance des espèces végétales : culture/adventices (Jones *et al.*, 2009b).

Bien sûr, la simple comparaison entre le nombre exact de pixels de culture ou d'adventices et le nombre détecté par l'algorithme n'est pas suffisante pour déterminer l'efficacité d'un algorithme car il peut y avoir de nombreuses erreurs de classification (pixels de culture pris pour des adventices et réciproquement) donnant l'illusion d'une classification parfaite. C'est pourquoi, la matrice de confusion (Kohavi et Provost, 1998 ; Provost *et al.*, 1998) et/ou le graphe ROC (Receiver Operating Characteristics) déduit pour chaque image testée, va permettre d'analyser plus finement les erreurs (de sur ou sous-détection) commises par les algorithmes (**Encadré 4**). Dans ces conditions, nous avons étudié le comportement de quatre algorithmes de discrimination culture/adventices sur différentes banques d'images modélisées (Bossu *et al.*, 2009). Ces algorithmes sont :

- un filtre de Gabor basé sur une transformée de Fourier (TF),
- un filtre de Gabor basé sur une transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFG),
- une transformée en ondelettes de type Debauchies 25 (TO),
- une transformée de Hough (TH).

L'ensemble des résultats révèle que la transformée en ondelettes (TO) donnent globalement les meilleurs résultats sur la discrimination culture/adventices alors que le filtre de Gabor basé sur la transformée de Fourier (TF) sur-détecte la culture. Cependant, le Filtre de Gabor, même s'il n'est pas le meilleur algorithme de discrimination pour la classe « adventices » semble être un bon compromis entre détection d'adventices et temps de calcul adapté pour une application temps réel. En effet, il est à noter que pour être opérationnel en conditions réelles (vitesse de travail autour de 10 km/h), le temps de traitement de l'image (acquisition de l'image, filtrage, discrimination culture/adventices, ouverture des EVP...) pour notre prototype est d'environ 850 ms. Il est également intéressant de noter que le comportement des algorithmes observés sur les images modélisées est similaire dans le cas d'images réelles, avec bien sûr de moins bons résultats.

2 – Un système de vision pour améliorer la qualité des épandages d'engrais

Contexte et motivations

En Europe, la fertilisation des parcelles agricoles avec des engrais minéraux solides (azote, phosphore, potassium...) est très majoritairement réalisée au moyen de machines appelées : distributeurs centrifuges (**Figures 10 et 11**). Le procédé de projection centrifuge utilisé par ces appareils se décompose en deux phases : une accélération de l'engrais sur un disque entraîné en rotation puis, après éjection (à une vitesse de 100 à 180 km/h) une phase de vol balistique qui répartit l'engrais sur une largeur pouvant dépasser 50 m.



Fig 10 : Photographie d'un distributeur centrifuge attelé à un tracteur (Source : Documentation commerciale Amazone ZA-M.)

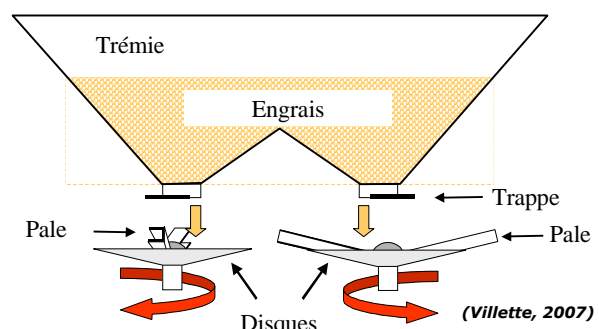


Fig 11 : Schéma de principe d'un distributeur centrifuge à deux disques. (Villette, 2006)

Le succès des distributeurs centrifuges dans les exploitations agricoles est dû à leur conception simple, leur faible coût et leur débit de chantier élevé (surface travaillée par heure). En revanche la qualité de la répartition de l'engrais au champ est relativement mal maîtrisée (Leterme, 2000 ; Roussel, 2006). Les défauts de la répartition sont liés à la diversité des caractéristiques mécaniques des engrais,

à la diversité des systèmes centrifuges commercialisés, à la complexité des interactions engrais-matériel et par voie de conséquence à la difficulté pour l'utilisateur de régler son appareil de manière optimale.

La distribution de l'engrais sur l'intégralité de la parcelle nécessite une succession de passages adjacents du distributeur (**Encadré 5**). La répartition transversale de l'engrais projeté doit donc être en adéquation avec la largeur fixée entre deux passages successifs pour apporter la dose prévue, y compris dans la zone de recouvrement de chaque passage. Les sous- ou sur-dosages qui résultent d'une mauvaise répartition de l'engrais au sol conduisent à des effets négatifs sur la culture (Sogaard et Kierkegaard, 1994 ; Tissot *et al.*, 1999) mais aussi sur l'environnement (Tissot *et al.*, 2002), notamment dans le cas de la fertilisation azotée (**Figure 13**).

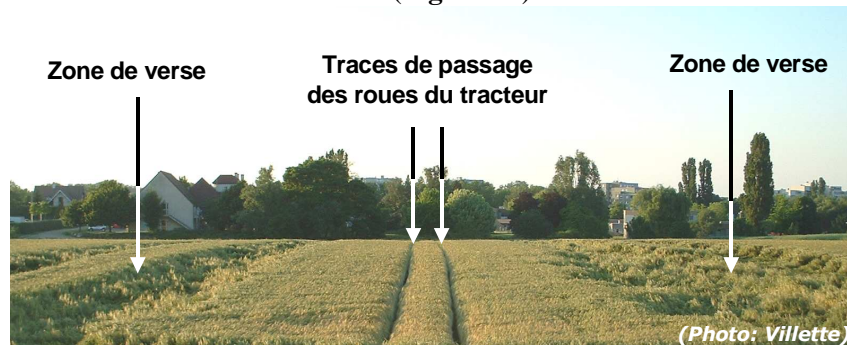


Fig 13 : Verse localisée (en bande) dans un champ de céréales. L'apport excessif d'azote dans la zone de recouvrement a provoqué une croissance trop rapide des tiges ce qui a fragilisé la plante.

Pour répondre aux considérations actuelles en matière de protection de l'environnement et de gain de productivité lors des travaux au champ, une meilleure maîtrise des opérations d'épandage s'avère nécessaire. Elle doit permettre l'augmentation des largeurs de travail et, dans un contexte d'agriculture de précision, rendre possible la modulation spatiale de la dose tout en maintenant la qualité de la répartition de l'apport.

Une collaboration pour une recherche finalisée

Depuis une quinzaine d'années, l'équipe GAP « Génie des Agroéquipements et Procédés » de l'ENESAD entretient des collaborations avec le Cemagref et en particulier avec l'équipe GEPAND « Génie des épandages ». Ces dernières années, dans le domaine de l'épandage d'engrais minéraux, l'implication de l'équipe GEPAND auprès des industriels s'est traduite par la mise en oeuvre d'une plateforme technologique d'appui en matière d'innovation et de promotion du concept d'écotechnologie (PEE, (**Encadré 1**)). Outre les tests de machines réalisés pour les constructeurs, l'équipe GEPAND a notamment conçu un nouveau banc d'essais appelé CEMIB (**Encadré 1**) (Piron et Miclet, 2006), et a procédé au transfert auprès des industriels de différents dispositifs permettant d'améliorer la qualité des épandages (par exemple le système Ecovision et les pales Epsilon, commercialisés par la société Sulky-Burel).

Les collaborations avec l'équipe GEPAND permettent à notre équipe d'envisager des transferts technologiques issus d'une partie de ses activités de recherche en vue de répondre aux besoins des industriels et de la profession agricole. Dans le cadre de l'étude des procédés d'épandage, une approche stroboscopique (Cointault, 2001) avait été utilisée en 2001 pour mesurer les vitesses d'éjection des grains d'engrais. En 2006, une seconde technique d'imagerie a été initiée pour faire directement apparaître dans l'image les trajectoires de l'engrais (Villette, 2006). Qualifiée d'acquisition « en filé », cette technique a pour but d'élaborer un dispositif plus simple, adapté à une large gamme de configurations de disques et susceptible (à terme) d'être embarqué sur un distributeur centrifuge.

Actuellement les travaux communs de l'équipe GAP et de l'équipe GEPAND du Cemagref se poursuivent sur la caractérisation des paramètres d'éjection de l'engrais au moyen d'un système d'acquisition d'images en filé. Le cahier des charges de ce dispositif impose d'être simple, robuste et peu coûteux. Ces contraintes ont pour objectif d'assurer au système un maximum de potentialités en terme de transfert ultérieur. Le dispositif vise ainsi plusieurs niveaux d'applications, de complexité

croissante mais permettant toutes de répondre à une attente du secteur agricole en matière d'épandage d'engrais.

Le premier niveau concerne la classification des engrais en fonction de leurs caractéristiques d'éjection et donc de leur aptitude à l'épandage. L'établissement par les centres techniques de tables d'équivalence des engrais et la diffusion de ces tables auprès des exploitants agricoles leur apporteraient une aide précieuse pour le réglage des machines.

Le second niveau d'application vise à proposer un système de mesure se substituant partiellement ou totalement aux tests traditionnels de diagnostic de la qualité des épandages. En effet, les tests actuels étant basés sur la mesure de la répartition au sol au moyen de bacs collecteurs, ils nécessitent des infrastructures lourdes lorsqu'ils sont menés en hall d'essais et sont particulièrement fastidieux lorsqu'ils sont réalisés au champ.

Enfin, le dernier niveau d'application consiste à embarquer le système d'imagerie sur la machine afin d'optimiser en temps réel le réglage de l'appareil au champ.

Un système alternatif de trajectographie

Pour ménager une gamme d'applications allant jusqu'aux systèmes embarqués, les développements se sont orientés vers une méthode de trajectographie alternative aux systèmes traditionnellement utilisés en laboratoire pour l'analyse du mouvement de particules. En effet, les techniques de PIV (Particle Image Velocimetry), d'imagerie rapide ou d'acquisition stroboscopique, apparaissent peu adaptées aux objectifs fixés (en terme de coût et de mise en oeuvre dans les conditions de fonctionnement d'un matériel agricole).

Le système d'imagerie (**Figure 14 et 15**) se base sur une acquisition en filé du mouvement des grains d'engrais. Il consiste à enregistrer dans l'image les traces laissées par les grains lors de leur mouvement à la sortie du disque d'épandage. Le dispositif expérimental utilisé pour ce projet se compose : d'une maquette de distributeur centrifuge, d'une caméra numérique monochrome placée à la verticale du flux d'engrais et de simples projecteurs pour l'éclairage (**Figure 14**).

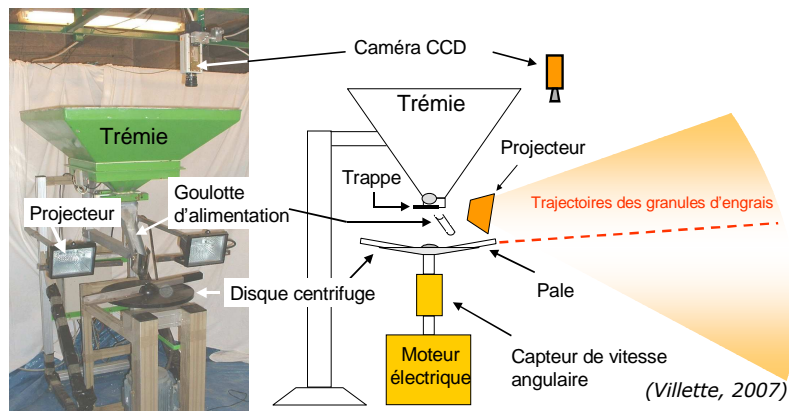


Fig 14 : Dispositif expérimental utilisé pour l'acquisition en filé des images d'épandage.

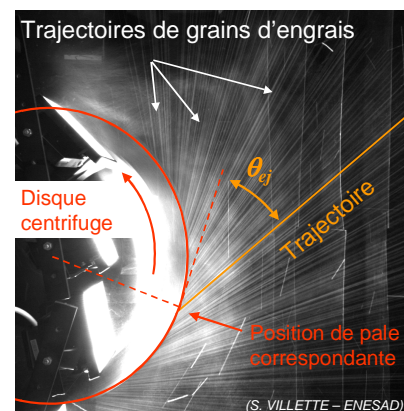


Fig 15 : Image acquise en filé d'une éjection d'engrais.

L'exploitation des traces laissées par les grains d'engrais dans les images acquises en filé (**Figure 15**) repose sur le calcul de la vitesse d'éjection à partir de l'angle d'éjection θ_{ej} , c'est-à-dire l'angle que fait la trajectoire par rapport à la tangente au disque. L'analyse cinématique (Villette *et al.*, 2005) du mouvement de l'engrais sur le disque centrifuge a montré que la mesure de l'angle horizontal d'éjection permet non seulement de déterminer la composante horizontale de la vitesse dans le cas d'un disque plat mais aussi les composantes tridimensionnelles de la vitesse dans le cas d'un disque tronconique (Villette *et al.*, 2008a). Cet aspect est particulièrement important puisque les disques tronconiques sont les plus usuels sur le marché. Sur la base de ce constat, il apparaît que l'objectif du système d'imagerie est de reconnaître les trajectoires des grains d'engrais et fournir la meilleure estimation possible de l'angle horizontal d'éjection correspondant.

Du fait des conditions d'acquisition au voisinage du dispositif centrifuge, l'image originale est inévitablement bruitée et présente de fortes variations de luminosité. Un filtre de détection de lignes de

crêtes a donc été spécifiquement développé (Villette *et al.*, 2007) pour permettre l'obtention d'une image binaire des axes des trajectoires suivies par les granules d'engrais.

L'image obtenue peut alors être analysée via le calcul d'une transformée de Hough spécifiquement adaptée (Villette *et al.*, 2006) à la situation d'une éjection centrifuge. Chaque trajectoire est alors caractérisée en coordonnées polaires par rapport à l'axe de rotation du disque centrifuge et l'angle d'éjection est déduit. A ce stade, les connaissances *a priori* issues du modèle mécanique permettent d'optimiser le traitement des images (**Encadré 6**).

Dans le cas d'un disque plat, le plan image étant parallèle au plan d'éjection de l'engrais, les angles mesurés dans l'image correspondent directement à ceux présents dans le plan d'éjection. En revanche, dans le cas de disques tronconiques, les trajectoires suivies par les granules ne sont plus parallèles au plan image et leur projection dans le plan focal de la caméra ne permet pas une mesure directe de l'angle d'éjection. Cet angle est alors déduit de l'angle apparent mesuré dans l'image après correction du biais lié à la prise de vue (Villette *et al.*, 2008b). La combinaison du modèle mécanique et de l'analyse géométrique de la prise de vue est particulièrement intéressante, puisqu'elle permet d'extraire une information 3D sur l'éjection de l'engrais à partir d'une image 2D de la scène.

La répartition angulaire du flux massique est quant à elle déduite de la fréquence de reconnaissance des trajectoires pour chaque secteur angulaire de la plage d'épandage. Moyennant l'utilisation d'un modèle de vol balistique, les informations déduites des images acquises en filé permettent de prédire la répartition de l'engrais au sol (**Encadré 7**).

La méthode a été validée en ce qui concerne l'estimation des composantes tri-dimensionnelles moyennes de la vitesse d'éjection. En ce qui concerne l'estimation de la répartition angulaire, les résultats sont cohérents avec ceux obtenus par les méthodes de référence mais il existe encore une marge de progression et des travaux restent à réaliser sur ce point (**Encadré 7**). Les algorithmes développés permettent de traiter le cas des disques plats et tronconiques équipés de pales simples. En revanche, des travaux de recherche restent nécessaires pour traiter le cas des pales à partage de flux (pales échancrées) qui sont assez courantes chez les constructeurs. Enfin, si la détermination de la vitesse moyenne d'éjection semble acquise en trois dimensions, l'estimation de la distribution verticale du flux massique reste encore un verrou à lever pour permettre au dispositif de répondre à l'ensemble des applications visées.

En terme d'évaluation, la validation globale de la méthode pour caractériser la nappe d'épandage ne peut être obtenue que par comparaison avec la répartition au sol réellement observée. Cette répartition réelle sera mesurée grâce au banc de test CEMIB développé et mis en service par l'équipe GEPAND du Cemagref.

CONCLUSION

En agriculture, les apports de produits phytosanitaires et d'engrais chimiques sont aujourd'hui confrontés à des exigences pouvant à première vue paraître contradictoires. Cependant, il devient indispensable de respecter l'environnement en ajustant, d'une part, les apports aux besoins locaux des plantes au sein d'une parcelle et d'autre part, il est nécessaire d'augmenter des largeurs de travail pour améliorer la productivité au champ et maintenir la compétitivité économique. Dans cette voie d'évolution, la conciliation de la précision des apports avec des débits de chantier élevés constitue un défi auquel sont confrontées les équipes de recherche pour répondre aux attentes de la profession agricole.

En partenariat avec les acteurs du secteur des agroéquipements et de la recherche universitaire, notre équipe a élaboré des propositions concrètes, basées sur la vision numérique, pour caractériser les cultures en vue d'une meilleure gestion de la pulvérisation d'herbicides et pour caractériser la distribution centrifuge d'engrais en vue d'améliorer la qualité des épandages.

Ces travaux s'inscrivent dans le développement de nouvelles technologies destinées, à terme, à être embarquées sur des outils agricoles pour optimiser les apports en terme de modulation spatiale et de qualité de répartition. Au niveau des équipements agricoles, l'adaptation de technologies innovantes aux besoins de terrain est une voie qui devrait à l'avenir, permettre de concilier sécurisation des productions agricoles et respect de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- Biller R. H., 1998. Reduced input of herbicides by use of optoelectronic sensors. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71, pp 317-362.
- Bossu J., 2007. Segmentation d'images pour la localisation d'adventices. Application à la réalisation d'un système de vision pour une pulvérisation spécifique en temps réel. Thèse de doctorat, soutenue le 4 décembre 2007, Université de Bourgogne.
- Bossu J., Gée Ch., Jones G., Truchetet F., 2009. Wavelet transform to discriminate between crop and weed in perspective agronomic images. *Computers and Electronics in Agriculture* Vol 65(1) p.133-143.
- Cointault F., 2001. Automatisation de la mesure du débit d'engrais et trajectographie des granulés d'engrais par imagerie rapide : application à la fertilisation raisonnée dans le contexte de l'Agriculture de Précision. Thèse de doctorat, soutenue le 20 décembre 2001, Université de Bourgogne.
- Gabor D., 1946. Theory of communication. *J. IEE (London)*, 93(III):429-457.
- Gée Ch., Bossu J., Jones G., Truchetet F., 2008. Crop/Weed discrimination in perspective agronomic images. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol 60/1, p.49-59.
- Jones G., Gée Ch., Truchetet F., 2009a. Modelling agronomic images for weed detection. Application to the comparison of crop/weed discrimination algorithm performances. *Precision Agriculture*. Vol 10 (1) p.1-15. DOI: 10.1007/s11119-008-9086-9
- Jones G., Gée Ch., Truchetet F., 2009b. Modelling agronomic images for weed detection. Application to the comparison of crop/weed discrimination algorithm performances. *Precision Agriculture Journal*, 10(1), pp.1-15. DOI: 10.1007/s11119-008-9086-9
- Kohavi R., et Provost F., 1998. Glossary of terms. *Machine Learning*, 30, pp 271-274.
- Leterme P-Y., 2000. Précision des épandages : une situation contrastée. *Perspectives Agricoles*, 263, pp 62-64.
- Piron E., Miclet D., 2006. Spatial distribution measurement: a new method for the evaluation and testing of centrifugal spreaders. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Centrifugal Fertiliser Spreading*, 24-25 octobre 2006, Cemagref, Pôle Epandage Environnement, Montoldre, France.
- Provost F., Fawcett T. et Kohavi R., 1998. The case against accuracy estimation for comparing induction algorithms. In *ICML '98 : Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning*, pages 445-453, San Francisco, CA, USA. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., 1992. The Algorithmic Beauty of Plants. *SIAM Review*, 34(1), pp. 142-143.
- Roussel D., 2006. Spreader field tests: the Dynatest method and spreading practice observations. *Proceedings of the 2nd International Symposium on centrifugal fertiliser spreading*. October 24-25, Montoldre, France.
- Sogaard H. T., Kierkegaard P., 1994. Yield reduction resulting from uneven fertilizer distribution. *Transactions of ASAE*, 36(6), pp 1749-1752.
- Streit L., Federl P., Costa Sousa M., 2005. Modelling plant variation through growth. *Computer Graphics Forum*, 24(3), pp. 497-506.
- Tissot S., Queron G., Miserque O., 1999. Tolérance d'une culture de froment à l'égard de l'hétérogénéité d'épandage des engrais azotés. *Biotechnology Agronomy Society Environment*, 3(3), pp 247-252.
- Tissot S., Miserque O., Mosrade O., Huyghebaert B., Destain J. P., 2002. Uniformity of N-fertilizer spreading and risk of ground water contamination. *Irrigation and drainage*, 51(1), pp 17-24.
- Villette S., 2006. Estimation de vitesse par analyse d'images acquises en filé : application à la caractérisation de la distribution centrifuge de granules d'engrais. Thèse de doctorat, soutenue le 12 décembre 2006, Université de Bourgogne.
- Villette S., Piron E., Cointault F., Chopinet B., 2005. Centrifugal spreading : an analytical model for the motion of fertiliser particles on a spinning disc. *Biosystems Engineering*, 92(2), pp 157-164, DOI:10.1016/j.biosystemseng.2005.06.013.

- Villette S., Cointault F., Chopinet B., Paindavoine M., 2006. Optimizing Hough transform for fertilizer spreading optical control. *Optical Engineering* 45(2) 027006, 11 pages.
- Villette S., Cointault F., Chopinet B., Zwaenepoel P., Paindavoine M., 2007. Nouveaux filtres optimisés pour la détection de lignes de crêtes. Actes du XXI^e Colloque GRETSI. Présentation poster. 11-14 septembre 2007, Troyes, France.
- Villette S., Piron E., Cointault F., Chopinet B., 2008a. Centrifugal spreading of fertiliser: Deducing three-dimensional velocities from horizontal outlet angles using computer vision. *Biosystems Engineering*, 99(4), pp 496-507, DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2007.12.001.
- Villette S., Cointault F., Piron E., Chopinet B., Paindavoine M., 2008b. Simple imaging system to measure velocity and improve the quality of fertilizer spreading in agriculture, *Journal of Electronic Imaging*, 17(3), pp 1109-1119; DOI:10.1117/1.2956835.
- Vioix J-B., 2004. Conception et réalisation d'un dispositif d'imagerie multi-spectrale embarqué : du capteur aux traitements pour la détection d'adventices. Thèse de doctorat, soutenue le 8 juillet 2004, Université de Bourgogne.

ENCADRE N°1 : Abréviations

UP-GAP : Unité Propre du ministère de l'agriculture et de la pêche – Génie des Agroéquipements et des Procédés. Site Web : <http://www.enesad.fr/index.php?id=53> . A compter du 1^{er} mars 2009, l'ENESAD devient AgroSup Dijon.

TECNOMA : Société de pulvérisateurs - 54 rue Marcel Paul – 51200 Epernay- Site Web : <http://www.tecnoma.com>

Cemagref : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement.

LE2I : Laboratoire d'Electronique, Informatique et Image.

PEE : Pôle Epandage Environnement inauguré en juin 2007.

CEMIB : banc radial de caractérisation des nappes d'épandage. Système unique en Europe, médaille d'argent 2007 au SIMA (salon mondial des fournisseurs de l'agriculture).

ENCADRE N°2 : Filtre de Gabor bi-dimensionnel – Rep représentation spatiale

Le filtre de Gabor à une dimension repose sur une fonction gaussienne modulée par une oscillation complexe (Gabor, 1946). Il est défini par sa réponse impulsionnelle :

$$g(x) = e^{-x^2/2\sigma^2} \cdot e^{2j\pi u_0 x}$$

Dans cette équation, l'écart-type σ caractérise la largeur de la fenêtre spatiale du filtre, la fréquence centrale étant fixée par u_0 .

Dans le cas d'images (2D) agronomiques où les lignes de semis sont localisées le long de l'axe vertical (axe Y) l'expression du filtre devient :

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \cos(2\pi u_0 x)$$

avec u_0 la fréquence du semis (axe X) et σ_x et σ_y les écart-types selon les axes X et Y, associés aux coordonnées spatiales x et y du champ de culture supposé plat ($z = 0$).

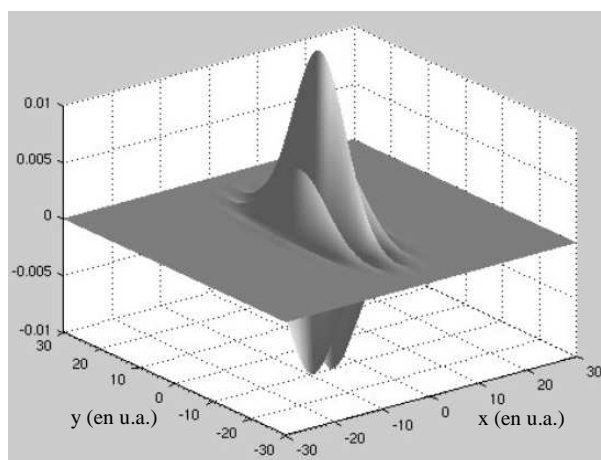


Fig 4 : Allure de la réponse impulsionnelle du filtre de Gabor en deux dimensions dans le domaine spatial.



Fig 5 : Image réelle d'une culture de céréales en présence d'adventices.



Fig 6 : Image filtrée au moyen du filtre de Gabor.

Les **Figures 5 et 6** illustrent l'efficacité du filtre de Gabor. En fausse couleur (orange / vert) est représenté sur la **Figure 6** le résultat de la classification culture / adventices (adventices = mauvaises herbes). Dans cette image, le filtre sur-détecte la classe « adventices » car le filtre n'est pas d'assez grande largeur : les bords de la culture (en orange) étant souvent considérés comme adventices (en vert).

ENCADRE N°3 : Modélisation d'un champ agronomique et création d'une image virtuelle

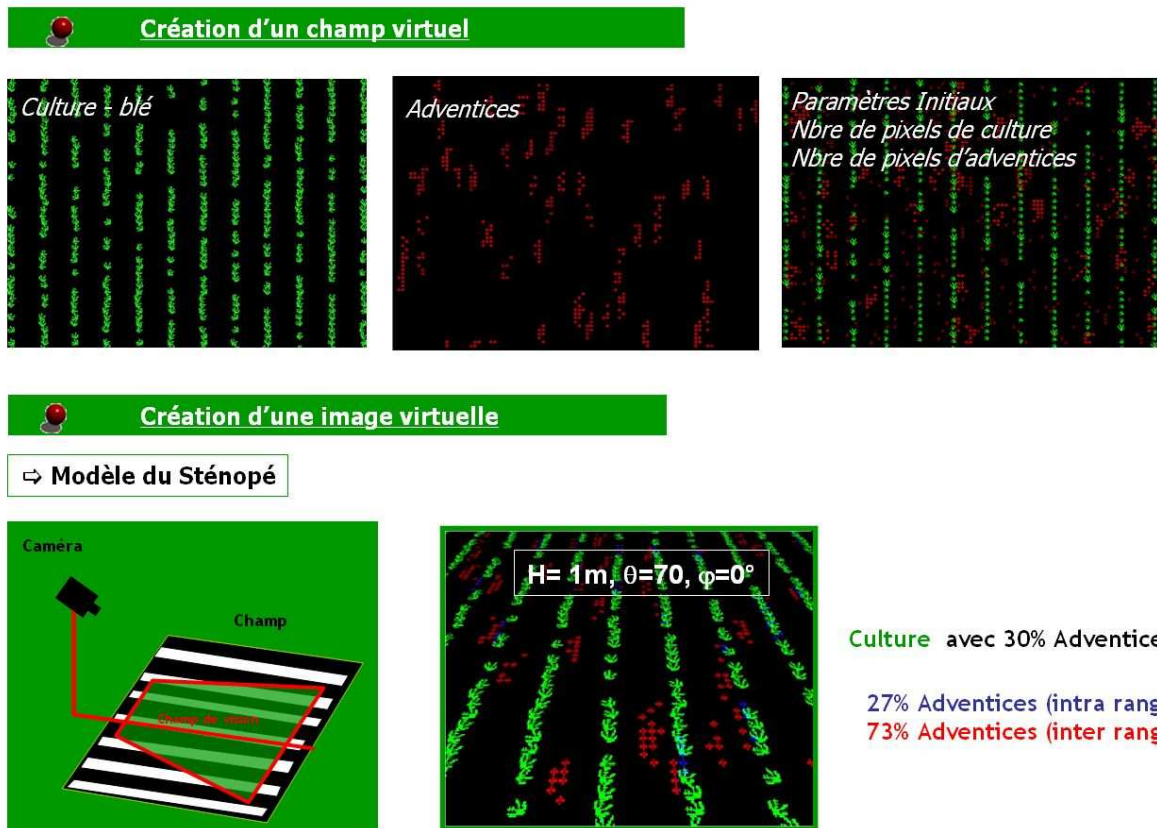


Fig 7 : Synoptique de la modélisation d'une parcelle de céréales.

La modélisation d'une parcelle céréalière (**Figure 7**) est réalisée avec un semis périodique (en vert) présentant quelques « trous » pour mieux modéliser la réalité. En rouge, sont représentées deux distributions spatiales d'adventices, ponctuelle et agrégative (2 motifs différents). Les plantes sont représentées en fausses couleurs. Pour cet exemple, la construction du champ virtuel a été paramétrée avec une fréquence inter-rang de 16 cm, un semis continu (blé) et un taux d'infestation d'adventices de 30%. L'image virtuelle est obtenue en modélisant la prise de vue à travers un système optique situé à une hauteur de 1 m du sol et faisant un angle de 70° avec l'axe vertical. Dans l'image finale sont représentées en vert, la culture, en bleu les adventices situées dans l'inter-rang et en rouge les adventices situées dans l'intra-rang.

ENCADRE N°4 : Matrice de confusion pour un système de classification à deux classes (culture / adventices)

		<i>Déte�t�</i>	
		Culture	Adventice
<i>Initial</i>	Culture	<i>VC</i>	<i>FA</i>
	Adventice	<i>FC</i>	<i>VA</i>

Avec :

$$\%TI_{initial} = \frac{FC + VA}{FC + VC + FA + VA}$$

$$\%TC_{initial} = 100 - \%TI_{initial}$$

Fig 8 : Dans la matrice de confusion, VC (Vraie Culture) représente le nombre de prédiction correctes de la classe culture initiale, VA (Vraie Adventice) représente le nombre de prédiction correctes de la classe adventice initiale, FC (Fausse Culture) représente le nombre de prédiction incorrectes de la classe culture initiale (ou erreur commise par l'algorithme) et FA (Fausse Adventice) représente le nombre de prédiction incorrectes de la classe adventice initiale (ou erreur commise par l'algorithme).

Dans le cas d'un système de classification parfaite, 100% de la culture (VC = 100% et FA = 0%) et 100% des mauvaises herbes (ou adventices) sont bien détectées (FC = 0% et VA = 100%). Les éléments non diagonaux de la matrice de confusion sont nuls.

Afin d'étudier la capacité des algorithmes testés (ou systèmes de classification)   bien détecter un pixel comme étant de la culture ou de la mauvaise herbe, nous avons illustré Fig 9 l'évolution des quatre éléments de la matrice (VC, FA, FC et VA) en fonction du taux d'infestation initial (%TI_{initial}) ou du taux de culture (%TC_{initial} = 100 - %TI_{initial}) initialement choisi dans la modélisation.

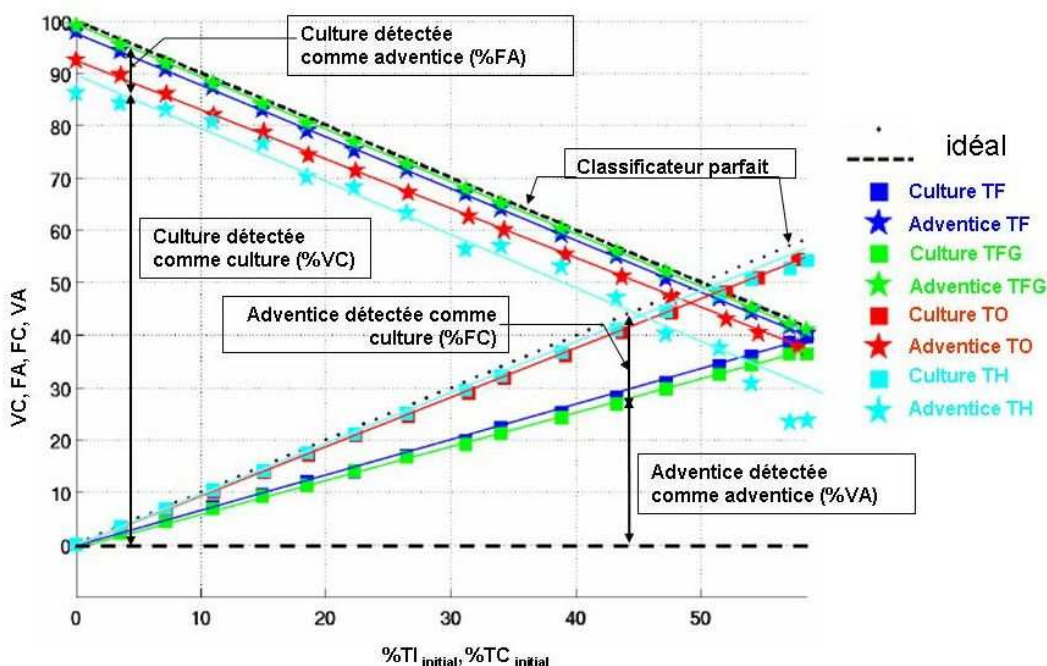


Fig 9 : Représentation des prédiction correctes/incorrectes d'adventices et de culture en fonction du Taux d'Infestation Initial (%TI_{initial}) et du Taux de Culture Initial (%TC_{initial}) obtenus pour quatre algorithmes testés à partir d'images simulées.

Quatre algorithmes ont ainsi pu être testés : un filtre de Gabor basé sur une transformée de Fourier (TF), un filtre de Gabor basé sur une transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFG), une transformée en ondelettes de type Debauchies 25 (TO) et une transformée de Hough (TH).

Sur la Fig 9, les résultats pour chaque algorithme sont représentés par une couleur (par ex. rouge pour la TO), la composante VC est symbolisée par une étoile et la composante VA est, quant à elle, représentée par un carré. Dans le cas d'une classification parfaite (FC = FA = 0%) si %TI = 0 alors VC

= 100% et si $\%TI = 45$ alors $VC = 55\%$. Nous construisons ainsi les 2 droites en pointillé sur la Fig 9, l'une étant la complémentaire de l'autre, l'une étant associée à la composante VC et l'autre à la composante VA . Dans le cas d'une classification imparfaite (cas des algorithmes testés), les composantes FC et FA ne sont plus nulles, ce qui a pour conséquence que les droites ainsi obtenues ne se superposent pas à celles d'une classification parfaite (en pointillé). Ainsi, l'écart entre ces droites et celles obtenues dans le cas d'un système de classification parfaite permet de rendre compte des erreurs commises sur la détection de la culture (FA) et des mauvaises herbes (FC).

Dans le cas des algorithmes (TF et TFG), la Fig 9 met clairement en évidence une erreur importante dans la détection des mauvaises herbes (sous-estimation par rapport à une classification parfaite) impliquant une sur-estimation des pixels identifiés comme étant de la culture.

ENCADRE N°5 : Epandage dans une parcelle agricole

La réalisation d'un épandage d'engrais au moyen d'un distributeur centrifuge nécessite une série de passages adjacents dans la parcelle.

La quantité d'engrais distribuée lors d'un passage diminuant de part et d'autre de l'axe d'avancement du tracteur, la distance de projection et le profil transversal de la répartition doivent être en adéquation avec la distance séparant deux passages parallèles successifs. Cette adéquation conditionne l'apport de la bonne dose dans les zones de recouvrement.

La qualité de la répartition de l'engrais résulte de la forme du profil transversal de la distribution qui lui-même découle des effets combinés des paramètres d'éjection (vitesse, répartition angulaire du flux) et du comportement en vol de l'engrais.

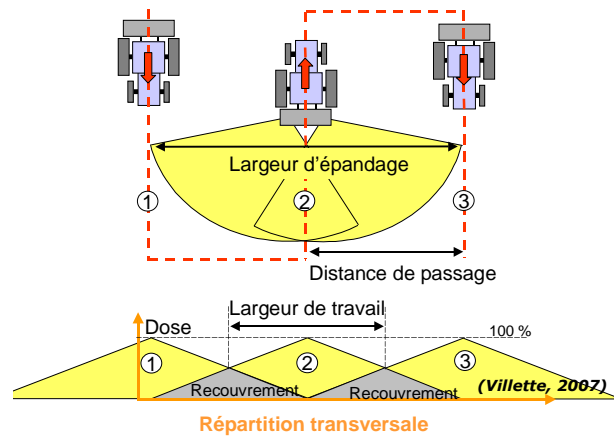
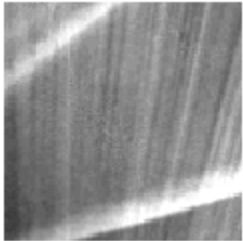


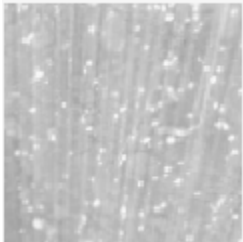

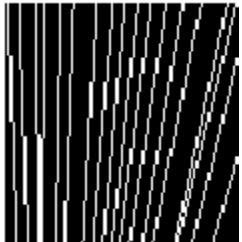


Fig 12 : Principe d'un épandage avec un distributeur centrifuge dont la répartition transversale est triangulaire (Villette, 2006).

ENCADRE N°6 : Une approche robuste

Le tableau ci-dessous illustre les résultats des algorithmes de traitement sur des images acquises en filé pour une même situation d'épandage mais dans des conditions différentes de prise de vue, notamment en terme d'arrière plan. Pour chacune des deux modalités, le tableau présente un extrait de l'image originale en niveau de gris, l'extrait de l'image binaire correspondante (après filtrage), les trajectoires identifiées par la transformée de Hough et enfin les caractéristiques de vitesse déduites des images (moyenne et écart-type calculés sur une série de 7 images acquises dans les mêmes conditions).

Les algorithmes étant basés sur la reconnaissance de structures rectilignes dans l'image, ils s'avèrent relativement robustes et permettent d'obtenir une estimation correcte de la vitesse d'éjection dans le cas d'images bruitées. La prise en compte des connaissances issues du modèle mécanique permet de définir la plage des orientations probables et ainsi de limiter fortement les fausses détections de trajectoires.

Extrait d'une image en niveau de gris	Image binaire	Trajectoires identifiées	Vitesse déduite
			Moyenne : $\bar{v} = 35,28 \text{ m.s}^{-1}$ Ecart-type : $\sigma_v = 0,72 \text{ m.s}^{-1}$
			Moyenne : $\bar{v} = 35,23 \text{ m.s}^{-1}$ Ecart-type : $\sigma_v = 0,75 \text{ m.s}^{-1}$

ENCADRE N°7 : De l'image à la prédiction de la répartition au sol

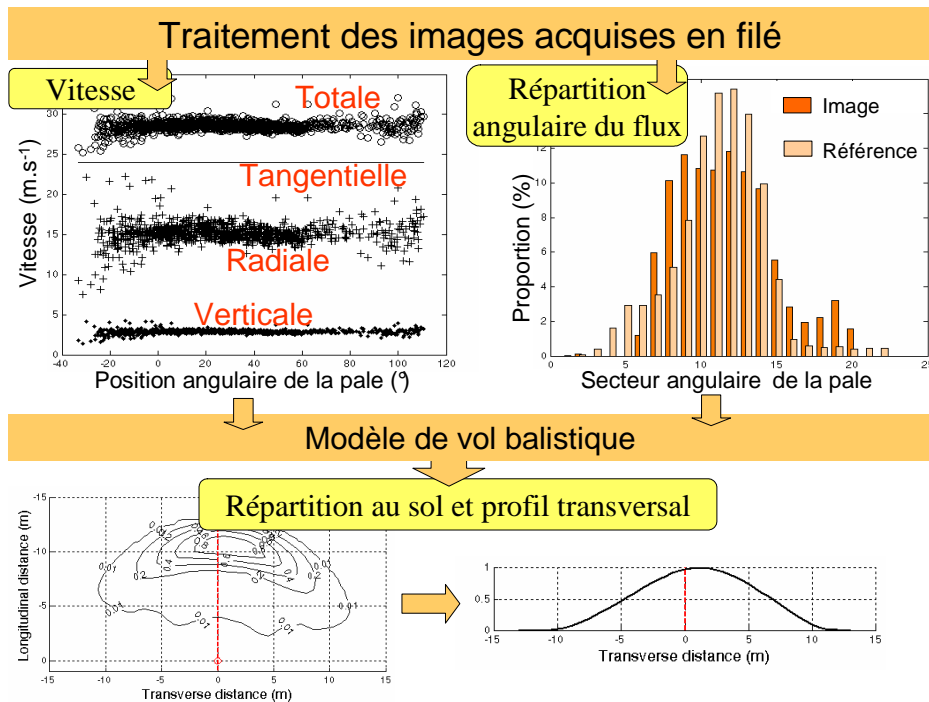


Fig 16 : Synoptique de la prédiction de la répartition de l'engrais au sol à partir des informations extraites d'images acquises en filé. Les résultats présentés ici sont issus d'environ 1000 trajectoires identifiées dans 30 images.

L'analyse géométrique de la prise de vue, couplée à l'analyse cinématique du processus centrifuge permet de déduire, de chaque trajectoire identifiée, les composantes 3D de la vitesse d'éjection correspondante. Chaque trajectoire étant associée à une position angulaire de la pale du disque d'épandage, l'historgramme de la répartition angulaire des éjections en sortie de disque peut être reconstruit à partir de ces informations. Cet histogramme constitue une estimation de la répartition angulaire du flux massique de l'engrais. Néanmoins l'estimation de ce paramètre de distribution reste encore à améliorer. La marge de progrès est visible sur la superposition avec l'historgramme de référence qui est obtenu en interceptant le flux au moyen de bacs collecteurs.

Les informations de vitesse et de répartition angulaire sont ensuite utilisées comme paramètres initiaux d'un modèle de vol balistique qui requiert également une information sur la granulométrie de l'engrais et son coefficient de traînée dans l'air.