

Trajectographie de granulés d'engrais par imagerie rapide : vers une maîtrise de l'épandage centrifuge

Frédéric Cointault^a, Sylvain Villette^a, Christophe Debain^b et Michel Paindavoine^c

L'émérgence des concepts d'agriculture de précision et d'agriculture durable s'inscrit dans une logique de respect de l'environnement et en particulier de gestion précise des intrants dans une parcelle, en intégrant les variabilités intra et interparcellaires (Robert, 1999). Une des pratiques culturales nécessitant une telle démarche est la fertilisation minérale ou organique. Nous nous sommes intéressés à la fertilisation minérale, en étudiant le processus d'épandage des distributeurs centrifuges d'engrais, principe le plus répandu en France et en Europe. Le contrôle de ce type de fertilisation doit permettre, d'une part d'optimiser les rendements, et d'autre part de respecter l'environnement. Dans le contexte de l'agriculture de précision, seuls des systèmes de régulation à boucle fermée, avec des capteurs appropriés pour contrôler la distribution d'engrais, pourraient permettre une gestion précise de la dose locale de fertilisant.

Bien que mécaniquement simples, les distributeurs centrifuges d'engrais utilisés pour la fertilisation minérale mettent en jeu des lois physiques complexes qui ne sont pas totalement caractérisées aujourd'hui. Deux paramètres doivent être alors contrôlés sur chaque disque de l'épandeur : la dose d'engrais et sa répartition spatiale au sol. Nous avons focalisé nos recherches sur ce second paramètre, en étudiant les conditions initiales d'éjection des granulés d'engrais en sortie du disque d'épandage. En effet, il existe une relation directe entre la distribution des granulés autour de chaque disque et la répartition de l'engrais au sol.

Nous présentons dans cet article une méthode de détermination des trajectoires des granulés d'engrais en sortie du disque d'épandage, pour une intégration des données dans un modèle de vol balistique et une prédiction de la répartition d'engrais obtenue au sol. Après une première partie consacrée à la description succincte du processus d'épandage centrifuge, nous présentons une maquette de distributeur centrifuge ainsi que le système de prise d'images mis en place pour évaluer les conditions initiales d'éjection des granulés. Nous décrivons ensuite les traitements des images par des méthodes d'estimation de mouvement, puis nous présenterons les résultats obtenus et les répartitions d'engrais calculées. Enfin nous développerons les perspectives d'évolution de notre système et les diverses utilisations possibles.

Le processus d'épandage centrifuge des engrais minéraux

L'épandage centrifuge est une technique simple et économique permettant de répandre des engrais minéraux dans les champs. Elle peut se résumer en trois phases :

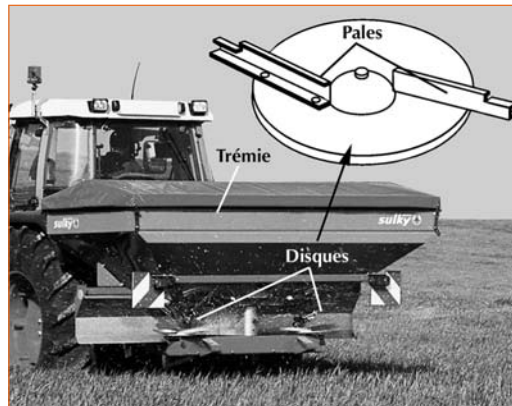
- écoulement de l'engrais vers les disques ;
- accélération des granulés d'engrais le long des pales et éjection ;
- vol balistique.

Les distributeurs centrifuges (figure 1) sont classiquement constitués d'une trémie (simple ou

Les contacts

a. UMR CPAP
« Capteurs et procédés pour l'agriculture de précision », Cemagref/ENESAD,
26, bd. du Docteur Petitjean, BP 87999,
21079 Dijon Cedex
b. Cemagref, UR Technologies, systèmes d'information et procédés pour l'agriculture et l'agroalimentaire,
24, avenue des Landais, BP 50085,
63172 Aubière Cedex
c. LE2I, UMR CNRS 5158, université de Bourgogne, Aile des sciences de l'ingénieur,
BP 47870, 21078 Dijon

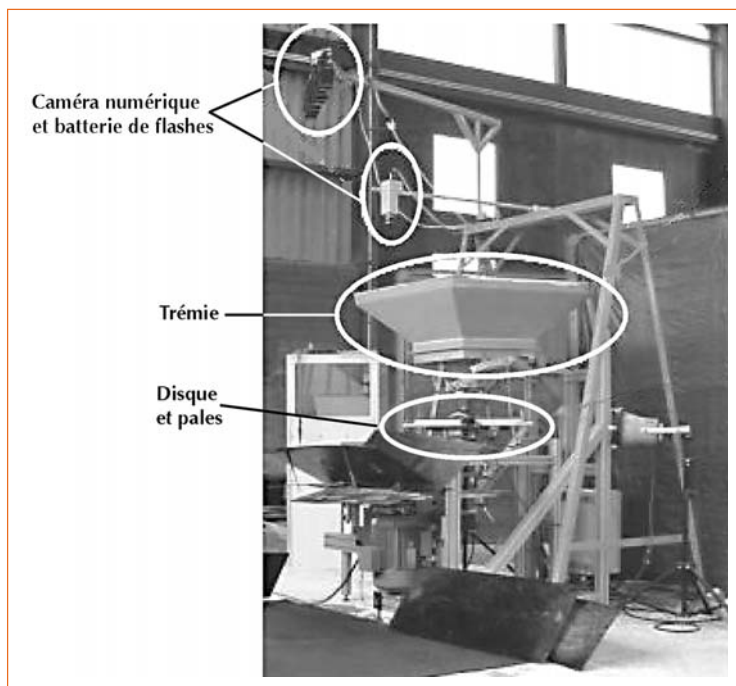
► Figure 1 – Distributeur centrifuge classique et vue de détail d'un des deux disques.



double) pour le stockage de l'engrais, et de deux disques rotatifs munis de pales.

Rappelons que les paramètres importants à respecter sont la dose d'engrais apportée et la qualité de sa répartition au sol et que la maîtrise de ce dernier paramètre passe par la détermination des conditions initiales d'éjection des granulés, objet de notre recherche. Or, ces conditions d'éjection varient en fonction de nombreux facteurs tels que la nature de l'engrais (granulométrie, densité...) la vitesse de rotation du disque, le débit massique... Les résultats d'études précédentes (Colin, 1997 ; Olieslagers, 1997) ont montré que cette distribution spatiale pouvait être estimée précisément en

▼ Figure 2 – Maquette d'épandeur dans le hall d'essais du Cemagref (photo F. Cointault).



calculant le vol balistique des particules, à partir des conditions initiales de vol, de leurs propriétés et de leurs paramètres géométriques. Ces conditions initiales reposent sur la détermination des vitesses et des angles d'éjection des granulés.

Notre approche s'est ainsi focalisée sur la caractérisation des trajectoires au voisinage du disque, avec des capteurs sans contact (pour ne pas perturber le flux), et plus précisément des capteurs d'images. Cependant, les granulés ayant une vitesse proche de 100 km/h lorsqu'ils quittent le disque, les techniques d'imagerie classique ne permettant pas de les voir correctement et individuellement à leur sortie. Une méthode de prise d'images rapides a été choisie pour caractériser cette éjection. Une maquette de distributeur simplifiée a été conçue pour réaliser notre étude. La méthode de prise d'images ainsi que cette maquette sont présentées dans le chapitre suivant.

La maquette du distributeur et le système de prise d'images

La maquette (figure 2) est une version simplifiée d'un distributeur d'engrais et se compose d'une trémie, d'un système d'alimentation de l'engrais et d'un disque plat muni de deux pales radiales. Les vitesses de rotation sont comprises entre 720 tr/min et 1 200 tr/min.

Les premiers tests de prise d'images ont été réalisés à l'aide d'une caméra rapide fonctionnant jusqu'à 500 ips (images par seconde), mais le format des images obtenu (350 x 262, soit 91 700 pixels) ne permettait pas de fournir la résolution requise pour couvrir l'ensemble du champ de la projection angulaire (approximativement 1,5 m²). Dans l'optique d'obtenir le champ souhaité, une haute résolution, un coût acceptable, et de permettre la mise en œuvre de diverses méthodes d'estimation du mouvement, nous avons conçu un nouveau système d'acquisition d'images (Cointault *et al.*, 2002). Cette solution alternative (coût faible et haute résolution) est obtenue par la combinaison d'une caméra numérique noir et blanc haute résolution (1 million de pixels) et d'une batterie de flashes travaillant dans un mode série pendant chaque temps d'exposition (figure 3). Les images multi-exposition collectées avec la caméra installée perpendiculairement au flux de sortie des granulés sont analysées pour estimer les trajectoires (directions et vitesses) des granulés d'engrais.

L'image obtenue (figure 4) représente le même jet d'engrais pris à différents instants. Une telle image est ensuite décomposée en une séquence d'images rapides, identique à celle que nous obtiendrions avec une caméra rapide adéquate, mais pour un coût plus faible et une résolution bien meilleure.

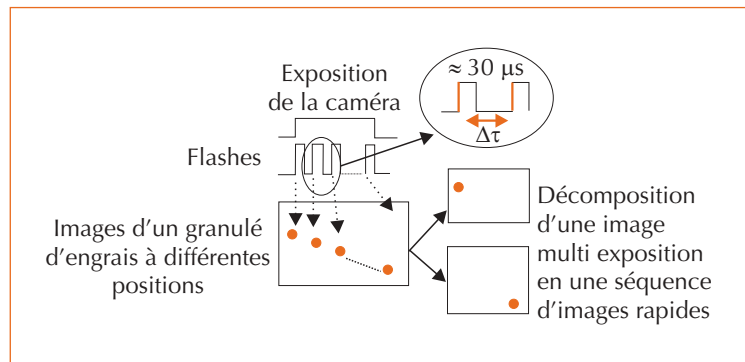
Les flashes ont été modifiés pour éclairer pendant une durée courte (environ $20 \mu\text{s}$), dans le but de prévenir le flou dû au mouvement rapide des granulés. Le délai entre chaque flash est ajustable de 16 ms à $128 \mu\text{s}$, grâce à un microcontrôleur (cadences caméra entre 122 ips et 7 812 ips). La caméra et les flashes sont synchronisés avec la rotation du disque, de sorte que le premier flash soit toujours déclenché à une position angulaire donnée du disque.

Les analyses d'images par des méthodes d'estimation du mouvement

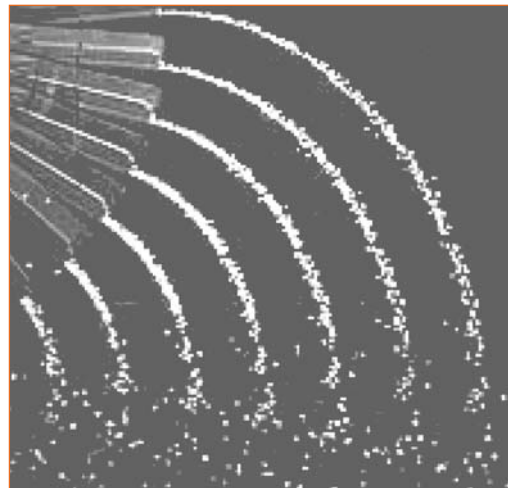
Il existe trois grandes catégories de méthodes permettant d'estimer le mouvement :

- l'approche par mise en correspondance bas niveau (Dubois *et al.*, 2000) ou haut niveau. Cette méthode travaille avec un voisinage spatio-temporel de pixels ;
- l'utilisation de transformées : fréquentielles (Fourier), spatio-fréquentielles (Gabor) (Heeger, 1988), énergétiques ;
- les méthodes différentielles et équations aux dérivées partielles. Elle travaille alors localement, au niveau du pixel, et repose principalement sur l'hypothèse d'invariance de luminance d'un pixel d'un objet 2D lors d'un déplacement entre deux images successives (Horn et Schunck, 1981).

Nous avons d'abord testé une méthode par mise en correspondance bas niveau appelée *intercorrélation*. En effet, cette méthode reste la référence en matière d'estimation du mouvement et permet d'estimer des déplacements très importants (plusieurs dizaines de pixels par image). Ensuite nous avons choisi une méthode basée exclusivement sur les relations géométriques obtenues en sortie du disque, et permettant de modéliser les jets théoriques d'engrais. Enfin, étant donné la faible taille de nos granulés, il est apparu important de travailler localement et donc d'utiliser une des méthodes différentielles basée sur l'emploi des champs de Markov.



▲ Figure 3 – Principe d'acquisition d'images rapides multi-exposition.



◀ Figure 4 – Exemple d'image multiexposition (engrais NPK 17-17-17).

La méthode intercorrélation

Cette méthode permet d'estimer des déplacements de grande amplitude, contrairement aux méthodes par transformées ou différentielles, en recherchant les objets en mouvement qui sont identiques dans les deux images, après le choix d'un bloc de pixels. Cependant elle reste limitée aux mouvements de translation ou de rotation pures, et est sensible au bruit. Elle fournit en outre la même vitesse pour chacun des pixels d'un même bloc, ce qui est un inconvénient pour les granulés d'engrais : en effet, tous les granulés n'ont pas la même granulométrie et de ce fait ils n'ont pas la même trajectoire. D'autre part, leur comportement est complexe, entraînant une dispersion des positions selon un processus aléatoire autour de directions principales. Cette dispersion ne permet pas à l'intercorrélation de calculer correctement les déplacements de ceux-ci.

La modélisation théorique des jets d'engrais

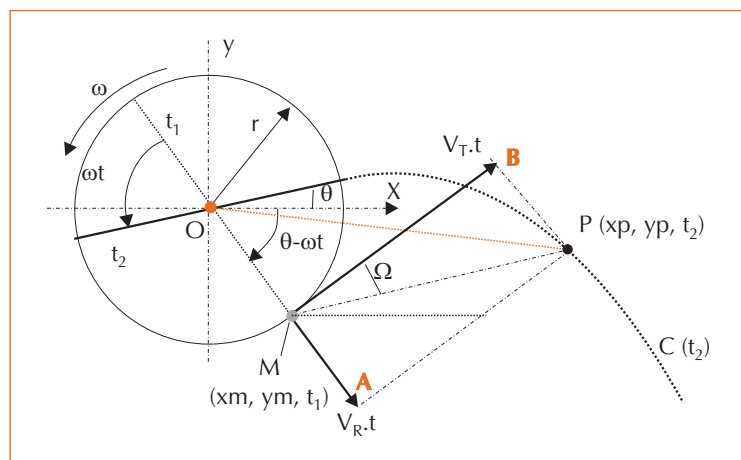
Pour éviter les problèmes précédents, nous avons établi les relations géométriques des trajectoires au moment de l'éjection, de manière à obtenir les formes théoriques des jets d'engrais. Les 7 modélisations établies (liées aux 7 flashes) permettent ensuite une évaluation du déplacement. Les résultats laissent apparaître de petits décalages de l'ordre de 3 à 5 pixels entre les positions calculées et les positions réelles des granulés. Ces erreurs sont beaucoup plus faibles qu'avec l'intercorrélation mais doivent encore être réduites. La figure 5 présente un schéma d'un disque d'épandage et de ses deux pales à deux moments différents : O est le centre du disque, r le rayon des pales, M le point d'éjection d'un granulé donné à l'instant t_1 et P la position de cette même particule à l'instant t_2 .

Sur cette figure, la courbe C représente une position instantanée du jet global. La forme de cette position est superposée à la position réelle dans une image d'une séquence obtenue avec notre système. Cet ajustement est réalisé pour toutes les positions d'un même jet. Ceci permet de déterminer les caractéristiques moyennes du mouvement des particules.

Champs de Markov

Un affinement des résultats précédents est nécessaire pour pallier les erreurs rencontrées. En effet, ces erreurs, même minimales, sont obtenues pour des déplacements relativement courts (7 cm), comparés à l'éjection globale (15 m). Notre affinement a été réalisé en utilisant les champs de Markov (Heitz et Bouthemy, 1993).

▼ Figure 5 – Schéma de l'éjection d'un granulé à deux instants différents t_1 et t_2 .



Cette approche fournit un modèle mathématique global et puissant permettant de définir des interactions locales non linéaires entre les pixels. La caractéristique locale est exprimée par la définition d'un voisinage pour chaque pixel. L'idée principale est que le niveau de gris d'un pixel dépend uniquement de ceux de ses voisins, et non de ceux de l'ensemble des pixels d'une image. On cherche alors à extraire des primitives ou étiquettes à partir d'observations : c'est donc une méthode *a posteriori*. Le champ d'observation représente ainsi l'ensemble des données disponibles, c'est-à-dire les deux images successives, et le champ de primitives correspond à l'information que nous recherchons, c'est-à-dire le mouvement.

Cette méthode est cependant limitée, d'après nos différents essais et les éléments bibliographiques (Graffigne *et al.*, 1995), à la détection de déplacements strictement inférieurs à 5 pixels/image. Nous ne pouvons donc pas utiliser cette méthode telle quelle sur nos images d'engrais, puisque nos déplacements sont d'environ 75 pixels/image pour les plus faibles.

Pour ramener la taille des déplacements des engrais à des valeurs détectables par la méthode, la modélisation théorique, vue précédemment, est utilisée comme initialisation des Champs de Markov.

Résultats

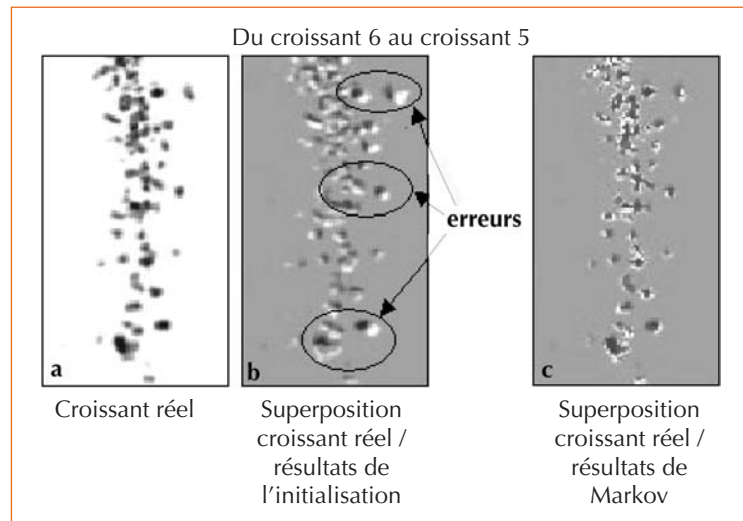
La méthode utilisant la modélisation théorique seule suppose que les vecteurs vitesses ont tous la même norme. Dans notre cas, les interactions entre les granulés et leurs caractéristiques, notamment géométriques, ne permettent pas de vérifier cette hypothèse.

La combinaison de cette modélisation avec la méthode d'analyse du mouvement utilisant les champs de Markov permet d'obtenir un champ de vecteurs déplacements plus précis, comme il est montré dans la figure 5 (test réalisé avec du chlorure de potassium [KCl]). La figure 6b représente la superposition entre l'image réelle (6a, pixels gris) et l'image reconstruite à partir des vecteurs calculés par la modélisation théorique des jets d'engrais (pixels blancs). Un flou apparaît entre les positions réelles et calculées des granulés, ce qui ne permet pas d'obtenir des déplacements corrects. La figure 6c représente la superposition entre l'image originale (pixels gris) et l'image corrigée par les champs de Markov (pixels blancs).

Toutes ces constatations ont été vérifiées pour l'ensemble de nos données :

- trois engrais différents : KCl 60 %, Ammonitrate 33,5 % et NPK 17-17-17,
- trois types de pales radiales : longues (325 mm), moyennes (275 mm), courtes (225 mm),
- différentes vitesses de rotation du disque : 600 à 1 000 tr/min,
- différents débits : de 0,1 à 1,3 kg/s.

Ceci justifie l'utilisation de la méthode par champs de Markov pour corriger les directions et intensités des vitesses des granulés. Le tableau 1 donne les vitesses instantanées obtenues pour le nitrate d'ammonium, pour deux granulés différents d'un même jet d'engrais. Ces granulés ont été choisis aléatoirement et les vitesses sont exclusivement calculées par les deux méthodes détaillées précédemment, en omettant l'intercorrélation pour laquelle les résultats sont beaucoup moins bons. Les déviations standards et les erreurs minimum et maximum correspondantes, pour l'ensemble du jet d'engrais cette fois-ci, sont données dans le tableau 2. Les vitesses réelles sont calculées manuellement entre deux images successives réelles. Dans les tableaux 1 et 2, V_i est la vitesse calculée avec la modélisation théorique des jets d'engrais, V_m est la vitesse calculée avec les champs de Markov et V_r est la vitesse réelle calculée comme expliqué ci-dessus. De même, « ouverture » correspond à l'ouverture de la trappe de la trémie permettant de définir un certain débit d'engrais.



▲ Figure 6 – Comparaison des résultats champs de Markov/méthode de modélisation pour du chlorure de potassium.

Comme on le remarque dans les tableaux 1 et 2, les résultats obtenus avec les champs de Markov sont bien meilleurs. Le tableau 3 (page 72) donne maintenant les angles d'éjection Ω obtenus pour trois engrais (ammonitrate (A), chlorure de potassium (KCl), NPK), et avec la combinaison des deux méthodes d'estimation du mouvement précédemment évoquée.

Les termes j_i donnent les numéros des positions successives d'un même jet d'engrais, sachant que le n° 8 est le plus éloigné du disque. Les varia-

Vitesses (m/s) délai flash 2,048 ms	$\omega = 800$ tr/min pales longues (325 mm) ouverture = 25 mm	$\omega = 800$ tr/min pales longues (325 mm) ouverture = 25 mm
Vitesses réelles (V_r)	34,02	33,9
Vitesses modélisation (V_i)	33,54	33,43
Vitesses Markov (V_m)	34,04	33,92
$(V_i - V_r)/V_r$	-1,40 %	-1,39 %
$(V_m - V_r)/V_r$	0,06 %	0,06 %

◀ Tableau 1 – Comparaisons entre les différentes vitesses pour le nitrate d'ammonium.

Vitesse réelle moyenne $\bar{V}_r = 33,97$ m/s	Dev. Std. (m/s)	Erreur Min / \bar{V}_r	Erreur Max / \bar{V}_r
Vitesses modélisation (V_i)	0,2390	0,43 m/s (1,26 %)	0,54 m/s (1,61 %)
Vitesses Markov (V_m)	0,0492	0 m/s (0 %)	0,07 m/s (0,21 %)

◀ Tableau 2 – Déviations standards (Dev. Std.) et erreurs obtenues pour le nitrate d'ammonium.

► Tableau 3 – Angles d'éjection Ω pour trois engrais, dans les mêmes conditions.

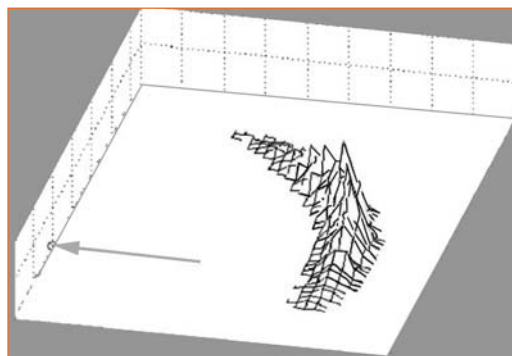
	Jets	Ω (°)		
		A	KCl	NPK
$\omega = 800$ tr/min	j8 -> j7	35,4°	26,1°	36,5°
Pales courtes (225 mm)	j7 -> j6	35,4°	27,5°	36,5°
Délai flash 4,096 ms	j6 -> j5	35,8°	27,9°	36,5°
Ouverture = 20 mm	j5 -> j4	35,8°	29,7°	37,2°
	j4 -> j3	36,1°	31°	37,2°

tions de Ω peuvent s'expliquer par les interactions entre les granulés, par l'effet de lift des particules (rotation sur elles-mêmes)... Néanmoins, on constate que pour des engrais sphériques (A et NPK), les valeurs sont voisines, autour de 36°. L'angle d'éjection dépend de la vitesse radiale des granulés en sortie, donc de leur temps de parcours sur la pale. Or un engrais sphérique a une surface en contact avec la pale plus faible qu'un engrais anguleux comme le KCl. De ce fait, il est moins ralenti et a donc une vitesse radiale plus élevée au moment de l'éjection. Il en résulte un angle d'éjection plus élevé.

La répartition au sol

L'emploi des données collectées par imagerie rapide, dans un modèle de vol balistique, permet d'obtenir une estimation de la répartition d'engrais au sol, dont l'allure est présentée sur la figure 7. La flèche noire indique le sens d'avancement du tracteur ; l'axe vertical représente la quantité d'engrais.

► Figure 7 – Répartition obtenue avec les données de l'imagerie rapide (en réalité les différents niveaux de répartition sont visualisés par différentes couleurs).



Ces répartitions sont établies sur la base d'une seule image et donc d'un seul passage de pale. Un travail de comparaison avec des répartitions réelles obtenues à poste fixe est désormais nécessaire pour valider les résultats, et affiner la compréhension des comportements mécaniques liés à l'épandage centrifuge.

Perspectives

Le système présenté dans cet article représente une avancée significative pour la compréhension globale du processus d'épandage, et ouvre ainsi plusieurs pistes de recherches intéressantes. Outre la comparaison aux répartitions réelles, les travaux engagés consistent à :

- poursuivre l'exploitation des données pour affiner la connaissance des phénomènes physiques du comportement des granulés sur la pale ;
- adapter les méthodes à d'autres configurations du distributeur : disque concave, pales inclinées...

- mettre en œuvre de nouvelles techniques d'images : méthode d'estimation du mouvement basée sur l'utilisation des filtres de Gabor, prise d'images mono-exposition (sans flashes) pour déterminer les trajectoires et la distribution angulaire des granulés.

Le système, considéré initialement comme un dispositif de recherches en laboratoire, pourra être utilisé par la suite comme un outil de référence pour :

- la mise en œuvre de capteurs d'images plus simples pouvant être appliqués directement sur un distributeur au champ ;

- le diagnostic à poste fixe des distributeurs du marché.

Conclusion

L'analyse du mouvement relativement rapide (environ 100 km/h) des granulés d'engrais, éjectés par les disques en rotation d'un distributeur centrifuge, nécessite d'utiliser un système d'acquisition d'images adapté. Un nouveau système breveté de collecte d'images a ainsi été développé. Il est basé sur la combinaison d'une caméra numérique haute résolution et d'une batterie de flashes, qui permettent d'illuminer le champ de vue pendant des instants très courts et répétés plusieurs fois pour une même image. Ce système d'imagerie permet la caractérisation des conditions initiales de vol des granulés au voisinage du disque d'épandage, c'est-à-dire jusqu'à 1 m50. La séquence d'images obtenue avec cette technique est identique à celle obtenue avec une caméra rapide, avec cependant une meilleure résolution spatiale, un meilleur rapport signal sur bruit et un coût plus faible. Les images multiexposition décomposées sont ensuite traitées avec différentes méthodes d'estimation du mouvement, qui nécessitent toutes des corrections d'images et la détermination précise de paramètres de calibration, afin d'obtenir une modélisation du champ de vecteurs déplacements proche de la réalité. Tous les résultats obtenus avec ce système de prise de vues justifient largement l'utilisation de la méthode d'analyse du mouvement basée sur les champs de Markov comme méthode de correction de l'identification des directions et des vitesses des granulés. En outre, cette technique s'adapte à une grande variété de granulés d'engrais.

L'intégration des données issues de l'imagerie dans un modèle de vol balistique permet de prévoir la répartition de l'engrais au sol. Les résultats obtenus en terme de répartition doivent cependant être confirmés par des comparaisons avec des répartitions réelles. Des essais sont prévus dans ce sens en 2004 au Cemagref à Montoldre.

À terme, les systèmes d'imagerie numérique adaptés à la caractérisation des trajectoires de granulés d'engrais devraient apporter une aide précieuse à la maîtrise de l'épandage centrifuge. Ils peuvent offrir aux concepteurs un outil d'étude de la répartition de l'engrais en fonction des caractéristiques des disques et peuvent apporter une alternative aux tests actuellement pratiqués. Ils pourront proposer à l'utilisateur un dispositif de diagnostic et d'aide au réglage du matériel. Enfin dans le cas de systèmes embarqués sur un distributeur, ce dispositif rend possible le contrôle de la forme de la nappe d'épandage en temps réel. La modification des caractéristiques de la nappe en cours d'épandage pourrait alors être envisagée de manière à répondre au mieux aux préconisations d'une carte de fertilisation et aux contraintes imposées par la forme de la parcelle (couplage à un système de localisation). Le développement des techniques d'imagerie dans le cadre de l'épandage centrifuge a ainsi pour objectif de fournir des dispositifs permettant une meilleure gestion de l'engrais au sein de la parcelle en limitant les surdosages ou sous-dosages localisés. □

Résumé

L'utilisation très fréquente des distributeurs centrifuges pour la fertilisation minérale est l'objet depuis plusieurs années d'études visant à améliorer la qualité de ces systèmes d'épandage et réduire *in fine* leurs impacts sur l'environnement. Pour progresser dans ce sens, il est primordial de bien connaître la dynamique de l'épandage centrifuge, et particulièrement les conditions initiales d'éjection des granulés d'engrais. Le travail décrit dans cet article présente la conception d'un système d'acquisition d'images rapides pour la caractérisation de l'épandage centrifuge d'engrais au laboratoire. Ce système multi-exposition breveté permet de déterminer les trajectoires des granulés après leur éjection, en utilisant une caméra numérique haute résolution combinée à une batterie de flashes, et différentes méthodes d'estimation du mouvement. La méthode par champs de Markov aléatoires, combinée à une méthode de modélisation théorique des jets d'engrais, donne des résultats très satisfaisants. Ces résultats peuvent alors être utilisés dans un modèle de vol balistique pour prédire la répartition d'engrais au sol, qui est alors à comparer à une répartition réelle obtenue lors d'essais en hall fermé. Les perspectives sont nombreuses en terme d'utilisation de ce système pour optimiser la conception des distributeurs centrifuges.

Abstract

Mineral fertilization by centrifugal spreading is a high polluting process. Since few years, a lot of research have been realized to reduce impacts on environment. For that, centrifugal spreading, and particularly the initial conditions of flight of the granules, have to be very accurately determined and understood. This paper describes the conception of a fast imaging system for the characterization of the fertilizer centrifugal spreading in laboratory. This multiexposure patented system allows to determine the granule trajectories after their ejection, by using a high resolution low cost digital camera combined to a set of flashes, and also different motion estimation methods. The use of a combination between Markov random fields method and a theoretical modelling of the shape of the throws gives very satisfying results, which can be then used in ballistic flight model to predict fertilizer distribution on the ground. This repartition must be compared to a real repartition obtained during spreading hall tests. Prospective are numerous in term of use of our patented system.

Bibliographie

- ROBERT, P.-C., 1999, Precision Agriculture: status and research needs, in J. Stafford (ed.) *Proceedings of the 2nd ECPA*, Odense, Danemark, SCI, London, UK.
- COLIN, A., 1997, *Étude du procédé d'épandage centrifuge d'engrais minéraux*, thèse de doctorat de l'UTC de Compiègne, France.
- OLIESLAGERS, R., 1997, *Fertilizer Distribution Modeling for Centrifugal Spreader Design*, Ph-D Thesis of the University of Louven, Belgium.
- COINTAULT, F. ; PAINDAVOINE, M. ; SARRAZIN, J.-P., 2002, High resolution low cost imaging system for particle projection analysis : application to fertilizer centrifugal spreading, *Meas. Sci. & Technol.*, 13, p. 1087-1093.
- DUBOIS, J. ; MOTYL, G.-J. ; FISCHER, V. ; FOUQUET, R. ; JACQUET, G., 2000, *System for real time motion measurement*, The Third European DSP Education & Research Conference, Paris.
- HEEGER, D.-J., 1988, Optical flow using spatio-temporal filters, *Int. Journal of Computer Vision*, vol. 1, n° 4, p. 279-302.
- HORN, B.-K.-P. ; SCHUNCK, B., 1981, Determining Optical Flow, *Artificial Intell.*, vol. 17, p. 185-203.
- HEITZ, F. ; BOUTHEMY, P., 1993, Multimodal estimation of discontinuous optical flow using markov random fields, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15 (12), p. 1217-1232.
- GRAFFIGNE, C. ; PRETEUX, F. ; SIGELLE, M. ; ZERUBIA, J. ; PEREZ, P. ; HEITZ, F., 1995, *Hierarchical Markov Random Field models applied to image analysis: a review*, Proc., SPIE Conf., n° 2568 on Neural Morphological and Statistic Methods in Image and Signal Processing, San Diego.