

Utilisation de l'espace de Hough pour caractériser une projection centrifuge

SYLVAIN VILLETTE¹, EMMANUEL PIRON², RICHARD MARTIN¹,
CHRISTELLE GEE¹, FREDERIC COINTAULT¹, MICHEL PAINDAVOINE³

¹ UP « Génie des Agroéquipements et Procédés », AgroSup Dijon, 26 bd Docteur Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon, France

² Equipe « Génie des épandages », Cemagref, - Les Palaquins, 03150 Montoldre, France

³ LE2I, UMR CNRS 5158, BP 47870, 21078 Dijon, France

¹s.villette@agrosupdijon.fr, r.martin@agrosupdijon.fr, c.gee@agrosupdijon.fr, f.cointault@agrosupdijon.fr,
²emmanuel.piron@cemagref.fr
³paindav@u-bourgogne.fr

Résumé - L'article présente une technique alternative de caractérisation d'un flux de granules éjectés par un disque centrifuge. L'application visée est le contrôle de l'épandage d'engrais en agriculture pour en améliorer la qualité et en réduire l'impact environnemental. La méthode utilise un système d'acquisition traditionnel permettant l'enregistrement dans l'image des traces laissées par les granules pendant leur mouvement d'éjection à la périphérie du disque centrifuge. La combinaison des caractéristiques géométriques de la prise de vue, de l'analyse cinématique du système mécanique et des particularités de calcul de la Transformée de Hough, est exploitée pour permettre l'extraction des informations pertinentes dans l'espace de Hough. La vitesse d'éjection et la répartition angulaire du flux massique sont ainsi directement déduites de cet espace. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus par des méthodes de référence.

Abstract - This article presents an alternative technique to characterise granule flows spread by spinning discs. The objective of the work is to control fertiliser spreading in agriculture in order to improve the quality of the spreading and reduce negative environmental effects. A traditional acquisition system is used to capture in the image the streaks due to the ejection motion of the granules during the exposure time in the vicinity of the spinning disc. The combination of relationships derived from the geometrical analysis of the acquisition system, the kinematic study of the mechanical system and particularities of the Hough Transform, is implemented to extract relevant data from the Hough space. Therefore, the outlet velocity and the angular distribution of the fertiliser mass flow are directly deduced from the Hough space. Results are compared with those obtained with reference methods.

1 Contexte et motivations

En agriculture conventionnelle, la fertilité chimique des sols cultivés est améliorée ou maintenue par des apports réguliers d'engrais. En Europe, les épandages d'engrais minéraux sont communément effectués au moyen de distributeurs centrifuges (figure 1) qui accélèrent l'engrais sur des disques en rotation et le projettent sur des largeurs pouvant atteindre 50 m.



Figure 1 : Exemple de distributeur centrifuge utilisé en agriculture

Ces appareils offrent des avantages économiques indéniables (investissement et rendement de chantier), mais leur emploi peut conduire à une mauvaise répartition de l'engrais au sol, qui est néfaste à la culture et à l'environnement. Pour répondre aux considérations actuelles en matière de productivité et de respect de l'environnement, il est nécessaire de développer des dispositifs de caractérisation de l'éjection pour contrôler

et améliorer la qualité des épandages obtenus avec ces machines.

Différentes méthodes ont été proposées pour mesurer la vitesse d'éjection des granules d'engrais à la sortie d'un dispositif centrifuge. Il s'agit de cellules à ultrasons [1], de cellules optiques [2], et de systèmes d'imagerie. Les systèmes d'imagerie offrent l'avantage de couvrir l'intégralité du secteur d'épandage à la périphérie du disque centrifuge et évitent tout contact avec la nappe d'éjection. Les techniques de PIV (Particle Image Velocimetry) ou d'imagerie rapide étant inadaptées aux objectifs visés en terme de coût et d'adaptation au matériel agricole, les approches se sont basées sur une acquisition stroboscopique [3] ou une acquisition « en filé » du mouvement des granules d'engrais [4]. En 2007, la société Amazone a proposé l'utilisation d'une caméra embarquée sur un distributeur centrifuge pour modifier le réglage de la machine en comparant l'information acquise à l'information issue d'une base de données préétablie.

Cet article propose une organisation spécifique de la prise de vue pour acquérir des images en filé au voisinage d'un disque centrifuge en profitant de propriétés géométriques bénéfiques pour la phase de traitement. Un traitement simplifié des images est alors développé pour caractériser l'éjection centrifuge en terme de vitesse et de répartition angulaire du flux.

L'objectif est de développer une technique de mesure simple et robuste pour instrumenter des systèmes mécaniques de référence destinés à améliorer la maîtrise des épandages mais aussi, à terme, envisager un dispositif embarqué pour le contrôle en temps réel des machines au champ.

2 Acquisition et traitement des images d'éjection centrifuge

2.1 Acquisition en filé

L'acquisition « en filé » consiste à enregistrer dans l'image les traces laissées, pendant le temps d'intégration du CCD, par les granules d'engrais lors de leur mouvement à la sortie du disque d'épandage. Le dispositif expérimental se compose : d'une maquette de distributeur centrifuge, d'une caméra numérique monochrome et de simples projecteurs pour l'éclairage (figure 2).

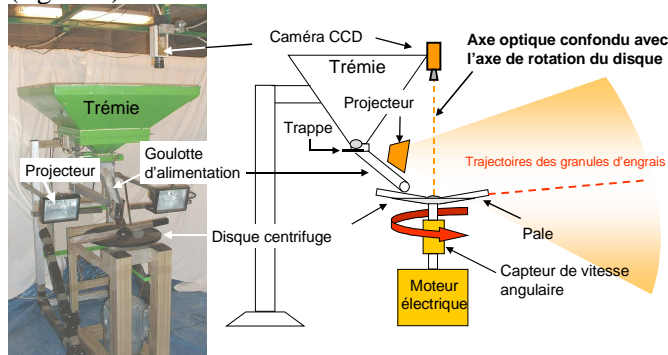


Figure 2 : Dispositif expérimental

La caméra est placée au-dessus du disque centrifuge et orientée de manière à ce que son axe optique soit confondu avec l'axe de rotation du disque. Cette disposition permet de bénéficier d'avantages géométriques qui simplifient et rendent plus rapide le traitement ultérieur des images. Au niveau du plan d'éjection, le champ de vision couvert par la caméra est d'environ $1,3 \text{ m} \times 1,3 \text{ m}$.

2.2 Combinaison de l'analyse mécanique du système et de l'analyse géométrique de la prise de vue

Pour la mesure de vitesse, l'exploitation des traces laissées par les grains d'engrais dans les images acquises en filé (figure 3) repose sur le calcul de la vitesse d'éjection à partir de l'angle d'éjection θ_{ej} , c'est-à-dire l'angle horizontal que fait la trajectoire par rapport à la tangente au disque.

L'analyse cinématique [5] du mouvement de l'engrais sur le disque centrifuge a montré que la mesure de l'angle horizontal d'éjection θ_{ej} permet de déterminer les composantes tridimensionnelles de la vitesse d'éjection [6] comme suit :

$$\text{- vitesse radiale : } v_R = \frac{r_{pale} \omega \tan \theta_{ej}}{1 + \tan \theta_{ej} \tan \alpha} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\text{- vitesse tangentielle : } v_T = \frac{v_R}{\tan \theta_{ej}} \quad (\text{Eq.2})$$

$$\text{- vitesse verticale : } v_k = \frac{v_R}{\cos \alpha} \tan \Omega \quad (\text{Eq.3})$$

avec r_{pale} le rayon de la pale, ω la vitesse de rotation du disque, α l'angle horizontal de la pale (par rapport au rayon du disque) et Ω l'angle vertical de la pale.

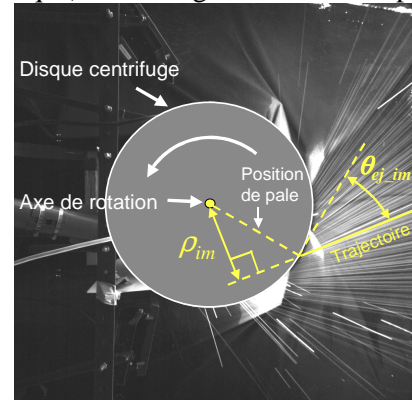


Figure 3 : Image acquise en filé

Dans le cas d'un disque tronconique (figure 4), les trajectoires empruntées par les granules n'étant pas parallèles au plan image, il existe un biais angulaire ε entre l'angle apparent observé $\theta_{ej_{im}}$ dans l'image et l'angle horizontal réel d'éjection θ_{ej} . Pour une valeur fixée de l'angle d'éjection, ce biais ε augmente avec la distance entre la trajectoire considérée et l'axe optique du système d'acquisition (figure 4a).

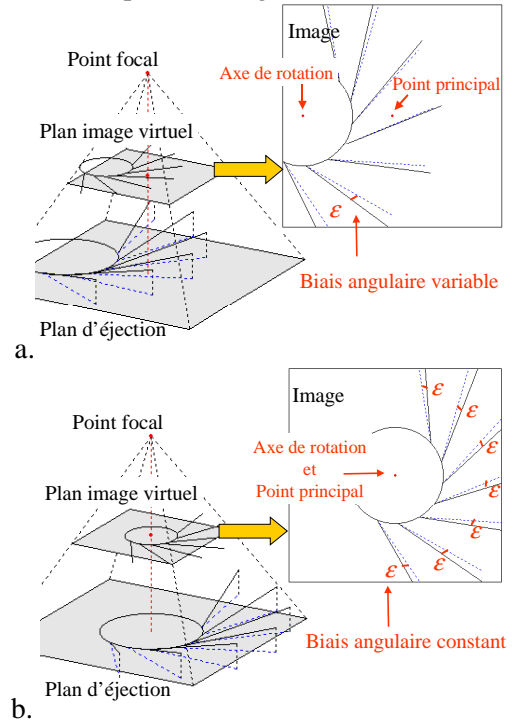


Figure 4 : Simulation 3D de la scène, de la prise de vue et de l'image acquise. Les trajectoires réelles sont représentées en trait continu et leur composante horizontale est représentée en pointillés.

En revanche, lorsque l'axe de rotation du disque est confondu avec l'axe optique, ce biais ε devient constant quelle que soit l'orientation de la trajectoire dans l'image (figure 4b). L'expression de l'angle horizontal réel θ_{ej} peut alors être directement établi en fonction de la distance ρ_{im} entre la trajectoire projetée dans l'image et l'axe de rotation du disque (figure 3). En prenant en compte les relations cinématiques qui lient les angles

d'éjection horizontaux θ_{ej} et verticaux Ω_{ej} [6], l'expression de ces angles est obtenue comme suit :

$$\theta_{ej} = \arctan \left(\frac{\sqrt{(r_{pale} f_{conv})^2 - \rho_{im}^2}}{\rho_{im} \left(1 + r_{pale} f_{conv} \frac{\Delta p \tan \Omega}{f \cos \alpha} \right)} \right) \quad (\text{Eq.4})$$

$$\Omega_{ej} = \arctan \left(\frac{\sin \theta_{ej}}{\cos \alpha} \tan \Omega \right) \quad (\text{Eq.5})$$

avec f_{conv} le facteur de conversion millimètre-pixel, Δp la taille d'un pixel et f la focale de l'objectif.

Compte tenu des relations établies, l'analyse de l'image aura pour objectif de déterminer le paramètre ρ_{im} correspondant aux trajectoires des granules.

2.3 Analyse simplifiée de l'espace de Hough

L'image binaire des axes des trajectoires, obtenue par filtrage [7], est analysée au moyen d'une Transformée de Hough (TH) [8] calculée en coordonnées polaires (ρ_H, θ_H) [9] par rapport à l'axe de rotation du disque. La superposition de l'origine de calcul de la TH avec l'axe de rotation du disque permet de restreindre fortement le domaine admissible pour ρ_H et de limiter la zone d'étude de l'image à une couronne centrée sur l'axe de rotation du disque [10]. Par ailleurs, la superposition de l'axe optique avec l'axe de rotation du disque du système mécanique permet de déduire la valeur de l'angle d'éjection du paramètre ρ_{im} indépendamment de l'orientation de la trajectoire dans l'image (Eq.4). Ces particularités géométriques permettent de réduire considérablement la taille de l'espace de Hough utile et ainsi de maîtriser les temps de calcul tant pour la construction de l'espace que pour son exploitation.

Des travaux antérieurs [4, 6] ont montré que les valeurs moyennes réelles des angles d'éjection horizontaux et verticaux des granules d'engrais restent constantes sur le secteur angulaire d'épandage. En conséquence, la valeur moyenne de ρ_{im} est constante quelle que soit l'orientation de la trajectoire dans l'image. La valeur moyenne du paramètre ρ_{im} , déduite de l'espace de Hough (EH), permet ainsi le calcul des valeurs moyennes des angles horizontaux et verticaux d'éjection (Eq. 4 et 5) pour l'ensemble du secteur d'épandage.

Après filtrage avec un masque de convolution 3×3 (défini à partir de la forme théorique de la répartition des votes) et après seuillage, l'espace des paramètres (ρ_H, θ_H) est projeté sur l'axe du paramètre ρ_H (somme selon les lignes). La valeur ρ_{im} du paramètre décrivant au mieux l'angle d'éjection sur l'ensemble du secteur angulaire d'épandage est alors déduite. Cette valeur correspond au maximum du nombre de votes (après filtrage) projetés sur l'axe du paramètre ρ_H . Cette approche permet de déduire l'angle d'éjection (Eq.4) représentatif de l'ensemble du secteur angulaire d'épandage, sans recourir à une identification individuelle des trajectoires suivies par chaque granule. La distribution angulaire du flux est ensuite simplement

déduite du positionnement θ_H des valeurs non-nulles de l'EH selon la ligne $\rho_H = \rho_{im}$.

3 Résultats

La méthode a été testée sur deux séries de 25 images obtenues pour le même disque centrifuge, avec deux engrais couramment utilisés en agriculture et connus pour avoir des comportements mécaniques différents : l'ammonitrate (NH_4NO_3) et le chlorure de potassium (KCl). Pour une image de chacune des séries, la figure 5 présente l'espace de Hough (après filtrage) et sa projection sur l'axe du paramètre ρ_H .

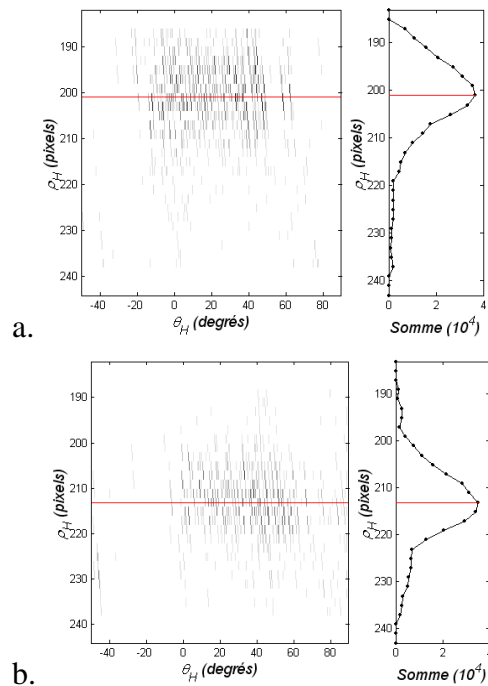


Figure 5 : L'espace de Hough et sa projection sur l'axe ρ_H pour une image d'ammonitrate (a) et de KCl (b).

3.1 Vitesse d'éjection

Pour les deux engrais étudiés, le tableau 1 donne, les valeurs moyennes des angles θ_{ej} et des vitesses v_{ej} d'éjection calculées sur les 25 images au moyen de notre analyse simplifiée de l'EH. Les valeurs sont comparées à celles obtenues par une méthode prise comme référence, qui consiste à identifier individuellement chaque pic (ρ_{pic}, θ_{pic}) de l'espace de Hough et à vérifier l'existence de la trajectoire définie par (ρ_{pic}, θ_{pic}) dans l'image [10]. Un angle d'éjection est alors déduit pour chaque trajectoire validée.

Tableau 1 : Valeurs moyennes des angles et des vitesses d'éjection obtenues pour deux engrais différents

Engrais	Analyse simplifiée de l'EH		Référence	
	θ_{ej}	v_{ej}	θ_{ej}	v_{ej}
KCl	34.7°	33.1 m.s ⁻¹	34.2°	32.9 m.s ⁻¹
NH ₄ NO ₃	40.5°	35.8 m.s ⁻¹	40.3°	35.7 m.s ⁻¹

3.2 Répartition angulaire du flux massique

La figure 6 présente l'histogramme de la répartition angulaire du flux massique déduite de l'analyse de l'EH ainsi que celle obtenue par une méthode de référence.

La méthode de référence consiste à collecter réellement l'engrais autour du disque dans 22 compartiments adjacents de 10°. Les quantités d'engrais issues de chaque compartiment sont ensuite pesées. La moyenne θ_{flux} et l'écart type σ_{flux} de la distribution angulaire sont donnés (figure 6) en terme de position angulaire de la pale pendant l'éjection.

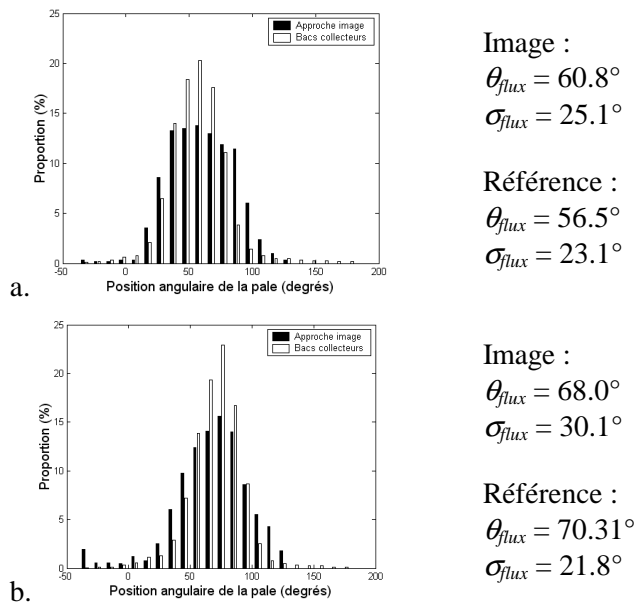


Figure 6 : Répartition angulaire du flux massique pour l'ammonitrate (a) et le KCl (b).

4 Discussion

En ce qui concerne l'angle et la vitesse d'éjection, les valeurs obtenues par la méthode présentée dans cet article sont très proches des valeurs de référence. En revanche la caractérisation de la répartition angulaire du flux massique est plus délicate, notamment en terme d'estimation de l'écart-type de la distribution. Par rapport aux histogrammes de référence (figure 6), les histogrammes déduits de l'espace de Hough montrent une saturation de la détection des trajectoires dans la partie centrale du secteur d'épandage. Cette saturation s'explique par le fait que dans ce secteur, les granules d'engrais quittent la pale en se superposant dans un même plan vertical. Le flux étant observé par le haut, seules les trajectoires supérieures (correspondant aux granules visibles) sont comptabilisées, les trajectoires inférieures étant masquées. Une marge de progression reste à réaliser sur la caractérisation de la distribution.

Les algorithmes ont été développés avec Matlab v6.1 et ont été mis en oeuvre sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel Pentium 4.3 GHz. Les temps de calculs sont de :

- 3.7 s pour la construction de l'espace de Hough (couvrant un secteur angulaire de 150°, avec un pas d'échantillonnage de 0.15° et de quantification de 2 pixels),
- 21 s pour l'exploitation de cet espace par la méthode de référence identifiant chaque trajectoire,
- moins de 0.2 s pour l'exploitation de l'espace avec la méthode proposée dans cet article.

Le temps de calcul de la TH peut quant à lui être réduit en augmentant le pas d'échantillonnage et le pas de

quantification de l'espace. Pour une application sur machine agricole, un objectif raisonnable serait de disposer d'une caractérisation de l'éjection centrifuge toutes les 2 secondes environ.

5 Conclusion

L'étude montre que l'exploitation d'une prise de vue adaptée aux particularités mécaniques d'un système de projection centrifuge permet de déduire très simplement de l'espace de Hough les paramètres d'éjection du flux projeté. La simplicité de l'acquisition et du traitement de l'image sont des atouts majeurs pour rendre viable la caractérisation d'une éjection centrifuge par vision numérique dans le cadre de l'instrumentation de systèmes centrifuges de référence mais aussi pour envisager un traitement temps réel des images pour une machine au champ. La poursuite des travaux vise à améliorer la précision des informations relatives à la distribution angulaire du flux, à diminuer les temps de calcul et adapter l'approche aux contraintes de construction d'un distributeur traditionnel.

6 Références bibliographiques

- [1] Hofstee J W, 1994. Handling and spreading of fertilizers : Part 3, Measurement of particle velocities and directions with ultrasonic transducers, theory, measurement system, and experimental arrangements. Journal of Agricultural Engineering Research, 58, 1-16.
- [2] Grift T E, Hofstee J W, 1997. Measurement of velocity and diameter of individual fertilizer particles by an optical method. Journal of Agricultural Engineering Research, 66, 235-238.
- [3] Cointault F, 2001. Automatisation de la mesure du débit d'engrais et trajectographie des granules 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, France.
- [4] 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 de l'Université de Bourgogne, France.
- [5] Villette S, Piron E, Cointault F, Chopinet B, 2005. Centrifugal spreading: an analytical model for the motion of fertilizer particles on a spinning disc. Biosystems Engineering 92(2), 157-164.
- [6] Villette S, Piron E, Cointault F, Chopinet B, 2008. Centrifugal spreading of fertilizer: Deducing three-dimensional velocities from horizontal outlet angles using computer vision. Biosystems Engineering. 99(4), 496-507
- [7] 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.
- [8] Hough P V C, 1962. Methods and means for recognizing complex patterns. US patent n° 3 069 654, 18 December 1962.
- [9] Duda R O, Hart P E, 1972. Use of Hough transformation to detect lines and curves in pictures. Communications of the Association for Computing Machinery, 15(1), 11-15.
- [10] Villette S., Cointault F., Chopinet B., Paindavoine M., 2006. Optimizing Hough transform for fertilizer spreading optical control. Optical Engineering 45(02)