

Evaluation de la répartition d'engrais au sol par analyse d'images rapides lors de l'épandage centrifuge d'engrais

F. COINTAULT¹, S. VILLETTE¹

¹ENESAD, UMR CPAP, 21, Bd. O de Serres, 21800 QUETIGNY
f.cointault@enesad.fr; s.villette@enesad.fr

Résumé - Bien que mécaniquement simples, les distributeurs centrifuges utilisés pour la fertilisation minérale impliquent des phénomènes physiques complexes qui ne sont pas actuellement caractérisés complètement. Pour éviter des mauvais apports d'engrais dans le champ, l'épandage centrifuge, et particulièrement les conditions initiales d'éjection des granulés, doivent être précisément comprises. Ce papier présente la conception d'un système d'acquisition d'images rapides pour la caractérisation de la répartition d'engrais au sol. Ce système multiexposition 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. Les résultats obtenus sont ensuite utilisés dans un modèle de vol balistique pour obtenir la répartition d'engrais au sol.

Abstract – Although mechanically simple, centrifugal spreaders used for mineral fertilization involve not well-known complex physics phenomena. To avoid bad fertilizer inputs in the field, the centrifugal spreading technique and particularly the initial conditions of flight of the granules have to be precisely understood. This paper presents the conception of a fast image processing system for the characterization of the centrifugal fertilizer spreading. This patented multiexposure system allows to determine granule trajectories after their ejection, by using a high resolution digital camera combined with a set of flashes, and different motion estimation methods. The results are then used in a ballistic model to obtain the fertilizer repartition on the ground.

1. Introduction : Contexte et objectifs

L'agriculture est un secteur de plus en plus utilisateur de nouvelles technologies de traitement de l'information, et particulièrement de méthodes de traitement d'images. L'apparition du concept d'Agriculture de Précision (AP) a été le déclencheur de ce développement ([1]). En agriculture, il est devenu important de pouvoir maîtriser les intrants, et de prendre en compte les variabilités intra et interparcelles (utilisation fréquente en télédétection) dans le champ. Un des domaines primordiaux de l'AP est la fertilisation d'engrais minéral. Le contrôle de cette dernière doit permettre de réguler et de maîtriser les apports au sol pour d'une part optimiser les rendements, et d'autre part respecter l'environnement.

Bien que mécaniquement simples, les distributeurs centrifuges d'engrais (Figure 1) 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 la répartition spatiale au sol. Nous nous sommes surtout intéressés au second paramètre en évaluant les conditions initiales d'éjection des granulés 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 d'engrais au sol. Ainsi, en déterminant la distribution d'engrais au voisinage du disque, la répartition au sol peut être estimée.

Le papier que nous proposons ici consiste à présenter la méthode de mesure de ces conditions d'éjection, que nous avons mis en place, en utilisant un système de prise d'images couplé à plusieurs méthodes d'estimation du mouvement.

Une première partie est consacrée au distributeur centrifuge et aux paramètres de l'épandage à évaluer. Les différentes façons d'acquérir les images pour déterminer les conditions initiales d'éjection sont présentées dans une seconde section, de même que le système de prise d'images breveté. Déterminer les conditions initiales d'éjection revient à estimer le mouvement des granulés en sortie du disque, c'est-à-dire leurs trajectoires. Une troisième section expose ainsi plusieurs méthodes d'estimation du mouvement liées à notre application, et propose quelques résultats. Une cinquième et dernière partie présente une répartition d'engrais au sol obtenue à partir de nos résultats de calcul de trajectoires. Les perspectives d'évolution de notre système sont enfin développées dans une dernière partie conclusive.

2. Les distributeurs centrifuges

2.1. Leur fonctionnement

Les distributeurs centrifuges sont classiquement constitués d'une trémie (simple ou double) pour le stockage de l'engrais, et de deux disques en rotation munis de deux pales (ou plus) permettant l'éjection de l'engrais.



FIG.1: distributeur centrifuge

La technique d'épandage centrifuge peut se résumer en trois étapes : l'écoulement de l'engrais vers le centre des disques ; l'accélération des granulés d'engrais le long des pales ; l'éjection de ces granulés et leur vol balistique. La qualité de la répartition des granulés au sol est directement dépendante des conditions d'éjection, qui varient en fonction de nombreux paramètres tels que la nature de l'engrais, la vitesse de rotation, le débit, ...

Dans le contexte de l'AP, seuls des systèmes de régulation à boucle fermée, avec des capteurs appropriés pour le contrôle de la distribution d'engrais, pourraient permettre une gestion précise du taux local de fertilisation.

2.2. Les paramètres importants à évaluer

Ils sont au nombre de deux: la dose d'engrais apportée et sa répartition au sol, mesurées en continu. Ce dernier paramètre est celui sur lequel nous avons travaillé, et sa maîtrise passe par la détermination des conditions initiales d'éjection des granulés. En effet, la distribution angulaire de sortie des granulés donne une information importante sur la forme de la nappe d'engrais au sol. Les résultats d'études précédentes ([2], [3]) ont montré que cette distribution spatiale pouvait être estimée précisément en calculant le vol balistique des particules, à partir des conditions initiales de vol (trajectoires), de leurs propriétés et de leurs paramètres géométriques. Notre approche s'est ainsi focalisée sur la caractérisation des trajectoires au voisinage du disque, avec des capteurs sans contact, et particulièrement des capteurs d'images.

3. Méthode d'acquisition des images pour l'évaluation de la répartition d'engrais au sol

La vitesse des granulés étant d'environ $100\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ à la sortie du disque, des techniques de prise d'images rapides ont été choisies pour la caractérisation de cette éjection. De précédents tests ont été réalisés en utilisant une caméra rapide travaillant à 500 ips (images par seconde). Le format d'image (350 par 262 pixels) ne fournit pas la résolution voulue pour couvrir un champ de vue d'environ 1m^2 nécessaire pour voir une grande partie de l'éjection. Dans l'optique d'obtenir ce

champ désiré et une haute résolution, et aussi d'utiliser différentes méthodes d'estimation du mouvement, nous avons conçu un nouveau système d'acquisition d'images ([4]).

Les caméras rapides classiques peuvent fournir des cadences élevées mais des résolutions faibles, ou alors à des prix très élevés. Une solution alternative est obtenue par la combinaison d'une caméra numérique haute résolution (1 million de pixels) et d'une batterie de 8 flashes travaillant dans un mode série pendant chaque temps d'exposition (figure 2).

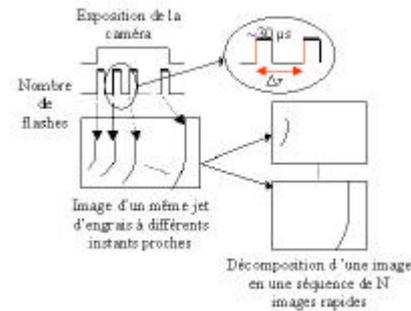


FIG. 2 : principe d'acquisition d'images rapides

Nous présentons dans la figure 3 une image « multiexposition » obtenue avec ce système et une batterie de 7 flashes. Une telle image est ensuite décomposée en une séquence de 7 images rapides identique à celle que nous obtiendrions avec une caméra rapide adéquate, mais pour un coût plus faible et une résolution bien meilleure.



FIG. 3 : exemple d'image multiexposition : 7 expositions successives d'un même jet

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. La caméra et les flashes sont synchronisés avec la position des pales sur le disque, de sorte que le premier flash est toujours déclenché à une position angulaire donnée du disque.

4. Analyses des images par des méthodes d'estimation du mouvement

Il existe à l'heure actuelle trois grandes catégories de méthodes permettant d'estimer le mouvement. La première utilise les approches par mise en

correspondance bas niveau ([5]) ou haut niveau. Cette méthode travaille avec un voisinage spatio-temporel de pixels. La seconde est basée sur l'utilisation de transformées : fréquentielles (Fourier), spatio-fréquentielles (Gabor) ([6]), énergétiques. La troisième utilise les méthodes différentielles et les 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 ([7]).

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 nous a servi de point de repère pour l'utilisation d'autres techniques. 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.

4.1. Intercorrélation

Cette méthode permet d'estimer des déplacements de grande amplitude, contrairement aux méthodes par transformées ou différentielles. Cependant elle reste limitée aux mouvements de translation ou de rotation pures, et est sensible au bruit. Les granulés ont un comportement 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.

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.

4.2. Modélisation théorique des jets d'engrais

Pour éviter les problèmes précédents, nous avons établis 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 peuvent encore être réduites.

4.3. Champs de Markov

Un affinement des résultats précédents est alors 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 ([8]).

Cette méthode est cependant limitée, d'après nos différents essais et les éléments bibliographiques, 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.

La mise en œuvre des Champs de Markov nécessite en outre une initialisation des champs de vecteurs déplacements initiaux, qui sont généralement pris égaux à 0 dans la littérature. Notre idée a donc été d'utiliser la technique précédente comme initialisation des Champs de Markov, puisque les erreurs ne sont pas supérieures à 5 pixels/image. Les résultats sont fournis sur la figure 4 ci-après (zoom d'une image globale).

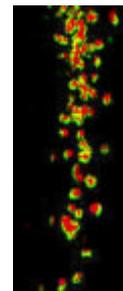


FIG. 4 : résultats avec les Champs de Markov (en rouge les positions réelles ; en vert les positions calculées)

Ce bon résultat visuel est confirmé par le calcul des vitesses d'éjection avec les différentes méthodes pré-citées et leur comparaison avec les vitesses réelles, calculées manuellement (tableau 1).

TAB. 1 : calcul des vitesses d'éjection et comparaison entre les méthodes d'estimation du mouvement

Speeds (m/s) calculated between throws n°6 and n°5 and throws n°7 and n°6	NPK fertilizer 800 rpm long blades mass flow of 0.05 kg/s	NPK fertilizer 800 rpm average blades mass flow of 0.40 kg/s
Real speed (Vr)	32.54	26.53
Modelled speed (Vi)	32.61	26.19
Intercorrelation speed (Vint)	33.56	26.73
Markov speed (Vm)	32.59	26.53
$(Vi-Vr)/Vr$	0.22%	-1.75%
$(Vint-Vr)/Vr$	3.13%	0.38%
$(Vm-Vr)/Vr$	0.15%	0.00%

On s'aperçoit que quel que soit le type d'engrais, le type de pales et le débit, les résultats sont toujours meilleurs avec l'utilisation des Champs de Markov.

5. Répartition au sol

L'emploi des données collectées par imagerie rapide permet d'obtenir une répartition d'engrais au sol dont l'allure est présentée sur la figure 5 ci-dessous. La flèche noire indique le sens d'avancement du tracteur.

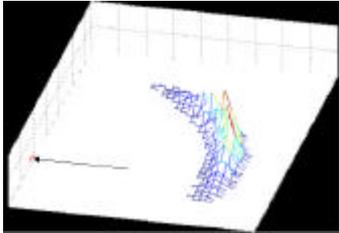


FIG. 5 : répartition obtenue avec les données de l'imagerie rapide

Cette répartition, établie sur la base d'une seule image donc d'un seul passage de pale, est à comparer à la répartition réelle (figure 6) dans le but de valider la fiabilité des résultats, et d'affiner la compréhension des comportements mécaniques liés à l'épandage centrifuge. Nos recherches ont aussi pour but le diagnostic des matériels existants.

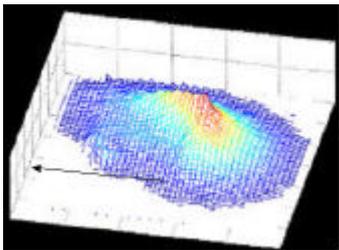


FIG. 6 : répartition réelle

L'étalement de la nappe pour la répartition réelle résulte d'une granulométrie plus étendue et de la présence de granulés mal éjectés.

6. Conclusion et perspectives

L'application de l'image à l'agriculture décrite dans cet article touche un domaine peu connu, à savoir l'épandage centrifuge d'engrais. Pour caractériser précisément cette intervention agricole, deux paramètres doivent être étudiés et en particulier la répartition d'engrais au sol. Ce paramètre dépend principalement des conditions initiales d'éjection des granulés que nous avons déterminé par imagerie rapide. Les champs de vecteurs vitesses obtenus sont intégrés à un modèle de vol balistique permettant de déterminer la répartition d'engrais au sol. Deux applications sont alors à envisager : tout d'abord l'emploi de ce système comme outil de test et de caractérisation de l'épandage à poste fixe, c'est-à-dire dans un hall d'essais ; ensuite l'utilisation et la mise en place de ce système sur un distributeur du marché, ce qui supposera une

automatisation de la chaîne de traitement. Enfin, d'autres méthodes d'analyse d'images sont en cours de développement : estimation de mouvement par filtres de Gabor,...

Une autre technique de prise d'images monoexposition (sans flashes) est également en cours d'étude pour déterminer les trajectoires et la distribution angulaire des granulés.

Remerciements :

Les auteurs remercient Emmanuel Piron (UMR CPAP Cemagref/ENESAD) d'avoir fourni les données expérimentales correspondant à la répartition réelle au sol.

Références

- [1] P.C. Robert. *Precision Agriculture : status and research needs*. in J. Stafford (ed.) Proceedings of the 2nd ECPA, Odense, Danemark, SCI, London, UK, 12-15 Juillet 1999.
- [2] R. Olieslagers. *Fertilizer Distribution modelling for centrifugal spreader design*. Ph-D Thesis of the University of Leuven, Belgique, 1997.
- [3] A. Colin. *Etude du procédé d'épandage centrifuge d'engrais minéraux*. Thèse de doctorat de l'UTC de Compiègne, France, 1997.
- [4] F. Cointault. *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 de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 2001.
- [5] J. Dubois, G.J. Motyl, V.Fischer, R. Fouquet et G. Jacquet. *System for real time motion measurement*. The Third European DSP Education & Research Conference, Paris, 2000.
- [6] D.J. Heeger. *Optical flow using spatio-temporal filters*. Int. Journal of Computer Vision, Vol. 1, No 4, pp. 279-302, 1998.
- [7] B.K.P. Horn et B. Schunck. *Determining Optical Flow*. Artificial Intell., Vol.17, pp. 185-203, 1981.
- [8] F. Heitz et P. Bouthémy. *Multimodal estimation of discontinuous optical flow using markov random fields*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 15 (12), pp. 1217-1232, 1993.