



Estimation de vitesse par analyse d'images acquises en filé : Application à la caractérisation de la distribution centrifuge de granules d'engrais.

Sylvain Villette

► To cite this version:

Sylvain Villette. Estimation de vitesse par analyse d'images acquises en filé : Application à la caractérisation de la distribution centrifuge de granules d'engrais.. Informatique [cs]. Université de Bourgogne, 2006. Français. NNT : . tel-00496311

HAL Id: tel-00496311

<https://theses.hal.science/tel-00496311>

Submitted on 30 Jun 2010

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.

UNIVERSITE DE BOURGOGNE
U.F.R. SCIENCES ET TECHNIQUES
ECOLE DOCTORALE BUFFON

THESE

présentée en vue de l'obtention du grade de
Docteur en Instrumentation et Informatique de l'Image

par

Sylvain VILLETTE

ESTIMATION DE VITESSE PAR ANALYSE D'IMAGES ACQUISES EN FILE :
APPLICATION A LA CARACTERISATION DE LA DISTRIBUTION CENTRIFUGE
DE GRANULES D'ENGRAIS

Soutenue le 12 décembre 2006 devant le Jury

Rapporteur	M.-F. DESTAIN	Professeur (Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux)
Rapporteur	P. BONTON	Professeur (Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand II)
Examineur	P. ZWAENEPOEL	Directeur de Recherches (Cemagref, Clermont-Ferrand)
Examineur	B. CHOPINET	Professeur (ENESAD, Dijon)
Examineur	F. COINTAULT	Maître de Conférences (ENESAD, Dijon)
Directeur de thèse	M. PAINDAVOINE	Professeur (Université de Bourgogne, Dijon)

TITRE

Estimation de vitesse par analyse d'images acquises en filé : Application à la caractérisation de la distribution centrifuge de granules d'engrais.

RESUME

Cette thèse montre que l'acquisition d'images en filé au voisinage du disque d'épandage d'un distributeur centrifuge d'engrais constitue une solution pour déterminer les composantes de la vitesse d'éjection des granules. Un filtre linéaire récursif est appliqué sur l'image pour détecter les axes des traces laissées par les granules. Ce filtre est développé en appliquant la méthodologie de Canny à un modèle de contour dont le profil dérive d'une approche expérimentale. Ensuite, les trajectoires sont identifiées et caractérisées au moyen de la transformée de Hough en intégrant les connaissances issues de l'analyse du processus d'épandage. La vitesse d'éjection est alors déduite de l'angle d'éjection par le biais de relations cinématiques. La répartition angulaire du flux d'engrais est également estimée à partir de la fréquence d'identification des trajectoires dans l'image. La répartition au sol de l'engrais est déduite d'un modèle de vol balistique utilisant ces paramètres.

Mots-clés : acquisition en filé, détection de lignes, transformée de Hough, distributeur centrifuge, épandage d'engrais.

TITLE

Velocity estimation using motion blurred images : Application to the characterisation of centrifugal distribution of granular fertiliser.

ABSTRACT

This dissertation demonstrates that motion blurred images acquired in the vicinity of the spinning disc of a fertiliser centrifugal spreader can be used to estimate the outlet velocity components of the granules. First, a recursive linear filter is applied to the image to detect the streak axes corresponding to the granule trajectories. This filter was specifically developed for our research by means of the Canny method and an edge model based on an experimental approach. Secondly, the trajectories are identified and characterised using the Hough Transform. Its computation is based on mechanical knowledge derived from spreading analysis. Next, the outlet velocities are deduced from the outlet angle measurements using kinematic relationships. The fertiliser angular distribution is also estimated using the frequency of trajectory identifications in the image. Finally, the spread pattern is computed by means of a ballistic flight model using the above parameters.

Keywords : motion blurred images, line detection, Hough transform, centrifugal spreader, fertiliser spreading.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à Dominique Pauthex et Bernard Chopinet pour avoir autorisé le déroulement de cette thèse dans le cadre de mes activités au sein du Laboratoire en Génie des Agroéquipements et Procédés de l'ENESAD.

Je remercie Michel Paindavoine pour avoir assuré la direction scientifique de ma thèse. Je lui suis reconnaissant pour son aide dans la définition des contours de l'étude et pour la bienveillance avec laquelle il s'est préoccupé de l'organisation calendaire de mon travail.

J'adresse également mes remerciements à Frédéric Cointault et Bernard Chopinet pour avoir accepté d'encadrer cette thèse et pour la confiance qu'ils m'ont accordé dans l'orientation de mon travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Philippe Zwaenepoel pour le regard qu'il a porté sur mon étude et les réflexions enrichissantes dont il m'a fait bénéficier.

J'adresse mes remerciements à Madame Marie-France Destain et Monsieur Pierre Bonton pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'être les rapporteurs de ma thèse.

Richard Martin m'a apporté un appui quasiment permanent lors des essais de prises de vues et d'épandage. Je le remercie très sincèrement pour sa disponibilité et pour le travail qu'il a réalisé dans la construction du dispositif expérimental. Je le remercie aussi pour ses encouragements et sa bonne humeur même lorsque le matériel était réfractaire.

J'adresse mes remerciements à Emmanuel Piron et Christelle Gée pour les nombreux échanges scientifiques et techniques que nous avons eu au cours du déroulement de cette thèse. Leurs avis et conseils ont constitué d'importants points de repères.

Je tiens également à remercier Mary Bouley pour sa sympathie et le temps qu'elle a bien voulu me consacrer afin d'améliorer ma rédaction en anglais. Son aide m'a été particulièrement précieuse.

Je remercie Rachid Sabre et Alain Breuvart pour leurs éclairages et leurs conseils en mathématiques et statistiques.

J'adresse également mes remerciements à Nicole Bornier pour sa contribution au bon déroulement de mon travail et au maintien de la bonne ambiance quotidienne du laboratoire dans l'esprit MGR.

Enfin, je souhaite assurer de ma reconnaissance Jacques Ranger et Jean-Claude Coquille qui m'ont encouragé à réaliser un travail de thèse.

Christelle, Frédéric et Bernard ont assuré une partie de mes charges d'enseignement pendant la phase de rédaction de la thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
--------------	---

CHAPITRE 1. CONTEXTE DE L'ETUDE

1	AGRICULTURE DURABLE ET AGRICULTURE DE PRECISION.....	3
1.1	AGRICULTURE ET DEVELOPPEMENT DURABLE	3
1.2	AGRICULTURE DE PRECISION	4
2	FERTILISATION	4
2.1	OBJECTIF : REpondre AUX BESOINS DES CULTURES	4
2.2	CONTEXTE TECHNIQUE ET ECONOMIQUE.....	6
2.3	CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL	7
2.4	CONTEXTE SOCIAL	8
2.5	CONTEXTE LEGISLATIF ET MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	9
2.6	MATERIEL DE FERTILISATION	11
2.7	ENGRAIS MINERAUX SOLIDES	12
3	DISTRIBUTION CENTRIFUGE D'ENGRAIS MINERAUX SOLIDES	13
3.1	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	13
3.2	QUALITE D'UN EPANDAGE CENTRIFUGE ET METHODES DE CONTROLE	16
3.2.1	<i>Contrôle de la dose apportée</i>	16
3.2.2	<i>Qualité et contrôle de la répartition spatiale</i>	17
4	CONCLUSION	19

CHAPITRE 2. OBJECTIF DE L'ETUDE, ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

1	DEFINITION DE L'OBJECTIF GENERAL.....	21
2	CARACTERISATION D'UN FLUX DE PARTICULES - ETAT DE L'ART	23
2.1	METHODES DE MESURE SANS DISPOSITIF OPTIQUE.....	23
2.1.1	<i>Utilisation des efforts exercés sur un corps d'épreuve</i>	23
2.1.2	<i>Utilisation des échanges thermiques</i>	24
2.1.3	<i>Utilisation d'ondes acoustiques</i>	25
2.1.4	<i>Utilisation de traceurs</i>	25
2.1.5	<i>Utilisation de la résonance magnétique nucléaire</i>	26
2.1.6	<i>Utilisation des propriétés capacitives</i>	26
2.2	METHODES UTILISANT UN SYSTEME OPTIQUE NE CONDUISANT PAS A L'ACQUISITION D'UNE IMAGE	26
2.2.1	<i>Vélocimétrie laser à franges</i>	26
2.2.2	<i>Intercorrélation de signaux optiques</i>	27
2.2.3	<i>Filtrage spatial</i>	27
2.2.4	<i>Mesure du temps écoulé entre deux occultations</i>	28
2.3	METHODES NECESSITANT L'ACQUISITION D'IMAGES	29
2.3.1	<i>Vélocimétrie Doppler globale</i>	29
2.3.2	<i>Vélocimétrie par images de particules (PIV)</i>	30
2.3.3	<i>Méthodes appliquées à des particules millimétriques</i>	33
2.4	BILAN SUR LES METHODES ENVISAGEABLES DANS LE CAS DE L'EPANDAGE D'ENGRAIS	36
3	DEFINITION DE L'APPROCHE ET PROBLEME SCIENTIFIQUE.....	38
3.1	CHOIX DE L'APPROCHE	38
3.2	PROBLEMATIQUE	39

CHAPITRE 3. ANALYSE MECANIQUE DU PROCESSUS D'EPANDAGE CENTRIFUGE

1	MOUVEMENT DE LA PARTICULE SUR LE DISQUE.....	41
1.1	MODELES EXISTANTS DANS LA LITTERATURE	41
1.2	DEFINITIONS ET NOTATIONS	43
1.3	ANALYSE CINEMATIQUE DU MOUVEMENT SUR LA PALE	46
1.3.1	<i>Expression du vecteur vitesse dans le repère lié à la pale.....</i>	46
1.3.2	<i>Expression des composantes radiale, tangentielle et verticale de la vitesse</i>	47
1.3.3	<i>Expression de l'angle vertical d'éjection.....</i>	48
1.3.4	<i>Expression de la norme de la vitesse</i>	50
1.3.5	<i>Conclusion</i>	50
1.4	ANALYSE DYNAMIQUE DU MOUVEMENT SUR LA PALE	51
1.4.1	<i>Hypothèses simplificatrices.....</i>	51
1.4.2	<i>Vecteur accélération</i>	51
1.4.3	<i>Bilan des forces et équation du mouvement.....</i>	52
1.4.4	<i>Expression de l'angle horizontal d'éjection.....</i>	53
1.4.5	<i>Valeurs limites de l'angle horizontal d'éjection</i>	56
1.4.6	<i>Discussion relative au modèle de mouvement proposé.....</i>	57
2	MOUVEMENT DE LA PARTICULE APRES SON EJECTION.....	61
2.1	PARTICULE SOUMISE AU POIDS ET A LA FORCE DE TRAINEE.....	61
2.2	AUTRES FORCES ENVISAGEABLES	63
2.2.1	<i>Inventaire des actions</i>	63
2.2.2	<i>Cas de l'effet Magnus.....</i>	63
2.3	PROPRIETES AERODYNAMIQUES	65
2.3.1	<i>Coefficient de traînée et résistance aérodynamique</i>	65
2.3.2	<i>Coefficient de traînée et coefficient de lift pour un projectile sphérique en rotation.</i>	69
2.4	MODELE RETENU	70
3	CONCLUSION.....	71

CHAPITRE 4. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1	DISPOSITIF MECANIQUE ET SYSTEME D'ACQUISITION	73
1.1	DISPOSITIF DE DISTRIBUTION CENTRIFUGE.....	73
1.2	SYSTEME D'ACQUISITION DES IMAGES	75
1.2.1	<i>Caméra.....</i>	75
1.2.2	<i>Carte d'acquisition</i>	76
1.2.3	<i>Optique.....</i>	76
1.2.4	<i>Support et orientation de la caméra.....</i>	76
1.2.5	<i>Système d'éclairage</i>	77
1.2.6	<i>Arrière plan.....</i>	78
2	OPERATIONS DE CALIBRATION.....	78
2.1	METHODE UTILISEE.....	78
2.1.1	<i>Choix de l'objet de référence</i>	79
2.1.2	<i>Modèle de détermination des paramètres intrinsèques.....</i>	79
2.2	MISE EN OEUVRE ET RESULTATS DE CALIBRATION.....	80
2.3	RECTIFICATION DES IMAGES.....	82
3	PARAMETRES DE REFERENCE ASSOCIES AUX IMAGES	82
4	CONCLUSION.....	84

CHAPITRE 5. TRAITEMENT BAS NIVEAU DE L'IMAGE

1	NOTIONS SUR LA DETECTION DE CONTOURS	86
1.1	NOTION DE CONTOUR DANS UNE IMAGE	86
1.2	OPERATEURS DE DETECTION	87
1.2.1	<i>Différentes approches</i>	<i>87</i>
1.2.2	<i>Recherche d'une fonction optimale de détection</i>	<i>89</i>
1.2.3	<i>Filtre linéaire de détection de contours en forme de crêtes.....</i>	<i>96</i>
1.3	BILAN SUR LES APPROCHES EXISTANTES	101
2	DEFINITION D'UN FILTRE OPTIMAL DE DETECTION DE CONTOURS POUR LES IMAGES D'EPANDAGE	102
2.1	ESTIMATION DE L'ALLURE DES CONTOURS A DETECTER.....	102
2.1.1	<i>Modélisation de la trace laissée par des granules</i>	<i>105</i>
2.1.2	<i>Choix du modèle de contour</i>	<i>105</i>
2.2	RECHERCHE DU FILTRE OPTIMAL PAR LA METHODE DE CANNY.....	108
2.2.1	<i>Expression des critères</i>	<i>108</i>
2.2.2	<i>Recherche de la fonction optimale.....</i>	<i>108</i>
2.3	IMPLEMENTATION RECURSIVE DES FILTRES EN 2D	111
2.4	CHOIX DES PARAMETRES DES FILTRES	112
2.4.1	<i>Critères de performance</i>	<i>113</i>
2.4.2	<i>Réponse en fréquence des filtres</i>	<i>115</i>
2.5	MISE EN OEUVRE DES FILTRES	116
2.5.1	<i>Détermination de la norme du gradient et de l'orientation</i>	<i>116</i>
2.5.2	<i>Affinage et seuillage par hystérésis.....</i>	<i>116</i>
3	EVALUATION PRATIQUE DE LA PERFORMANCE DE LA DETECTION	117
3.1	EVALUATION SUR IMAGES SYNTHETIQUES	117
3.1.1	<i>Principe de l'indice de Pratt</i>	<i>118</i>
3.1.2	<i>Construction de l'image de synthèse.....</i>	<i>118</i>
3.1.3	<i>Evaluation et comparaison aux filtres de la littérature</i>	<i>119</i>
3.2	EVALUATION SUR IMAGES NATURELLES	121
3.2.1	<i>Evaluation du filtre proposé sur une image traditionnelle</i>	<i>122</i>
3.2.2	<i>Evaluation sur une image d'épandage.....</i>	<i>124</i>
4	CONCLUSION	126

CHAPITRE 6. IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES TRAJECTOIRES

1	VOCABULAIRE ET NOTATIONS	128
2	TRANSFORMEE DE HOUGH	129
2.1	PRINCIPE GENERAL	129
2.2	PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS.....	131
3	ADAPTATION DE LA TRANSFORMEE A L'ANALYSE D'IMAGES D'EPANDAGE	132
3.1	CHOIX DE L'ORIGINE DE LA REPRESENTATION POLAIRE.....	132
3.2	CHOIX D'UNE ZONE D'INVESTIGATION DANS L'IMAGE.....	134
3.3	CHOIX DE LA TAILLE DES ACCUMULATEURS DE LA TRANSFORMEE DE HOUGH.....	136
3.3.1	<i>Relation entre $\Delta_q\theta$ et $\Delta_q\rho$</i>	<i>137</i>
3.3.2	<i>Incidence du pas de quantification sur la précision obtenue.....</i>	<i>139</i>
3.4	CALCUL DE LA TRANSFORMEE DE HOUGH	139
3.5	EXEMPLES DE VALEURS POUR LES PARAMETRES DE CALCUL DE LA TRANSFORMEE	140
4	EXTRACTION DES PICS DE L'ESPACE DE HOUGH	141
5	EVALUATION DE LA METHODE	143
5.1	TEST REALISE SUR DES IMAGES D'EPANDAGE	143

5.2	TEST REALISE SUR DES IMAGES DE SYNTHESE.....	144
6	CAS OU LES TRAJECTOIRES DES GRANULES NE SONT PAS COPLANAIRES.....	148
6.1	DEFINITION DU PROBLEME ET APPROCHE PROPOSEE.....	148
6.2	MODELISATION GEOMETRIQUE DU PROBLEME.....	149
6.3	ECART ANGULAIRE ENTRE L'IMAGE D'UNE TRAJECTOIRE ET L'IMAGE DE SA PROJECTION DANS LE PLAN DE REFERENCE.....	151
6.3.1	<i>Expression en fonction de l'inclinaison verticale de la trajectoire.....</i>	<i>151</i>
6.3.2	<i>Prise en compte des connaissances a priori</i>	<i>152</i>
6.4	CORRECTION DES CARACTERISTIQUES POLAIRES	152
7	CONCLUSION.....	153

CHAPITRE 7. CONFRONTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

1	VALIDATION EN CONDITION STATIQUE	155
1.1	MATERIEL ET METHODE.....	155
1.2	CONFRONTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION	157
2	VALIDATION EN CONDITION DYNAMIQUE.....	158
2.1	ESTIMATION DE LA VITESSE D'EJECTION	159
2.1.1	<i>Matériel et méthode.....</i>	<i>159</i>
2.1.2	<i>Confrontation des résultats et discussion.....</i>	<i>161</i>
2.2	ESTIMATION DE L'ANGLE VERTICAL D'EJECTION	165
2.2.1	<i>Matériel et méthode.....</i>	<i>166</i>
2.2.2	<i>Confrontation des données expérimentales.....</i>	<i>167</i>
2.2.3	<i>Discussion.....</i>	<i>170</i>
2.3	REPARTITION ANGULAIRE DU FLUX.....	172
2.3.1	<i>Matériel et méthode.....</i>	<i>172</i>
2.3.2	<i>Confrontation des résultats.....</i>	<i>173</i>
2.3.3	<i>Discussion.....</i>	<i>175</i>
3	UTILISATION DES RESULTATS FOURNIS PAR LES ALGORITHMES.....	177
3.1	PROFIL DE VITESSE.....	177
3.2	ESTIMATION DE LA REPARTITION AU SOL	178
3.3	INTERACTIONS MATERIAU-MATERIEL	180
3.3.1	<i>Coefficient de frottement dynamique équivalent.....</i>	<i>180</i>
3.3.2	<i>Courbure des trajectoires</i>	<i>183</i>
4	SYNTHESE DES RESULTATS ET DISCUSSION.....	186

CONCLUSION ET PERSPECTIVES	189
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	193
ANNEXES	203
CONTRIBUTIONS DE L'AUTEUR	277

Les chapitres 3 et 6 faisant appel à des notations spécifiques, celles-ci sont répertoriées directement au sein de chacun de ces chapitres.

Introduction

Dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, le développement de la mécanisation ainsi que le recours aux produits phytopharmaceutiques et aux engrais minéraux ont permis d'augmenter fortement la production agricole. La recherche d'une meilleure productivité en agriculture a également engendré une transformation du parcellaire conduisant à l'exploitation de surfaces de plus en plus grandes. A la suite d'une phase d'intensification parfois mal maîtrisée, le secteur agricole s'est engagé dans une démarche de raisonnement des intrants dont l'objectif est de réduire les charges, augmenter l'efficacité des apports et limiter les impacts des activités de production sur l'environnement.

Sur le plan de la fertilisation, la teneur en éléments nutritifs des sols cultivés est assurée ou maintenue par des apports réguliers d'engrais minéraux qui, en Europe, sont essentiellement réalisés au moyen de distributeurs centrifuges. Au champ, la qualité des épandages ne permet pas toujours de valoriser les efforts qui ont été réalisés sur le plan de la préconisation des quantités d'engrais à apporter. En effet, en dépit de leur apparente simplicité, les appareils centrifuges s'avèrent relativement délicats à régler en raison de la multiplicité des engrais et de la variété de leur comportement.

D'autre part, l'absence de dispositif embarqué pour le contrôle en continu de la nappe d'épandage constitue un obstacle à la mise en œuvre d'une gestion réellement spatialisée des apports visant à répondre aux exigences de l'agriculture de précision.

La détermination des conditions d'éjection des granules, lorsqu'ils quittent la pale d'un distributeur centrifuge, constitue un préalable indispensable à l'utilisation d'un modèle de vol balistique pour estimer la distribution spatiale de l'engrais. Pour caractériser la nappe d'épandage, cette thèse développe une technique automatisée d'estimation de l'angle et de la vitesse d'éjection par analyse d'images. La méthode permet également d'accéder à une estimation de la répartition angulaire du flux d'engrais.

Le premier chapitre introduit les opérations de fertilisation en les situant dans l'évolution des pratiques et du contexte agricole. Il présente les appareils de distribution centrifuge et met en évidence les limites actuelles en terme de qualité d'épandage.

Le deuxième chapitre précise les objectifs de la thèse. Il dresse un panorama des techniques envisageables pour l'étude d'un flux de particules puis définit l'approche retenue et affine la problématique. La méthode choisie consiste à exploiter des images acquises en filé au voisinage du disque d'épandage. Ces images ont la particularité de faire apparaître les trajectoires suivies par les granules d'engrais en mouvement pendant le temps d'intégration de la caméra.

Les composantes de la vitesse d'éjection de ces particules sont déduites des angles d'éjection par des relations cinématiques dont les expressions sont établies au troisième chapitre. L'analyse du processus d'épandage permet, de plus, d'élaborer un modèle du mouvement des particules pendant leur phase d'accélération sur le disque d'épandage. Pour compléter cette

étude, un modèle simple de vol balistique est présenté dans le but de prédire la répartition au sol de l'engrais.

Le dispositif expérimental mis en œuvre pour reproduire le fonctionnement d'un distributeur centrifuge et acquérir les images de l'engrais éjecté est présenté dans le quatrième chapitre.

Le cinquième chapitre élabore un filtre de détection de lignes destiné à extraire des images les axes des trajectoires suivies par les granules. Le filtre est conçu spécialement pour cette situation en appliquant la méthodologie de Canny (1986) à un modèle de contour dont le profil dérive d'une approche expérimentale.

L'identification et la caractérisation des axes des trajectoires au moyen de la transformée de Hough (1962) font l'objet d'un développement dans le sixième chapitre. Le calcul de la transformée est, là encore, spécifiquement adapté à l'application.

Enfin, le septième et dernier chapitre analyse les résultats obtenus par la méthode proposée dans la thèse pour déterminer les angles horizontaux et verticaux, la vitesse d'éjection et la répartition angulaire du flux d'engrais à la sortie d'un disque d'épandage centrifuge. Il donne également un éclairage sur le comportement de l'engrais à l'éjection et propose une prédiction de la répartition de l'engrais au sol en fonction des paramètres caractéristiques déduits de l'analyse d'images.

La conclusion finale souligne les perspectives d'application de la méthode d'acquisition et d'analyse des images dans une politique d'amélioration de la qualité des épandages d'engrais.

Chapitre 1 : Contexte de l'étude

1 AGRICULTURE DURABLE ET AGRICULTURE DE PRECISION

1.1 AGRICULTURE ET DEVELOPPEMENT DURABLE

De manière générale, les activités humaines, et en particulier l'essor des activités de production lors du dernier siècle, ont eu sur notre environnement d'importantes répercussions. Au plan mondial, la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement de Rio en 1992 s'est faite l'écho de cette préoccupation. La prise de conscience de ces détériorations a abouti à la définition d'une politique de développement durable qui exprime le besoin de préservation des potentialités de notre environnement à l'échelle des générations. A travers la notion de « durabilité », cette politique cherche à établir une stratégie à long terme pour concilier le développement de nos activités du point de vue environnemental, économique et social.

En tant qu'activité commerciale, l'agriculture a pour principal but la fourniture de produits alimentaires, dont elle est la seule source de production. Pour atteindre cet objectif, elle est tributaire des conditions environnementales et de la disponibilité des ressources naturelles sur lesquelles elle exerce inévitablement une pression.

Après la seconde guerre mondiale, l'agriculture française et européenne a cherché à augmenter sa productivité. L'évolution des technologies et des critères commerciaux ont conduit les agriculteurs à moderniser leurs exploitations ainsi que leurs modes de production pour diminuer les coûts et augmenter les rendements. Une agriculture intensive s'est alors développée en Europe, encouragée par le niveau élevé de soutien des prix pratiqué à l'époque par la Politique Agricole Commune (PAC). Cette intensification s'est accompagnée d'une augmentation des consommations d'engrais et de produits phytosanitaires conduisant à une forte dégradation de certains écosystèmes.

En 1992, une réforme profonde de la PAC a stoppé cette course productiviste en transformant le système d'aides à la production en un système d'aides directes au revenu.

Le secteur agricole a alors également progressivement intégré la démarche de développement durable. En effet, les dégradations environnementales liées à l'activité agricole ont engendré une préoccupation croissante de nos sociétés et il est apparu essentiel d'améliorer les performances environnementales de l'agriculture afin de garantir une utilisation durable des ressources.

Dans ce contexte, les considérations environnementales sont aujourd'hui au cœur des préoccupations de la PAC. La réforme de 1999 intègre ainsi un renforcement des mesures agri-environnementales et lie le paiement des aides au respect d'exigences environnementales par l'éco-conditionnalité.

En appliquant le concept de développement durable, dans l'objectif de permettre la croissance actuelle sans compromettre les possibilités de croissance des générations futures, l'agriculture

durable cherche à concilier la rentabilité des exploitations, la qualité des productions, le respect de l'environnement et la préservation de notre cadre de vie.

Au niveau de la parcelle, les apports technologiques de l'agriculture de précision peuvent aider les exploitants à atteindre ces objectifs.

1.2 AGRICULTURE DE PRECISION

Dans le mode de culture traditionnel, l'exploitant définit la dose d'application des intrants¹ à l'échelle de la parcelle, de manière uniforme sur l'ensemble du champ. Cette approche donne satisfaction dans le cas d'un parcellaire faisant apparaître des entités relativement homogènes. En revanche cette pratique est peu performante lorsque les parcelles présentent une forte variabilité dans la nature du sol. Avec l'augmentation des surfaces et les regroupements de parcelles, réalisés dans un objectif de gain de productivité, la variabilité intra-parcellaire s'avère rarement négligeable. Au sein d'un même champ, il est alors souhaitable d'améliorer la gestion spatiale des intrants de manière à mieux répondre aux besoins de la culture et si possible diminuer la quantité totale apportée à l'hectare.

Cette stratégie est à l'origine de la notion d'agriculture de précision apparue aux Etats-Unis dans les années 1980. Il s'agit, à la base, d'un mode de conduite des parcelles agricoles qui se fonde sur la prise en compte de la variabilité intra-parcellaire et conduit à la modulation spatiale des intrants. Ce principe a vu le jour avec l'installation de capteurs de rendement et de systèmes de géo-référencement sur le matériel de récolte. Au delà de la prise en compte de la variabilité du sol et des cultures dans un objectif essentiellement économique, le concept évolue aujourd'hui vers la gestion de l'environnement et de la qualité des produits (Mac Bratney et al., 2005).

Actuellement, le développement de cette approche reste conditionné par les limites de la technologie et des modélisations agronomiques : capteurs, systèmes de traitement de données, modèles de prise de décision, méthodes d'évaluation...

Pour les cultures, l'objectif de l'agriculture de précision est d'optimiser la gestion des intrants en fonction des potentialités locales du sol afin d'améliorer l'exploitation agronomique, environnementale et économique des parcelles en garantissant la qualité des productions.

Dans ce schéma, les apports d'engrais et les traitements phytosanitaires sont deux opérations dont l'impact est particulièrement marqué en terme de coût et d'incidence environnementale.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons aux opérations de fertilisation minérale.

2 FERTILISATION

2.1 OBJECTIF : REPONDRE AUX BESOINS DES CULTURES

L'objectif de la fertilisation est de maintenir ou d'accroître la teneur des horizons cultivés en éléments nutritifs. Le but est de corriger une partie des défauts du sol pour répondre aux exigences de la culture dans la limite des potentialités locales.

¹ Matières entrantes au niveau d'une parcelle pour permettre la production : semences, fertilisants, produits phytosanitaires...

L'apport de matières fertilisantes permet ainsi :

- de compenser les exportations d'éléments minéraux dues aux récoltes,
- d'offrir une réserve nutritive immédiatement mobilisable pour répondre aux besoins de certaines phases végétatives,
- d'exploiter des sols naturellement pauvres.

De la fin de la seconde guerre mondiale à 1973, engagée dans un objectif de production quantitative, l'agriculture française a très fortement accru ses consommations d'engrais ; les livraisons d'azote augmentant même plus que proportionnellement à l'augmentation des rendements. A la suite du premier choc pétrolier, la fertilisation a été raisonnée de manière économique en privilégiant le critère de rentabilité des apports. Les rendements et la consommation d'azote ont alors suivi une croissance proportionnelle jusqu'en 1990. Après cette date, les rendements ont continué de croître alors que la quantité d'azote utilisée s'est stabilisée voire a diminué. Ces changements traduisent l'évolution des approches de la fertilisation passant de considérations purement quantitatives à l'optimisation technique et économique de l'utilisation des engrais.

Pour éviter les apports insuffisants ou excessifs, la fertilisation se doit d'être raisonnée. Pour l'azote par exemple, le raisonnement classique de la fertilisation se base sur un bilan annuel réalisé pour chaque culture et chaque parcelle. L'objectif de ce bilan est d'équilibrer au mieux les besoins de la culture et les différentes fournitures de nutriments dont elle peut bénéficier. Les besoins sont fonction de la plante cultivée (espèce, variété) et de l'objectif de rendement défini en fonction du potentiel pédo-climatique à l'échelle spatiale considérée. Les fournitures sont fonctions du sol (reliquat du bilan précédent, minéralisation d'une fraction de la matière organique) ainsi que des apports de matières fertilisantes organiques et minérales. Ce bilan permet de définir la dose optimale permettant d'atteindre sur le plan économique la meilleure marge brute et sur le plan environnemental le plus faible reliquat et la plus faible lixiviation.

Lorsque les besoins globaux en azote sont élevés (à partir de 100 kg.ha⁻¹), les apports sont fractionnés de manière à ce que l'azote soit absorbable par la plante au moment opportun du cycle végétatif. A titre d'exemple, pour une céréale à paille, trois apports d'azote sont couramment pratiqués : au stade tallage, au stade épi 1 cm et au cours de la montaison.

Aujourd'hui des modèles sont développés pour améliorer encore l'efficacité de la fertilisation en simulant le comportement de la culture à partir des différents paramètres liés au sol, au climat, aux précédents culturels, à l'itinéraire technique. Certains modèles peuvent même prendre en considération la date des apports et les effets du fractionnement.

Des méthodes de diagnostic de la nutrition azotée des plantes ont été développées pour aider à la décision concernant le troisième apport d'azote sur des céréales. Une solution consiste à analyser la teneur en nitrate du jus de tige des céréales (méthode Jubil proposée par l'INRA² et Arvalis ; méthode Ramsés proposée par InVivo, PILazo proposée par l'INRA et le CTIFL³).

Les évolutions technologiques fournissent également aujourd'hui des capteurs permettant d'estimer sur le terrain l'état réel de la nutrition azotée de la culture.

La télédétection aérienne ou satellitaire permet d'apporter une information à grande et moyenne échelle pour caractériser spatialement l'état d'une culture et aider l'exploitant dans

² Institut National de Recherche Agronomique

³ Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

sa prise de décision (Lamb et al., 2004). Des services d'aide à la conduite des cultures et des parcelles à partir d'images satellites sont d'ores et déjà proposés aux agriculteurs (Anonyme, 2004b). Par exemple, le service Farmstar développé en France par EADS-Astrium et Arvalis a concerné 250 000 ha de cultures et 10 000 agriculteurs (Roland et Gauthier, 2006). Dans cette méthode, la teneur en chlorophylle est estimée en fonction de la réflectance du couvert végétal, et le niveau de nutrition azotée de la culture en est déduit. Combinée à des modèles agronomiques, cette information permet de générer des cartes de consignes pour un apport d'azote.

A l'échelle de la plante, des instruments de diagnostic permettent à l'exploitant de réaliser des mesures ponctuelles du taux de chlorophylle dans les feuilles des plantes (SPAD-502 réalisé par Minolta Corporation (Ahmad et al., 1999), pince N-tester commercialisée par Yara). Cette information est utilisée pour renseigner les modèles de prise de décision ou, par échantillonnage dans la parcelle, dans le but de produire des cartes de consignes pour les apports d'azote (Ahmad et al., 1999).

A l'échelle de la culture, des dispositifs portables (GPN de la société GP-AZF) ou embarqués directement sur le tracteur (N-Sensor de la société Yara) sont d'ores et déjà commercialisés pour mesurer à distance la réflectance du couvert végétal et estimer l'état de nutrition des plantes en temps réel. Dans un objectif de modulation de dose, le capteur proposé par Yara offre une solution pour la gestion de la variabilité du besoin en azote sur la base d'une information mesurée in situ et en temps réel. D'autres dispositifs embarqués pour l'estimation des besoins en azote des cultures sont actuellement à l'étude (Alchanatis et Schmilovitch, 2005 ; Schächtl et al., 2005 ; Noh et al., 2005).

Aujourd'hui, dans le domaine de la fertilisation, les modèles et les capteurs proposés ou en cours d'élaboration constituent des outils élaborés d'aide à la décision en intégrant un grand nombre de paramètres et en permettant de déterminer au mieux les quantités d'engrais à apporter aux cultures. Ils permettent également de prendre en considération la variabilité intra-parcellaire du sol et de la culture pour réaliser une modulation de dose.

2.2 CONTEXTE TECHNIQUE ET ECONOMIQUE

Sur le plan économique, de 1980 à 2000, la part des fertilisants dans les consommations intermédiaires a diminué du fait de la chute des prix des engrais (en monnaie constante) et de la réduction des quantités de phosphore (-56%) et de potassium (-40%) utilisées (Schvartz et al., 2005).

Sur cette période, l'augmentation de la consommation d'azote a également été relativement faible (7%). Pour la campagne 2001-2002, la part des engrais, ramenée à la valeur de la production agricole, représentait 7,9 % des consommations en polyculture-élevage et 13,4% en grande culture (Schvartz et al., 2005).

Néanmoins, depuis 1994, on assiste à une remontée des prix de l'engrais et il peut être souligné que le marché des fertilisants est très dépendant du coût de l'énergie.

En agissant sur la croissance des plantes, les fertilisants ont une incidence directe sur la production et donc sur le rendement à l'hectare.

Un sous-dosage global ou ponctuel sur une parcelle engendre donc une diminution du rendement. De même, un sur-dosage global ou ponctuel ne conduit généralement pas à une augmentation de rendement et peut même entraîner une diminution en cas de verse de céréales à paille par exemple. Ziani et Rousselet (1990a) ont ainsi identifié chez un groupe d'agriculteurs des situations de verse, localisée en bandes parallèles à l'axe de passage du

tracteur, révélant des défauts de réglage de l'appareil d'épandage et un recouvrement incorrect.

Dans le cas de l'azote, les zones sur-dosées peuvent de plus s'avérer potentiellement polluantes.

L'action des fertilisants ne se limite cependant pas à un aspect quantitatif ; les apports d'éléments nutritifs ont également un impact sur la qualité des produits agricoles du fait de leur rôle dans la biologie des plantes et dans la composition des tissus végétaux. Ils modifient ainsi la valeur nutritionnelle des produits et la qualité technologique liée au process de transformation.

Les apports d'azote permettent par exemple d'augmenter la teneur en protéines des blés durs pour la fabrication des pâtes alimentaires et améliorent la valeur boulangère des blés tendres. En revanche, les excès d'azote peuvent avoir un effet néfaste sur la qualité des produits. Pour la betterave sucrière, un apport excessif induit une diminution du taux de sucre extractible. Pour les orges brassicoles, la fertilisation azotée a une incidence sur les aptitudes à la fermentation et doit permettre d'obtenir un équilibre correct entre amidon et protéines. Pour les pommes de terre, un excès d'azote est également préjudiciable car il peut induire des cœurs creux, des déformations, un retard de maturation, des difficultés de défanage, ainsi qu'une diminution de la teneur en amidon et en matière sèche.

Les matières fertilisantes ont donc un impact sur la quantité et la qualité des produits agricoles, tant dans le cas d'une carence que d'un excès en éléments nutritifs. L'effet global de ces éléments sur la récolte dépend des quantités apportées mais également de l'équilibre qui existe entre les différents éléments minéraux disponibles pour la culture.

En particulier, dans le cas de l'azote, on peut penser qu'une mauvaise répartition spatiale de l'engrais au niveau de la parcelle induit un risque économique pour l'exploitant et un risque de dégradation pour le milieu.

Les incidences économiques d'une mauvaise répartition de l'engrais dans une parcelle sont difficiles à évaluer compte-tenu de la diversité des situations rencontrées (type de défaut, culture, sol, climat...) et de la variété des conséquences induites (durée du chantier de récolte, perte à la récolte, valorisation du produit...). Selon Makowski et al. (2000), l'hétérogénéité d'un apport d'engrais peut être à l'origine d'une perte de rendement qui peut atteindre 5 q/ha et d'une perte de marge brute pouvant dépasser 300 F/ha sur un blé.

Pour concilier les performances économiques et environnementales des opérations de fertilisation, l'UNIFA⁴ (Anonyme, 2005b) préconise le respect de cinq règles fondamentales consistant à : calculer la dose d'azote minéral par un bilan prévisionnel, choisir la forme d'azote la mieux adaptée, fractionner les apports, ajuster les quantités en fonction des modèles et outils de pilotage, et contrôler avec précision l'épandage. Ce dernier point est directement dépendant des matériels d'épandage de l'engrais.

2.3 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Le principal impact de la fertilisation sur l'environnement se situe au niveau de la qualité des eaux suite à une mauvaise gestion des effluents d'élevage et à une utilisation excessive de matières fertilisantes. D'autre part, notons qu'indépendamment de tout apport de fertilisant, la

⁴ Union des Industries de la Fertilisation

fixation de l'azote atmosphérique par certaines espèces végétales conduit naturellement à l'apparition de nitrates dans le sol. En venant perturber le cycle naturel de l'azote, un changement d'activité au niveau d'une parcelle peut conduire à augmenter la minéralisation de l'azote organique en nitrates (*e.g.* labour d'une prairie). L'activité agricole peut donc engendrer une augmentation de la concentration des eaux en nitrates avant même tout apport de matière fertilisante.

Lorsqu'ils ne correspondent pas rigoureusement aux besoins des cultures, les apports de matières fertilisantes engendrent un risque de pollution des eaux.

Au niveau des eaux souterraines, la dégradation liée à la présence de nitrates est connue et incontestable. Non retenus par le pouvoir adsorbant du sol, les nitrates, lorsqu'ils sont en excès, rejoignent facilement les nappes d'eaux souterraines par drainage profond, contaminant ainsi les ressources. La lenteur du processus de migration (de l'ordre d'un mètre par an) ajoute à la gravité de la situation compte tenu du niveau de concentration déjà atteint dans certaines nappes profondes. Cette lenteur implique également une latence importante entre le changement des pratiques agricoles et l'apparition d'améliorations significatives.

Bien qu'elle ne soit pas la seule source de pollution, l'utilisation de matières fertilisantes sur les parcelles agricoles contribue également à la détérioration de la qualité des eaux superficielles. En hiver ou lors d'orages, le ruissellement et le drainage agricole peuvent engendrer un départ d'eaux chargées en éléments nutritifs vers le réseau hydrographique de surface.

En ce qui concerne les incidences environnementales de la fertilisation minérale, réalisée au moyen d'engrais chimiques, le principal problème est lié aux apports d'azote et à l'entraînement des nitrates vers les nappes souterraines et les eaux superficielles.

Cette pollution rend délicate la production d'eau potable pour la consommation humaine et constitue également l'un des facteurs responsables de l'eutrophisation des milieux aquatiques.

2.4 CONTEXTE SOCIAL

Dans nos sociétés, l'eau est l'objet d'une préoccupation constante. En Europe, nous sommes passés d'un problème de salubrité et de potabilité à des inquiétudes vis à vis de la qualité et de la pérennité de la ressource. Dans une appréhension générale des risques liés à la qualité alimentaire, les craintes vis à vis des pollutions agricoles ont progressé.

Les principales activités pointées du doigt par nos concitoyens sont les élevages intensifs et leurs rejets, l'utilisation de produits phytosanitaires et l'utilisation d'engrais chimiques.

Dans les années 70, le principe pollueur-payeur voit le jour. Ce concept préconise que le coût des mesures prises pour maintenir l'environnement dans un état correct soit répercuté dans le coût des biens et services utilisés par les entités (productrices ou consommatrices) qui sont à l'origine de la pollution.

En France, des actions ont été entreprises pour lutter contre les pollutions azotées d'origine agricole en combinant des dispositifs réglementaires, économiques et la promotion d'actions volontaires auprès des agriculteurs. Néanmoins, le rapport à l'Assemblée Nationale de l'OPECST⁵ rédigé par Miquel (2003) souligne « une nette insuffisance de résultat sur la qualité de l'eau » et « une menace pour la pérennité d'autres secteurs économiques ». Il

⁵ Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques

propose d'autre part de réformer la politique de prévention des pollutions diffuses d'origine agricole sur la base d'un recours plus systématique à l'éco-conditionnalité (cf. contexte législatif).

Au niveau des fabricants d'engrais et des constructeurs de matériels d'épandage, les principales interrogations et évolutions identifiées (Zwaenepoel, 2004) portent sur les engrais à haut dosage en azote, le fractionnement des apports, le développement des outils « grande largeur », les dispositifs d'aide à la décision et l'aide au paramétrage des appareils d'épandage.

Au niveau du secteur agricole, les actions entreprises dans les années futures seront probablement fonction de l'image que souhaite donner la profession, de la réglementation et des aides économiques.

Il est aujourd'hui nécessaire de concilier les pratiques agricoles avec les attentes de la société en terme de traçabilité, de qualité de l'alimentation, de respect de l'environnement ainsi que d'aménagement et de gestion du territoire.

Notons que le secteur agricole doit faire face aux attentes parfois antagonistes d'une société attentive à son cadre de vie et à sa sécurité alimentaire mais composée de consommateurs à la recherche de produits au meilleur prix.

2.5 CONTEXTE LEGISLATIF ET MESURES D'ACCOMPAGNEMENT

En 1991, la Commission Européenne a promulgué la « directive nitrates »⁶ dans le but de protéger les eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. Cette directive demandait aux états membres d'élaborer un code de bonnes pratiques agricoles, de définir les « zones vulnérables » et de prévoir la mise en oeuvre de « programmes d'actions ».

Les zones vulnérables identifiées par la directive sont les zones qui alimentent les eaux superficielles et souterraines qui dépassent ou risquent d'atteindre une concentration en nitrate de 50 mg.L⁻¹ ainsi que les zones présentant un risque d'eutrophisation. En France, ces zones concernent aujourd'hui 55% de la surface agricole utile (Schvartz et al., 2005).

Le code des bonnes pratiques agricoles, publié par arrêté au Journal Officiel du 5 janvier 1994, est d'application obligatoire dans les zones vulnérables et d'application volontaire hors de ces zones.

Sur le plan de l'épandage des engrais, soulignons que le code des bonnes pratiques mentionne à l'article 6 de veiller à l'uniformité de l'épandage de la dose déterminée en s'assurant de l'homogénéité du produit épandu et en contrôlant le réglage du matériel utilisé.

En 1992, la loi française faisait de l'eau « un patrimoine commun de la nation » dont la protection relève de l'intérêt général. Au niveau européen, la protection de l'eau a revêtu deux aspects : d'une part, la lutte contre le déversement de substances polluantes dans l'environnement aquatique et d'autre part, la définition de normes de qualité sur des zones spécifiques ou pour des usages particuliers. Une nouvelle directive cadre sur l'eau a été élaborée en 2000⁷ dans le but de fournir « un cadre législatif transparent et cohérent ».

⁶ Directive du Conseil du 12 décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles (96/676/CEE)

⁷ Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 (JOCE n° L327 du 22/12/2000, p 1-73)

Cette directive fixe pour l'horizon 2015 un objectif de « bon état écologique et chimique » pour les eaux de surface et un « bon état chimique et quantitatif » pour les eaux souterraines. Soulignons enfin que la directive a également une exigence de transparence en matière de répartition des charges entre les différents secteurs économiques et vis à vis du principe pollueur-payeur, même si elle n'impose pas l'application rigoureuse de ce principe en laissant la voie ouverte aux subventions et transferts.

Les programmes d'actions se sont accompagnés de dispositifs économiques. Dans le cadre de la maîtrise des pollutions liées aux effluents d'élevage, des aides ont été attribuées aux exploitants à travers les PMPOA ou PMPLEE (Programmes de Maîtrise de Pollution d'Origine Agricole ou Liées aux Effluents d'Elevage), pour réaliser des investissements et des changements de pratiques en matière d'épandage. L'indemnité compensatoire de couverture des sols (ICCS) constitue également une aide pour l'implantation de cultures « pièges à nitrates » dans les zones d'actions complémentaires (ZAC). Des aides au traitement des effluents d'élevage dans les zones en excédent structurel (ZES) ont également été proposées.

En 1999, l'application de la TGAP (Taxe Générale sur les Activités Polluantes) à certains produits a constitué, en France, un des outils d'application du principe « pollueur-payeur » avec l'objectif, d'une part, de financer la « réparation » des dommages causés à l'environnement et d'autre part, de dissuader les pratiques polluantes. En 2001, cette fiscalité s'est appliquée sur les produits phytosanitaires agricoles. Aujourd'hui, la TGAP est devenue une redevance versée à l'Agence de l'eau.

Bien qu'envisagée à plusieurs reprises, cette fiscalité n'a jamais été appliquée sur les fertilisants. L'utilisation excessive des engrais devrait néanmoins être pénalisée par l'éco-conditionnalité qui consiste à subordonner le paiement d'aides ou de crédits agricoles au respect de certains critères environnementaux.

Ce concept est apparu dans le droit communautaire dès la deuxième réforme de la PAC en 1999 qui a fait apparaître une action en faveur du développement rural et de la protection de l'environnement. De manière générale, en France, le principe d'éco-conditionnalité a été mis en application à partir de 2001 en conditionnant le versement de certaines primes au respect de règles à caractère environnemental.

En accompagnement des politiques environnementales, des comités ont été créés pour promouvoir le développement de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement. En 1980 a été créé le COMIFER⁸. Quatre ans plus tard, le CORPEN⁹ a également été constitué pour favoriser les évolutions dans les pratiques culturales dans le but de réduire les pollutions liées aux nitrates et phosphates avant d'être étendu aux produits phytosanitaires en 1992. Ce comité a émis des propositions pour le « Code des bonnes pratiques agricoles » et a rédigé diverses brochures destinées à améliorer les pratiques agricoles pour réduire les pertes de nitrates vers les eaux.

Les aspects réglementaires se sont également accompagnés de démarches volontaires au niveau de la profession. Au niveau national, différentes actions ont été engagées.

En 1991, une opération nationale de conseil en fertilisation intitulée « Ferti-Mieux » a été initiée par le Ministère de l'Agriculture et le Ministère de l'Environnement, en partenariat avec les organisations agricoles et les acteurs de la filière. L'objectif était de labelliser des

⁸ COMIté français pour l'étude et le développement de la FErtilisation Raisonnée

⁹ Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates, les phosphates et les produits phytosanitaires provenant des activités agricoles

opérations de fertilisation azotée raisonnée dans des zones vulnérables. Cette initiative a donné lieu à plus de 54 opérations locales réparties sur l'ensemble du territoire.

En 1993, l'association FARRE (Forum de l'Agriculture Raisonnée Respectueuse de l'Environnement) a été constituée par les chambres d'agriculture, des industriels et des organisations professionnelles agricoles. Cette association a pour objectif d'améliorer le raisonnement des pratiques culturales en conciliant l'efficacité économique, le respect de l'environnement et la qualité des produits agricoles.

En 1999, le Ministère de l'Agriculture a proposé aux exploitants agricoles de s'engager dans des contrats territoriaux d'exploitation (CTE) dans le but de favoriser l'emploi, de répondre aux attentes de la société en terme de sécurité et de qualité alimentaire, d'agir en faveur de l'environnement et de l'espace rural. En 2003, ces contrats ont été remplacés par les contrats d'agriculture durable (CAD) plus restrictifs et imposant aux exploitants de raisonner et d'enregistrer leur pratique de fertilisation sur une durée de cinq ans.

D'après Miquel (2003), ces programmes de démarches volontaires induisent « une sensibilisation des agriculteurs, mais l'impact environnemental de ces actions reste limité ».

Concernant la qualité du travail réalisé par les matériels d'épandage, aucune réglementation n'est actuellement en vigueur en France. Néanmoins, il n'est pas interdit d'imaginer dans les années futures une évolution similaire à celle qui concerne la pulvérisation de produits phytosanitaires. Le contrôle technique des pulvérisateurs est aujourd'hui obligatoire en Allemagne, en Belgique, aux Pays-Bas, au Danemark et en Finlande. En terme de formation, en France un agrément¹⁰ est d'ores et déjà nécessaire pour les applicateurs de produits phytosanitaires.

2.6 MATERIEL DE FERTILISATION

En agriculture, les matières fertilisantes sont principalement apportées sous la forme d'engrais minéraux solides, d'engrais minéraux liquides et d'engrais organiques (fumier, lisier, compost...).

Pour les engrais liquides, selon le type de production, les apports peuvent être réalisés par un dispositif d'irrigation (« fertigation ») ou au moyen de pulvérisateurs. L'épandage des engrais de ferme (organiques) est réalisé avec différents matériels en fonction des propriétés mécaniques de ceux-ci. Lorsque le produit a une consistance suffisante, les appareils utilisent un dispositif mécanique de projection centrifuge. Lorsque le produit est liquide les appareils utilisent un dispositif hydraulique avec une rampe d'épandage munie de buses ou de socs d'enfouissement.

Dans le cas des engrais minéraux solides, qui se présentent sous la forme de granules, les épandages en plein (consistant à disperser l'engrais sur la surface de la parcelle) sont essentiellement réalisés en grande culture au moyen de distributeurs centrifuges, de distributeurs pendulaires ou de distributeurs pneumatiques à rampes.

Soulignons que les engrais peuvent également être apportés de manière localisée en nappe étroite ou en bande (arboriculture, viticulture), ainsi qu'en ligne, avec enfouisseurs ou en association lors du semis.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons au mode d'apport correspondant en Europe à la plus grande part du tonnage épandu : la distribution centrifuge d'engrais minéraux solides. A titre d'exemple, en Angleterre, une étude récente sur les pratiques de fertilisation

¹⁰ Loi 92-533 du 17 juin 1992, décret n°94-863 du 5 octobre 1994 et arrêté du 13 mars 1995

citée par Miller et Parkin (2005) rapporte que 72 % des distributeurs d'engrais utilisés sur les exploitations de plus de 200 hectares sont de type centrifuge, 8.7% sont de type pendulaire et 8.2% sont de type pneumatique tandis que 11% des matériels utilisent de l'engrais liquide. Selon Fölster (2005) de la société Amazone, en agriculture, environ 80 % des engrais sont épandus au moyen de distributeurs centrifuges.

Les principaux avantages de la distribution centrifuge sont liés à sa robustesse, sa simplicité, et au faible coût d'investissement et d'entretien qui en résulte.

En 2005, la FRCUMA de l'Est de la France rapporte (Anonyme, 2005a), pour cette région, un coût moyen de 5050 € pour les distributeurs portés « standard » et 6600 € pour les versions « haut de gamme ». Avec les options (pesée de la trémie, monitoring...), le coût des appareils de grande capacité peut atteindre 20 000 € (Anonyme, 2006). Néanmoins, Tissot et al. (1999a) soulignent que le prix d'achat de l'appareil est particulièrement faible par rapport au coût de l'engrais qu'il permet d'épandre. En considérant des frais moyens de fertilisation de l'ordre de 150 €/ha et une durée d'amortissement de 10 ans, les auteurs estiment que le prix d'achat du distributeur représente 3 à 4% du coût de l'engrais pour une exploitation de 100 ha.

En comparant la qualité de la répartition spatiale de l'engrais de deux distributeurs centrifuges et de deux distributeurs pneumatiques, Fulton et al. (2005a) ont montré que, contrairement aux idées reçues, les distributeurs pneumatiques ne permettaient pas toujours d'obtenir une meilleure qualité de la répartition. Ces distributeurs sont relativement chers et demandent une attention plus soutenue en terme de maintenance et d'entretien pour obtenir des performances égales ou supérieures à celles de l'épandage centrifuge.

Les appareils pendulaires souffrent quant à eux d'une limitation aux petites largeurs de travail (12 à 18 m).

2.7 ENGRAIS MINÉRAUX SOLIDES

Seule la composition chimique des engrais minéraux fait l'objet de dispositions réglementaires et de normes. Un engrais peut être soit « simple » en apportant un seul type d'élément : azote ou potassium ou phosphore, soit « composé » en apportant une combinaison binaire ou ternaire de ces éléments. Lorsqu'un engrais composé est réalisé non pas chimiquement mais physiquement par mélange de plusieurs engrais différents, des écarts non négligeables peuvent apparaître entre les granules en terme de taille ou de masse volumique.

Concernant les caractéristiques physiques, aucune réglementation n'est aujourd'hui en vigueur. De nombreux paramètres ont néanmoins été identifiés pour caractériser la qualité physique des engrais et leur aptitude à l'épandage : masse volumique, distribution granulométrique, sphéricité, taux d'écoulement, dureté, friabilité, taux de poussières, résistance à la reprise de l'humidité, résistance à la reprise en masse.

En pratique, les caractéristiques physiques des engrais sont particulièrement variables puisqu'elles dépendent de la fabrication mais aussi du mode et de la durée de stockage, du mode de manutention, des conditions climatiques...

Dans le cadre d'un épandage centrifuge, ces caractéristiques conditionnent la régularité du débit d'engrais dans les appareils et la qualité de la répartition au sol. Comme les caractéristiques physiques de l'engrais influencent son comportement sur le disque d'épandage, un réglage spécifique des appareils d'épandage est indispensable pour chaque engrais.

Aujourd'hui, les fournisseurs commercialisent des engrais (*e.g.* « Extran 33,5 » de Yara, « HD 33.5 » d'AZF) dont les caractéristiques physiques sont améliorées en vue d'accroître la

qualité des épandages pour les grandes largeurs de travail : resserrement granulométrique autour d'un diamètre moyen suffisant, masse volumique élevée, dureté...

De petits granulomètres de terrain sont également proposés par les constructeurs de matériel de distribution d'engrais pour permettre à l'utilisateur d'apprécier la distribution granulométrique de son engrais et son aptitude à un épandage en grande largeur.

3 DISTRIBUTION CENTRIFUGE D'ENGRAIS MINERAUX SOLIDES

3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe général de fonctionnement d'un distributeur centrifuge (figure 1-1) est relativement simple. Les granules d'engrais, stockés dans une trémie, traversent un orifice dont l'ouverture variable permet le réglage du débit. Les particules sont ensuite dirigées au dessus d'un disque muni de pales. Du fait de la rotation du disque (700 à 1000 tr/min), le flux d'engrais est régulièrement coupé par le passage des pales. Sur chaque pale, les granules sont accélérés dans un mouvement centrifuge jusqu'à leur éjection. Ils atteignent alors une vitesse de l'ordre de 100 à 150 km/h. Selon la largeur de travail envisagée, les distributeurs comportent un ou deux disques.

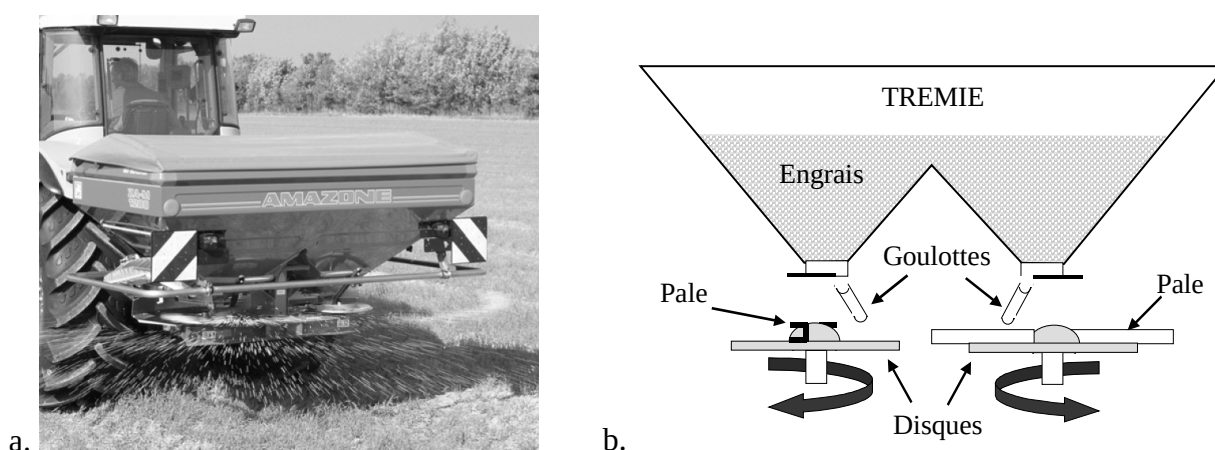


Figure 1-1 : a - Photographie d'un distributeur centrifuge à deux disques attelé à un tracteur (Source : Documentation commerciale Amazone ZA-M). b – Schéma de principe d'un distributeur centrifuge à deux disques.

La forme de la nappe d'épandage conditionne la répartition de l'engrais au sol. Elle est fonction de la conception et des réglages de l'appareil : vitesse de rotation du disque, longueur des pales, débit d'engrais, forme du disque, forme des pales, inclinaison des pales, position du point de chute de l'engrais sur le disque. La figure 1-2 donne quelques exemples de configurations de disques équipés de pales droites.

La répartition au sol est également fortement influencée par les réglages réalisés au niveau de l'attelage de l'appareil (inclinaison, hauteur), les propriétés physiques de l'engrais (masse volumique, forme, granulométrie...) et les conditions d'épandage (mouvement du distributeur en cours de travail, dévers, vent, humidité...).

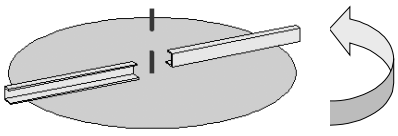
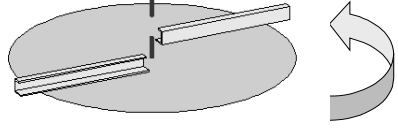
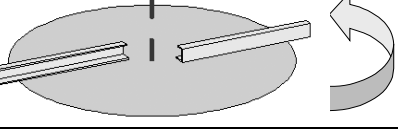
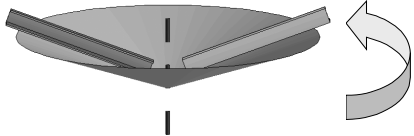
Configuration	Vue de 3/4
Disque plat, pales radiales	
Disque plat, pales inclinées vers l'arrière	
Disque plat, pales inclinées vers l'avant	
Disque tronconique, pales radiales	

Figure 1-2 : Représentations schématiques de différentes configurations de disques (l'axe de rotation des disques est représenté par le trait vertical pointillé).

Le principe d'un épandage en plein dans une parcelle consiste en une série de passages successifs adjacents. La figure 1-3 illustre ce mode de répartition de l'engrais et la courbe théorique de répartition transversale qui résulte du recouvrement des passages « aller-retour ». Selon le type d'appareil, la quantité d'engrais distribuée lors d'un seul passage diminue régulièrement de part et d'autre de l'axe d'avancement du tracteur (profil triangulaire, cf. figure 1-3) ou présente un plateau central avant une décroissance sur les extrémités (profil trapézoïdal).

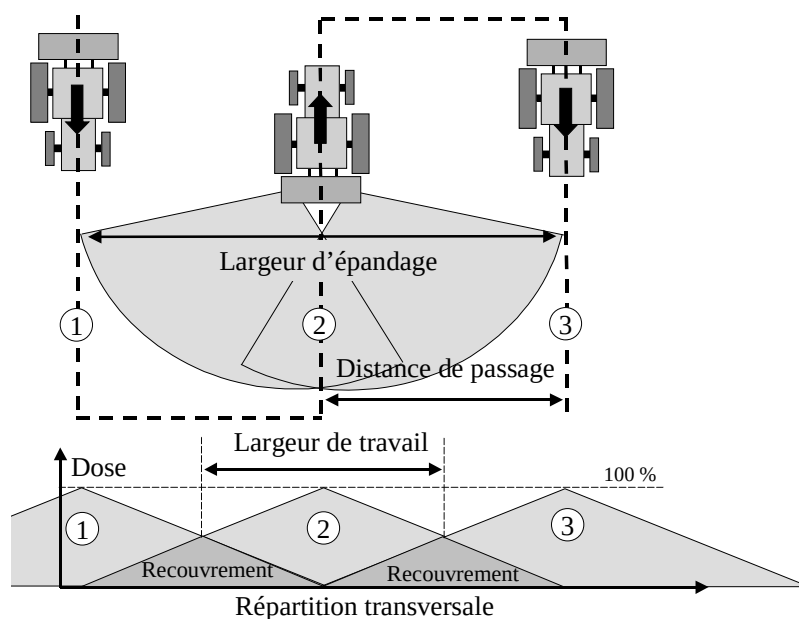


Figure 1-3 : Schéma de principe d'un épandage en plein avec distributeur centrifuge dont la répartition transversale est triangulaire.

Dans tous les cas, les réglages du système de distribution sont nécessaires à l'obtention d'une nappe d'épandage dont la forme et les recouvrements assureront la régularité transversale de la dose apportée. La distance de passage étant fixée, la largeur d'épandage doit permettre l'obtention de la largeur optimale de travail pour éviter un recouvrement excessif (engendrant un sur-dosage) ou un recouvrement insuffisant (engendrant un sous-dosage).

Sur le terrain, pour chaque engrais, ce réglage est réalisé par l'utilisateur selon un tableau fourni par le constructeur et établi pour différents engrais en fonction de la largeur de travail envisagée. Soulignons qu'en pratique, l'utilisateur peut être amené à épandre un engrais non répertorié dans le manuel fourni par le constructeur. Les granules d'engrais étant très hydroscopiques, leur comportement est également influencé par les conditions climatiques qui ajoutent à la difficulté de réglage des appareils.

La stratégie de réglage de la distribution est variable selon les constructeurs. Pour permettre différentes largeurs d'épandage, les constructeurs proposent :

- des disques interchangeables (Kuhn, Amazone),
- des pales interchangeables (Bogballe, Sulky),
- une modification de l'inclinaison des pales (Amazone),
- une modification de l'inclinaison longitudinale de l'appareil (Bogballe),
- une variation de la vitesse de rotation des disques (Vicon par boîte de vitesses, Kuhn par entraînement hydraulique, Bredal par modification du régime prise de force),
- une modification de la position du disque sous le point d'alimentation (Kuhn),
- une modification de la position du point de chute indépendamment de l'ouverture des trappes d'alimentation (Sulky, Bredal),
- une modification de la position angulaire de la fenêtre d'alimentation centrale (Vicon)...

Dans le cas d'une modulation de dose, la modification du débit d'alimentation du disque engendrant une modification de la nappe d'épandage (lorsque les réglages sont maintenus constants), certains constructeurs ont développé des formes de trappes d'alimentation dans l'objectif de corriger la position du point de chute de manière à maintenir une répartition au sol correcte.

Ces dernières années, trois principales évolutions techniques ont marqué le marché des distributeurs centrifuges. Il s'agit tout d'abord d'une augmentation de la largeur potentielle de travail jusqu'à 36 m voire davantage. Cette évolution fait suite à l'augmentation des largeurs de rampe des pulvérisateurs pour l'application des produits phytosanitaires et la contrainte qui en résulte pour respecter les mêmes passages de roues. Le deuxième point concerne les équipements de bordure destinés à assurer un épandage satisfaisant jusqu'au bord des parcelles en évitant ou en limitant les projections au-delà. Enfin le dernier élément est relatif au contrôle de la dose apportée. Il peut être réalisé au moyen d'un système de pesée embarquée couplé à la régulation DPA (« Débit Proportionnel à l'Avancement ») et à une console de contrôle.

La mise en oeuvre de la modulation de dose en fonction d'une carte de préconisations reste en pratique relativement délicate. Elle pose le problème de l'adaptation de la largeur de travail à la variabilité spatiale (Persson et al., 2003), du décalage entre la position du récepteur GPS et celle de la nappe d'épandage (Griepentrog et Persson, 2001) et de la définition des tests permettant de juger de sa qualité (Shearer et al., 2002 ; Fulton et al., 2005b).

Des travaux sont également en cours (Virin et al., 2005) pour optimiser localement au sein d'une parcelle les caractéristiques de l'épandage de manière à réduire au mieux la différence entre la carte de préconisations et la quantité réellement apportée en chaque point de la

parcelle. Cette optimisation consiste à prévoir localement une modification du débit d'engrais et une modification de certaines caractéristiques de la nappe d'épandage : portée moyenne de l'éjection et direction moyenne de la nappe.

Sur le plan du guidage du tracteur au sein de la parcelle, différents dispositifs de navigation automatisée ou d'assistance à la conduite donnent d'ores et déjà satisfaction (Pein et al. 2006 ; Fekete et al. 2006 ; Balsari et al., 2006).

3.2 QUALITE D'UN EPANDAGE CENTRIFUGE ET METHODES DE CONTROLE

La qualité d'un épandage se traduit par la régularité avec laquelle la dose déterminée est apportée en tout point d'une parcelle sur laquelle un apport constant a été prévu.

La régularité peut être considérée de manière longitudinale : dans la direction d'avancement du tracteur et de manière transversale : perpendiculairement à l'axe de passage.

Longitudinalement, la variation de quantité apportée est généralement faible. Elle dépend de la variation de l'écoulement granulaire, de la variation du régime moteur et de la vitesse d'avancement. Ces variations sont particulièrement limitées dans le cas d'un appareil à débit proportionnel à l'avancement (DPA).

En revanche, dans la direction transversale, la variabilité peut être beaucoup plus accentuée. Elle dépend de la dispersion de l'engrais à l'arrière du tracteur et du recouvrement des passages « aller-retour ».

En Europe, la norme EN 13739¹¹ spécifie dans sa première partie (EN 13739-1) les préconisations relatives à la conception et à la construction des distributeurs centrifuges dans un objectif de qualité des épandages et de protection de l'environnement. Elle est d'application volontaire et permet aux constructeurs de disposer d'un argument commercial pour valoriser les efforts entrepris pour améliorer la qualité des matériels.

La seconde partie de la norme (EN 13739-2) définit les méthodes d'essais à appliquer pour contrôler le matériel en hall de tests.

3.2.1 CONTROLE DE LA DOSE APPORTEE

Pour le réglage du débit, la norme EN 13739-1 spécifie l'écart maximum admissible entre le débit obtenu et le débit attendu (15%, 10% et 7.5% pour des débits respectivement inférieurs à 25kg/min, compris entre 25 et 150 kg/min, et supérieurs à 150 kg/min). Concernant la modulation de dose, la norme préconise simplement que la réponse du système d'alimentation à une certaine amplitude de variation de débit attendu doit s'effectuer en moins de 5 secondes.

Sur le terrain, pour un contrôle de la dose en préalable à un épandage, les constructeurs proposent des récipients et des protocoles permettant de vérifier de manière ponctuelle le réglage du débit d'engrais. Pour un contrôle continu en cours de travail, certains matériels sont équipés de capteurs de pesée (jauges de contrainte) qui mesurent en statique ou en continu le poids de la trémie ou de l'ensemble de l'outil. Ces dispositifs apportent un confort de travail en évitant les tests manuels et en mesurant rigoureusement la quantité d'engrais apportée sur chaque parcelle. Couplée à la régulation DPA, la pesée en continu a pour objectif de prendre en compte les variations des caractéristiques de l'engrais (coulabilité) en cours de travail et de permettre un contrôle de la modulation de dose.

¹¹ Norme européenne : « Matériel Agricole – Distributeur d'engrais solides en nappe et centrifuges – Protection de l'environnement – Partie 1 : Prescriptions ; Partie 2 : Méthodes d'essai »

Le contrôle du débit massique d'engrais peut également être réalisé par mesure du couple résistant du disque (Villette et al., 2003) à partir de la pression dans le circuit d'entraînement hydraulique par exemple (*e.g.* distributeur Kuhn Axera-H EMC).

3.2.2 QUALITE ET CONTROLE DE LA REPARTITION SPATIALE

3.2.2.1 Qualité et tests en hall d'essais

La répartition spatiale de l'engrais est appréciée par la mesure de la répartition transversale obtenue en hall d'essais selon un protocole et dans des conditions définies par la norme EN 13739-2 (surface plane, vitesse du vent inférieure à 2 m.s⁻¹, hygrométrie inférieure à 65%, température entre 10 et 25°C). Compte tenu des largeurs de travail des appareils actuellement commercialisés, qui peuvent atteindre 42 m, la largeur des halls d'essais nécessaires peut aller jusqu'à 80 m. Les infrastructures à prévoir pour la réalisation de ces essais normalisés sont donc particulièrement conséquentes.

En hall d'essais, la répartition transversale de l'engrais est contrôlée au moyen de bacs récepteurs de 50 x 50 cm², disposés de manière contiguë, perpendiculairement à l'axe d'avancement du tracteur. Après l'épandage (déplacement du tracteur ou de la ligne de bacs récepteurs), les quantités d'engrais récoltées par chaque bac récepteur sont pesées et le diagramme de répartition est établi. Après avoir déduit la répartition après recouvrement, le degré d'irrégularité de la distribution transversale est caractérisé par un indice de dispersion, appelé « coefficient de variation transversale » (CV). Cet indice adimensionnel est défini par le rapport de l'écart type σ sur la valeur moyenne ($\bar{x}$) des quantités recueillies dans chaque bac. Il est exprimé en pourcentage : $CV(\%) = 100 \frac{\sigma}{\bar{x}}$.

La norme NF EN 13739-1 impose aux appareils mis sur le marché un coefficient de variation transversale inférieur à 15 % mesuré en hall d'essais.

Les résultats de tests réalisés sous l'égide de la DLG¹² sur sept distributeurs différents (correspondant à cinq marques) sont rapportés par Frick (2002). Sur 71 situations différentes d'épandage (distributeur, largeur de travail, engrais, débit, position « normal » ou « tardif »), seul un CV est supérieur à 10 %.

En 2004, cinq constructeurs ont participé à des essais organisés par la revue Profi International (Anonyme, 2004a). Les tests ont été menés dans quatre conditions d'épandage (variation de l'engrais, du débit et de la hauteur de l'appareil) pour chacun des cinq distributeurs, soit 20 situations d'épandage différentes. Dès le premier réglage, 14 situations (soit 70 %) présentent un CV inférieur à 15 %. Après un premier ajustement, 17 situations (soit 85 %) ont un CV inférieur à 15%. Les situations présentant des CV élevés sont celles pour lesquelles les engrais utilisés dans le cadre des tests ne sont pas répertoriés dans les tableaux de réglage des constructeurs.

Il apparaît donc qu'en hall de tests, les distributeurs centrifuges d'engrais satisfont assez facilement le seuil de 15 % en terme de coefficient de variation transversale.

¹² Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (Société Allemande d'Agriculture)

3.2.2.2 Qualité et tests au champ

Au champ, en conditions réelles d'utilisation, la qualité de la répartition de l'engrais est dégradée du fait de nombreux facteurs : précision des réglages réalisés par l'utilisateur, conditions climatiques (vent, humidité), irrégularité du terrain, précision du jalonnage...

Ainsi, sur les exploitations agricoles, Ziani et Rousselet (1990a) ont constaté des défauts de répartition de l'engrais chez les exploitants en relation avec une forte fréquence de verse sur les céréales. D'après Ziani et Rousselet (1990b), il existe une corrélation entre l'irrégularité de la répartition transversale de l'engrais, l'intensité de la verse et la diminution du rendement.

Sur la base d'un principe similaire à celui mis en oeuvre en hall d'essais, la qualité de l'épandage peut être caractérisée sur le terrain au moyen de bacs récepteurs disposés perpendiculairement à l'axe d'avancement du tracteur. En pratique, la mise en oeuvre de ce type d'essais est particulièrement contraignante pour un exploitant. En conséquence les contrôles sont relativement peu fréquents. L'étude britannique de 2004 sur l'utilisation des engrais (Anonyme, 2005c) a montré qu'au Royaume Uni seulement un tiers des exploitants pratiquait une vérification de la répartition transversale au moins une fois par an et 7% des utilisateurs réalisaient un contrôle à chaque changement d'engrais.

Le tableau 1-1 donne une interprétation de la qualité de l'épandage en fonction de la valeur du coefficient de variation de la répartition transversale mesurée au champ.

CV	Qualité d'épandage
<15%	bonne
15 à 25%	moyenne
> 25 %	mauvaise

Tableau 1-1 : Interprétation de la valeur du coefficient de variation transversale (CV) en terme de qualité de la répartition de l'engrais.

Usuellement, un coefficient de variation supérieur à 20-25% traduit une situation considérée comme préjudiciable à la culture et à l'environnement.

Les contrôles de répartition de l'engrais pratiqués sur le terrain avec des distributeurs réglés par leurs utilisateurs peuvent fournir des valeurs sensiblement moins bonnes que celles mesurées en hall d'essais. Ainsi un CV au champ de 25 % en moyenne est rapporté par Tissot et al. (1999a) sur 300 essais. De manière similaire, Leterme (2000) signale un CV au champ moyen de 20,7 %, établi sur la base de 235 tests de terrain menés par le service Dynatest de la société DSM Agro. A partir de ces tests, la société DSM Agro considère que seulement un tiers des épandages est correctement réalisé par les utilisateurs. Dans les deux études, les anomalies constatées sont attribuées à des défauts de réglage des appareils. Une première correction du réglage permet de constater une amélioration moyenne du CV de 10 % par Tissot et al. (1999a) et 8 % par DSM Agro (Leterme, 2000).

Fulton et al. (2005a), se sont intéressés à la variabilité de la répartition au sol dans le cas d'une modulation de dose pour deux épandeurs centrifuges. Pour chacune des doses envisagées, les réglages ont été réalisés selon les préconisations des constructeurs. Malgré ces réglages, les auteurs ont constaté que le profil de la répartition transversale évoluait en fonction du débit massique d'engrais pour l'un des distributeurs. Pour les deux distributeurs, l'augmentation du débit conduit à un surdosage au niveau des recouvrements. Globalement, lors de la modulation de dose, les CV évoluent de 6 à 27 % pour l'un des distributeurs et de 9 à 16 % pour l'autre.

La modulation de dose induit donc une difficulté supplémentaire pour maintenir une bonne qualité de la répartition au sol compte tenu de la modification de la nappe d'épandage lors d'une variation de débit de l'engrais (Kweon et Grift, 2006). L'utilisation de mélanges d'engrais constitue également un problème délicat (Tissot et al. 1999b, Miserque et al., 2005).

Actuellement, aucun système embarqué n'est commercialisé pour caractériser même partiellement la répartition spatiale de l'engrais. Un dispositif utilisant deux capteurs d'impacts pour déterminer la position du secteur d'épandage d'un des disques du distributeur pendant une phase d'étalonnage préliminaire à la phase de travail a été proposé par un constructeur, il y a une dizaine d'années, puis retiré du marché (système Justax de Sulky).

3.2.2.3 Contrôle en continu de la nappe d'épandage

Dans le cadre de l'agriculture de précision, les modèles agronomiques et les dispositifs de caractérisation des sols et des cultures permettent de définir des cartes de préconisations de l'apport d'engrais en intégrant la variabilité intra-parcellaire. L'exploitation de ces cartes pour réaliser un épandage de précision se heurte à l'absence de dispositif permettant de contrôler en continu la répartition de l'engrais éjecté par le distributeur. En effet, en cours de travail, il est impossible de prendre en considération les modifications de la nappe d'épandage en fonction de la modulation du débit de l'engrais. D'autre part, en l'absence de capteur pour caractériser la répartition de l'engrais il n'est pas possible de contrôler le système de distribution de manière à ajuster la nappe d'épandage aux préconisations spatiales de l'apport.

L'absence de dispositif embarqué pour la caractérisation en continu de la nappe d'épandage constitue donc un obstacle à la valorisation des travaux déjà menés sur l'optimisation des apports dans une parcelle.

4 CONCLUSION

Après une période de forte intensification des systèmes et d'augmentation systématique des apports, la production agricole s'est engagée à la fin des années 1980 dans une démarche de raisonnement de l'utilisation des intrants dans le but de réduire les charges de production. Alors qu'elle a atteint les objectifs d'approvisionnement alimentaire et d'activité commerciale exportatrice qui lui avaient été assignés il y a une cinquantaine d'années, l'agriculture se retrouve aujourd'hui parmi les accusés de la dégradation de l'environnement.

Dans ce contexte, l'apport d'engrais pour fertiliser les champs constitue l'une des opérations agricoles dont l'incidence économique et environnementale doit faire l'objet d'une attention particulière. En effet, la quantité d'engrais épandue sur une surface donnée et son mode d'apport ont une incidence sur le rendement, la qualité de la récolte et l'environnement.

Dans un objectif d'agriculture durable qui raisonne les intrants, préserve le milieu naturel, garantit la qualité des produits et assure aux exploitants une activité professionnelle rémunératrice, des méthodes ont été élaborées pour conduire la fertilisation des cultures de manière très précise. Des modèles ont été développés pour évaluer avec rigueur les besoins des plantes, la disponibilité des éléments nutritifs et ainsi réaliser des bilans minutieux. Des dispositifs sont également proposés pour déterminer au mieux la dose d'engrais nécessaire à la culture en fonction de l'état de nutrition azotée des plantes qui peut même être évalué localement en temps réel au moment de l'apport.

Les efforts réalisés pour déterminer au mieux la dose de fertilisant à apporter à une culture à une période donnée ne peuvent être valorisés que si l'épandage de l'engrais au sein de la parcelle est lui aussi parfaitement maîtrisé. Lors des tests réalisés en hall d'essais, après réglage du matériel en fonction du type d'engrais et de la largeur de travail, les distributeurs centrifuges commercialisés aujourd'hui présentent une bonne régularité de répartition transversale. En revanche, lorsque les tests sont pratiqués au champ après un réglage effectué par l'utilisateur, la qualité de la répartition est très souvent insuffisante. De plus, la modulation de dose nécessaire à la prise en compte de la variabilité intra-parcellaire engendre une variation de débit de l'engrais qui modifie la répartition de l'engrais au sol.

Il est alors permis de s'interroger sur l'intérêt d'un calcul précis des quantités d'engrais à apporter et de la prise en compte de la variabilité intra-parcellaire si l'épandage est réalisé de manière approximative avec un coefficient de variation de 25%.

Il est donc souhaitable d'améliorer les réglages couramment effectués par les utilisateurs de distributeurs d'engrais centrifuge de manière à limiter l'hétérogénéité de l'apport.

En pratique, la grande diversité physique des engrais commercialisés, les variations climatiques, le travail en grande largeur et le caractère contraignant du contrôle de la répartition transversale au champ sont autant d'éléments qui ajoutent à la difficulté d'obtenir un épandage de qualité.

Face à cette situation, l'utilisateur est relativement démuné puisqu'il n'existe sur le marché aucun système de contrôle automatisé de la répartition spatiale de l'engrais.

D'autre part, avec le développement des épandages en grande largeur, les halls d'essais traditionnels risquent également de s'avérer insuffisants pour le contrôle de la répartition de l'engrais dans les années futures.

Enfin, en ce qui concerne la prise en compte de la variabilité intra-parcellaire, il semble bien audacieux d'envisager de répondre localement aux besoins d'une culture si le matériel d'épandage ne permet pas d'envisager une modification en cours de travail de la manière dont l'engrais est réparti au sol. Pour minimiser les écarts entre les quantités d'engrais préconisées par une carte qui réalise un zonage de la parcelle et les quantités réellement apportées par le matériel d'épandage, il est nécessaire d'adjoindre aux dispositifs de contrôle du débit instantané de l'engrais un système de contrôle de sa répartition spatiale.

Chapitre 2 : Objectif de l'étude, état de l'art et problématique

1 DEFINITION DE L'OBJECTIF GENERAL

L'évolution du contexte de la production agricole a conduit les instituts techniques et les équipementiers à proposer de nouveaux outils pour le raisonnement de la fertilisation minérale des cultures. Des évolutions significatives ont ainsi été réalisées sur le plan des modèles agronomiques, des services d'aide à la décision et à la modulation des apports, mais aussi au niveau des dispositifs de localisation, de guidage, de caractérisation de la nutrition de la culture et de prise en compte de données géo-référencées. Des capteurs ont également été proposés pour le contrôle en continu de la quantité d'engrais apportée. L'ensemble de ces systèmes sophistiqués, permet de prévoir une gestion fine des apports allant jusqu'à la prise en compte de la variabilité spatiale des besoins de la culture au sein d'une parcelle.

Néanmoins, ces développements contrastent avec l'état d'avancement des dispositifs de gestion de l'épandage proprement dit au niveau des appareils de distribution d'engrais. En effet, actuellement, aucun capteur n'est commercialisé pour fournir une information relative à la répartition spatiale de l'engrais. Dans le cadre de contrôles ponctuels en bout de champ ou en hall d'essais, aucun système de diagnostic ou d'aide au réglage n'est disponible sur la base de mesures réalisées au niveau de l'appareil. Le contrôle de la largeur de travail ou de la répartition transversale nécessite aujourd'hui systématiquement un épandage en vraie grandeur en procédant à un ou plusieurs passages au dessus de bacs de collecte. Cette méthode éprouvée permet d'obtenir une information précise sur la répartition de l'engrais au sol mais demande en contrepartie la mise en œuvre d'un dispositif contraignant qui sur le terrain constitue une limite à son utilisation. Pour les tests réalisés en hall d'essais la mise en œuvre systématique de cette technique de contrôle s'avère également de plus en plus délicate compte tenu de l'augmentation de la largeur de travail des matériels et de la taille des infrastructures nécessaires aux tests.

D'autre part, dans un contexte d'agriculture de précision, l'absence de dispositif embarqué permettant de caractériser en continu la répartition spatiale de l'engrais constitue un frein à la prise en compte des variabilités intra-parcellaires pendant la phase d'épandage.

Bien que le système mécanique de distribution centrifuge soit relativement simple, la prédiction de la répartition au sol de l'engrais en utilisant uniquement une modélisation du mouvement des granules d'engrais de la trémie jusqu'au sol est délicate. Cette approche nécessite en effet la connaissance d'un nombre important de paramètres et se heurte aux difficultés de modélisation du comportement spécifique de chaque matériau sur le disque d'épandage.

Une alternative à cette modélisation intégrale, consiste à mesurer les caractéristiques du mouvement de l'engrais à la fin de sa phase d'accélération centrifuge, lorsque les particules quittent les pales. Cette approche permet ainsi de s'affranchir de la modélisation du

comportement dynamique de l'engrais sur la pale pendant la phase d'accélération et permet d'envisager la modélisation du vol balistique sur la base de paramètres mesurés au voisinage du disque. Le principe de cette approche qui nécessite également la connaissance des caractéristiques aérodynamiques de l'engrais est illustré en figure 2-1.

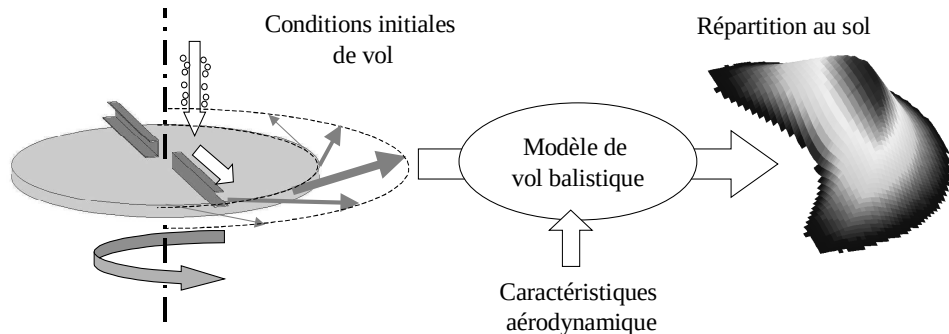


Figure 2-1 : Synoptique de la prédiction de la répartition au sol de l'engrais à partir des conditions initiales de vol et des caractéristiques aérodynamiques des granules.

En toute rigueur, la modélisation de la phase de vol balistique d'un ensemble de granules éjectés par un disque d'épandage nécessiterait la caractérisation pour chaque granule de ses propriétés aérodynamiques (masse, coefficient de traînée...) ainsi que de ses conditions initiales de vol (vitesse et direction). En pratique, la mesure exhaustive des caractéristiques physiques de chaque granule est difficilement imaginable. En revanche, une estimation de la répartition au sol de l'engrais peut être envisagée de manière plus globale sur la base d'informations statistiques concernant l'ensemble des granules (*e.g.* distribution granulométrique) et d'une caractérisation globale de leurs conditions d'éjection.

L'objectif de la thèse est ainsi de développer une technique automatisée de caractérisation des conditions d'éjection du flux d'engrais produit par un disque d'épandage centrifuge, dans le but de renseigner un modèle de vol balistique pour prédire la répartition de l'engrais au sol. Le flux étudié est discontinu. Il se compose de granules éjectés à chaque passage de pale et dont la dispersion s'amplifie au cours de la phase de vol (cf. figure 2-2). L'éjection s'étend sur un secteur angulaire dont l'amplitude et la localisation est fonction du comportement de l'amas de granules en mouvement sur la pale.



Figure 2-2 : Photographie multi-exposition d'un flux de granules d'ammonitrate sur la pale et à la sortie de la pale d'un disque d'épandage centrifuge. L'éclairage stroboscopique permet l'observation de 5 positions successives de la pale.

La caractérisation des conditions d'éjection des granules sera réalisée de manière à permettre le développement ultérieur d'outils de diagnostic, d'aide au réglage voire de dispositif embarqué pour le contrôle en continu de la largeur de travail. Elle devra donc être adaptable à différentes configurations de disques et satisfaire au mieux les contraintes de robustesse, de précision et de coût de façon à conserver un champ d'application le plus vaste possible.

De manière à définir l'approche la plus appropriée à la caractérisation du flux d'engrais éjecté par un disque d'épandage centrifuge, un panorama des principales solutions techniques envisageables pour l'étude d'un flux de particules solides est dressé dans le paragraphe qui suit.

Dans ce document, le terme de « particule » est utilisé de manière générique pour désigner un élément solide d'une dimension inférieure au centimètre sans préjuger davantage de la taille ni de la forme de cet élément.

2 CARACTERISATION D'UN FLUX DE PARTICULES - ETAT DE L'ART

La littérature relate différentes techniques pour acquérir des informations permettant de caractériser un flux de particules. Nous distinguerons les méthodes ne nécessitant pas de dispositif optique, les méthodes utilisant un système optique ne conduisant pas à l'acquisition d'une image et enfin les méthodes basées sur l'obtention d'une image du flux. A la suite de ce panorama un bilan sera réalisé sur les méthodes envisageables dans le cas de l'épandage d'engrais.

2.1 METHODES DE MESURE SANS DISPOSITIF OPTIQUE

Dans le cas de l'écoulement d'un fluide dans une canalisation, la vitesse est généralement mesurée indirectement par l'application des lois de la mécanique des fluides. En effet, l'application de la loi de Bernoulli permet de déduire la vitesse du fluide à partir de la pression dynamique qui peut être mesurée par le biais d'un système de type Venturi ou tube de Pitot. Ce type d'approche est cependant difficilement transférable au cas d'un flux de particules plus ou moins dispersées.

D'autres méthodes de mesures initialement employées pour la mesure de la vitesse d'un fluide peuvent néanmoins être envisagées dans le cas d'un flux de particules.

2.1.1 UTILISATION DES EFFORTS EXERCES SUR UN CORPS D'EPREUVE

En plaçant dans le flux une pièce qui sera entraînée en rotation, du type anémomètre à coupelles ou à hélice, la vitesse du flux peut être estimée en fonction de la vitesse de rotation de cette pièce. Dans le cas d'un fluide, d'après Asch et al. (1991), les performances de ces dispositifs peuvent atteindre 1 % dans une plage de mesure fixée. Elles sont néanmoins dépendantes de l'étalonnage et de l'absence de turbulences. Pour des écoulements granulaires, Oki et al. (1977) mentionnent la possibilité d'utiliser de petites turbines qui, placées dans le flux, sont entraînées en rotation par le mouvement des grains. La vitesse de rotation de la turbine peut alors être reliée à la vitesse des particules. Cette technique présente plusieurs inconvénients : le dispositif de mesure est intrusif et perturbe l'écoulement ; la technique s'adresse à un flux continu et dense de particules ; un calibrage est nécessaire pour chaque matériau granulaire.

Dans un écoulement granulaire, il est également possible de s'intéresser à l'énergie de choc des particules pour estimer la vitesse. Chang et al. (1986) citent les travaux de Heertjes et al. (1970) concernant les mesures de vitesses à partir de la mesure du moment cinétique des particules en utilisant un capteur piézo-électrique. Chang et al. soulignent que cette méthode est très difficilement exploitable du fait de l'indispensable connaissance de la masse des particules.

Pour caractériser la nappe d'épandage à la sortie d'un distributeur centrifuge, la société Sulky-Burel a proposé à la fin des années 1990 un système basé sur des capteurs piézo-électriques (système Justax) puis a retiré cet appareil du marché. Le dispositif était composé de deux capteurs disposés sur un même support et qui plongés dans la nappe d'épandage permettaient de réaliser une mesure de l'énergie des impacts de part et d'autre de l'axe principal d'éjection. Orienté au voisinage du disque en fonction de la largeur de travail souhaitée, ce dispositif permettait à l'utilisateur de régler la position du point de chute de l'engrais de manière à équilibrer l'énergie de choc mesurée par chacun des deux capteurs. L'utilisateur réglait ainsi l'orientation du secteur d'épandage selon la direction définie par le constructeur en fonction de la largeur de travail souhaitée. Le dispositif étant intrusif, il n'était utilisé que dans la phase d'étalonnage préliminaire à l'épandage sur la parcelle. Ce système n'avait pas pour objectif de mesurer la vitesse d'éjection de l'engrais.

2.1.2 UTILISATION DES ECHANGES THERMIQUES

Les techniques d'anémométrie thermique sont commercialisées depuis les années 50 pour mesurer la vitesse des fluides. Ces techniques exploitent la propriété de variation de résistance électrique d'un métal conducteur en fonction de sa température. Les capteurs construits sur cette base sont couramment qualifiés d'anémomètres à fil chaud ou anémomètres à température constante. Le principe des capteurs est le suivant. Par le biais d'une alimentation électrique, un élément résistif (fil ou film) est porté à une température supérieure à celle du flux dans lequel la mesure de vitesse est envisagée. Un échange de chaleur se produit alors par convection avec le fluide. Cet échange est fonction de la vitesse du fluide mais également de ses propriétés physiques et de l'écart de température avec le corps chauffé.

La température d'équilibre de la pièce qui joue le rôle d'organe sensible est déterminée par la mesure de sa résistance. Un dispositif de calibration est nécessaire pour étalonner le dispositif. D'après Asch et al. (1991), les précisions obtenues sur les mesures de vitesse avec ce type de dispositif sont de l'ordre de quelques pour-cents dans le cas de l'écoulement subsonique isotherme d'un gaz.

Pour réaliser des mesures dans des flux à deux ou trois dimensions, des dispositifs utilisant de deux à quatre fils ont été développés (Rosemann et al. 1996). Une calibration (Lekakis, 1996) dans chacune des directions est alors nécessaire.

Dans le cas d'un flux de particules solides de quelques millimètres, Oki et al. (1977) citent les travaux de Marsheck et Gomezplata (1965) qui ont réalisé une sonde basée sur le transfert de chaleur pour estimer le débit massique de granules dans un lit fluidisé. La sonde se compose de deux thermistances, l'une servant à chauffer les particules et l'autre à mesurer la température des particules. Le transfert de chaleur dépend du nombre de granules par unité de volume mais aussi des caractéristiques propres des granules. En conséquence, le dispositif nécessite une calibration pour chaque matériau granulaire.

2.1.3 UTILISATION D'ONDES ACOUSTIQUES

Dans un milieu homogène dont les caractéristiques physiques sont connues, la vitesse de déplacement d'une onde acoustique est une constante. Si le milieu de propagation est en mouvement par rapport à un émetteur et un récepteur, la composante de sa vitesse selon l'axe émetteur-récepteur vient s'ajouter ou se retrancher à la vitesse normale de propagation de l'onde. L'analyse de la durée de propagation d'un train d'impulsions entre émetteur et récepteur permet alors d'estimer la vitesse du flux. Cette méthode n'est pas applicable pour mesurer la vitesse d'un flux de granules.

En revanche, il est possible de baser la mesure de vitesse sur l'effet Doppler. Dans cette technique, des impulsions ultrasonores sont émises avec une fréquence donnée en direction du flux de granules. En retour, les fréquences diffusées par les particules subissent une variation proportionnelle à la vitesse de celles-ci. La vitesse du fluide est alors déduite de la variation de fréquence entre le signal émis et le signal reçu.

L'effet Doppler a été utilisé par Hofstee (1994) pour la conception d'un système de mesure de la vitesse des grains d'engrais. L'ouverture de la cellule de mesure proposée est de 20x20 mm². Le système utilise un émetteur à ultrasons et trois récepteurs disposés dans l'espace selon un trièdre orthogonal permettant de collecter les fréquences émises dans les trois directions de l'espace. Le système a été testé au moyen d'un accélérateur de granules spécifiquement réalisé pour cet usage. La vitesse d'éjection de cet accélérateur, réglable de 2.9 à 18.1 m.s⁻¹, a été considérée comme la vitesse de référence pour tester le dispositif. L'auteur indique que pour les faibles vitesses, les valeurs mesurées sont supérieures aux vitesses de référence et que pour les vitesses élevées, les vitesses mesurées sont inférieures aux vitesses de référence. Les écarts entre la vitesse de référence et les moyennes des vitesses mesurées peuvent atteindre 10 %.

Les graphiques fournis par l'auteur montrent également que les écarts-types ont tendance à s'amplifier avec la vitesse moyenne d'éjection et peuvent dépasser 2 m.s⁻¹ pour une vitesse de réglage de 18.1 m.s⁻¹.

D'après l'auteur la principale raison de l'écart constaté entre la valeur de référence et la valeur mesurée est liée à l'hypothèse faite sur la vitesse des particules qui est considérée comme négligeable devant la vitesse de propagation des ultrasons dans l'air. L'auteur émet également des réserves quant à la précision des vitesses prises comme référence.

Notons que ce capteur permet également une estimation de la taille des particules.

Ce capteur a été utilisé pour caractériser les épandages réalisés avec un distributeur pendulaire (Hofstee, 1995a) et avec un distributeur centrifuge (Hofstee, 1995b).

2.1.4 UTILISATION DE TRACEURS

Plutôt que de chercher à repérer le mouvement de particules ne possédant pas de caractéristiques naturelles propices à leur détection, certains auteurs ont proposé d'introduire des marqueurs dans le flux étudié. En considérant que ces marqueurs sont animés d'un mouvement similaire à celui des autres particules du flux, les mesures réalisées plus facilement sur ces éléments permettent de caractériser le flux.

Oki et al. (1977) mentionnent la possibilité d'utiliser des émetteurs radio miniatures dont la vitesse peut être déterminée en mesurant le temps qui sépare le passage de ces marqueurs à proximité de deux antennes placées à des positions différentes. Lakshman Rao et Venkateswarlu (1973) ont estimé la vitesse d'un traceur radio au moyen d'une seule antenne en considérant que l'intensité du signal reçu est fonction de la distance séparant l'émetteur de

l'antenne. Avec le dispositif proposé par ces auteurs la mesure n'est réalisable que dans une plage de distance allant de 0.5 à 15 cm de l'antenne. La vitesse mesurée est de l'ordre de 0.38 cm.s^{-1} . Cette méthode est envisageable pour suivre l'écoulement des grains dans une trémie ou un silo.

Outre le fait que cette technique nécessite la conception d'un émetteur miniaturisé, il est permis de penser que la vitesse du traceur n'est représentative de celle du flux que si le comportement de celui-ci dans le flux est similaire à n'importe quel autre grain. Les caractéristiques physiques du traceur (taille, densité, forme...) devraient donc a priori être similaires à celles des granules dont on cherche à étudier le mouvement.

Une autre solution consiste à marquer directement certains éléments du flux de particules étudié. Chang et al. (1986) rapportent l'utilisation de traceurs radioactifs par Keller et al. (1972) pour mesurer la vitesse de grains de maïs dans des convoyeurs pneumatiques au moyen de deux détecteurs placés le long de la canalisation de transport. Compte tenu des difficultés liées à la mise en oeuvre des matériaux radioactifs et de la difficulté de séparation des grains traités et des grains sains une fois la mesure réalisée, cette technique a un domaine d'application très restreint.

2.1.5 UTILISATION DE LA RESONANCE MAGNETIQUE NUCLEAIRE

Yan (1996) rapporte la possibilité de mesurer la vitesse de particules de charbon sur la base de la résonance magnétique nucléaire de l'hydrogène.

En utilisant la résonance magnétique nucléaire, Prochnow (2002) a notamment cherché à caractériser le profil de vitesses d'un écoulement granulaire dense dans une conduite verticale. La zone d'observation permise par son dispositif est réduite à une sphère d'environ 18 cm de diamètre. La technique de résonance magnétique nécessitant une proportion importante de protons, les mesures ont été réalisées sur un écoulement de graines de moutarde qui offrent cette propriété. La durée d'acquisition relativement longue (12 minutes pour un plan de coupe dans le cadre des essais présentés) destine la méthode à l'étude de phénomènes stationnaires. L'auteur ne donne aucune estimation de la précision obtenue sur la mesure de vitesse. Similaire aux dispositifs d'imagerie par résonance magnétique utilisés en médecine, ce système de mesure est particulièrement onéreux.

2.1.6 UTILISATION DES PROPRIETES CAPACITIVES

Yan (1996) rapporte l'existence de travaux cherchant à réaliser un capteur capacitif pour la mesure de la vitesse d'un flux de particules véhiculées dans une canalisation. Le principe repose sur l'analyse par intercorrélation des signaux délivrés par les condensateurs dont les armatures sont situées de part et d'autre de la conduite. Les travaux mentionnés ont été réalisés sur des conduites d'un diamètre de 25 mm. L'auteur rapporte que des divergences importantes ont été constatées entre les mesures réalisées par cette méthode et les vitesses mesurées par imagerie rapide.

2.2 METHODES UTILISANT UN SYSTEME OPTIQUE NE CONDUISANT PAS A L'ACQUISITION D'UNE IMAGE

2.2.1 VELOCIMETRIE LASER A FRANGES

La vélocimétrie laser à franges, également qualifiée d'anémométrie laser Doppler, est une méthode qui repose sur l'utilisation d'un laser dont l'intersection de deux faisceaux définit un volume de mesure siège d'un réseau de franges d'interférences. Lorsqu'une particule traverse

ce volume elle est alternativement éclairée par les franges et diffuse une lumière dont la fréquence est une fonction linéaire de sa vitesse. Connaissant la longueur d'onde du laser et l'angle d'intersection entre les rayons, la relation entre la fréquence diffusée par la particule et sa vitesse peut être établie. L'utilisation de deux ou trois paires de rayons laser de longueurs d'onde différentes associées à deux ou trois détecteurs équipés de filtres d'interférences permet la mesure de deux ou trois composantes de la vitesse. La difficulté de l'analyse du scintillement (Délery, 2002) est liée à l'extraction d'une fréquence très élevée (plusieurs MHz) d'un signal très bref (quelques μs). Cette méthode est utilisée pour l'étude dynamique des fluides pour lesquels on procède volontairement à un ensemencement de faible concentration en particules de très petites tailles (1 à 10 μm).

2.2.2 INTERCORRELATION DE SIGNAUX OPTIQUES

La mesure de vitesse de grains de quelques millimètres peut être réalisée au moyen de deux capteurs optiques permettant de mesurer l'intervalle de temps qui sépare le passage des grains devant chacun des détecteurs. La distance qui sépare les deux détecteurs étant connue, la vitesse peut être déduite.

Oki et al. (1977) ont développé une sonde munie de deux couples de fibres optiques, l'une pour l'émission de lumière et l'autre pour la réception de la lumière réfléchi par la particule et sa transmission à un détecteur. Les deux détecteurs étant alignés avec le sens du flux, la vitesse est déduite de la distance séparant les deux fibres réceptrices et du décalage temporel entre les signaux enregistrés par chacun des détecteurs. Le décalage est obtenu en recherchant le pic d'intercorrélation des deux signaux. Les auteurs soulignent notamment la difficulté du choix de la distance séparant les deux fibres de détection. D'après les auteurs, cette distance doit être proche de la taille des grains.

Chang et al. (1986) ont réalisé et testé trois sondes optiques différentes comportant divers arrangements de deux photo-détecteurs et de 4 à 7 diodes émettrices en infra-rouge. Pour les tests, les sondes ont été placées à proximité d'un disque en rotation recouvert de grains (maïs et blé) et d'un flux de grains en chute libre dans une enceinte. Par comparaison aux vitesses théoriques, l'erreur maximum commise est de 10 % pour des vitesses allant de 2 à 9 m.s^{-1} .

Yan (1996) rapporte les travaux de Dyakowski et Williams (1993) pour mesurer la vitesse d'un flux de particules de faible concentration (0.2 à 2% de particules solides) dans une canalisation de 80 mm de diamètre. Le capteur utilise 16 faisceaux lumineux constituant deux plans orthogonaux à l'axe de la conduite et espacés de 8 mm. Les vitesses moyennes sont mesurées dans une gamme de 2 à 6 m.s^{-1} avec une précision de 10%.

Il peut être souligné qu'avec ces méthodes, la mesure porte sur la composante de la vitesse correspondant à l'alignement des deux détecteurs ou des deux séries de détecteurs.

2.2.3 FILTRAGE SPATIAL

Lorsqu'une diode émettrice et un photo-détecteur sont placés de part et d'autre d'un flux de particules, le signal délivré par le détecteur est affecté par la vitesse des particules ainsi que par leurs caractéristiques dimensionnelles. Le filtrage spatial consiste à extraire de ce signal fortement bruité une fréquence proportionnelle à la vitesse des particules. Dans cette technique, la composante périodique du signal relative à la vitesse des particules est recherchée par analyse de la fonction d'auto-corrélation. Yan (1996) décrit un capteur utilisant cette approche pour mesurer la vitesse de particules dans des conduites de transport pneumatique. Le capteur utilise une série de diodes émettrices et réceptrices placées de part et d'autre de la conduite dans le sens du flux. Testé sur une gamme de vitesses allant de 2 à 5

m.s⁻¹, le capteur a donné des résultats dont l'écart maximal est de 9 % par rapport aux mesures réalisées par imagerie rapide.

Fiedler et al. (1997) proposent de réaliser ce type de capteur en utilisant comme élément sensible un CCD (Charge Coupled Device) linéaire.

2.2.4 MESURE DU TEMPS ECOULE ENTRE DEUX OCCULTATIONS

Grift et Hofstee (1997a) ont développé un dispositif optique dont l'objectif est la mesure de la vitesse et du diamètre des particules. Le capteur, d'un diamètre d'entrée de 3 cm, est basé sur l'utilisation de deux rangées de diodes photosensibles. Pour chacune de ces lignes, les diodes sont toutes connectées à une porte ET logique de manière à ce que le signal soit à l'état haut lorsque toutes les diodes sont éclairées et à l'état bas lorsque une ou plusieurs diodes sont occultées par une particule. Une source lumineuse émet deux plans de lumière dont l'occultation partielle par le passage d'une particule est détectée au niveau des barrettes de photodiodes disposées dans l'alignement de chacun de ces plans. La vitesse de passage de la particule est directement déduite du temps séparant les extinctions détectées par les deux barrettes de photorécepteurs. Cette construction ne permet de mesurer que la composante de la vitesse qui est orthogonale aux barrettes de photorécepteurs.

En utilisant un miroir renvoyant les plans de lumière à 90°, les auteurs proposent un système de mesure de la vitesse en deux dimensions.

L'utilisation d'un tel système est mentionnée pour la mesure de vitesse d'une particule plastique de 4 mm accélérée au moyen d'un dispositif spécifiquement construit (Grift et Hofstee 1997b). Pour cette mesure à deux dimensions, les auteurs signalent que l'erreur serait inférieure à 5%. La publication ne permet pas de savoir s'il s'agit d'une seule mesure ou si la mesure a fait l'objet de répétition, en effet, il n'est fait mention ni de valeurs moyennes ni d'écarts-types.

La mesure des dimensions de la particule est déduite de sa vitesse et du temps de blocage à l'état bas du signal issu d'une des barrettes de photo-récepteurs du fait de son occultation partielle par le passage de la particule. D'après Grift et Hofstee (1997a) l'erreur commise sur l'estimation du diamètre de la particule serait inférieure à 2%.

D'après Grift (2001) et Grift et al. (2001) le capteur décrit ci-dessus peut être utilisé pour estimer le débit massique d'un flux de granules en mouvement dans l'air en se basant sur une relation statistique permettant d'estimer le nombre de granules individuels en fonction du nombre d'amas détectés (identifiables par leurs tailles).

Grift et Hofstee (2002) proposent d'utiliser le capteur décrit ci-dessus pour évaluer la répartition au sol des granules d'engrais éjectés par un distributeur centrifuge. Le principe consiste à déterminer la vitesse et la taille des granules éjectés puis à déduire au moyen d'un modèle de vol balistique la portée de la projection de chacun des granules identifiés. La taille de la cellule de mesure étant de quelques centimètres, le capteur est monté sur un bras dont la rotation autour de l'axe du disque d'épandage lui permet de parcourir toute la plage angulaire d'éjection. Un codeur angulaire permet d'associer à chaque mesure la position du capteur.

Les auteurs soulignent deux inconvénients au niveau de leur dispositif. La disposition des barrettes de photodiodes sur le bras rotatif ne permet de mesurer que la composante horizontale radiale de la vitesse des particules qui traversent le capteur. L'utilisation de cette unique composante pour prédire la répartition au sol des granules, conduit à sous-estimer la vitesse d'éjection. D'autre part, les directions d'éjection étant considérées de manière radiale, le positionnement angulaire du flux par rapport à l'axe de passage du tracteur ne peut pas être déterminé.

Les auteurs indiquent que pour remédier à ces problèmes, un dispositif pourrait être envisagé pour faire pivoter le capteur autour de son axe vertical de manière à rechercher l'angle dans lequel la vitesse est maximale et ainsi estimer l'angle moyen entre la composante radiale et la composante tangentielle de la vitesse.

En faisant parcourir au capteur trois fois la nappe d'épandage, les auteurs signalent obtenir 1000 mesures. Un échantillonnage semble donc réalisé par le dispositif mais les auteurs ne donnent aucune information à ce sujet.

Le capteur étant placé à proximité du disque d'épandage, il est permis de s'interroger sur l'incidence de rebonds des granules qui percutent les flancs de la cellule de mesure et sur la qualité des informations obtenues lorsque les particules ne franchissent pas le dispositif de manière individuelle mais de manière groupée notamment pour la détermination du diamètre des particules.

Récemment, dans une publication concernant la déduction du coefficient de frottement de l'engrais sur la pale à partir de la mesure de l'angle d'éjection, Grift et al. (2006) ont montré que sous réserve de certaines configurations géométriques, la composante tangentielle de la vitesse peut être déduite de la composante radiale. Appliquées à la détermination de la vitesse et de la direction des granules, ces considérations pourraient permettre d'améliorer sensiblement la prédiction de la répartition de l'engrais au moyen du capteur décrit par Grift et Hofstee (1997a). Cependant, il est permis de s'interroger sur l'incidence qu'aurait l'erreur de positionnement de la cellule de mesure sur l'estimation de la vitesse totale et l'estimation de la direction des trajectoires.

Swisher et al. (2002) ont développé un capteur optique pour mesurer le flux de particules dans le tube d'alimentation d'un distributeur pneumatique d'engrais. Le principe repose sur l'utilisation d'une source lumineuse linéaire associée à une barrette de photo-récepteurs, le tout étant monté dans une chambre trapézoïdale traversée par un tube d'alimentation en engrais de 25 mm de diamètre. L'approche se base sur le comptage des interruptions du signal optique par le flux de particules. D'après les auteurs, cette méthode est robuste vis à vis de la variation d'absorbance fonction de l'engrais (granulométrie, couleur,...) et du flux d'air. Les auteurs établissent une corrélation linéaire entre le débit massique de l'engrais et le nombre d'atténuations enregistrées pour l'ammonitrate, et le tri-phosphate, mais non dans le cas du chlorure de potassium (KCl). L'utilisation de ce capteur nécessite une calibration pour chaque engrais de manière à déterminer la pente de la droite de régression. Notons que ce capteur ne permet que d'estimer un débit moyen et ne donne en aucun cas une estimation de la vitesse des particules.

2.3 METHODES NECESSITANT L'ACQUISITION D'IMAGES

2.3.1 VELOCIMETRIE DOPPLER GLOBALE

La vélocimétrie Doppler globale puise ses fondements dans le brevet de Komine (1990). Le principe consiste à déterminer la vitesse en utilisant le principe de l'effet Doppler pour l'analyse de la lumière réfléchie par les particules en mouvement dans un plan lumineux de fréquence connue. A la différence de l'anémométrie laser à franges, la mesure du décalage Doppler de fréquence est réalisée en utilisant une cellule à iode haute résolution. Cette cellule fonctionne comme un filtre sensible aux fréquences et permet d'acquérir, sous la forme d'une image, une mesure globale du champ de vitesses moyen sur une région de l'espace et non en un point seulement.

Meyers et Komine (1991) proposent d'observer le flux qui traverse un plan de lumière laser au moyen de deux caméras. Pour cette raison, la technique est également appelée vélocimétrie Doppler plane. Une caméra sert de référence alors que l'autre reçoit le flux lumineux ayant traversé une cellule d'absorption à iode qui agit comme un convertisseur fréquence-intensité lumineuse.

Barricau et al. (2002) ont montré la faisabilité des mesures en deux dimensions avec ce système, cependant les auteurs concluent que des améliorations sont nécessaires pour rendre l'utilisation de cette méthode suffisamment simple et attractive pour une éventuelle utilisation dans l'industrie.

Meyers et Lee (2000) ont identifié les sources d'erreurs de la méthode dans le cadre d'une utilisation en soufflerie et ont montré que l'erreur quadratique moyenne sur les mesures pouvaient être ramenée à 0.5 m.s^{-1} . Selon les auteurs, les principales sources d'erreur sont liées à l'utilisation de la cellule à vapeur d'iode pour laquelle une variation de température de 0.1°C conduit à une variation de 3 m.s^{-1} sur l'évaluation de la vitesse.

En pratique, cette technique est réservée à l'étude des fluides pour lesquels on procède à un ensemencement volontaire au moyen de fines particules.

2.3.2 VELOCIMETRIE PAR IMAGES DE PARTICULES (PIV)

2.3.2.1 Principe de base

La vélocimétrie par images de particules PIV (Particle Image Velocimetry) est une technique non-intrusive apparue dans les années 80 avec l'objectif de mesurer un champ de vitesses à un instant donné. Son principe consiste à acquérir à des instants successifs des images de traceurs (fines particules) introduit dans un écoulement. La comparaison de deux prises de vues consécutives permet d'estimer le champ de vitesses du fluide étudié.

Classiquement, la taille des particules utilisées pour l'ensemencement d'un flux gazeux est de $1 \text{ à } 5 \mu\text{m}$ et pour un flux liquide de $5 \text{ à } 100 \mu\text{m}$.

La technique repose sur l'utilisation d'un plan laser qui permet de visualiser une coupe de l'écoulement au moyen d'une caméra placée perpendiculairement à ce plan. Deux images consécutives sont obtenues par deux illuminations laser (plan de lumière pulsée) à court intervalle de temps, de manière à ce que les mêmes particules apparaissent dans les deux images. L'intégration au niveau du capteur CCD est synchronisée avec chaque impulsion laser afin de garantir aux différentes images d'une particule la même intensité lumineuse.

Les aspects pratiques de l'enregistrement des images en PIV sont donnés par Stanislas et Monnier (1997) notamment en ce qui concerne le choix de la source laser, la réalisation d'un plan de lumière et le choix de l'optique de la caméra en fonction de la taille des particules.

En PIV classique, le champ de déplacements est déterminé à partir des déplacements moyens évalués par calculs de corrélations sur des petites régions d'intégration qui échantillonnent le plan image et appelées régions d'interrogation. La taille traditionnelle de ces régions est de 32×32 pixels (Westerweel, 1997). La concentration en particules est habituellement choisie de manière à obtenir de 10 à 25 images de particules par région d'interrogation.

En général, les dispositifs de PIV ne cherchent pas à caractériser les déplacements individuels de chacune des particules mais à proposer en chaque point de l'image un paramètre statistique (*e.g.* le déplacement moyen) estimant localement le mouvement des particules (Westerweel, 1997). Néanmoins les travaux de Keane et al. (1995) montrent que la reconstruction des trajectoires individuelles est possible pour un grand nombre de particules observées.

Westerweel (1997) montre que la précision de la mesure dépend de la technique d'analyse d'images et de la taille des particules dans l'image par rapport à la taille de la région d'interrogation. En mettant en oeuvre une technique d'interpolation permettant une

localisation sub-pixel du pic de corrélation et en choisissant de manière optimale le diamètre des particules dans l'image, Westerweel (1997) indique que l'erreur de mesure sur le déplacement estimé est d'environ 1% pour un déplacement d'un quart de la taille d'une fenêtre d'interrogation de 32x32 pixels. Cette estimation ne prenant en compte que les limites des traitements réalisés dans l'image, l'auteur souligne que la précision de la mesure est également déterminée par le comportement des traceurs, l'effet de filtrage dû à la représentation du champ de vitesses en tant que champ de déplacements localement uniformes et le biais engendré par l'optique. De manière générale, Adrian (1997) mentionne également une précision de l'ordre de 1 % sur l'estimation de vitesse avec une résolution spatiale de l'ordre de 1 mm, la largeur du champ de vision usuel étant de 100 mm.

Saga et al. (2000) ont procédé à une comparaison des mesures obtenues par PIV et par vélocimétrie laser à franges. L'écart moyen obtenu sur l'ensemble du champ de vitesses par les deux méthodes est de moins de 3%.

En utilisant des concentrations d'ensemencement généralement plus faibles, il est possible d'identifier les déplacements individualisés des particules. La méthode est alors qualifiée de vélocimétrie par suivi de particules ou PTV : « Particle Tracking Velocimetry ».

L'utilisation de méthode hybride, PIV-PTV permet d'améliorer la résolution spatiale de la méthode de mesure du champ de vitesses des particules (Stitou et Riethmuller, 2001).

2.3.2.2 Exemple d'utilisation pour l'étude d'un dispositif centrifuge

La PIV est une technique utilisée dans de très nombreux domaines. De manière à mieux cerner les aspects concrets et les difficultés de sa mise en oeuvre, il est intéressant d'illustrer son utilisation dans un contexte donné. Dans cet objectif, nous prendrons comme exemple les travaux de Wuibaut et al. (2004) sur l'analyse des instabilités d'écoulements associées aux interactions entre la roue à aubes et le diffuseur d'une pompe centrifuge. Le principe mécanique d'une pompe centrifuge présente en effet des ressemblances avec celui d'un distributeur centrifuge d'engrais.

Dans le dispositif expérimental de Wuibaut et al. le plan de lumière pulsée est orienté perpendiculairement à l'axe de rotation de la roue et coupe celle-ci à mi-hauteur (à mi-distance de ses deux flasques). Compte tenu du mouvement des aubes et de la présence des ailettes du diffuseur dans la scène, le plan d'illumination est obtenu par un système à quatre lasers spécifiquement construit pour l'application par une société spécialisée. Pour simplifier la manipulation, l'installation n'est pas alimentée en eau mais étudiée en air. L'ensemencement est réalisé avec des particules sphériques de l'ordre du micron. Les images sont acquises par une caméra orientée perpendiculairement au plan laser.

Wuibaut et al. font état des principales difficultés techniques rencontrées pour la mise en oeuvre du banc laser. Ils mentionnent les problèmes liés :

- à l'étanchéité de l'enceinte d'ensemencement,
- à l'isolation du dispositif vis à vis des lumières parasites,
- aux réflexions sur les parois des aubages (un poli-miroir a été réalisé sur les deux faces d'un aubage de manière à ce que les réflexions lumineuses restent dans le plan de mesure),
- au réglage de la superposition des quatre plans lasers nécessaires à la couverture de la zone étudiée,
- aux distorsions optiques engendrées par les aubages en verre du diffuseur,
- aux ombres portées,
- à l'encrassement des dispositifs du fait de l'ensemencement du flux d'air.

Les auteurs signalent que la précision des mesures de champs de vitesses est fortement liée à la qualité des images acquises, les images bruitées donnant un nombre important de faux vecteurs. Pour diminuer le bruit, une soustraction systématique d'une image de l'arrière plan est réalisée.

Globalement, les travaux décrits par Wuibaut et al. montrent que la technique de PIV est particulièrement délicate à mettre en oeuvre lorsque des pièces mécaniques sont en mouvement dans le plan laser.

2.3.2.3 Techniques pour les mesures tridimensionnelles

Dans son principe de base, la PIV est une méthode de mesure de vitesse instantanée bidimensionnelle qui repose sur la mise en oeuvre d'un plan laser visualisant une coupe dans un écoulement fluide ensemencé de fines particules. La technique classique ne permet donc pas la mesure du champ de vitesses dans un écoulement à trois dimensions.

Pour palier le problème de la mesure tridimensionnelle de la vitesse dans un écoulement, différentes approches ont été développées.

La PIV stéréoscopique consiste à estimer trois composantes de vitesse à partir de mesures réalisées dans un plan laser observé en stéréoscopie par deux caméras. Dans ce cas, le feuillet lumineux doit être suffisamment épais pour permettre l'estimation de la composante non parallèle au plan.

Ponchaut et al. (2005) ont développé et testé un système de poursuite de particules en trois dimensions qui se compose de 3 CCD disposés dans le même plan selon un triangle équilatéral et faisant face à la scène. Au niveau de la scène, le volume que permet d'explorer le dispositif est de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Les auteurs ont procédé à une analyse théorique et expérimentale des erreurs commises au niveau de la calibration, de la construction du dispositif et de la localisation des particules dans les images. Pour des déplacements de 2,54 mm les erreurs moyennes constatées sont inférieures à 2%.

D'autres approches, alternatives ou complémentaires, à l'approche stéréoscopique ont également été proposées. Pereira et Gharib (2002) exploitent le phénomène de défocalisation ou moyen d'un masque placé dans le système optique de l'objectif, permettant à un point lumineux en dehors du plan de référence de la scène de se projeter en deux points sur le plan image. La distance entre ces deux points sur le plan du capteur CCD est fonction de la distance du point observé par rapport au plan de référence sur lequel le système optique est focalisé.

Liberzon et al. (2004) proposent un système de PIV stéréoscopique multi-plans destiné à réaliser des mesures de vitesse en 3 dimensions. Le dispositif se compose de deux caméras et d'un système optique permettant de réaliser plusieurs plans laser parallèles d'intensité variable à partir d'un seul plan laser entrant. Le dispositif se caractérise par un champ de vision de $60 \times 60 \text{ mm}^2$ dans lequel 3 plans laser sont créés, distants deux à deux de 1,25 cm. L'analyse des images utilise le principe de la défocalisation et de la stéréoscopie. Aucune évaluation des erreurs obtenues sur les mesures n'est fournie par les auteurs qui précisent seulement que les mesures réalisées par l'approche stéréoscopique sur la composante normale au plan d'illumination sont plus erronées que celles réalisées dans ce plan.

D'autres auteurs proposent des techniques de PIV holographiques (Pu et al., 1999 ; Sheng et al., 2003 ; Fournier et al., 2003 ; Dubois et al., 2004). Il s'agit d'une technique interférentielle qui exploite la nature ondulatoire de la lumière. Le traitement informatique de l'interférogramme permet de restituer la scène en trois dimensions en se basant sur les lois de l'optique diffractive.

2.3.3 METHODES APPLIQUEES A DES PARTICULES MILLIMETRIQUES

Les méthodes développées pour l'étude du mouvement d'un flux de particules millimétriques relèvent de technique d'acquisition plus simples que celles mentionnées pour la PIV.

2.3.3.1 Méthodes utilisées pour des mesures en deux dimensions

2.3.3.1.1 **Imagerie rapide et méthode stroboscopique**

De manière générale, la décomposition du mouvement d'un objet peut être abordée par imagerie rapide ou par méthode stroboscopique.

Le principe de l'imagerie rapide est d'obtenir des images successives de la scène dans laquelle se déplace l'objet. La comparaison des positions de l'objet étudié permet de déterminer une distance qui, ramenée à l'intervalle de temps qui sépare l'acquisition de deux images consécutives, fournit une estimation de la vitesse de déplacement. Lorsque le mouvement est rapide, la difficulté réside dans l'obtention d'une cadence suffisante pour l'acquisition des images.

Les caméras rapides étant particulièrement onéreuses l'approche stroboscopique constitue une alternative à l'acquisition d'images successives dans un court laps de temps. Dans la méthode stroboscopique, la scène est soumise à un éclairage cadencé selon une fréquence connue. En choisissant un temps de pose ou d'intégration relativement long, les positions successives de l'objet en mouvement se trouvent enregistrées dans une seule et même image. La technique est alors qualifiée de multi-exposition.

En 1971, Fiscus et al. étudient la vitesse d'un flux de granules en chute libre (maïs, soja et blé) à l'aide d'une caméra rapide dont le défilement du film permet d'obtenir de 2000 à 7000 images par seconde. L'écoulement est étudié en considérant que la vitesse des grains apparaissant de manière individualisée sur la périphérie du flux est la même que celle des grains au centre du flux. La mesure des déplacements est réalisée par comparaison des images successives et en se référant à une grille placée sur l'arrière plan de la scène.

Sielamowicz et al. (2004) ont étudié l'écoulement d'un matériau granulaire dans une maquette de silo réalisée en Plexiglas. Pendant la vidange du silo, le mouvement relativement lent des particules le long d'un des flancs est observé au moyen d'une caméra vidéo dont la fréquence d'acquisition est seulement de 3.75 Hz. Le champ de vecteurs vitesses est déduit de longues séquences d'images (100 à 400 images) au moyen d'un traitement informatique utilisé en PIV et basé sur l'intercorrélation. Un vecteur vitesse est obtenu pour chaque pixel de l'image.

De manière similaire, Ostendorf et Swedes (2005) ont utilisé une caméra dont l'acquisition a été réglée à 30 images par seconde pour observer le déplacement de pastilles plastiques dans un silo en phase de vidange. Le champ de vitesses est déterminé au moyen d'un logiciel du commerce pour le traitement d'images de PIV.

Concernant l'épandage centrifuge, Colin (1997) a mesuré la vitesse d'éjection des granules projetés par un distributeur centrifuge équipé d'un disque tronconique au moyen d'une caméra vidéo rapide (enregistrement sur cassette VHS) associée à un flash stroboscopique. Le champ de vision du dispositif est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres.

Le dispositif permet d'atteindre une cadence de 500 images par seconde. La norme et la direction des vecteurs vitesses des particules sont déterminées manuellement en repérant les positions d'un même granule dans deux images successives. Sur 50 vecteurs vitesses mesurés,

l'écart-type constaté est de l'ordre de 0.5 m.s^{-1} pour une vitesse moyenne de l'ordre de 30 m.s^{-1} . De même, Olieslagers (1997) a utilisé une caméra vidéo rapide à 500 images par seconde pour mesurer la vitesse des granules d'engrais éjectés par un disque de distribution centrifuge. Comme Colin, Olieslagers procède à une analyse visuelle et manuelle des images pour déduire la vitesse des granules. Les tests pratiqués par Olieslagers ont été réalisés avec un disque plat.

Pour faciliter le repérage et la mise en correspondance visuelle des granules présents dans deux images successives, ces deux auteurs ont coloré une petite fraction (5%) des granules.

Des caméras rapides ont également été utilisées pour étudier le mouvement d'une particule sur le disque d'un distributeur centrifuge par Aphale et al. (2003) (500 images par seconde) et Tijssens et al. (2005).

Pour analyser le mouvement d'un flux de particules, certains auteurs ont préféré avoir recours à la multi-exposition.

En utilisant une caméra CCD associée à un système stroboscopique, Tischer et al. (2001) ont établi les champs de vecteurs vitesses d'écoulements avalancheux de grains de sable. La caméra est orientée perpendiculairement au plan sur lequel l'écoulement a lieu. Le temps d'intégration de la caméra étant de 100 ms et la fréquence du stroboscope de 150 Hz, 15 expositions successives se superposent sur une image. Les champs de vecteurs vitesses sont alors déterminés au moyen d'un logiciel du commerce utilisé en PIV.

Pour mesurer le champ de vitesses des granules d'engrais éjectés par un distributeur centrifuge équipé d'un disque plat, Cointault (2001) a également recours à la multi-exposition. En plaçant la caméra à 1 m au dessus du plan du disque, l'auteur exploite un champ de vision d'environ 1 m^2 au niveau du flux des granules. Le système d'éclairage proposé se compose de huit flashes qui en se déclenchant de manière successive permettent de produire un éclairage stroboscopique de la scène. Huit positions successives du même jet d'engrais sont alors enregistrées dans une seule et même image. Après que l'opérateur ait défini manuellement les contours des régions de l'image correspondant à chaque position du jet, un algorithme d'estimation du mouvement est mis en oeuvre pour définir la correspondance entre les pixels de deux positions successives du jet. La méthode retenue par l'auteur consiste en l'utilisation des champs de Markov après avoir défini une correspondance entre régions de l'image calculée préalablement en modélisant l'éjection des granules. Cette méthode fournit un champ de vecteurs vitesses pour l'image mais ne permet pas l'identification des granules. Bien que l'auteur ne mentionne pas d'hypothèse concernant la coplanarité des trajectoires, on peut penser qu'il considère implicitement que les granules d'engrais se déplacent dans un plan parallèle au CCD. En effet, les variations de position des granules dans l'image sont directement interprétées en terme de vitesse. Cette approche est donc limitée à l'étude d'un épandage réalisé avec un disque plat.

Vangeyte et al. (2004) déterminent également la vitesse des granules d'engrais à la sortie d'un épandeur centrifuge au moyen d'un éclairage stroboscopique et d'une acquisition de l'image en multi-exposition. Le dispositif diffère de celui de Cointault (2001) dans la mesure où la caméra est placée à faible hauteur au dessus du flux. Cette caméra est montée sur un bras rotatif qui permet son déplacement autour du distributeur pour couvrir l'intégralité de la plage angulaire d'épandage.

Soulignons que dans la littérature, certains auteurs (Sielamowicz et al., 2004 ; Ostendorf et Swedes, 2005 ; Tischer et al., 2001) qualifient la technique qu'ils utilisent de PIV alors que le système d'acquisition mis en oeuvre est fondamentalement différent de celui décrit précédemment pour cette technique. Dans ce cas, le terme de PIV se rapporte uniquement aux algorithmes de traitement des images pour déterminer le champ de vitesses et non au dispositif d'acquisition des images.

2.3.3.1.2 Acquisition d'images en filé

L'acquisition d'images en filé consiste à utiliser un éclairage constant et à choisir un temps de pose ou un temps d'intégration suffisamment long par rapport à la vitesse de déplacement des objets dans la scène. Le mouvement de l'objet se traduit alors dans l'image par une traînée lumineuse. Dans ces conditions, une particule animée d'un mouvement rectiligne dans la scène apparaît dans l'image sous la forme d'une trace linéaire.

Cette technique a été employée par Patterson et Reece (1962) ainsi que Inns et Reece (1962) pour visualiser les trajectoires de particules (billes sphériques et pièces parallélépipédiques en métal) éjectées par la pale d'un distributeur centrifuge d'engrais. Sur les clichés obtenus, les auteurs ont mesuré manuellement les angles d'éjection des particules.

Au moyen d'images acquises en filé, Olieslagers (1997) a déterminé la vitesse de granules éjectés par un disque d'épandage centrifuge en se basant sur l'angle β_o que fait la trajectoire par rapport à la direction radiale de la pale. L'angle β_o est mesuré manuellement, mais l'auteur ne donne pas de détail sur la manière dont il définit dans l'image le rayon par rapport auquel cet angle est mesuré. La situation étudiée est celle d'un disque plat équipé de pales radiales. La vitesse d'éjection v_o est déterminée à partir de la vitesse tangentielle de la pale en considérant que $v_o = \omega r / \sin \beta_o$ avec ω la vitesse de rotation du disque et r le rayon de la pale.

Reumers et al. (2003a) ont également réalisé des prises de vues en filé pour étudier l'angle de sortie de l'engrais en fonction de la position angulaire de la pale dans le cas d'un disque tronconique. Les mesures ont été réalisées manuellement sur des tirages issus de films photographiques. Concernant ces mesures, il est permis de s'interroger sur les biais engendrés par l'inclinaison verticale des trajectoires des granules. En effet, du fait de l'utilisation d'un disque tronconique, les trajectoires photographiées n'appartiennent pas toutes à un même plan et ne sont en aucun cas parallèles au plan du CCD, ce qui implique des erreurs sur la mesure de leur orientation par rapport à la pale. Cet aspect sera détaillé dans le chapitre 6 de la présente thèse.

2.3.3.2 Méthodes utilisées pour des mesures en trois dimensions

Une solution classique pour étudier le mouvement d'objets en trois dimensions est l'utilisation d'une méthode stéréoscopique. Le principe général de la stéréoscopie consiste à acquérir de manière simultanée deux images d'une même scène, observée selon deux points de vues différents. De manière générale, cette méthode nécessite l'utilisation de deux caméras synchronisées.

Afin de diminuer le coût du système d'acquisition, certains auteurs proposent des approches qui ne requièrent qu'une caméra.

Yang et Schrock (1993) ont élaboré un dispositif pour étudier en trois dimensions les rebonds de grains tombant sur un plateau. Il s'agit d'une méthode stroboscopique permettant d'enregistrer entre 15 et 20 positions successives du même grain sur chacune des vues acquises par une caméra (film de 35 mm). Soulignant le fait que la photographie stroboscopique avec une seule caméra ne permet pas de caractériser correctement les

mouvements dans une scène en 3 dimensions, les auteurs complètent leur dispositif par un miroir placé à proximité de la scène observée et orienté à 45° par rapport à l'axe optique de la caméra. Ce montage permet d'acquérir dans la même vue les images du mouvement des granules observés selon deux points de vues différents. Le dispositif constitue une alternative à la mise en place des dispositifs stéréoscopiques utilisant deux caméras. Le système de mesure a été testé sur le mouvement de chute libre de grains (soja et blé). L'erreur maximum avec la vitesse de chute théorique est de 4%. Notons cependant que dans le cas de la chute libre, le vecteur vitesse se limite à une composante verticale parallèle au plan de l'image. Une approche similaire a été utilisée par Pan et al. (2002) pour étudier le mouvement des bulles présentes dans un liquide lors d'un écoulement dans un tuyau vertical. La précision globale que permet d'obtenir ce dispositif n'est pas mentionnée par les auteurs.

2.4 BILAN SUR LES METHODES ENVISAGEABLES DANS LE CAS DE L'EPANDAGE D'ENGRAIS

Parmi les méthodes de mesure sans dispositif optique évoquées dans les paragraphes précédents, seules deux approches peuvent présenter un intérêt dans le cadre de la caractérisation du flux de granules éjectés par un distributeur centrifuge. La première technique, basée sur l'utilisation de capteurs d'impacts est une méthode intrusive qui perturbe le flux et ne peut donc pas être envisagée pour réaliser une mesure permanente pendant un épandage. Cette technique peut être imaginée pour obtenir des informations sur la répartition angulaire du flux par rapport à l'axe de passage du tracteur, mais elle n'est pas envisageable pour déterminer la vitesse d'éjection des granules. La seconde méthode utilise l'effet Doppler mesuré au moyen d'émetteurs et de récepteurs d'ultrasons. Dans le domaine de l'épandage d'engrais, cette technique a été développée par Hofstee (1994). Les principales limites du dispositif proposé sont liées à la petite taille de la cellule d'analyse et à la faible précision des mesures obtenues.

En ce qui concerne les méthodes optiques ne conduisant pas à l'acquisition d'une image, les méthodes basées sur l'intercorrelation de signaux ou le filtrage spatial semblent donner des précisions de l'ordre de 10% sur la mesure de vitesse pour des valeurs inférieures à 10 m.s^{-1} . Le dispositif décrit par Grift et Hofstee (1997a) basé sur la mesure du délai qui sépare deux occultations permet d'atteindre d'après les auteurs une précision inférieure à 5% sur la mesure de vitesse. Ces méthodes réalisent une évaluation de la vitesse selon l'axe du dispositif de mesure mais sont difficilement utilisables pour déterminer les composantes du vecteur vitesse en deux ou trois dimensions. D'autre part, le volume sur lequel s'effectue la mesure est nécessairement réduit à quelques centimètres, ce qui implique le déplacement du dispositif à travers le flux pour pouvoir le caractériser sur toute son étendue.

Concernant les méthodes basées sur l'acquisition d'images, de très nombreux développements ont été réalisés dans le cadre de la PIV. Cette technique, basée sur l'éclairage d'un flux de particules sub-millimétriques par un plan laser orthogonal à l'axe de la prise de vue, est mal adapté à la caractérisation de l'épandage. Du fait de la taille des grains d'engrais (*i.e.* 2 à 5 mm) et leurs déplacements éventuellement non coplanaires, l'étude de l'épandage centrifuge par une technique de PIV nécessiterait la mise en oeuvre de plans lasers et de systèmes d'acquisition particulièrement complexes. Un tel dispositif ne répondrait pas aux objectifs assignés à l'étude en terme de choix technologiques visant à permettre le développement d'un dispositif d'acquisition simple, de faible coût et potentiellement embarquable.

L'imagerie rapide et les approches stroboscopiques constituent des méthodes plus simples pour étudier le mouvement de granules en mouvement. En revanche, elles ne permettent pas dans le cas général de lever l'incertitude sur les déplacements en trois dimensions, s'il n'est pas fait usage de dispositifs stéréoscopiques. Notons que la technique de multi-exposition est une alternative à l'imagerie rapide permettant de réduire considérablement le coût du système d'acquisition. Dans le cadre de la caractérisation de l'épandage centrifuge, en considérant que les trajectoires des granules sont coplanaires, cette technique a l'avantage de donner directement accès à une estimation de la vitesse et de la direction des granules par comparaison de deux positions successives.

Lorsque le champ de vision est choisi de manière à couvrir une scène relativement étendue, la conception du système d'acquisition se heurte à la difficulté d'obtenir un système d'éclairage stroboscopique à la fois puissant, robuste et de faible coût. D'après Cointault et al. (2002) l'utilisation d'un stroboscope traditionnel ne permet pas d'obtenir la fréquence et la puissance suffisante pour l'étude du mouvement de l'engrais au voisinage d'un disque d'épandage sur une surface d'environ 1 m². D'autre part, l'analyse automatisée des images acquises en multi-exposition est particulièrement sensible aux variations d'illumination et à la qualité de l'arrière plan. Dans le cas d'un arrière plan texturé (sol agricole, culture) ou de présence d'ombres portées dans la scène, la reconnaissance des granules ou la mise en correspondance des pixels sur la base de leur intensité lumineuse (Cointault, 2001) risque de s'avérer particulièrement délicate. La qualité des images nécessaires à l'identification de granules de quelques millimètres de diamètre dans une scène d'environ 1 m² nécessite de plus une résolution suffisante ce qui implique également un coût en terme de système d'acquisition. La mise en oeuvre d'une technique multi-acquisition sur un petit champ de vision (Vangeyte et al., 2004) peut permettre de réduire ces inconvénients en diminuant la distance entre les granules en mouvement et le dispositif d'éclairage et d'acquisition. Mais le déplacement du système d'imagerie autour du disque d'épandage est alors nécessaire pour pouvoir évaluer les caractéristiques du flux sur la totalité du secteur angulaire d'épandage.

Enfin, soulignons que s'il n'est pas fait usage d'un dispositif stéréoscopique, la mesure par imagerie rapide ou multi-exposition des distances parcourues par les granules d'engrais n'est correctement réalisée que si le plan de déplacement est parallèle au plan du CCD de la caméra. En conséquence, les dispositifs proposés actuellement (Cointault, 2001 ; Vangeyte et al., 2004) ne sont adaptés qu'au cas des disques plats qui sont peu courants sur le marché des distributeurs d'engrais (*i.e.* un seul constructeur).

L'utilisation d'images acquises en filé est également envisageable pour déterminer la vitesse d'éjection d'un granule à partir de la mesure de son angle d'éjection. La simplicité du système d'acquisition et d'éclairage nécessaire à cette technique de prise de vue lui confère un avantage incontestable en terme d'applicabilité, de coût et de robustesse. En revanche, cette technique n'a été mise en oeuvre que manuellement (Inns et Reece, 1962 ; Patterson et Reece 1962 ; Olieslagers, 1997 ; Reumers et al., 2003) et son utilisation dans le cas de disques tronconiques n'est pas acquise.

3 DEFINITION DE L'APPROCHE ET PROBLEME SCIENTIFIQUE

3.1 CHOIX DE L'APPROCHE

L'objet de la thèse est de développer une technique automatisée de caractérisation du flux de granules d'engrais éjectés par un disque d'épandage centrifuge en vue d'alimenter un modèle de vol balistique permettant de prédire la répartition de l'engrais au sol. L'obtention de ces informations conditionne le développement ultérieur d'outils de diagnostic, d'aide au réglage ou de systèmes embarqués pour le contrôle en continu de la nappe d'épandage.

En considérant que les propriétés intrinsèques des granules d'engrais (masse, coefficient de traînée,...) peuvent être obtenues à partir de caractérisations annexes menées sur un échantillon (distribution granulométrique, paramètres de forme...), il demeure indispensable d'estimer les conditions initiales d'éjection des granules. Une alternative à la détermination exhaustive des vecteurs vitesses de chaque granule éjecté est d'obtenir une identification d'une partie des trajectoires empruntées par les granules et une estimation des vitesses correspondantes sur toute la zone d'épandage. Une telle caractérisation permettrait de fournir un profil de vitesses à l'éjection et une estimation de la localisation du secteur angulaire d'épandage.

Pour répondre à cet objectif, les systèmes d'imagerie offrent une grande souplesse en permettant d'acquérir une information en deux dimensions dont les possibilités d'exploitation sont multiples.

En choisissant un champ de vision suffisamment large l'intégralité du secteur angulaire d'épandage au voisinage du disque est couvert par une seule image et la caractérisation du flux ne nécessite pas le déplacement du système d'acquisition. Cette approche est avantageuse pour la robustesse mécanique du dispositif et la précision du positionnement de la caméra par rapport à la scène étudiée. Ce choix réduit également la complexité du système et donc son coût.

La prise de vue en filé constitue une solution particulièrement séduisante du fait de la simplicité du système d'acquisition des images. Appliquée à l'épandage centrifuge de fertilisants minéraux, cette technique conduit à l'exploitation d'images dans lesquelles les grains d'engrais n'apparaissent pas sous forme de points mais sous forme de stries.

La figure 2-3 donne un exemple d'image acquise en filé au voisinage d'un disque d'épandage centrifuge. Ce type d'image sera qualifié « d'image d'épandage ».

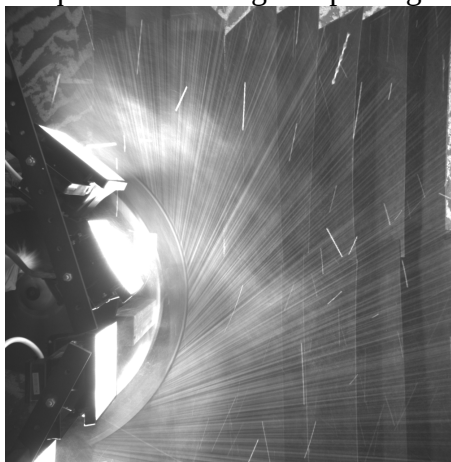


Figure 2-3 : Exemple d'image d'épandage acquise en filé au voisinage d'un disque de distribution centrifuge.

3.2 PROBLEMATIQUE

Lorsque le mouvement d'un objet est rapide par rapport au temps d'acquisition de l'image, cet objet apparaît sous la forme d'une traînée. Dans la très grande majorité des cas, cette traînée est considérée comme un défaut qui engendre un flou, une dégradation de l'image et donc nuit à son exploitation ultérieure. Dans cette situation, la restauration de l'image est usuellement réalisée par un algorithme de déconvolution (Bascle et al., 1996 ; Yitzhaky et al., 1998 ; Ben-Ezra et Nayar, 2004 ; Rav-Acha et Peleg, 2005).

Dans le cadre de cette thèse, la restauration de l'image acquise en filé n'est pas recherchée. Au contraire, les traces laissées dans l'image par les granules d'engrais en mouvement seront considérées comme la source d'information à exploiter.

Le premier objectif de la méthode à concevoir pour l'analyse d'image est de déterminer la vitesse d'éjection des granules d'engrais à partir de l'orientation des trajectoires dans l'image et plus précisément en fonction de l'angle d'éjection des granules. Il est donc nécessaire d'établir les relations physiques qui lient la vitesse d'éjection et l'angle d'éjection pour différentes configurations de disques. Cette étude mécanique s'intéressera aux cas des disques plats ou tronconiques équipés de pales radiales ou inclinées.

Ces relations ayant été définies, une méthode automatisée de traitement des images d'épandage devra être élaborée pour identifier et caractériser les trajectoires observables dans l'image de manière à permettre une mesure de l'angle d'éjection des granules. Notons que cet angle n'est pas défini par rapport à une référence fixe dans l'image mais par rapport à la position de la pale du disque d'épandage qui est en mouvement pendant le temps d'intégration de la caméra. La difficulté réside dans la définition d'une méthode robuste vis à vis de la qualité de l'image originale et permettant d'atteindre une précision suffisante en terme d'estimation de vitesse.

Dans le cas d'un disque tronconique, l'estimation de l'angle d'éjection devra prendre en considération le biais existant entre l'orientation des trajectoires dans l'image et leur orientation réelle dans la scène lorsque le déplacement des granules n'est pas parallèle au plan image. La prise en compte des caractéristiques de la prise de vue et du mouvement des particules étudiées devra alors permettre une estimation des composantes de la vitesse en trois dimensions. La caractérisation tridimensionnelle des conditions initiales d'éjection au moyen d'une seule caméra constitue également une des difficultés à résoudre.

Dans un objectif de prévision de la répartition spatiale de l'engrais il sera intéressant de s'interroger sur la possibilité d'extraire une information concernant la répartition angulaire du flux à partir des données utilisées pour la détermination du profil de vitesse en fonction de la position angulaire de la pale.

Les valeurs des paramètres estimés sur la base des images acquises en filé seront confrontées à celles obtenues expérimentalement au moyen d'autres méthodes.

La mise en oeuvre de la technique développée sera également l'occasion d'apporter des informations complémentaires sur le comportement des granules lors d'un épandage par un système centrifuge.

Chapitre 3 : Analyse mécanique du processus d'épandage centrifuge

Le premier objectif de ce chapitre est d'établir les relations qui permettent d'obtenir la vitesse d'un granule d'engrais éjecté par une pale de distributeur centrifuge à partir de la connaissance de l'angle horizontal d'éjection du granule. Ces relations seront nécessaires à l'interprétation, en terme de vitesse d'éjection, des traces laissées par les granules dans une image acquise en filé au voisinage du disque.

Ce premier objectif sera atteint sur la base de l'analyse cinématique du mouvement d'une particule sur une pale.

Le deuxième objectif est de montrer que, sous certaines hypothèses, l'angle horizontal d'éjection d'une particule est lié au coefficient de frottement de celle-ci sur la pale ce qui permet de borner l'étendue des valeurs d'angles envisageables. La limitation a priori de la plage de valeurs admissibles pour l'angle d'éjection permettra ultérieurement d'optimiser le traitement d'identification et de caractérisation des trajectoires présentes dans une image d'épandage acquise en filé.

De manière à satisfaire un large champ d'applications, les expressions seront établies dans le cas général d'un disque tronconique équipé de pales rectilignes inclinées. Les situations correspondant à des configurations plus simples se trouvent ainsi a fortiori résolues : disques plats ou tronconiques équipés de pales rectilignes, radiales ou inclinées.

Enfin, le troisième objectif est de définir un modèle de vol balistique pour pouvoir prédire la trajectoire d'une particule après son éjection en fonction de ses caractéristiques aérodynamiques et de la vitesse à l'éjection.

1 MOUVEMENT DE LA PARTICULE SUR LE DISQUE

1.1 MODELES EXISTANTS DANS LA LITTERATURE

L'étude des aspects mécaniques de l'épandage centrifuge a débuté dans les années soixante. Les auteurs ont alors cherché à modéliser le mouvement d'une particule pendant sa phase d'accélération pour diverses configurations de disques. Ces analyses considèrent une seule particule sur la pale.

Dans le cas d'un disque plat équipé de pales droites radiales et alimenté à proximité de l'axe de rotation, Patterson et Reece (1962) ont établi les équations du mouvement d'une particule animée d'un glissement pur, d'un roulement pur ou de la combinaison d'un glissement et d'un roulement sur la pale.

Ces travaux ont été prolongés par Inns et Reece (1962) qui pour la même configuration de disque, ont considéré une alimentation éloignée du centre du disque en s'intéressant au choc

de la particule au moment de la prise en pale et aux rebonds qui en découlent. Les auteurs ont considéré l'incidence de trois rebonds successifs sur la pale. Les résultats théoriques avancés sont d'après les auteurs confirmés par les essais expérimentaux menés avec des billes en acier mais n'ont pas pu être validés pour des grains d'engrais.

En 1963, Cunningham a établi les expressions de la vitesse d'une particule animée d'un glissement pur le long d'une pale droite. Ce travail a été réalisé dans le cas d'un disque plat équipé de pales inclinées et dans le cas d'un disque tronconique équipé de pales radiales. Dans sa publication l'auteur donne peu de détails concernant l'élaboration des expressions proposées.

Cunningham et Chao (1967) se sont intéressés à un disque plat équipé d'une pale hybride, composée d'une partie courbe à proximité de l'axe de rotation et prolongée d'une partie droite sur la partie périphérique du disque. L'équation du mouvement est alors résolue numériquement.

Les modèles établis pour ces configurations de disque ont ensuite été utilisés par différents auteurs (Ritter et al. 1980, Pitt et al. 1982, Griffis et al. 1983, Aphale et al. 2003) pour réaliser des simulations de répartition d'engrais.

La modélisation du mouvement de l'engrais sur le disque a fait à nouveau l'objet de recherches à partir des années 1990 avec les travaux d'Hofstee (1995). Cet auteur propose d'écrire de manière générale l'équation du mouvement d'une particule sous la forme d'une équation différentielle composée de cinq termes dont il détermine les coefficients pour les configurations suivantes : disque plat équipé de pales droites radiales, ou de pales droites inclinées, ou de pales circulaires, ou de pales en spirales logarithmiques, ou de pales paraboliques et disque tronconique équipé de pales droites radiales, ou de pales inclinées.

Hofstee se limite à l'expression des équations différentielles du mouvement et ne propose aucune solution à ces équations. D'après l'auteur, les situations pour lesquelles l'angle d'inclinaison horizontal ou l'angle d'inclinaison vertical de la pale ne sont pas nuls, ou pour lesquelles les pales ne sont pas droites, doivent être résolues numériquement.

Olieslagers (1997) établit l'équation du mouvement d'une particule seule animée d'un glissement pur dans le cas d'un disque tronconique équipé de pales inclinées. Il aboutit à une équation différentielle du mouvement légèrement différente de celle proposée par Hofstee pour la même configuration de disque. La remarque formulée pour expliquer cette différence constatée par l'auteur est difficile à interpréter. L'auteur ne propose pas de solution analytique à son équation de mouvement qui d'après lui ne peut être résolue que numériquement. Olieslagers propose également des compléments à ce modèle de mouvement en prenant en compte une phase de roulement et en intégrant les phénomènes de rebonds. La prise en compte de ces perfectionnements n'a pas permis d'améliorer sensiblement les différences constatées entre les simulations et les épandages réels réalisés pour la validation. En revanche, les simulations ont donné des résultats satisfaisants en recherchant la valeur adaptée pour le coefficient de frottement de l'engrais sur la pale et en définissant une forme adéquate pour la zone de chute de l'engrais sur le disque.

Plus récemment, Dintwa et al. (2004) ont repris rigoureusement le modèle proposé par Olieslagers (1997) sans prise en compte des rebonds ni de la phase de roulement. Ils proposent d'utiliser numériquement l'équation différentielle établie par Olieslagers pour simuler la répartition au sol de l'engrais en calculant un grand nombre de trajectoires pour différentes positions initiales sur le disque de manière à obtenir une distribution statistique.

Dans le cas d'un disque tronconique équipé de pales radiales, Reumers et al. (2003b) proposent d'exprimer analytiquement la composante radiale horizontale et la composante tangentielle horizontale de la vitesse d'éjection de la particule en fonction de l'angle horizontal d'éjection. Ils considèrent pour cela que la composante tangentielle est la somme d'une composante relative à la rotation du disque et d'une composante relative à l'inclinaison horizontale de la pale. La composante verticale n'est en revanche pas établie. En conséquence, aucune expression n'est proposée pour l'angle vertical d'éjection.

Les modèles utilisés dans les travaux présentés précédemment considèrent le mouvement d'une particule seule sur la pale. Actuellement une autre approche, basée sur la modélisation par élément discret (DEM) est proposée pour permettre de prendre en considération des interactions entre particules (Tijssens et al., 2005 ; Van Liedekerke et al., 2005). Cette technique se base sur le calcul de manière itérative des positions de chaque particule selon un pas de temps fini en considérant les forces agissant sur la particule dues à la pesanteur, aux collisions avec les particules voisines et aux collisions avec le dispositif d'épandage. La principale difficulté de mise en oeuvre de ce type d'approche réside dans le choix des valeurs des nombreux paramètres qui interviennent dans le modèle et dans la complexité de prise en compte de la diversité de formes des granules d'engrais. Actuellement les modélisations assimilent les particules à des sphères.

Dans le cas général d'un disque tronconique équipé de pales inclinées, la littérature ne fournit pas les expressions des composantes de la vitesse d'éjection d'une particule en fonction de la configuration du disque et des angles d'éjection. Ces relations sont néanmoins indispensables à l'estimation de la vitesse à partir des images d'épandage acquises en filé.

Par ailleurs, les équations différentielles du mouvement établies dans la littérature pour cette configuration de disque ne sont pas pratiques du fait de l'absence de solution analytique. D'autre part, des divergences existent entre les expressions proposées par les différents auteurs.

Du fait de ces constatations, un travail d'analyse mécanique du mouvement d'une particule sur un disque de distributeur centrifuge en vue d'établir les relations nécessaires aux objectifs fixés pour cette thèse s'avère indispensable. Il est réalisé dans les paragraphes suivants en deux phases distinctes : une analyse cinématique permettant d'exprimer les composantes du vecteur vitesse et une analyse dynamique permettant de modéliser le mouvement sous certaines hypothèses.

1.2 DEFINITIONS ET NOTATIONS

Pour éviter les confusions, il sera fait référence dans ce document à l'inclinaison de la pale et non à l'angle tronconique du disque. En effet, lorsqu'elle n'est pas radiale, une pale droite (rectiligne) ne peut être en contact avec un cône qu'en deux points et l'inclinaison de la pale par rapport à l'horizontale diffère de l'angle tronconique externe du disque. La relation entre ces deux angles a d'ailleurs été établie par Olieslagers (1997) et reprise par Dintwa et al. (2004).

L'angle horizontal d'éjection θ_{ej} est l'angle entre la tangente au cercle décrit par l'extrémité de la pale et la projection de la trajectoire de la particule dans le plan horizontal.

L'angle vertical d'éjection Ω_{ej} est l'angle entre la trajectoire de la particule et le plan horizontal.

La figure 3-1 présente graphiquement la majorité des variables qui seront utilisées dans l'analyse mécanique du mouvement d'une particule sur le disque.

Dans ce chapitre, les représentations graphiques correspondent à un disque tronconique équipé de pales inclinées vers l'arrière, mais les résultats peuvent immédiatement être étendus au cas des disques équipés de pales inclinées vers l'avant.

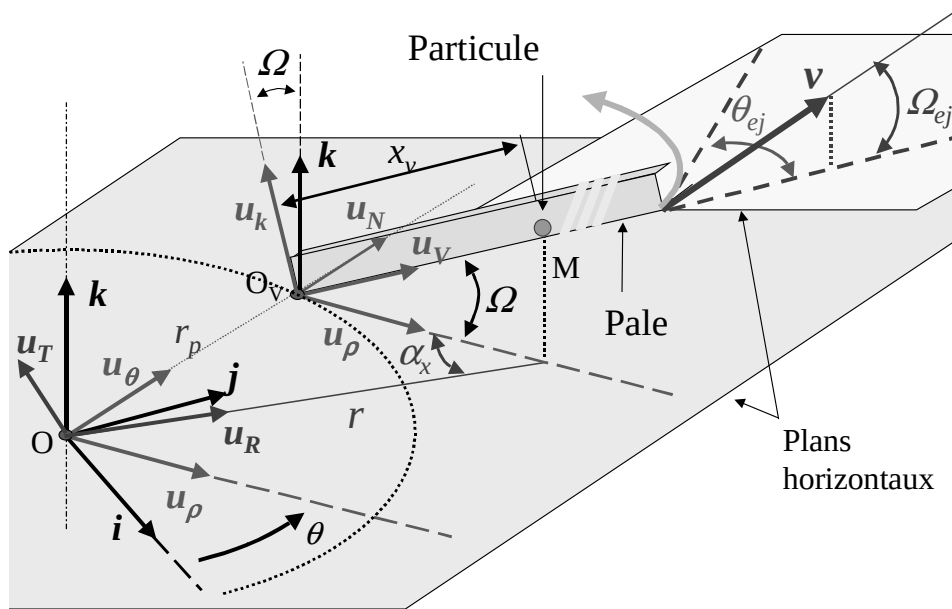


Figure 3-1 : Schématisation de la pale et des principales variables intervenant dans l'étude mécanique du processus d'épandage.

De manière à décomposer clairement le mouvement de la particule, quatre repères orthonormés directs sont définis.

Trois systèmes ont leur origine O située sur l'axe de rotation du disque.

Le repère $(O, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ est relatif au châssis du distributeur ; il est considéré comme un référentiel galiléen.

Le repère $(O, \mathbf{u}_\rho, \mathbf{u}_\theta, \mathbf{k})$ est lié au disque ; il est entraîné en rotation à la vitesse angulaire du disque.

Le repère $(O, \mathbf{u}_R, \mathbf{u}_T, \mathbf{k})$ s'oriente quant à lui en fonction de la position de la particule sur la pale. Il est choisi avec $\mathbf{u}_R$ pris dans la direction de la projection de la particule dans le plan horizontal passant par O .

Le quatrième repère a son origine O_v définie par la projection de O sur l'axe de la pale. Ce point est dans le plan horizontal passant par O . Pendant la rotation du disque, ce point décrit un cercle centré sur O . Ce système est défini par $(O_v, \mathbf{u}_v, \mathbf{u}_n, \mathbf{u}_k)$ avec $\mathbf{u}_v$ porté par la pale et orienté de l'intérieur vers l'extérieur du disque.

Les notations utilisées dans ce chapitre sont données ci-dessous. L'écriture en gras est réservée aux grandeurs vectorielles.

$\mathbf{a}$	vecteur accélération de la particule, m.s^{-2}
$\mathbf{f}_f$	force de frottement, N
$\mathbf{f}_g$	poids, N
$\mathbf{f}_{Rd}$	réaction du disque, N
f_{Rd}	norme de la réaction du disque, N
$\mathbf{f}_{Rv}$	réaction de la pale, N
f_{Rv}	norme de la réaction de la pale, N
g	norme d'accélération de la pesanteur, m.s^{-2}
K	coefficient du modèle
l_{pale}	longueur de la pale, m
m	masse de la particule, kg
r	distance horizontale entre la particule et l'axe de rotation du disque, m
r_0	rayon correspondant à la position initiale de la particule sur la pale, m
r_p	distance entre l'axe de rotation et la pale, m
r_{pale}	rayon de la pale, m
t	temps, s
$\mathbf{v}$	vecteur vitesse de la particule, m.s^{-1}
v	norme du vecteur vitesse, m.s^{-1}
$\mathbf{v}_H$	composante horizontale du vecteur vitesse à l'éjection, m.s^{-1}
v_H	norme de la composante horizontale de la vitesse d'éjection, m.s^{-1}
$\mathbf{v}_R$	composante radiale horizontale du vecteur vitesse à l'éjection, m.s^{-1}
v_R	norme de la composante radiale horizontale de la vitesse à l'éjection, m.s^{-1}
$\mathbf{v}_T$	composante tangentielle horizontale du vecteur vitesse à l'éjection, m.s^{-1}
v_T	norme de la composante tangentielle horizontale de la vitesse à l'éjection, m.s^{-1}
x_V	abscisse de la particule sur la pale (par rapport à O_V), m
$\hat{x}_V$	approximation de x_V , m
$\dot{x}_V$	vitesse de la particule le long de la pale, m s^{-1}
$\hat{\dot{x}}_V$	approximation de $\dot{x}_V$, m.s^{-1}
$\ddot{x}_V$	dérivée seconde de x_V , m.s^{-2}
x_{V0}	position initiale de la particule sur la pale (par rapport à O_V), m
α_x	l'angle entre la projection horizontale de la pale et le rayon de la position de la particule en mouvement (fonction de x_V), rad
α_{lv}	angle horizontal d'inclinaison de la pale, rad
δ	coefficient du modèle
θ	angle de rotation du disque pendant le mouvement (<i>i.e.</i> angle entre $\mathbf{i}$ et $\mathbf{u}_\rho$), rad
$\dot{\theta}$	norme de la vitesse de rotation du disque, rad.s^{-1}
$\ddot{\theta}$	norme de l'accélération angulaire du disque, rad.s^{-2}
θ_{ej}	angle horizontal d'éjection de la particule par rapport à $\mathbf{v}_T$, rad
μ	coefficient de frottement de la particule le long de la pale
Ω	inclinaison de la pale par rapport au plan horizontal, rad
Ω_{ej}	angle vertical d'éjection de la particule, rad

1.3 ANALYSE CINEMATIQUE DU MOUVEMENT SUR LA PALE

En décomposant le vecteur vitesse de la particule dans un repère adéquat, il est possible d'exprimer la composante radiale, la composante tangentielle et la composante horizontale de la vitesse d'éjection en fonction des paramètres dimensionnels du disque, de la vitesse de rotation et de l'angle horizontal d'éjection.

La figure 3-2 présente les aspects géométriques de cette décomposition.

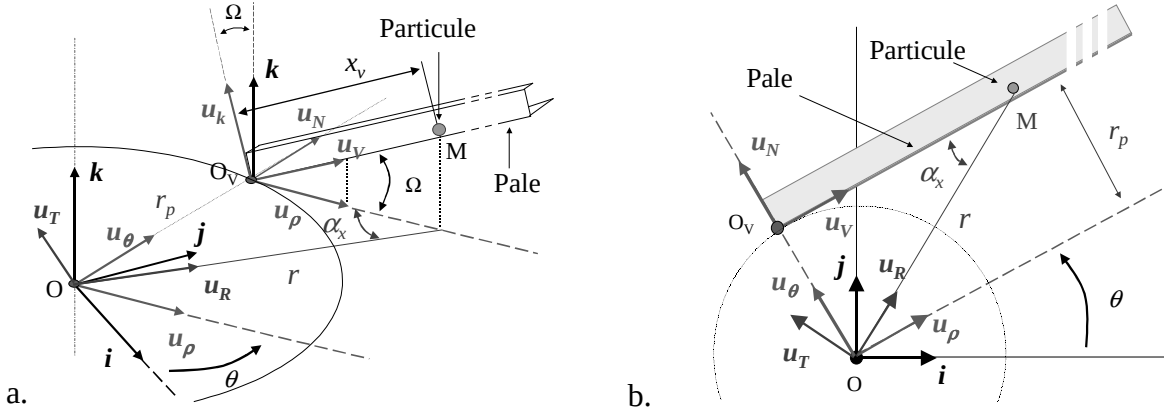


Figure 3-2 : a - Vue en perspective de la pale et des différents repères d'étude ; b – Vue de dessus de la pale et des différents repères.

1.3.1 EXPRESSION DU VECTEUR VITESSE DANS LE REPERE LIE A LA PALE

La décomposition du mouvement de la particule étant très simple sur la pale, mais plus complexe dans les autres repères, il est intéressant de rechercher dans un premier temps l'expression de la dérivée des vecteurs du repère associé à la pale.

Dans (O, **i**, **j**, **k**), l'expression des vecteurs **u_rho** et **u_theta** est :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_\rho = \mathbf{i} \cos \theta + \mathbf{j} \sin \theta \\ \mathbf{u}_\theta = -\mathbf{i} \sin \theta + \mathbf{j} \cos \theta \end{cases} \quad (3.1)$$

avec θ l'angle de rotation du disque par rapport au référentiel galiléen (*i.e.* angle entre **i** et **u_rho**). Dans ce repère, les dérivées temporelles de **u_rho** et **u_theta** sont déduites comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{u}}_\rho = \dot{\theta} \mathbf{u}_\theta \\ \dot{\mathbf{u}}_\theta = -\dot{\theta} \mathbf{u}_\rho \end{cases} \quad (3.2)$$

Les vecteurs **u_V**, **u_N**, et **u_k** liés à la pale peuvent être décomposés sur **u_rho**, **u_theta** et **k** comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_V = \mathbf{u}_\rho \cos \Omega + \mathbf{k} \sin \Omega \\ \mathbf{u}_N = \mathbf{u}_\theta \\ \mathbf{u}_k = -\mathbf{u}_\rho \sin \Omega + \mathbf{k} \cos \Omega \end{cases} \quad (3.3)$$

avec Ω l'angle entre la pale et le plan horizontal.

En utilisant (3.2) et en dérivant (3.3) par rapport au temps, on obtient :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{u}}_V &= \dot{\theta} \mathbf{u}_\theta \cos \Omega &= \dot{\theta} \mathbf{u}_N \cos \Omega \\ \dot{\mathbf{u}}_N &= -\dot{\theta} \mathbf{u}_\rho &= \dot{\theta} (-\mathbf{u}_V \cos \Omega + \mathbf{u}_k \sin \Omega) \\ \dot{\mathbf{u}}_k &= -\dot{\theta} \mathbf{u}_N \sin \Omega \end{cases} \quad (3.4)$$

L'expression de la dérivée temporelle du repère associé à la pale étant établie, le mouvement de la particule peut maintenant être facilement décomposé.

Soit M la position d'une particule sur la pale (figure 3-2). Le vecteur position de cette particule est :

$$\mathbf{OM} = \mathbf{OO}_V + \mathbf{O}_V \mathbf{M} = r_p \mathbf{u}_N + x_V \mathbf{u}_V \quad (3.5)$$

En dérivant cette équation par rapport au temps et en utilisant (3.4), l'expression du vecteur vitesse $\mathbf{v}$ est obtenue comme suit :

$$\mathbf{v} = (-r_p \dot{\theta} \cos \Omega + \dot{x}_V) \mathbf{u}_V + x_V \dot{\theta} \mathbf{u}_N \cos \Omega + r_p \dot{\theta} \mathbf{u}_k \sin \Omega \quad (3.6)$$

avec $\dot{x}_V$ la vitesse de déplacement de la particule le long de la pale.

1.3.2 EXPRESSION DES COMPOSANTES RADIALE, TANGENTIELLE ET VERTICALE DE LA VITESSE

En substituant (3.3) dans (3.6), on obtient :

$$\mathbf{v} = (\dot{x}_V \cos \Omega - r_p \dot{\theta}) \mathbf{u}_\rho + (x_V \dot{\theta} \cos \Omega) \mathbf{u}_N + \dot{x}_V \sin \Omega \mathbf{k} \quad (3.7)$$

L'expression de $\mathbf{u}_\rho$ et $\mathbf{u}_\theta$ en fonction de $\mathbf{u}_R$ et $\mathbf{u}_T$ est:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_\rho = \mathbf{u}_R \cos \alpha_x - \mathbf{u}_T \sin \alpha_x \\ \mathbf{u}_\theta = \mathbf{u}_R \sin \alpha_x + \mathbf{u}_T \cos \alpha_x \end{cases} \quad (3.8)$$

avec α_x l'angle horizontal entre la projection horizontale de la pale et le rayon de la position de la particule.

D'après la figure 3-2 on obtient les relations géométriques suivantes:

$$\cos \alpha_x = \frac{x_V \cos \Omega}{r} \quad (3.9)$$

$$\sin \alpha_x = \frac{r_p}{r} \quad (3.10)$$

où r est la distance horizontale entre la particule et l'axe de rotation du disque.

En substituant (3.8) dans (3.7) et en utilisant (3.9) et (3.10), l'expression de la vitesse devient :

$$\mathbf{v} = (\dot{x}_V \cos \Omega \cos \alpha_x) \mathbf{u}_R + (r \dot{\theta} - \dot{x}_V \cos \Omega \sin \alpha_x) \mathbf{u}_T + (\dot{x}_V \sin \Omega) \mathbf{k} \quad (3.11)$$

En appelant r_{RT} le rapport de la composante horizontale radiale v_R sur la composante horizontale tangentielle v_T de la vitesse d'éjection, on déduit de l'expression de ces deux composantes que :

$$v_R = \frac{r_{pale} \dot{\theta} r_{RT}}{1 + r_{RT} \tan \alpha_{lv}} \quad (3.12)$$

où r_{pale} est le rayon de la pale et α_{lv} est la valeur de l'angle α_x au moment de l'éjection (lorsque la particule est à l'extrémité de la pale).

Or par définition, $r_{RT} = \tan(\theta_{ej})$ la composante horizontale radiale peut donc être exprimée en fonction de l'angle horizontal d'éjection de la particule :

$$v_R = \frac{r_{pale} \dot{\theta} \tan(\theta_{ej})}{1 + \tan(\theta_{ej}) \tan \alpha_{lv}} \quad (3.13)$$

La composante tangentielle de la vitesse est déduite de cette expression :

$$v_T = \frac{v_R}{\tan(\theta_{ej})} = \frac{r_{pale} \dot{\theta}}{1 + \tan(\theta_{ej}) \tan \alpha_{lv}} \quad (3.14)$$

De même, la composante horizontale de la vitesse s'exprime comme suit :

$$v_H = \frac{v_R}{\sin \theta_{ej}} = \frac{r \dot{\theta}}{\cos \theta_{ej} + \sin \theta_{ej} \tan \alpha_{lv}} \quad (3.15)$$

Pour définir la composante verticale, il convient d'exprimer préalablement $\dot{x}_v$:

$$\dot{x}_v = \frac{v_R}{\cos \Omega \cos \alpha_x} \quad (3.16)$$

En prenant $\alpha_x = \alpha_{lv}$ et en remplaçant $\dot{x}_v$ dans le troisième terme de (3.11), l'expression de la composante verticale de la vitesse au moment de l'éjection est :

$$v_k = \frac{v_R}{\cos \alpha_{lv}} \tan \Omega \quad (3.17)$$

d'où en substituant :

$$v_k = \frac{r_{pale} \dot{\theta} \tan(\theta_{ej})}{\cos \alpha_{lv} + \tan(\theta_{ej}) \sin \alpha_{lv}} \tan \Omega \quad (3.18)$$

Numériquement, les valeurs obtenues pour la composante horizontale en utilisant (3.15) sont identiques à celle obtenues avec l'expression proposée par Reumers (2003b).

1.3.3 EXPRESSION DE L'ANGLE VERTICAL D'EJECTION

Dans son étude du mouvement pour un disque tronconique à pales radiales, Cunningham (1963) considère que la composante verticale de la vitesse est obtenue en multipliant le module de la vitesse le long de la pale par le sinus de l'angle tronconique du disque. De

même, Colin (1997) ne fait pas de différence entre l'inclinaison du vecteur vitesse de la particule lorsqu'elle quitte la pale et l'angle tronconique du disque. Olieslagers et al. (1996) considèrent également que l'inclinaison verticale du vecteur vitesse de la particule lorsqu'elle quitte la pale correspond à l'inclinaison verticale de la pale.

Les calculs menés dans le cadre de ce chapitre, montrent que ces considérations sont erronées.

Dans le cas d'un disque tronconique à pales inclinées, Olieslagers (1997) définit d'ailleurs l'angle d'éjection vertical par l'arc-tangente du rapport de la composante horizontale sur la composante verticale de la vitesse d'éjection et le différencie ainsi de l'inclinaison de la pale par rapport à l'horizontale. Néanmoins, l'expression de ces composantes n'étant pas établie en fonction des caractéristiques du disque et de l'angle horizontal d'éjection, l'auteur ne caractérise pas davantage cet angle. Dintwa et al. (2004) distinguent également l'inclinaison de la pale par rapport à l'horizontale et l'angle vertical total d'éjection de la particule mais ils ne proposent aucune expression de cet angle. Reumers (2003b) n'ayant exprimé analytiquement que les composantes horizontales de la vitesse, il est également contraint de mesurer cet angle expérimentalement pour l'intégrer dans son modèle théorique de mouvement.

La littérature ne fournit donc pas de relation permettant d'exprimer l'angle vertical d'éjection des granules. D'autre part, des divergences existent entre les propos des différents auteurs. Compte tenu du travail réalisé dans le paragraphe précédent, cette lacune peut être facilement comblée.

La composante horizontale et la composante verticale du vecteur vitesse ayant été établies en (3.15) et (3.17), l'angle vertical d'éjection Ω_{ej} de la particule par rapport à l'horizontale est immédiatement déduit :

$$\tan \Omega_{ej} = \frac{v_k}{v_H}$$

d'où :

$$\tan \Omega_{ej} = \frac{\sin \theta_{ej}}{\cos \alpha_{lv}} \tan \Omega \quad (3.19)$$

Dans le cas d'un disque équipé de pales radiales, la relation se réduit à :

$$\tan \Omega_{ej} = \sin \theta_{ej} \cdot \tan \Omega$$

Il est opportun de souligner que l'angle vertical d'éjection théorique ne dépend que des paramètres dimensionnels du disque et de l'angle horizontal d'éjection.

En pratique, l'angle vertical d'éjection de la particule est inférieur à l'angle vertical d'inclinaison de la pale. A titre d'exemple, pour une pale radiale inclinée de $7,5^\circ$ par rapport à l'horizontale, la figure 3-3 montre l'évolution de l'angle vertical d'éjection calculé pour un angle horizontal d'éjection compris entre 20° et 45° . L'angle vertical d'éjection est alors compris entre $2,5^\circ$ et $5,3^\circ$. Les bornes imposées à l'angle horizontal d'éjection seront justifiées dans les paragraphes suivants.

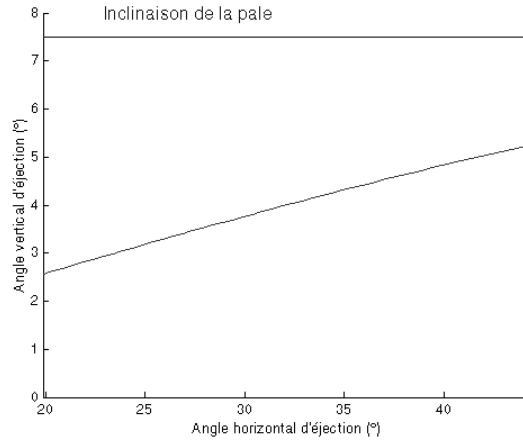


Figure 3-3 : Illustration graphique de la relation établie entre l'angle horizontal et l'angle vertical d'éjection pour une pale radiale inclinée de 7,5° par rapport à l'horizontale.

La relation (3.19) constituera ultérieurement une contrainte qui permettra de réduire l'espace des solutions pour l'estimation de l'angle horizontal d'éjection θ_{ej} à partir de l'image bidimensionnelle de la scène.

1.3.4 EXPRESSION DE LA NORME DE LA VITESSE

La norme du vecteur vitesse peut être déduite de l'expression de la composante horizontale et de l'expression de l'angle vertical d'éjection comme suit :

$$v = \frac{v_H}{\cos \Omega_{ej}} = \frac{1}{\cos \Omega_{ej}} \cdot \frac{r\dot{\theta}}{\cos \theta_{ej} + \sin \theta_{ej} \tan \alpha_{lv}} \quad (3.20)$$

d'où :

$$v = \sqrt{1 + \left(\frac{\sin \theta_{ej}}{\cos \alpha_{lv}} \tan \Omega \right)^2} \frac{r\dot{\theta}}{\cos \theta_{ej} + \sin \theta_{ej} \tan \alpha_{lv}} \quad (3.21)$$

Dans le cas d'un disque tronconique équipé de pale radiale, la vitesse totale de la particule au moment de son éjection peut donc être déduite des caractéristiques dimensionnelles du disque et de l'angle horizontal d'éjection.

1.3.5 CONCLUSION

L'analyse cinématique du mouvement de la particule a permis de montrer que chacune des composantes du vecteur vitesse à l'éjection peut être déterminée à partir des caractéristiques dimensionnelles du disque, de la vitesse de rotation et de l'angle horizontal d'éjection de la particule. En pratique, seule la valeur de l'angle horizontal d'éjection est inconnue pendant le processus d'épandage. Sa valeur devra être extraite des images acquises au voisinage du disque.

En conséquence, l'angle vertical d'éjection peut également être déduit de l'angle horizontal d'éjection.

Concernant l'étude cinématique, il est important de souligner que les relations établies se fondent sur une décomposition et une dérivation du vecteur position d'un point matériel.

Aucune hypothèse n'est faite quant au comportement dynamique de la particule sur la pale (glissement, roulement) avant son éjection.

1.4 ANALYSE DYNAMIQUE DU MOUVEMENT SUR LA PALE

1.4.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

L'étude du mouvement proposée ici s'intéresse à une particule unique animée d'un glissement pur le long de la pale. Les situations de rebonds ou de roulement sur la pale ne sont pas prises en compte.

Les actions physiques considérées pour établir l'équation du mouvement de la particule sont : le poids de la particule, la force de réaction verticale du disque, la force de réaction de la pale et la force de frottement de la particule.

La force centrifuge et la force de Coriolis utilisées traditionnellement pour établir l'équation du mouvement (Patterson et Reece, 1962 ; Cunningham et Chao, 1967 ; Colin, 1997 ; Olieslagers, 1997) sont des forces de repère. Elles n'ont pas lieu d'être considérées ici en préalable à l'établissement de l'équation du mouvement sachant que le vecteur accélération de la particule sera exprimé par rapport au référentiel $(O, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ considéré comme galiléen.

En effet, le travail de dérivation vectorielle généralement considéré comme laborieux a déjà été réalisé dans l'analyse cinématique du mouvement pour établir l'expression de la vitesse d'éjection de la particule en fonction de l'angle horizontal d'éjection. Ce travail sera simplement prolongé par le calcul du vecteur accélération.

1.4.2 VECTEUR ACCELERATION

La dérivation de l'expression vectorielle de la vitesse (3.6) sur la base des relations déjà établies (3.4), permet d'obtenir immédiatement l'expression du vecteur accélération :

$$\begin{aligned} \mathbf{a} = & (-r_p \ddot{\theta} \cos \Omega + \ddot{x}_v) \mathbf{u}_v + (-r_p \dot{\theta} \cos \Omega + \dot{x}_v) \dot{\theta} \mathbf{u}_N \cos \Omega \\ & + \dot{x}_v \dot{\theta} \mathbf{u}_N \cos \Omega + x_v \ddot{\theta} \mathbf{u}_N \cos \Omega + x_v \dot{\theta}^2 (-\cos \Omega \mathbf{u}_v + \sin \Omega \mathbf{u}_k) \cos \Omega \\ & + r_p \ddot{\theta} \mathbf{u}_k \sin \Omega - r_p \dot{\theta}^2 \mathbf{u}_N \sin^2 \Omega \end{aligned}$$

En regroupant les termes, l'expression devient :

$$\begin{aligned} \mathbf{a} = & (\ddot{x}_v - x_v \dot{\theta}^2 \cos^2 \Omega - r_p \ddot{\theta} \cos \Omega) \mathbf{u}_v \\ & + (2 \dot{x}_v \dot{\theta} \cos \Omega + x_v \ddot{\theta} \cos \Omega - r_p \dot{\theta}^2 \sin^2 \Omega - r_p \dot{\theta}^2 \cos^2 \Omega) \mathbf{u}_N \\ & + (x_v \dot{\theta}^2 \cos \Omega \sin \Omega + r_p \ddot{\theta} \sin \Omega) \mathbf{u}_k \end{aligned}$$

où $\ddot{\theta}$ est l'accélération angulaire du disque, $\dot{x}_v$ est la vitesse de la particule le long de la pale, et $\ddot{x}_v$ est l'accélération de la particule le long de la pale.

En considérant que pendant le processus d'épandage, la vitesse de rotation du disque est constante, l'expression du vecteur accélération de la particule peut être simplifiée comme suit :

$$\mathbf{a} = (\ddot{x}_v - x_v \dot{\theta}^2 \cos^2 \Omega) \mathbf{u}_v + (2 \dot{x}_v \dot{\theta} \cos \Omega - r_p \dot{\theta}^2) \mathbf{u}_N + (x_v \dot{\theta}^2 \cos \Omega \sin \Omega) \mathbf{u}_k \quad (3.22)$$

Le vecteur accélération de la particule a été établi par rapport au repère $(O, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ considéré comme galiléen, mais décomposé dans le repère $(O_V, \mathbf{u}_V, \mathbf{u}_N, \mathbf{u}_k)$ de manière à faciliter l'étude dynamique de la particule en mouvement le long de la pale.

1.4.3 BILAN DES FORCES ET EQUATION DU MOUVEMENT

Les forces physiques qui agissent sur la particule pendant son mouvement sur la pale sont représentées sur la figure 3-4.

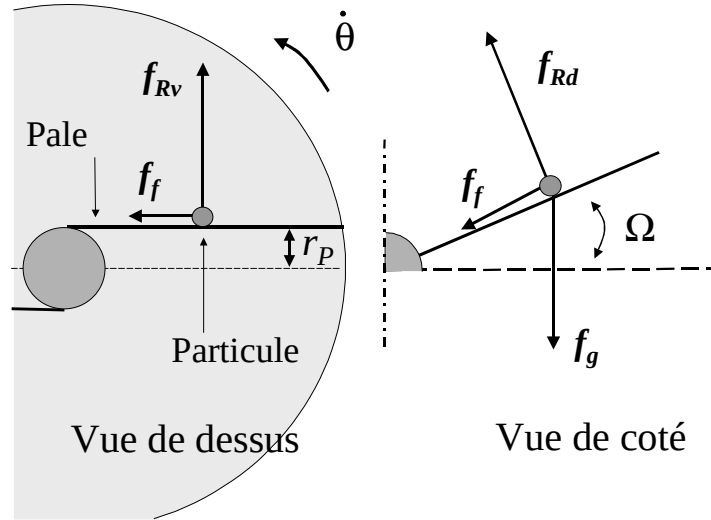


Figure 3-4 : Représentation des forces physiques qui agissent sur une particule en mouvement sur la pale

Les actions extérieures sont décomposées sur le repère $(O_V, \mathbf{u}_V, \mathbf{u}_N, \mathbf{u}_k)$ lié à la pale et sont décrites par les expressions suivantes.

L'expression du poids est :

$$\mathbf{f}_g = -mg(\mathbf{u}_V \sin \Omega + \mathbf{u}_k \cos \Omega) \quad (3.23)$$

où m est la masse de la particule et g est l'accélération de la pesanteur.

La réaction du disque est :

$$\mathbf{f}_{Rd} = f_{Rd} \mathbf{u}_k \quad (3.24)$$

où f_{Rd} est la norme de la force de réaction du disque.

La réaction de la pale est :

$$\mathbf{f}_{Rv} = f_{Rv} \mathbf{u}_N \quad (3.25)$$

où f_{Rv} est la norme de réaction de la pale.

La force de frottement est :

$$\mathbf{f}_f = -\mu(f_{Rd} + f_{Rv})\mathbf{u}_V \quad (3.26)$$

où μ est le coefficient de frottement de la particule sur la pale et sur le disque.

Le vecteur accélération de la particule ayant été établi par rapport à un référentiel considéré comme galiléen, l'application de la relation fondamentale de la dynamique donne :

$$m\mathbf{a} = \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_{Rd} + \mathbf{f}_{Rv} + \mathbf{f}_f \quad (3.27)$$

En substituant les équations (3.22) à (3.26) dans (3.27), cette équation devient :

$$\begin{cases} m(\ddot{x}_v - x_v \dot{\theta}^2 \cos^2 \Omega) = -\mu(f_{Rd} + f_{Rv}) - mg \sin \Omega \\ m(2\dot{x}_v \dot{\theta} \cos \Omega - r_p \dot{\theta}^2) = f_{Rv} \\ m x_v \dot{\theta}^2 \cos \Omega \sin \Omega = f_{Rd} - mg \cos \Omega \end{cases} \quad (3.28)$$

L'équation différentielle du mouvement de la particule le long de la pale est déduite du système d'équations précédent :

$$\ddot{x}_v + 2(\mu \dot{\theta} \cos \Omega) \dot{x}_v - \dot{\theta}^2 \cos \Omega (\cos \Omega - \mu \sin \Omega) x_v = \mu r_p \dot{\theta}^2 - \mu g \cos \Omega - g \sin \Omega \quad (3.29)$$

Le principal intérêt de l'approche présentée dans ce paragraphe est de permettre l'établissement de l'équation du mouvement simplement en sommant les forces physiques dans le repère (O_v , $\mathbf{u}_v$, $\mathbf{u}_n$, $\mathbf{u}_k$) qui est lié à la pale.

En conséquence, l'équation différentielle du mouvement (3.29) peut être immédiatement résolue de manière analytique.

En considérant que $x_v = x_{v0}$ et $\dot{x}_v = 0$ à l'instant initial (début du mouvement de la particule sur la pale), la solution de l'équation (3.29) est :

$$x_v = \frac{(x_{v0} - K)}{2\delta} \left((\delta - \mu \cos \Omega) e^{-(\delta + \mu \cos \Omega) \dot{\theta} t} + (\delta + \mu \cos \Omega) e^{(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} t} \right) + K \quad (3.30)$$

où x_{v0} est la position initiale de la particule sur la pale (mesurée le long de la pale par rapport à O_v) ; t est le temps ; K est une constante définie par :

$$K = \frac{\mu g \cos \Omega + g \sin \Omega - \mu r_p \dot{\theta}^2}{\dot{\theta}^2 \cos \Omega (\cos \Omega - \mu \sin \Omega)} \quad (3.31)$$

et où le coefficient δ est :

$$\delta = \sqrt{\cos^2 \Omega (\mu^2 + 1) - \mu \sin \Omega \cos \Omega} \quad (3.32)$$

1.4.4 EXPRESSION DE L'ANGLE HORIZONTAL D'EJECTION

L'objet de ce paragraphe est de montrer que les valeurs admissibles pour l'angle d'éjection de la particule sont bornées. Pour atteindre cet objectif, l'angle d'éjection est déterminé de manière théorique en fonction du coefficient de frottement de la particule sur la pale et le disque ainsi qu'en fonction des caractéristiques dimensionnelles du disque.

L'angle horizontal d'éjection de la particule est défini par l'arc-tangente du rapport r_{RT} de la composante horizontale radiale sur la composante horizontale tangentielle de la vitesse.

A partir de la relation (3.11), l'expression de ce ratio au moment de l'éjection (lorsque $r = r_{pale}$ et $\alpha_x = \alpha_{lv}$) est :

$$r_{RT} = \frac{\dot{x}_v \cos \Omega \cos \alpha_{lv}}{r\dot{\theta} - \dot{x}_v \cos \Omega \sin \alpha_{lv}} \quad (3.33)$$

Ce rapport s'exprime notamment en fonction de la vitesse de la particule le long de la pale $\dot{x}_v$ qui n'a pas encore été déterminée.

En dérivant l'équation (3.30), la vitesse de la particule le long de la pale est :

$$\dot{x}_v = \frac{(x_{v0} - K)}{2\delta} (\delta + \mu \cos \Omega)(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} \left(e^{(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} t} - e^{-(\delta + \mu \cos \Omega) \dot{\theta} t} \right) \quad (3.34)$$

En considérant que la pale est suffisamment longue et que par conséquent la durée du déplacement de la particule sur la pale a été suffisante, l'exponentielle négative peut être considérée comme négligeable devant l'exponentielle positive au moment de l'éjection.

Sous cette hypothèse, la position (3.30) et la vitesse (3.34) de la particule au moment de l'éjection peuvent être approximées par :

$$\hat{x}_v = \frac{(x_{v0} - K)}{2\delta} (\delta + \mu \cos \Omega) e^{(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} t_{ej}} + K$$

et :

$$\hat{\dot{x}}_v = \frac{(x_{v0} - K)}{2\delta} (\delta + \mu \cos \Omega)(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} e^{(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} t_{ej}}$$

où t_{ej} est l'instant auquel la particule quitte la pale, $\hat{x}_v$ et $\hat{\dot{x}}_v$ sont les approximations respectives de x_v et $\dot{x}_v$.

Ces approximations permettent d'écrire une relation simplifiée entre la vitesse et la position de la particule sur la pale :

$$\hat{\dot{x}}_v = (\hat{x}_v - K)(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} \quad (3.35)$$

L'examen de cette équation montre qu'elle conduit à surestimer la vitesse de la particule le long de la pale. L'erreur induite par l'utilisation de cette relation a été calculée à titre d'exemple dans le cas d'un disque tronconique ($\Omega = 5^\circ$) équipé de pales radiales ($r_p = 0.05$ m) et animé d'une vitesse de rotation de 73 rad s^{-1} (700 tr/min). La position initiale de la particule sur la pale x_{v0} a été prise égale à 0.05 m ou 0.10 m.

La diminution de l'erreur commise avec l'augmentation de l'abscisse de la particule le long de la pale est représentée sur la figure 3-5 pour différentes valeurs du coefficient de frottement : 0, 0.25, 0.5, 0.75 et 1.

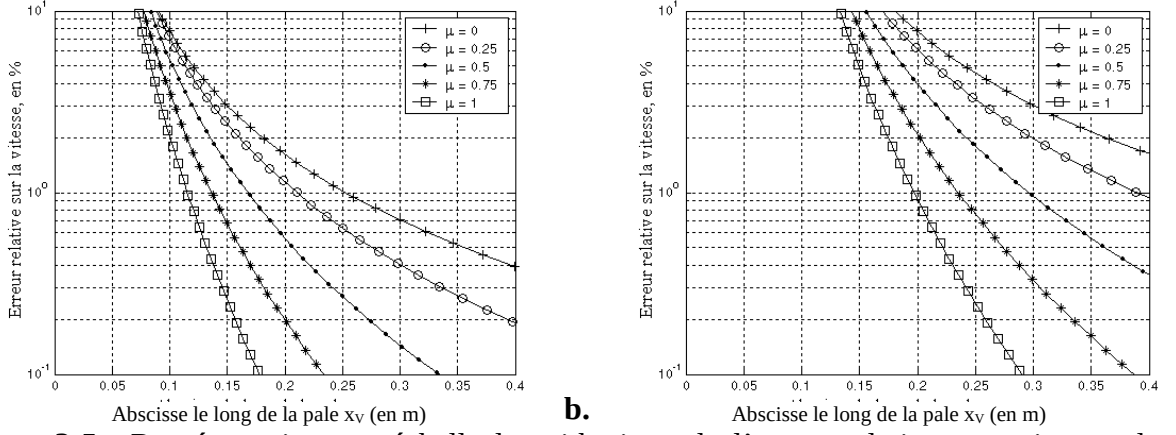


Figure 3-5 : Représentation sur échelle logarithmique de l'erreur relative commise sur la valeur de la vitesse $\dot{x}_v$ en fonction de la position $\dot{x}_v$ de la particule le long de la pale. Les simulations sont réalisées pour différentes valeurs du coefficient de frottement pour les paramètres suivants : $\Omega = 5^\circ$, $r_p = 0.05$ m, $\dot{\theta} = 73$ rad s⁻¹, avec $x_{v0} = 0.05$ m (a) ou $x_{v0} = 0.10$ m (b).

Dans le cas où $x_{v0} = 0.05$ m l'erreur relative est inférieure à 1% lorsque la pale est plus longue que 0,12 m pour un coefficient de frottement de 1, et lorsque la pale est plus longue que 0,25 m pour un coefficient de frottement nul. Cette dernière valeur correspond au cas le plus défavorable. Lorsque l'abscisse de la prise en pale de la particule augmente, l'erreur commise augmente. Pour $x_{v0} = 0.10$ m et pour un coefficient de frottement de 0.5, la pale devrait avoir une longueur de plus 0.3 m pour que l'erreur commise sur la vitesse $\dot{x}_v$ soit inférieure à 1%.

Sous l'hypothèse d'une pale suffisamment longue, la vitesse de la particule le long de la pale est obtenue au moment de l'éjection (lorsque $\hat{x}_v = l_{pale}$) à partir de la relation (3.35) de la manière suivante :

$$\dot{x}_v \cong (l_{pale} - K)(\delta - \mu \cos \Omega) \dot{\theta} \quad (3.36)$$

En outre, lorsque la particule quitte la pale, l'angle α_x correspond à l'angle horizontal d'inclinaison de la pale α_{lv} qui est défini par :

$$\cos \alpha_{lv} = \frac{l_{pale} \cos \Omega}{r_{pale}} \quad (3.37)$$

et :

$$\sin \alpha_{lv} = \frac{r_p}{r_{pale}} \quad (3.38)$$

où l_{pale} est la longueur de la pale par rapport à O_v et r_{pale} est le rayon de la pale.

En substituant (3.36), (3.37), (3.38) dans (3.33), le ratio de la composante radiale sur la composante tangentielle de la vitesse est :

$$r_{RT} = \frac{(l_{pale} - K)(\delta - \mu \cos \Omega) l_{pale} \cos^2 \Omega}{r_{pale}^2 - (l_{pale} - K)(\delta - \mu \cos \Omega) r_p \cos \Omega} \quad (3.39)$$

Les expressions de K et δ sont données par (3.31) et (3.32).

Ce rapport est fonction des caractéristiques dimensionnelles du disque, de sa vitesse de rotation et du coefficient de frottement.

L'angle horizontal d'éjection théorique d'une particule qui glisse seule sur la pale lors de son accélération se déduit simplement du ratio r_{RT} :

$$\theta_{ej} = \arctan(r_{RT}) \quad (3.40)$$

$$\theta_{ej} = \arctan \left(\frac{(l_{pale} - K)(\delta - \mu \cos \Omega) l_{pale} \cos^2 \Omega}{r_{pale}^2 - (l_{pale} - K)(\delta - \mu \cos \Omega) r_p \cos \Omega} \right) \quad (3.41)$$

1.4.5 VALEURS LIMITES DE L'ANGLE HORIZONTAL D'EJECTION

Dans le cadre de ce travail, les valeurs du coefficient de frottement seront considérées comme comprises entre 0 et 1. La valeur limite 0 est imposée par la signification physique du coefficient qui est nul si les deux corps en contact glissent l'un sur l'autre sans aucun effort. En revanche la borne supérieure mérite quelques remarques puisque dans le cas général, la valeur d'un coefficient de frottement peut dépasser 1. Ashby (2000) indique des coefficients de frottement pour le glissement sec supérieur à 1 notamment dans le cas d'un métal « mou » en frottement contre lui même (plomb sur plomb, cuivre sur cuivre, nickel sur nickel...).

Dans le cadre de l'épandage centrifuge d'engrais, les valeurs des coefficients de frottement mesurées à ce jour ont toujours été inférieures à 1. Patterson et Reece (1962) évaluent les coefficients de frottement entre 0.3 et 0.7.

Hofstee et Huisman (1990) dressent une synthèse des valeurs de coefficients de frottements proposés dans la littérature. Ces valeurs sont comprises entre 0.2 et 0.7. Les mesures de coefficients de frottement réalisées par Hofstee (1992) pour différents engrais glissant sur différents matériaux et pour différentes vitesses, donnent des valeurs comprises entre 0.2 et 0.55.

Les valeurs mesurées par Aphale et al. (2003) pour 9 types d'engrais sont de 0.4, 0.5 ou 0.6.

Pour une situation d'épandage fixée, soit une configuration de disque et une vitesse de rotation données, le ratio r_{RT} est une fonction monotone décroissante du coefficient de frottement μ de la particule sur la pale sur l'intervalle [0 1].

Les expressions des valeurs limites du ratio r_{RT} sont données dans le tableau 3-1 pour les différents cas particuliers de configuration.

En conséquence, l'angle horizontal d'éjection de la particule déduit de (3.41) est borné puisque les valeurs admissibles pour le coefficient de frottement sont bornées. Par exemple dans le cas d'un disque plat équipé de pales radiales, l'angle d'éjection est compris entre 22.5° et 45° (valeurs obtenues en négligeant le coefficient K).

Dans le cas d'un disque tronconique équipé de pales radiales pour lequel le coefficient K est négligeable (par exemple pour $r_{pale} = 0.3$ m et $\dot{\theta} = 84$ rad.s⁻¹) et pour lequel $\Omega = 7.5^\circ$, les angles horizontaux d'éjection sont compris entre 20° et 45°. Ces résultats justifient le choix de la plage de valeurs considérées pour l'angle horizontal d'éjection dans l'exemple proposé au paragraphe 1.3.3 concernant les valeurs d'angle vertical d'éjection.

Valeurs extrêmes du coefficient de frottement	
$\mu = 0$	$\mu = 1$
Disque tronconique équipé de pales inclinées	
$r_{RT} = \frac{\delta(l_{pale} - K)l_{pale} \cos^2 \Omega}{r_{pale}^2 - \delta(l_{pale} - K)r_p \cos \Omega}$ $K = \frac{g \sin \Omega}{\dot{\theta}^2 \cos^2 \Omega}$ $\delta = \cos \Omega$	$r_{RT} = \frac{(l_{pale} - K)(\delta - \cos \Omega)l_{pale} \cos^2 \Omega}{r_{pale}^2 - (l_{pale} - K)(\delta - \cos \Omega)r_p \cos \Omega}$ $K = \frac{g(\cos \Omega + \sin \Omega) - r_p \dot{\theta}^2}{\dot{\theta}^2 \cos \Omega (\cos \Omega - \sin \Omega)}$ $\delta = \sqrt{2 \cos^2 \Omega - \sin \Omega \cos \Omega}$
Disque tronconique équipé de pales radiales	
$r_{RT} = \frac{\delta(r_{pale} - K) \cos^2 \Omega}{r_{pale}}$ Si K est négligeable devant r_{pale} : $r_{RT} = \cos^3 \Omega$	$r_{RT} = \frac{(r_{pale} - K)(\delta - \cos \Omega) \cos^2 \Omega}{r_{pale}}$ Si K est négligeable devant r_{pale} : $r_{RT} = \left(\sqrt{2 \cos^2 \Omega - \sin \Omega \cos \Omega} - \cos \Omega \right) \cos^2 \Omega$
Disque plat équipé de pales inclinées	
$r_{RT} = \frac{l_{pale}^2}{r_{pale}^2 - l_{pale} r_p}$	$r_{RT} = \frac{(l_{pale} - (g / \dot{\theta}^2 - r_p))(\sqrt{2} - 1)l_{pale}}{r_{pale}^2 - (l_{pale} - (g / \dot{\theta}^2 - r_p))(\sqrt{2} - 1)r_p}$
Disque plat équipé de pales radiales	
$r_{RT} = 1$	$r_{RT} = \frac{(r_{pale} - g / \dot{\theta}^2)(\sqrt{2} - 1)}{r_{pale}}$ Si $K = g / \dot{\theta}^2$ est négligeable devant r_{pale} : $r_{RT} = (\sqrt{2} - 1)$

Tableau 3-1 : Expressions des valeurs limites pour le ratio r_{RT} pour différentes configurations de disques.

1.4.6 DISCUSSION RELATIVE AU MODELE DE MOUVEMENT PROPOSE

Le travail présenté dans ce chapitre fournit un modèle analytique pour décrire le mouvement d'une particule seule qui glisse le long d'une pale d'un disque d'épandage centrifuge. L'étude a été menée pour le cas d'un disque tronconique équipé de pales inclinées vers l'arrière. L'angle horizontal d'inclinaison de la pale est caractérisé par la distance r_p qui sépare la pale de l'axe de rotation du disque. Dans le cas d'un disque équipé de pales inclinées vers l'avant, les expressions établies dans ce chapitre doivent être utilisées en remplaçant r_p par son opposé : $-r_p$.

La présente étude considère le mouvement de la particule par rapport à un référentiel galiléen lié au châssis du distributeur d'engrais qui est supposé immobile ou en mouvement de translation à vitesse constante. Le vecteur vitesse et le vecteur accélération de la particule sont alors obtenus par dérivations successives du vecteur position par rapport à ce référentiel. Cette approche conduit à écrire la relation fondamentale de la dynamique en considérant seulement les forces physiques exercées sur la particule sans introduction des forces de repère usuelles (*i.e.* force centrifuge et force de Coriolis).

Bien que les vecteurs vitesse et accélération soient établis par rapport à un référentiel lié au châssis du distributeur, ils peuvent être décomposés sur un repère lié à la pale ce qui simplifie l'écriture de l'équation différentielle régissant le mouvement de la particule.

Cette équation est alors directement obtenue sous une forme qui permet sa résolution de manière analytique.

Pour simplifier l'expression du modèle, il n'a pas été fait de différence entre le coefficient de frottement de la particule avec la pale et le coefficient de frottement de celle-ci avec le disque. Cette distinction a été réalisée par Patterson et Reece (1962) et Olieslagers (1997). Néanmoins, Olieslagers (1997) utilise dans ses simulations numériques des valeurs identiques pour les coefficients de frottement de l'engrais sur la pale et sur le disque.

En pratique, compte tenu du profil en U des pales les plus courantes, il ne paraît pas aberrant de considérer une seule et même valeur de coefficient de frottement de l'engrais avec les différentes surfaces de la pale.

En considérant une valeur unique de coefficient de frottement entre la particule et les surfaces sur lesquelles elle glisse, le modèle de mouvement développé dans ce chapitre peut être confronté aux modèles décrits dans la littérature pour diverses configurations de disques.

Considérons tout d'abord, le cas d'un disque plat équipé de pales radiales en annulant dans les expressions établies dans ce chapitre les paramètres r_p et Ω . Dans ce cas, l'abscisse x_v et la vitesse $\dot{x}_v$ le long de la pale sont respectivement égales à la position radiale r et à la vitesse radiale $\dot{r}$ de la particule. Pour cette configuration, les équations (3.31) et (3.32) se simplifient ainsi :

$$K = \frac{\mu g}{\dot{\theta}^2} \text{ et } \delta = \sqrt{\mu^2 + 1}$$

Les expressions de r et $\dot{r}$ déduites de (3.30) et (3.34) sont alors identiques à celles formulées par Patterson et Reece (1962).

Dans le cas d'un disque tronconique équipé de pales radiales, les expressions de x_v et $\dot{x}_v$ sont obtenues au moyen des équations (3.30) et (3.34) en considérant $r_p = 0$ et l'expression simplifiée de K :

$$K = \frac{\mu g \cos \Omega + g \sin \Omega}{\dot{\theta}^2 \cos \Omega (\cos \Omega - \mu \sin \Omega)}$$

En utilisant les relations géométriques suivantes :

$$r = x_v \cos \Omega$$

$$r_0 = x_{v0} \cos \Omega$$

où r_0 est la position radiale initiale de la particule, les expressions de x_V et $\dot{x}_V$ (dédites de (3.30) et (3.34)) sont les mêmes que celles proposées par Cunningham (1963) pour cette configuration de disque.

Dans le cas d'un disque plat équipé de pales inclinées, les relations géométriques suivantes sont facilement établies:

$$x_V = r \cos \alpha_{lv} \quad (3.42)$$

$$r_p = r \sin \alpha_{lv} \quad (3.43)$$

En considérant ces relations et en réalisant les changements de variables nécessaires dans les équations établies par Cunningham (1963) il est montré que les équations de cet auteur sont les mêmes que celles établies en (3.30) et (3.34) pour x_V et $\dot{x}_V$ en prenant $\Omega = 0$. Les expressions de δ et K sont alors :

$$K = \frac{\mu g}{\dot{\theta}^2} - \mu r_p \text{ et } \delta = \sqrt{\mu^2 + 1}$$

En utilisant les relations (3.42) et (3.43), il peut être montré que l'équation différentielle (3.29) est identique à celle proposée par Olieslagers (1997) et Dintwa et al. (2004) lorsqu'elle est écrite en fonction de x_V , r et α_x dans le cas d'un disque plat (en prenant $\Omega = 0$).

En revanche, des différences apparaissent lorsque la comparaison est réalisée avec l'équation transformée en coordonnées cylindriques proposée par Olieslagers ou Dintwa et al. en prenant $\Omega = 0$.

Ces différences sont dues à l'utilisation de la relation (3.42) qui est différente de la relation géométrique utilisée par ces auteurs.

Les relations géométriques utilisées par Olieslagers, et reprises par Dintwa et al., semblent incorrectes dans la mesure où elles conduisent à définir les fonctions trigonométriques $\cos \alpha_{lv}$ et $\sin \alpha_{lv}$ de manière incohérente. De plus, la définition de la fonction $\cos \alpha_{lv}$ proposée par ces auteurs conduirait à définir une origine des abscisses le long de la pale variable au cours du mouvement de la particule, ce qui n'a pas de sens.

Enfin, dans le cas d'un disque tronconique équipé de pales inclinées, la solution analytique donnée par (3.30) a été comparée avec la solution numérique de l'équation différentielle du mouvement proposé par Olieslagers (1997) écrite en coordonnées cylindriques. Cette équation complexe est résolue en utilisant la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 proposée par le logiciel Matlab. L'abscisse le long de la pale x_V est ensuite déduite du rayon r calculé. Pour cette configuration de disque, la relation géométrique entre x_V et r est fonction de l'angle d'inclinaison horizontale et de l'angle d'inclinaison verticale de la pale comme suit :

$$x_V = \frac{r \cos \alpha_x}{\cos \Omega} = \frac{r}{\cos \Omega} \sqrt{1 - \left(\frac{r_p}{r} \right)^2} \quad (3.44)$$

Pour différentes valeurs de r_p prises égales à 0.01 m, 0.025 m et 0.05 m, la figure 3-6 montre les différences obtenues entre la solution analytique de (3.30) et la solution numérique de l'équation en coordonnées cylindriques proposée par Olieslagers (1997). Les paramètres utilisés pour cette simulation sont : $\dot{\theta} = 73 \text{ rad s}^{-1}$; $x_{V0} = 0.05 \text{ m}$; $\Omega = 5^\circ$ et $\mu = 0.25$.

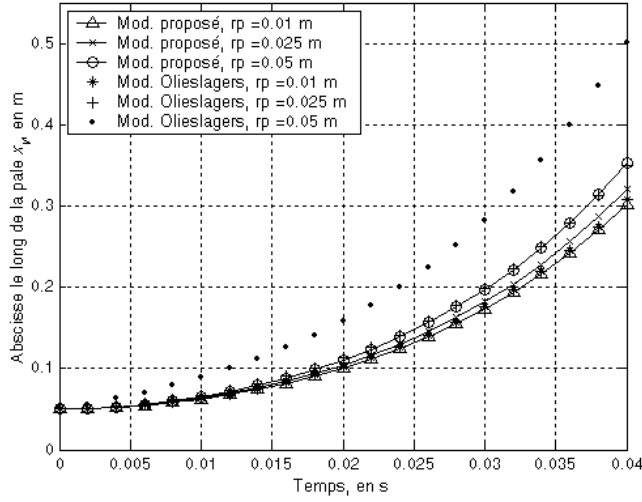


Figure 3-6 : Evolution de l'abscisse de la particule le long de la pale calculée selon le modèle proposé dans ce chapitre et selon le modèle proposé par Olieslagers (1997), pour différentes valeurs du paramètre r_p et pour $\dot{\theta} = 73 \text{ rad s}^{-1}$; $x_{v0} = 0.05 \text{ m}$; $\Omega = 5^\circ$ et $\mu = 0.25$.

Les différences observées entre ces deux modèles augmentent lorsque l'inclinaison horizontale de la pale augmente (augmentation de r_p). Ces discordances sont principalement dues aux transformations de coordonnées nécessaires à l'expression en coordonnées cylindriques de l'équation pour en permettre sa résolution numérique. En effet, l'expression de l'abscisse x_v en fonction du rayon r , de l'angle α_x lié à l'inclinaison horizontale de la pale et de l'angle d'inclinaison verticale de la pale Ω utilisée par Olieslagers est différente de celle proposée en (3.44).

Les écarts constatés entre les deux modèles sont également dus à des projections de forces qui semblent erronées dans le modèle proposé par Olieslagers. Des divergences sont observées au niveau de l'expression des forces physiques qui agissent sur la particule. Concernant le poids de la particule, la projection du vecteur sur la pale est fonction, chez Olieslagers, de l'angle α_x qui correspond à une orientation définie dans le plan horizontal, ce qui est surprenant.

Les projections du poids et de la force de Coriolis sur la pale pour établir la norme de la force de frottement de la particule sur la pale et le disque sont également discordantes avec celles proposées dans ce chapitre.

Des divergences entre le modèle proposé dans ce chapitre et l'équation différentielle proposée par Hofstee (1995) pour la même configuration de disque existent également de manière similaire. Notons que l'équation proposée par Hofstee est elle-même différente de celle proposée par Olieslagers (1997). Néanmoins, dans les deux cas il est étonnant que le terme relatif au vecteur poids de la particule fasse intervenir l'angle horizontal α_x lié à la position de la particule sur la pale au cours de son mouvement. Dans sa publication, Hofstee (1995) ne donnant aucun détail concernant l'établissement des coefficients de son équation différentielle, l'explication des différences constatées est malaisée.

Le ratio r_{RT} de la composante horizontale radiale sur la composante horizontale tangentielle de la vitesse d'éjection établi analytiquement dans ce chapitre peut également être comparé aux expressions proposées dans la littérature.

Dans le cas d'un disque plat équipé de pales radiales, Patterson et Reece (1962) ont établi l'expression de la composante radiale de la vitesse de la particule lorsqu'elle quitte la pale en fonction de la vitesse angulaire. L'examen de leur relation confirme la validité du ratio r_{RT}

donnée en (3.39) lorsqu'il est exprimé pour cette configuration particulière de disque. L'expression se simplifie alors comme suit :

$$r_{RT} = \left(1 - \frac{\mu g}{r_{vane} \dot{\theta}^2}\right) \left(\sqrt{\mu^2 + 1} - \mu\right)$$

Dans le cas d'un disque tronconique équipé de pales radiales, en négligeant le coefficient K , Colin (1997) exprime le ratio des composantes horizontales de la vitesse de la manière suivante :

$$r_{RT} = \cos \Omega \left(\sqrt{\mu^2 + 1} - \mu \tan \Omega - \mu\right) \quad (3.45)$$

Pour cette configuration, en utilisant la même hypothèse concernant la faible incidence du coefficient K , l'équation (3.39) se réduit à l'expression (3.45).

2 MOUVEMENT DE LA PARTICULE APRES SON EJECTION

Pour prédire la répartition au sol de l'engrais à partir des conditions initiales de vol, il est nécessaire de modéliser la phase de vol balistique des particules entre l'instant où elles quittent la pale et le moment où elles arrivent au sol.

L'étude approfondie du mouvement des particules pendant la phase de vol balistique ne fait pas partie des ambitions de cette thèse. Néanmoins, les paragraphes qui suivent apportent les éléments utiles à l'exploitation des conditions initiales de vol balistique pour permettre de déterminer la portée de projection en vue d'une prédiction de la répartition au sol de l'engrais. Ils mentionnent également les difficultés relatives à la détermination des paramètres aérodynamiques des granules éjectés.

2.1 PARTICULE SOUMISE AU POIDS ET A LA FORCE DE TRAÎNÉE

Une modélisation simple du mouvement de la particule dans l'air consiste à considérer pendant la phase de vol deux actions physiques : le poids et la force de traînée.

Le poids s'exprime simplement : $\mathbf{f}_g = -m\mathbf{g}$

où m est la masse de la particule et $\mathbf{g}$ le vecteur accélération de la pesanteur.

La force de traînée est fonction des caractéristiques de la particule et de la vitesse de celle-ci par rapport à l'air. Lorsque la particule évolue dans une masse d'air immobile (absence de vent) la direction de la force de traînée est colinéaire et opposée au vecteur vitesse de la particule. L'expression de la force de traînée est alors :

$$\mathbf{f}_D = -\frac{1}{2} C_D A \rho_{air} v^2 \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|}$$

Avec :	C_D	coefficient de traînée de la particule
	A	surface projetée de la particule
	ρ_{air}	masse volumique de l'air
	v	norme du vecteur vitesse du granule
	$\mathbf{v}$	vecteur vitesse de la particule

L'équation du mouvement s'établit en appliquant le principe fondamental de la dynamique :

$$\mathbf{a} = \mathbf{g} - \frac{1}{2m} C_D A \rho_{air} v^2 \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} \quad (3.46)$$

où $\mathbf{a}$ est le vecteur accélération de la particule.

En posant : $K_a = \frac{1}{2m} C_D A \rho_{air}$, l'expression devient (3.46) :

$$\mathbf{a} = \mathbf{g} - K_a v^2 \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|} \quad (3.47)$$

En pratique, l'intérêt du coefficient K_a est d'englober, pour une particule donnée, l'ensemble de ses propriétés aérodynamiques dans le milieu considéré. Ce coefficient sera qualifié de coefficient de résistance aérodynamique spécifique.

Dans le contexte de l'épandage centrifuge d'engrais, cette modélisation simple considérant une particule soumise seulement à son poids et à la force de traînée est celle qui a été traditionnellement considérée par de nombreux auteurs : Mennel et Reece (1963), Pitt et al. (1982), Griffis et al. (1983), Hofstee et Huisman (1990), Olieslagers et al. (1996), Colin (1997), Grift et Hofstee (2002), Reumers et al. (2003b), Aphale et al. (2003), Bradley et Farnish (2005).

En considérant la particule soumise seulement à son poids et à la force de traînée résultant d'un déplacement dans une masse d'air immobile, la trajectoire de la particule a lieu dans le plan défini par le vecteur vitesse de la particule au moment de l'éjection.

Dans le repère $(O, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$, l'équation du mouvement établie en (3.47) conduit au système d'équations différentielles suivant :

$$\begin{cases} \ddot{x} = -K_a \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \\ \ddot{y} = -K_a \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \\ \ddot{z} = -g - K_a \dot{z} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \end{cases}$$

Dans le cas général, ce système d'équations différentielles non linéaires qui décrit le vol balistique de la particule ne peut pas être résolu analytiquement. Sa résolution peut être envisagée de manière numérique par la méthode d'Euler ou une méthode plus optimisée de type Runge-Kutta.

Cunningham (1963), Pitt et al. (1982) et Olieslagers et al. (1996) citent les travaux de Timoshenko et Young (1948) qui dans le cas où la particule est éjectée selon une direction proche de l'horizontale, approximent la portée du vol de la particule au moyen d'une expression analytique. Deux hypothèses sont formulées pour permettre ce développement. La première consiste à considérer le carré de la composante verticale de la vitesse comme négligeable devant celui de la composante horizontale. La seconde considère que la composante verticale de la force de traînée est proportionnelle à la composante verticale de la vitesse. L'expression analytique de la portée du vol balistique de la particule déterminée sous ces hypothèses est donnée dans l'article de Pitt et al. (1982).

2.2 AUTRES FORCES ENVISAGEABLES

2.2.1 INVENTAIRE DES ACTIONS

Si le poids et la force de traînée conditionnent de manière évidente le mouvement de la particule pendant son vol balistique, il est permis de s'interroger sur l'influence d'autres forces physiques éventuelles.

De nombreuses forces généralement prises en considération dans l'analyse du mouvement d'une particule dans un fluide visqueux peuvent être négligées dans le cas du vol balistique d'un granule d'engrais dans l'air.

La force d'Archimède peut être omise compte tenu du fait que la masse volumique de la particule est de l'ordre de 1000 fois celle de l'air. Du fait de la faible masse volumique et de la faible viscosité de l'air, les forces de masse ajoutée et de Basset peuvent également être négligées.

La masse d'air dans laquelle la particule évolue ne présentant pas de gradient de vitesse, le lift engendré par une distribution non-uniforme de pression peut être ignoré.

Les grains d'engrais ayant une forme relativement sphérique, la force de portance peut de même être ignorée.

D'autres forces ont une incidence difficile à évaluer. La forme dissymétrique des granules peut donner naissance à un couple de rotation sur la particule et intervenir dans le mouvement. D'autre part, lorsque les granules quittent la pale, ils sont proches les uns des autres et l'étude de leur mouvement considérant les particules comme indépendantes peut être erronée. Enfin, au voisinage du disque, les pales créent un flux d'air qui peut également avoir une incidence sur le mouvement des granules dans leur première phase de vol.

Il est également permis de s'interroger sur l'incidence d'un éventuel mouvement de rotation dont une particule pourrait être animée en sortie de pale.

2.2.2 CAS DE L'EFFET MAGNUS

Dans le cas d'une particule sphérique qui roulerait sur la pale, l'accélération acquise lors du mouvement sur le disque pourrait conférer une forte vitesse de rotation à la particule. A titre d'exemple, une sphère de 3 mm de diamètre qui se déplacerait par roulement pur à 100 km/h au moment de l'éjection, aurait une vitesse de rotation de 2950 tours par seconde.

L'incidence de la rotation d'une sphère sur sa trajectoire en vol a été mise en évidence par Magnus (1802-1870) qui a donné son nom à l'effet constaté.

Le principe physique de la déviation due à l'effet Magnus peut être appréhendé à travers l'équation de Bernoulli concernant l'écoulement des fluides. En effet, la conservation de l'énergie implique que lorsque la vitesse d'un fluide augmente, sa pression diminue.

Considérons une particule sphérique en rotation qui se déplace dans l'air. Par frottement, elle engendre autour d'elle un courant d'air dissymétrique comme illustré en figure 3-7. D'un côté de la sphère, la vitesse de rotation s'ajoute à la vitesse de l'air, tandis que de l'autre côté, la vitesse de rotation se soustrait à celle de l'air. Du côté où les vitesses s'ajoutent, la vitesse de l'écoulement se trouve augmentée, ce qui implique une pression diminuée. A l'inverse, du côté où les vitesses se retranchent, l'écoulement est freiné et la pression est augmentée.

Globalement, il en résulte une différence de pression qui se traduit par une déviation du côté où la pression est la plus faible.

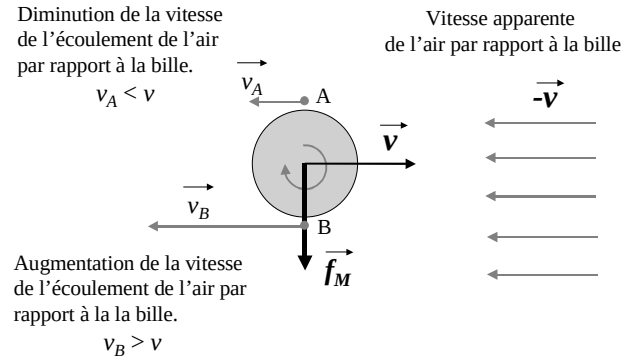


Figure 3-7 : Illustration de l'origine de l'effet Magnus. A et B sont deux volumes élémentaires d'air à proximité de la bille.

Pour une particule en mouvement dans une masse d'air immobile, l'expression vectorielle de l'effet Magnus est traditionnellement :

$$\vec{f}_M = \frac{1}{2} C_M \rho A v^2 \frac{\vec{\omega} \wedge \vec{v}}{\|\vec{\omega} \wedge \vec{v}\|}$$

avec :

ρ	masse volumique de l'air (kg/m^3)
A	surface projetée (m^2)
$\vec{v}$	vecteur vitesse de déplacement de la bille (m.s^{-1})
$\vec{\omega}$	vecteur vitesse de rotation de la bille (rad.s^{-1})
C_M	coefficient de lift dû à l'effet Magnus (sans dimension)

Cette expression traduit que la force s'exerce latéralement au déplacement : force orthogonale à la vitesse de déplacement et à l'axe de rotation du solide.

Dans le cas où la rotation de la particule serait prononcée, l'étude du mouvement de la particule devrait en toute rigueur prendre en considération la relation suivante :

$$I_p \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{T}$$

Avec

I_p	moment d'inertie de la particule
$\vec{\omega}$	vitesse de rotation de la particule sur elle même
$\vec{T}$	couple agissant sur la particule dû aux interactions avec le fluide
t	temps

En pratique, les incertitudes concernant le mouvement d'une particule individuelle entraînée dans un flux de granules sur la pale rendent très difficile la prédiction de la vitesse de rotation (si elle existe) de la particule en sortie de pale. Le coefficient de lift dû à l'effet Magnus est également un paramètre particulièrement délicat à estimer pour un granule d'engrais.

D'autre part, il est permis de s'interroger sur l'évolution du coefficient de traînée de la particule lorsque celle-ci est animée d'un mouvement de rotation.

2.3 PROPRIETES AERODYNAMIQUES

En pratique, la principale difficulté inhérente à la mise en oeuvre des équations du vol balistique, dans le cadre d'un épandage d'engrais, réside dans le choix des valeurs des paramètres qui caractérisent le comportement aérodynamique du granule.

La masse de la particule et la surface projetée ne peuvent être correctement déterminées que si la masse volumique de la particule est connue et si la forme de la particule est bien définie.

Le coefficient de traînée C_D dépend de la forme de la particule et du régime d'écoulement de l'air autour de celle-ci. Le régime d'écoulement est caractérisé par le nombre de Reynolds Re qui pour une particule sphérique de diamètre d_{part} en mouvement dans une masse d'air immobile s'écrit :

$$Re = \frac{\rho_{air} d_{part} v}{\mu_{air}}$$

où μ_{air} est la viscosité dynamique de l'air (en Pa.s), ρ_{air} est la masse volumique de l'air et v est la vitesse de la particule par rapport à l'air.

L'évaluation du coefficient de lift dû à l'effet Magnus C_M est également délicate. Elle est généralement réalisée en fonction du paramètre de spin, qui dans le cas d'une particule sphérique, se définit par le rapport de la vitesse tangentielle de la sphère sur la vitesse de la particule ($\omega r_{part}/v$ avec pour la particule : ω la vitesse de rotation, r_{part} le rayon et v la vitesse dans l'air).

2.3.1 COEFFICIENT DE TRAINEE ET RESISTANCE AERODYNAMIQUE

Le coefficient de traînée est bien modélisé en fonction du nombre de Reynolds dans le cas d'une sphère lisse sans mouvement de rotation. En revanche l'évaluation de sa valeur est délicate dans le cas d'une particule quelconque.

2.3.1.1 Cas d'une particule sphérique

L'évolution du coefficient de traînée pour une sphère lisse en fonction du nombre de Reynolds est illustrée par la figure 3-8.

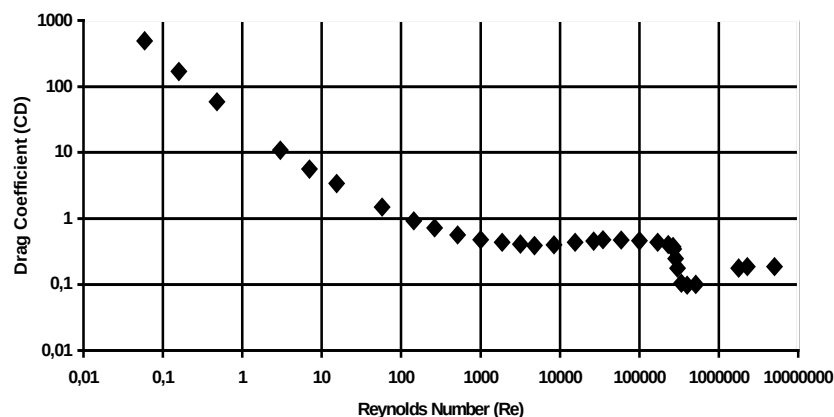


Figure 3-8 : Mesures expérimentales du coefficient de traînée pour une sphère en fonction du nombre de Reynolds. Extrait d'un rapport de l'Université de technologie de Louisiane (Anonyme, 2002).

Le coefficient de traînée d'une sphère a été étudié par de nombreux auteurs et sa valeur a fait l'objet de différentes modélisations en fonction de la plage considérée pour le nombre de Reynolds.

L'expression du coefficient a pu être établie analytiquement par Stokes dans le cas d'un petit nombre de Reynolds. Pour des valeurs plus importantes les expressions dérivent de mesures expérimentales.

Sommerfeld (2000) rappelle les régimes d'écoulement usuellement identifiés et les ajustements utilisés pour modéliser l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds. Ces relations sont données dans le tableau 3-2.

Régime d'écoulement	Coefficient de traînée
$Re < 0,5$ (Régime de Stokes)	$C_D = \frac{24}{Re}$ Stokes (1851)
$0,5 < Re < 10^3$ (Régime de transition)	$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687})$ Schiller et Naumann (1933)
$10^3 < Re < 10^5$ (Régime de Newton)	$C_D = 0.44$
Autour de $Re = 2,5 \cdot 10^5$ (Régime critique)	Forte diminution du coefficient de traînée dû au passage d'un écoulement laminaire à turbulent dans la couche limite
$Re > 4 \cdot 10^5$ (Régime super-critique)	Augmentation constante de C_D

Tableau 3-2 : Régimes d'écoulement et exemples de modélisation du coefficient de traînée associé pour une sphère lisse. Synthèse extraite de Sommerfeld (2000).

Sommerfeld (2000) souligne que le coefficient de traînée peut être altéré par de nombreux phénomènes : turbulence dans l'écoulement, rugosité de la surface de la particule, forme de la particule, effet de mur (présence d'un objet au voisinage du mouvement de la particule), compressibilité du fluide... Des mesures expérimentales spécifiques sont nécessaires pour quantifier l'incidence de ces interactions.

2.3.1.2 Cas d'un granule d'engrais

La valeur du coefficient de traînée C_D a été établie en fonction du nombre de Reynolds pour une sphère, mais est assez délicate à évaluer pour des granules d'engrais.

La détermination des caractéristiques aérodynamiques d'une particule de forme quelconque est généralement réalisée expérimentalement sur la base de l'étude du mouvement de la particule en chute libre.

Lorsque l'accélération devient nulle, le coefficient de résistance aérodynamique spécifique peut être obtenu à partir de la vitesse terminale en utilisant la relation (3.47).

Cette vitesse peut être mesurée en étudiant la chute d'une particule dans une colonne verticale d'air immobile et en mesurant la vitesse dans la dernière phase de la chute.

Hofstee (1992) souligne que le principal problème de cette méthode est de nécessiter une hauteur verticale importante pour permettre à la particule étudiée d'atteindre sa vitesse terminale. D'après l'auteur, pour réaliser une mesure de vitesse dont la valeur s'écarte de moins de 1% de la vitesse terminale, la hauteur de chute doit être de 4 m pour un diamètre de 1 mm et une masse volumique de 1000 kg/m^3 et atteint plus de 55 m pour un diamètre de 5 mm et une masse volumique de 2000 kg/m^3 .

Une autre solution consiste à estimer la vitesse terminale au moyen d'un système de type élutriateur utilisé pour produire un flux d'air vertical de vitesse réglable. Le flux s'oppose alors au mouvement de chute des particules et les maintient en suspension.

En 1990, Hofstee et Huisman font une synthèse des vitesses terminales mesurées en fonction de la taille des particules par différents auteurs pour divers engrais. Les auteurs concluent que pour les engrais, la valeur du coefficient de résistance aérodynamique spécifique est comprise entre 0.025 et 0.25 m^{-1} .

Song et Litchfield (1991) ont déterminé les vitesses terminales pour 19 variétés de graines (maïs, soja, blé, avoine et orge) de céréales au moyen d'un système de type élutriateur. Les auteurs réalisent une analyse des données expérimentales en envisageant différents types de régressions entre des facteurs de forme adimensionnels et la vitesse terminale des graines. Pour le maïs et le soja, ils retiennent le paramètre de sphéricité correspondant au diamètre géométrique moyen divisé par la longueur. Pour les graines de forme plus cylindrique (blé, avoine, orge) ils retiennent le ratio du diamètre de la sphère équivalente sur le diamètre géométrique moyen. Le diamètre géométrique moyen est calculé comme la racine cubique du produit de la longueur, de la largeur et de la hauteur. La sphère équivalente est quant à elle définie comme la sphère qui possède le même volume que la graine.

D'après les auteurs, dans 79% des cas, les écarts entre la vitesse calculée en utilisant le facteur de forme approprié et la vitesse mesurée expérimentalement sont inférieurs à 10 %.

Hofstee (1992) a mis en oeuvre les techniques de chute libre et de système élutriateur dans le but de caractériser les propriétés aérodynamiques de grains d'engrais. Il conclut à de grandes différences entre les résultats obtenus par les deux méthodes et met en doute les valeurs obtenues par le système élutriateur.

Hofstee propose de calculer le diamètre de la sphère qui a le même temps de chute que la particule étudiée. Il propose ensuite de calculer le rapport de ce diamètre sur celui de la sphère équivalente qui est la sphère ayant la même masse que la particule. Ce rapport est défini par l'auteur comme le « coefficient de diamètre ». Il peut être utilisé pour déterminer le coefficient de résistance aérodynamique à partir du diamètre de la sphère équivalente et de la masse volumique de la particule.

Pour faciliter la modélisation du comportement aérodynamique des grains d'engrais Grift et al. (1997) définissent un facteur d'équivalence appelé « q-factor » permettant de prendre en compte le comportement aérodynamique d'une particule réelle par rapport à celui d'une sphère. Ce facteur de correction est défini par les auteurs comme le rapport du « diamètre équivalent » sur le « diamètre correspondant » de la particule. La densité vraie d'un engrais étant connue, le diamètre « correspondant » d'un grain est défini comme le diamètre de la sphère qui aurait la même masse. Le diamètre « équivalent » est quant à lui déterminé à partir de la mesure du temps de chute libre du grain. Le diamètre de la sphère présentant le même

temps de chute (calculé sur la base d'un modèle de chute libre préétabli) définit le « diamètre équivalent » de la particule.

Walker et al. (1997) ont prolongé cette étude en proposant d'estimer le coefficient de traînée à partir de la mesure d'un « facteur de forme » sur la base d'une régression linéaire (établie avec un coefficient de détermination de 0.58).

La relation proposée est : $C_D = 0.4387 + 0.002536 \times S$ où S est le facteur de forme.

Pour déterminer le facteur de forme d'un granule d'engrais, les auteurs ont recouru à l'acquisition d'images numériques de ce granule. Dans un premier temps, le centre de gravité de l'image du granule est déterminé puis les distances radiales qui séparent le contour de ce centre sont calculées sur 360° selon un pas de 1° .

Le rayon du cercle qui ajuste au mieux (au sens des moindres carrés) le contour du granule est ensuite déterminé. Pour traduire les irrégularités de surface du granule, les auteurs calculent la somme des valeurs absolues des différences entre les distances radiales et le rayon du cercle donnant le meilleur ajustement. Cette grandeur est ensuite divisée par le rayon du cercle donnant le meilleur ajustement de manière à produire un paramètre adimensionnel. Le facteur de forme proposé par les auteurs est calculé par l'addition des valeurs obtenues pour deux prises de vue à 90° du même granule.

Aphale et al. (2003) proposent de déduire le coefficient de résistance aérodynamique spécifique de la particule dans l'air à partir du coefficient de résistance aérodynamique spécifique de la particule dans l'eau. Cette méthode présente deux avantages principaux. En chute libre, la particule atteint sa vitesse terminale après avoir parcourue environ 1% de la distance qui aurait été nécessaire dans l'air. D'autre part, la vitesse terminale dans l'eau est de l'ordre de 5% de la valeur obtenue dans l'air, ce qui en facilite la mesure. Néanmoins, une attention particulière est à porter sur la validité de correspondance des régimes d'écoulement. Les valeurs du coefficient de résistance aérodynamique spécifique K_a obtenues pour 16 types d'engrais différents s'échelonnent de 0.1 à 0.46 m^{-1} .

En utilisant un système de type élutriateur, Csizmazia et Polyak (2001) mesurent des valeurs de coefficient de résistance aérodynamique (correspondant à la grandeur $m.K_a$) comprises entre 39.10^{-7} et 55.10^{-7} kg/m pour un engrais NPK 15-15-15 ; entre 13.10^{-7} et 496.10^{-7} kg/m pour un engrais NPK 2-18-18 ; entre 11.10^{-7} et 179.10^{-7} kg/m pour de l'ammonitrate et entre 36.10^{-7} et 143.10^{-7} kg/m pour du chlorure de potassium. La grande différence entre les plages de valeurs obtenues pour le NPK 15-15-15 et le NPK 2-18-18 est curieuse. Les valeurs relativement similaires obtenues pour l'ammonitrate et le chlorure de potassium sont également surprenantes.

Griffis et al. (1983) ont utilisé un système de type élutriateur pour déterminer le coefficient de résistance aérodynamique (correspondant à la grandeur $m.K_a$) correspondant à différentes fractions de taille de particules pour deux engrais différents. Les valeurs obtenues sont comprises entre $1,5.10^{-4}$ et 17.10^{-4} g/m .

Ritter et al. (1980) utilisent également un système de type élutriateur pour obtenir les coefficients de résistance aérodynamique, mais ne communiquent aucune valeur.

En pratique, lorsque des simulations d'épandages sont réalisées sans mesure spécifique des caractéristiques aérodynamiques correspondant à l'engrais utilisé, les choix et les valeurs utilisées par les auteurs sont très variés.

En faisant l'hypothèse que les particules sont relativement sphériques, certains auteurs choisissent un coefficient de traînée proche de celui connu pour une sphère lisse en régime de Newton.

De manière générale, Pitt et al. (1982) ont choisi de prendre $C_D = 0.46$. Olieslagers et al. (1996) ont choisi de prendre $C_D = 0.44$ pour simuler l'épandage de nitrate d'ammonium calcique. Pour leur simulation de vol balistique concernant les granules d'ammonitrate d'un diamètre moyen de 2.18 mm éjectés à une vitesse moyenne de l'ordre de 20 m.s^{-1} , Grift et Hosftee (2002) ont choisi de prendre $C_D = 0.4$. Reumers et al. (2003b) assimilent les particules d'engrais à des sphères et prennent $C_D = 0.44$.

Dans le cas de particules de formes irrégulières Mennel et Reece (1963) proposent de considérer $C_D = 1.2$ lorsque $Re > 50$, le nombre de Reynolds étant calculé à partir du diamètre équivalent de la particule déterminé sur la base de la maille du tamis qui la laisse passer.

Dans leur étude concernant la ségrégation des granules en fonction de leur taille lors de l'épandage centrifuge de mélanges d'engrais, Bradley et Farnish (2005) ont opté pour un coefficient de traînée égal à 0.6 en considérant que cette valeur légèrement au-dessus de celle attribuée à une sphère prend en compte la non sphéricité des granules d'engrais.

2.3.2 COEFFICIENT DE TRAINEE ET COEFFICIENT DE LIFT POUR UN PROJECTILE SPHERIQUE EN ROTATION.

Alaways (1998) rappelle que les premières mesures expérimentales du coefficient de traînée et du coefficient de lift dû à l'effet Magnus ont été réalisées par Maccoll (1928) sur une sphère en bois d'une quinzaine de cm de diamètre. L'évolution des valeurs de ces coefficients est représentée sur la figure 3-9 en fonction du paramètre de spin.

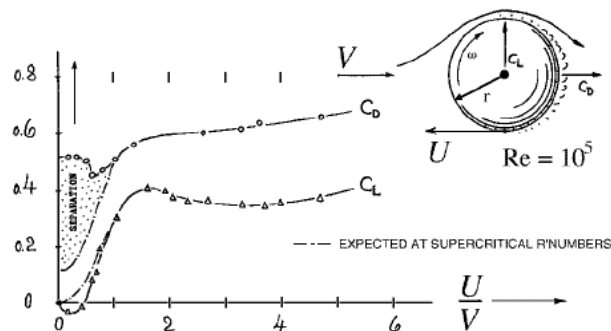


Figure 3-9 : Coefficient de traînée et coefficient de lift mesurés par Maccoll (1928, cité par Alaways, 1998) en fonction du paramètre de spin pour un nombre de Reynolds de 10^5 .

Dans la littérature, la plupart des travaux qui abordent les effets de lift d'un projectile concernent des applications sportives. En 2000, Mehta recensait 76 références s'intéressant aux propriétés aérodynamiques des balles utilisées dans différents sports (notamment golf, baseball, cricket, tennis, football).

Alaways (1998) s'est intéressé aux caractéristiques aérodynamiques des balles de baseball en effectuant une synthèse des principaux travaux réalisés sur ce sujet et en réalisant des mesures du coefficient de traînée et du coefficient de lift dû à l'effet Magnus. Le dispositif expérimental utilisé pour observer la trajectoire des balles utilise 10 caméras numériques associées à un éclairage stroboscopique. La figure 3-10 présente à titre d'exemple les valeurs

obtenues pour le coefficient de lift en fonction du paramètre de spin et le coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds.

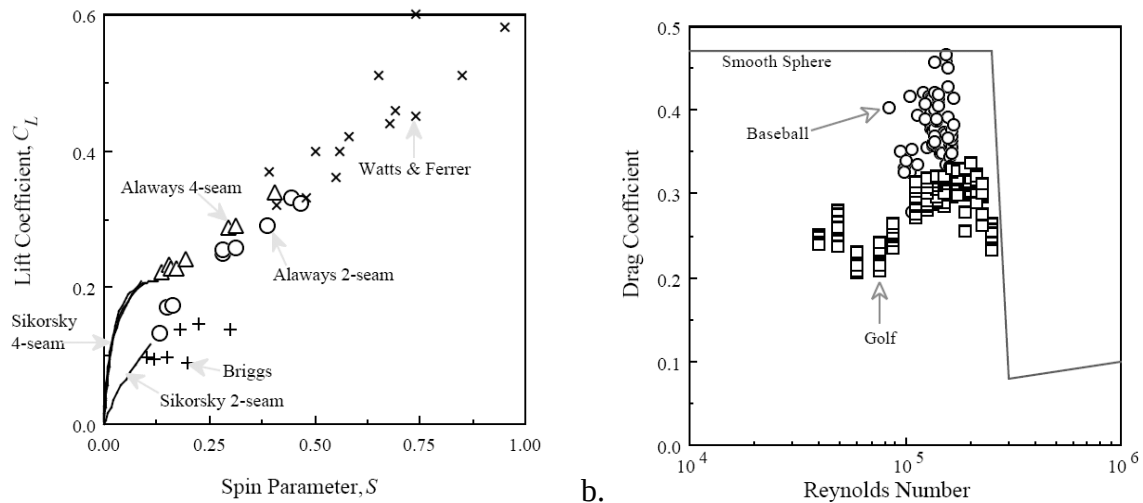


Figure X3-10 : a – Coefficients de lift obtenus par Alaways (1998) (noté « Sikorsky » et « Alaways »), Briggs (1959), Watts et Ferrer (1987). b – Coefficients de traînée obtenus par Alaways (1998) pour une balle de baseball et par Smits et Smith (1994) pour une balle de golf. Ces graphiques sont extraits de Alaways (1998).

Alaways (1998) conclut à une forte influence de l'orientation des coutures de la balle sur le coefficient de lift pour les faibles valeurs du paramètre de spin. Il souligne également que la rugosité de la balle induit un coefficient de traînée inférieur à celui d'une sphère lisse. Cette diminution du coefficient de traînée est toutefois moins prononcée que celle observée pour une balle de golf dont la rugosité est plus importante.

Carré et al. (2002) ont étudié l'influence du spin d'un ballon de football sur sa trajectoire. Deux caméras vidéo rapides sont utilisées pour analyser le mouvement du ballon. La première caméra (240 images par seconde) est utilisée pour caractériser les conditions initiales du mouvement alors que la seconde (120 images par seconde) couvre la trajectoire du ballon sur une dizaine de mètres. Les auteurs ont expérimentalement mis en évidence les variations des coefficients de traînée et de lift en fonction de la vitesse de rotation du ballon .

2.4 MODELE RETENU

Dans le cadre de cette thèse, le modèle de vol balistique retenu se limitera à la prise en compte du poids et de la force de traînée. Cette approche est celle qui, à ce jour, a été utilisée par les auteurs ayant cherché à déterminer des portées de projection de granules d'engrais ou ayant cherché à simuler l'intégralité d'une nappe de répartition.

Malgré son apparente simplicité, la mise en oeuvre pratique de cette modélisation se heurte au choix délicat des paramètres aérodynamiques correspondant aux particules d'engrais considérées.

D'autres phénomènes physiques peuvent sans aucun doute influencer le mouvement des granules pendant leur phase de vol balistique mais l'absence d'étude quantitative dans le cas de l'engrais rend leur prise en compte hasardeuse.

L'effet Magnus est probablement l'une des actions qui peut modifier de manière sensible la trajectoire d'une particule par rapport à celle qui sera déterminée par le modèle qui a été retenu. Dans le cas d'un flux de granules en mouvement sur la pale d'un distributeur centrifuge, il semble néanmoins peu probable que les granules puissent être animés d'un important mouvement de rotation compte tenu de leur rugosité et de leurs contacts mutuels. En revanche, lorsque des particules de forme relativement sphérique se déplacent de manière individuelle sur la pale, un mouvement de rotation peut facilement s'établir (Patterson et Reece, 1962 ; Olieslagers, 1997 ; Aphale et al., 2003).

Ces suppositions seront confirmées ultérieurement par l'observation de la courbure des trajectoires sur des images d'épandage acquises en filé.

3 CONCLUSION

Les expressions établies dans ce chapitre pour modéliser le mouvement de la particule sur le disque couvrent les configurations de disques plats ou tronconiques équipés de pales rectilignes, radiales ou inclinées.

L'analyse cinématique du mouvement d'une particule a permis de montrer que la composante horizontale et la composante verticale de la vitesse d'éjection peuvent être obtenues en fonction des caractéristiques dimensionnelles du disque, de la vitesse de rotation de celui-ci et de l'angle horizontal d'éjection. La mesure de cet angle permettra donc d'estimer la vitesse des grains d'engrais en sortie de pale.

Les relations établies pour l'analyse cinématique ont ensuite été utilisées pour déterminer l'expression du vecteur accélération de la particule nécessaire à l'analyse dynamique du mouvement. Le modèle de mouvement établi a été comparé aux modèles déjà existants dans la littérature. Il apparaît comme une généralisation des modèles décrits par Patterson et Reece (1962) et Cunningham (1963). Il présente cependant des différences avec les modèles proposés par Hofstee (1995), Olieslagers (1997) et Dintwa et al. (2004) (cet auteur reprenant le modèle d'Olieslagers) qui posent certains problèmes de projections géométriques.

L'étude dynamique du mouvement de la particule a conduit à exprimer de manière théorique le ratio de la composante horizontale radiale et de la composante horizontale tangentielle de la vitesse d'éjection ce qui permet de borner les valeurs admissibles pour l'angle d'éjection en fonction de la plage de valeur envisageable pour le coefficient de frottement de l'engrais sur la pale. L'expression du ratio des composantes de la vitesse proposée dans ce chapitre généralise les relations qu'avaient établies Patterson et Reece (1962) et Colin (1997) pour des configurations plus simples.

Réciproquement la mesure expérimentale de l'angle horizontal d'éjection des grains d'engrais pour une configuration de disque donnée, permet d'imaginer une caractérisation de l'engrais à partir du coefficient de frottement qui en serait déduit. Des éléments de réflexion seront fournis sur cet aspect dans le chapitre consacré aux résultats expérimentaux.

En ce qui concerne le vol balistique, le modèle couramment utilisé dans la littérature consiste à considérer une particule seule soumise à deux actions physiques : son poids et la force de traînée. En dépit de son apparente simplicité vis à vis des autres actions qui pourraient être envisageables, la mise en oeuvre de ce modèle n'est pas évidente dans le cadre d'un épandage d'engrais. La principale difficulté réside dans l'évaluation du coefficient de résistance aérodynamique spécifique des grains d'engrais.

Dans le cas de particules sphériques, susceptibles d'acquérir un mouvement de rotation lors de leur accélération sur la pale d'un distributeur centrifuge, une difficulté supplémentaire peut apparaître du fait de l'incidence d'une force de lift liée à l'effet Magnus.

Chapitre 4 : Dispositif expérimental

L'objectif de ce chapitre est de présenter le dispositif expérimental mis en oeuvre pour acquérir en filé une image des trajectoires empruntées par les particules éjectées d'un disque d'épandage centrifuge.

Pour des raisons de coût et de valorisation des investissements réalisés antérieurement par le Laboratoire en Génie des Agroéquipements et Procédés, le dispositif expérimental reprend une partie du matériel (cartes d'acquisition, capteurs, actionneurs) utilisé lors du travail de thèse de Frédéric Cointault (2001).

1 DISPOSITIF MECANIQUE ET SYSTEME D'ACQUISITION

1.1 DISPOSITIF DE DISTRIBUTION CENTRIFUGE

De manière générale, le dispositif d'épandage mis en oeuvre pour cette étude intègre des éléments similaires aux organes fondamentaux d'un distributeur centrifuge du commerce. Les assemblages sont réalisés sur plusieurs structures indépendantes pour faciliter la manipulation du dispositif dans un espace restreint et pour offrir plus de flexibilité dans les possibilités de réglage et de prise de vue.

Le dispositif se compose de deux châssis. Le premier châssis permet l'approvisionnement du système d'épandage en granules. Il est constitué d'une trémie d'un volume utile de 60 L environ, fixée à une potence par l'intermédiaire d'un capteur de pesée. La base de la trémie est équipée d'une trappe actionnée par un moteur électrique commandé à distance. Le degré d'ouverture de la trappe fixe le débit de l'engrais vers le système d'épandage. Cette première structure supporte également une goulotte d'alimentation permettant de diriger le flux gravitaire des granules du fond de la trémie vers le disque. Cette goulotte permet le réglage de la position du point de chute de l'engrais sur le disque.

Le second châssis constitue le dispositif d'épandage proprement dit et supporte les organes en mouvement. Il comporte un seul disque d'épandage, entraîné par un moteur électrique triphasé à 4 pôles (vitesse de synchronisme : 1500 tr/min) d'une puissance nominale d'environ 4 kW. L'alimentation du moteur est réalisée par un variateur de fréquence pour permettre le réglage de la vitesse de rotation.

Le contrôle de la vitesse de rotation est réalisé par un capteur de vitesse inséré entre le disque d'épandage et l'arbre moteur.

Le disque d'épandage se compose d'un plateau rotatif plan (réglé horizontalement) sur lequel peuvent être montés différents jeux de pales. Chaque jeu se compose de deux pales, de même rayon, prévues pour un montage en opposition de manière radiale ou inclinée. Les pales utilisées dans le cadre de cette étude sont en acier inoxydable avec un profil en U ou en V.

Les configurations tronconiques du disque sont obtenues en équipant le plateau rotatif plan de supports triangulaires et d'un tronc de cône réalisé en tôle ou en matière plastique. La figure 4-1 présente deux exemples de configurations du disque d'épandage.

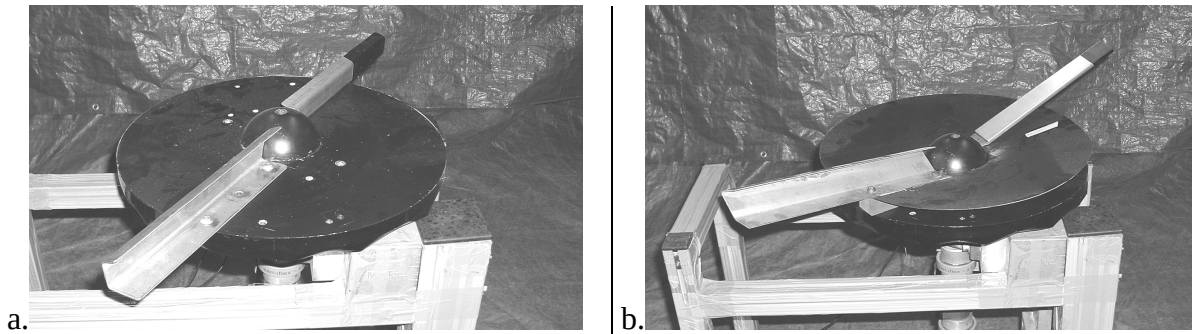


Figure 4-1 : Exemple de configurations de disques utilisés pour les essais d'épandage. a – Disque plat équipé de pales radiales avec profil en U ; b – Disque tronconique équipé de pales inclinées vers l'avant avec profil en V.

Un déflecteur destiné à réduire le passage des granules incorrectement pris en pale (« incontrôlés ») dans le champ de vision peut si besoin venir s'adjoindre au dispositif mécanique.

Une ossature démontable a été réalisée pour confiner les projections des granules éjectés par le dispositif d'épandage dans un espace de 3 m x 4 m d'emprise au sol et de 2 m de hauteur. Cette structure parallélépipédique supporte une bâche plastique jouant le rôle de collecteur de granules et un ensemble de bâches latérales évitant les projections à l'extérieur de l'espace de travail. Des pans de tissus sont disposés sur toute la périphérie du volume de confinement de manière à amortir les chocs et à éviter les rebonds des granules en direction du champ de vision de la caméra.

La figure 4-2 présente la disposition des principaux organes du dispositif de distribution centrifuge et du dispositif d'acquisition des images.

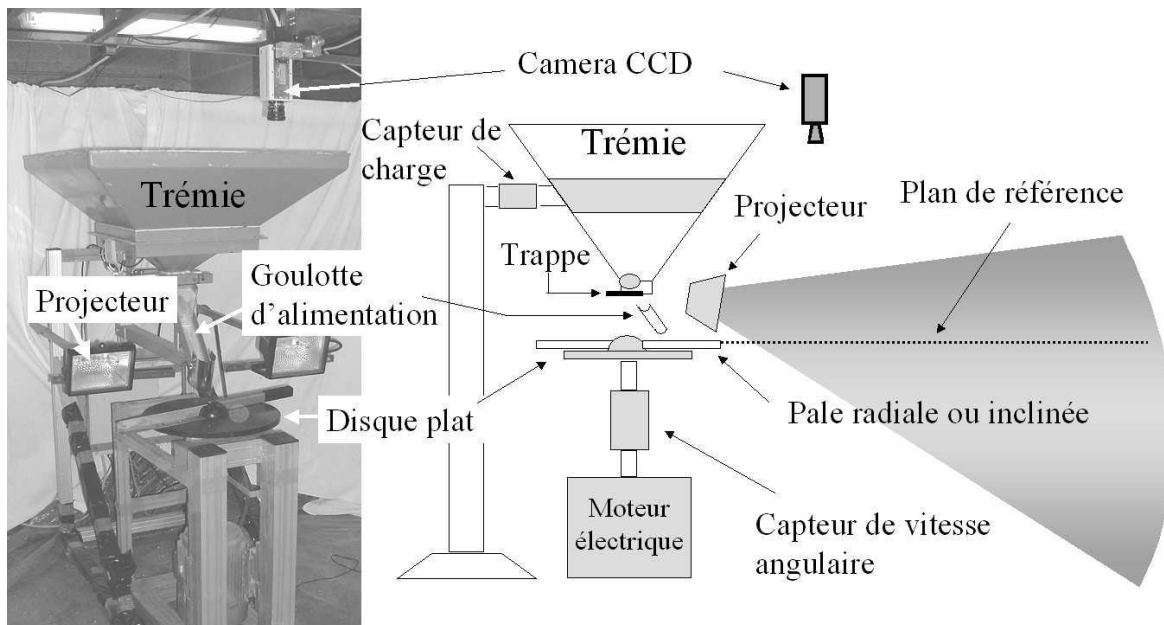


Figure 4-2 : Vue générale du dispositif expérimental (équipé ici d'un disque plat).

L'acquisition des signaux délivrés par les capteurs (capteur de vitesse et capteur de charge) est réalisée via une carte PCI National Instruments de type 6023E comportant 8 entrées-

sorties numériques et 8 entrées-sorties analogiques. Les signaux transitent préalablement par un conditionneur de signal National Instruments de type SC-2043-SG nécessaire pour la conversion des signaux issus des jauges de contraintes (capteur de charge). Les données sont accessibles via un ordinateur équipé du logiciel LabView (version 5.1).

1.2 SYSTEME D'ACQUISITION DES IMAGES

Le système d'acquisition des images en filé se compose d'une caméra équipé d'un objectif grand angle, d'une carte d'acquisition et d'un système d'éclairage. La caméra est placée à environ 1 m au dessus du plan du disque d'épandage (figure 4.2) de manière à ce que son champ de vision couvre la zone d'éjection.

1.2.1 CAMERA

Les images sont acquises au moyen d'une caméra CCD numérique à transfert de trame Kodak Megaplus ES 1.0/MV. Cette caméra monochrome travaille avec une dynamique de 8 bits. La zone photosensible utile de la matrice CCD est de 1008 x 1018 pixels de $9 \times 9 \mu\text{m}^2$ chacun.

Le choix d'une caméra avec capteur CCD peut être situé dans le contexte des caméras CCD ou CMOS actuellement commercialisées.

Les capteurs d'images à transfert de charges CCD (Charge Coupled Device) ont acquis un niveau de performance qui leur confère aujourd'hui leur légitimité pour répondre aux exigences des applications scientifiques. Dans les applications industrielles, ces capteurs sont en revanche fortement concurrencés par les capteurs CMOS (« Complementary Metal Oxyde Semiconductor ») dont la technologie relève d'une filière de production de masse en électronique, et permet l'intégration de fonctionnalités supplémentaires. Les différences fondamentales entre les deux types de capteurs se situent au niveau de leur architecture. Dans les dispositifs CCD, les charges sont transférées de proche en proche d'un site à son voisin ce qui implique que la lecture d'un site photosensible ne peut être réalisée indépendamment de celle des autres sites. Dans le cas des capteurs CMOS à pixels actifs, les transistors présents dans chaque pixel commandent l'intégration du flux lumineux, la sélection des pixels et amplifient le signal avant de le transmettre par des lignes métalliques qui parcourent la matrice et rendent chaque pixel directement adressable.

Les capteurs CMOS sont ainsi moins chers et peuvent intégrer des fonctions de lecture de trame, de fenêtrage, de conversion analogique-numérique... En contrepartie les capteurs CMOS présentent un facteur de remplissage de l'ordre de 40 à 60 % alors qu'il peut atteindre près de 100% pour les capteurs CCD.

Les capteurs CMOS souffrent également d'un bruit spatial et d'un bruit temporel plus importants. La non-uniformité spatiale des capteurs est due au fait que les transistors de chaque pixel n'ont pas tous rigoureusement les mêmes caractéristiques. Le niveau de bruit temporel, dont les composantes ont notamment été étudiées par Tian et al. (2001) est quant à lui plusieurs fois supérieur à celui des capteurs CCD.

Les capteurs CMOS commercialisés aujourd'hui souffrent encore d'un rapport signal sur bruit inférieur à celui des capteurs CCD et d'une sensibilité plus faible.

Dans le cadre de la phase d'étude et de validation d'une méthode d'analyse de l'éjection par imagerie, le choix d'une caméra CCD se justifie donc de manière à limiter au maximum les défauts de l'acquisition de l'image engendrés par le capteur, éliminant ainsi une source de difficulté supplémentaire. De même, dans ce contexte, le capteur de 1008 x 1018 pixels

permet de doter le dispositif expérimental d'un système d'acquisition ayant une résolution suffisante pour envisager différents modes de prise de vue et garantir une certaine souplesse de mise en œuvre.

1.2.2 CARTE D'ACQUISITION

L'ordinateur utilisé pour l'obtention des images est équipé d'une carte d'acquisition permettant d'assurer l'interface avec la caméra. Il s'agit d'une carte PCI Matrox Meteor II Digital. Elle permet notamment l'acquisition d'images en continu selon la cadence de la caméra (15 images par seconde) ou de manière contrôlée sur la base d'un signal délivrant une impulsion sur une entrée prévue à cet effet.

En pratique, l'acquisition d'une image d'épandage destinée à une exploitation informatique est réalisée en synchronisant le début de la phase d'intégration avec une position angulaire de la pale. La détection de la position est réalisée au moyen d'une diode émettrice et d'une diode réceptrice qui détecte par réflexion le passage d'une pastille blanche collée sous le disque d'épandage.

Le logiciel Matrox-Intellicam permet l'exploitation de la caméra via la carte d'acquisition. Il est notamment utilisé pour l'acquisition proprement dite des images d'épandage, le choix du temps d'intégration du CCD, et la mise en station de la caméra (en permettant de visualiser en temps réel la position du point principal dans l'image).

Les images sont stockées sur le disque dur de l'ordinateur.

1.2.3 OPTIQUE

La caméra est équipée d'un objectif de marque Pentax Cosmicar de 8.5 mm de focale. Compte tenu de la taille du CCD, cette focale permet d'obtenir la couverture d'un champ de $1 \times 1 \text{ m}^2$ dans le plan horizontal du disque d'épandage lorsque la caméra est située à 1 m au dessus du disque.

La plupart des prises de vues réalisées dans le cadre du développement de la méthode d'analyse des images acquises en filé ont été effectuées dans ces conditions. Néanmoins, la hauteur de la caméra par rapport au disque a été portée à environ 1.20 m pour permettre de couvrir une plage angulaire plus large lors des prises de vues destinées à l'estimation de la distribution angulaire du flux.

1.2.4 SUPPORT ET ORIENTATION DE LA CAMERA

Le support de la caméra est indépendant des châssis du système de distribution centrifuge présentés précédemment. Il se compose d'une structure rigide solidement fixée aux poutres en béton qui traversent le plafond du local dans lequel les essais sont réalisés. La conception modulaire de la structure permet une grande flexibilité dans le positionnement de la caméra au dessus de la scène.

Le bras qui maintient la caméra comporte une tête de réglage utilisant deux jeux de vis micrométriques qui permettent une mise en station fine de la caméra. L'axe de visée de la caméra est ainsi réglé verticalement en faisant coïncider le point principal de l'image acquise avec sa projection orthogonale au sol (donnée par un fil à plomb). L'erreur de verticalité est considérée comme inférieure à 0.2° .

Le plateau rotatif du système d'épandage étant par ailleurs réglé à l'horizontale, au moyen d'un niveau de maçon, l'axe de la prise de vue peut être considéré comme perpendiculaire à ce plan de référence et donc parallèle à l'axe de rotation du disque d'épandage.

1.2.5 SYSTEME D'ECLAIRAGE

La configuration de l'illumination de la scène est choisie de manière à rehausser dans l'image les traces des trajectoires empruntées par les granules lorsqu'ils quittent le disque d'épandage.

Dans un premier temps un éclairage vertical a été mis en oeuvre en plaçant des projecteurs de part et d'autre de la caméra et en orientant le flux lumineux de manière verticale. Le principal inconvénient de cette disposition est lié à l'éclairage de l'arrière plan. En effet le sol est alors éclairé de manière frontale, ce qui engendre de fortes disparités dans l'image pouvant aller jusqu'à la saturation.

Dans un second temps, l'éclairage a été orienté dans un plan proche de celui du disque. Les projecteurs sont alors placés à proximité immédiate du disque d'épandage et les granules éjectés sont éclairés par l'arrière lors de leur vol. Un meilleur contraste des traces laissées par les granules par rapport à l'arrière plan a ainsi pu être obtenu.

Les projecteurs utilisés pour l'éclairage de la scène sont de simples projecteurs halogènes du commerce de 500 W alimentés par des variateurs d'intensité.

Il est permis de s'interroger sur l'intérêt d'éclairer les granules avec une couleur particulière pour accentuer les traces laissées dans l'image par rapport à l'arrière plan. A titre indicatif des mesures de réflectance ont été réalisées sur un grain d'ammonitrate (figure 4-3). Les courbes de réflectance obtenues confirment l'intuition en ne présentant pas de pic particulier entre 450 et 1000 nm. Les granules d'ammonitrate ne présentent donc pas de particularité intéressante dans la plage de longueur d'onde exploitable par les caméras CCD. En toute rigueur cette caractérisation pourrait être réalisée pour les différents types d'engrais. Néanmoins, même si certains engrais ont une réponse spectrale particulière, il semble peu intéressant de développer un système d'imagerie spécifique à un type de granule.

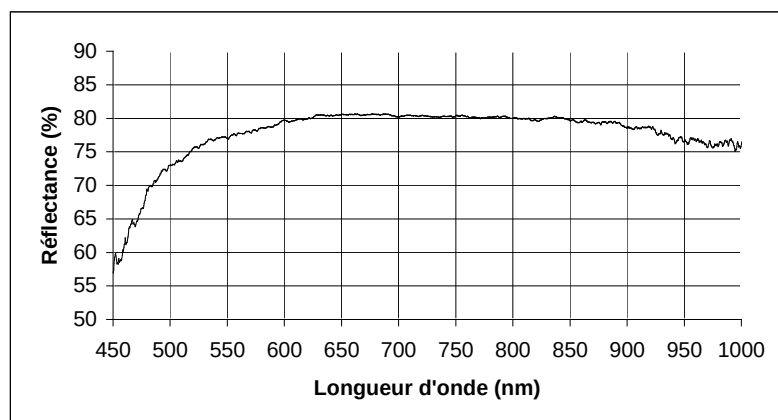


Figure 4-3 : Réflectance d'un granule d'ammonitrate en fonction de la longueur d'onde.

La réponse spectrale d'un granule d'engrais de type ammonitrate étant relativement uniforme, le problème de rehaussement des traces laissées par les granules dans l'image par rapport à l'arrière plan peut être abordé en cherchant à minimiser le flux lumineux en provenance de ce dernier. Dans le cas d'une application sur une parcelle agricole la fenêtre spectrale

intéressante est à raisonner en fonction de la réflectance du sol (globalement croissante de 400 à 1000 nm) et de la réflectance de la culture (présentant un pic entre 500 et 600 nm puis une très forte évolution à partir de 700-750 nm).

Concernant l'objectif du travail décrit dans ce document, l'acquisition des images étant réalisée en laboratoire avec un arrière plan artificiel, l'utilisation d'un éclairage d'une couleur particulière ou d'un filtre placé devant l'objectif de la caméra pour atténuer l'incidence de l'arrière plan n'est pas envisagée.

1.2.6 ARRIERE PLAN

Les prises de vues réalisées pendant l'épandage des granules étant effectuées en statique dans un espace confiné, les granules éjectés tapissent rapidement le sol de la zone couverte par la caméra et engendrent un bruit d'arrière plan important. D'autre part, sous certaines conditions d'éclairage (notamment lorsque celui-ci est orienté verticalement), des réflexions lumineuses sur la bâche plastique recouvrant le sol dégradent la qualité des images acquises.

De manière à éliminer ces inconvénients, deux solutions ont été mises en oeuvre lors des prises d'images. La première consiste à tapisser le sol de plaques de plastique noires brillantes et inclinées d'environ 45° par rapport à l'horizontale. La seconde consiste à tendre un tissu sombre en forme de cône de manière à empêcher la stagnation des granules dans la zone située à proximité du disque d'épandage.

2 OPERATIONS DE CALIBRATION

L'objet du travail décrit dans ce document est de réaliser des mesures dimensionnelles dans l'image de manière notamment à estimer l'angle d'éjection des granules accélérés par le dispositif centrifuge. Les coordonnées des points de l'image doivent donc être une représentation la plus fidèle possible de la position des granules dans l'espace au cours de leur mouvement.

En pratique, la caméra et son optique induisent des distorsions. Le but des opérations de calibration est d'estimer, sur la base d'un modèle, les paramètres caractérisant ces déformations de manière à ensuite permettre de reconstituer fidèlement les informations spatiales qui sont observées. Cette étape s'avère indispensable pour extraire correctement des informations métriques d'une image et consiste à déterminer les paramètres intrinsèques qui caractérisent la caméra et son objectif. Ces paramètres seront ensuite utilisés pour rectifier les images avant traitement.

2.1 METHODE UTILISEE

Les problèmes de calibration ne sont pas récents. Depuis la fin du 19^{ième} siècle de nombreuses méthodes ont été développées à travers les époques en fonction des instruments utilisés et en fonction de l'évolution des besoins en photogrammétrie puis en vision numérique (Clarke et Fryer, 1998).

Dans le cas des caméras CCD, les méthodes utilisent essentiellement le modèle optique du sténopé auquel il convient d'associer un modèle de distorsion pour prendre en compte les déformations induites par l'objectif.

Le principe des méthodes traditionnellement utilisées peut être résumé en trois étapes. D'abord une série d'images est acquise sur un objet de référence à deux ou trois dimensions. Ensuite, cette série est analysée de manière à estimer la valeur des paramètres qui minimisent l'erreur entre un modèle de déformation et les observations issues des images. Les valeurs obtenues caractérisent alors l'ensemble objectif-caméra. Enfin, les valeurs attribuées à chacun des paramètres sont utilisées pour rectifier les images des scènes dans lesquelles des mesures dimensionnelles sont envisagées.

2.1.1 CHOIX DE L'OBJET DE REFERENCE

Pour des raisons de simplicité, l'objet de référence a été choisi sous la forme d'un plan (deux dimensions) permettant l'obtention d'une grille orthogonale de points. Pour obtenir cette grille, un réseau de disques (Heikkilä et Silvén, 1996) dont la détermination du centre de gravité est aisée, pourrait a priori paraître une bonne solution. Mais lorsque le plan des disques n'est pas parallèle au plan de l'image, le centre de gravité ne correspond plus rigoureusement au centre du disque. Un compromis doit alors être trouvé entre diminution du diamètre des disques et précision du calcul du barycentre.

Le choix d'un objet de référence sous la forme d'un damier (Bouguet, 2003) formé de carrés alternativement noirs et blancs s'avère finalement préférable en définissant les points caractéristiques comme les intersections des lignes et des colonnes définis par les coins des carreaux extraits sur l'image.

En pratique, le damier qui a été utilisé (figure 4-4) pour calibrer le système optique comporte 12 lignes et 12 colonnes utiles, formé de carrés de 40 mm de coté.



Figure 4-4 : Damier utilisé comme objet de référence pour la calibration de la caméra équipée de son objectif.

2.1.2 MODELE DE DETERMINATION DES PARAMETRES INTRINSEQUES

Les paramètres intrinsèques qui caractérisent la caméra et son optique sont la longueur focale, la position du point principal (intersection de l'axe de visée avec le plan image) et les coefficients de distorsions. Il convient parfois d'ajouter à ces paramètres un facteur d'échelle et un facteur d'angle (« skew factor ») pour prendre en considération le rapport largeur-hauteur des pixels ainsi que la non orthogonalité des lignes et des colonnes du CCD.

La méthode de calibration la plus simple repose sur une estimation linéaire de la distorsion (Abdel-Aziz, 1971). Malheureusement elle ne peut pas être employée dans notre cas du fait de la courte focale utilisée et des distorsions importantes qui en résulte.

Pour apporter une solution à ce type de situation, Heikkilä et Silvén (1997) ont développé une méthode basée sur une estimation non linéaire de la distorsion et adaptée à un objet de référence plan. Les auteurs proposent un modèle explicite qui utilise les paramètres physiques (déjà mentionnés) pour lesquels les valeurs optimales doivent être recherchées.

La mise en oeuvre de la méthode proposée nécessite seulement une série d'images présentant une grille orthogonale de points régulièrement répartis sur un plan orienté dans différentes directions. La connaissance de la position réelle de l'objet observé n'est pas nécessaire.

Le modèle optique proposé par Heikkilä et Silvén (1997) est celui du sténopé auquel sont associés des coefficients de distorsions pour prendre en compte les déformations induites par l'objectif.

Le principe d'une projection centrale implique qu'un point de la scène de coordonnées (x, y, z) dans le repère caméra se projette sur le plan image en $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$ selon une relation du type :

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix} = \frac{f}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

avec f la longueur focale.

Heikkilä et Silvén (1997) proposent de compléter ce modèle de projection en faisant apparaître les composantes de distorsions permettant de prévoir la position réelle (u_i, v_i) du pixel de l'image correspondant au point considéré dans la scène :

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_u s_u (\tilde{u}_i + \delta_r u_i + \delta_t u_i) \\ D_v (\tilde{v}_i + \delta_r v_i + \delta_t v_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$$

La relation fait intervenir une distorsion radiale :

$$\begin{bmatrix} \delta_r u_i \\ \delta_r v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_i (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) \\ \tilde{v}_i (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) \end{bmatrix}$$

et une distorsion tangentielle :

$$\begin{bmatrix} \delta_t u_i \\ \delta_t v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2p_1 \tilde{u}_i \tilde{v}_i + p_2 (r_i^2 + 2\tilde{u}_i^2) \\ p_1 (r_i^2 + 2\tilde{v}_i^2) + 2p_2 \tilde{u}_i \tilde{v}_i \end{bmatrix}$$

Avec : D_u, D_v les coefficients de conversion des unités métriques en pixels
 s_u un facteur d'échelle relatif au rapport largeur-hauteur des pixels
 (u_0, v_0) la position du point principal
 k_1, k_2 les coefficients de distorsion radiale de deuxième, et quatrième ordre (les ordres supérieurs sont rarement envisagés).
 r_i la distance du point projeté à l'axe optique $r_i = \sqrt{\tilde{u}_i^2 + \tilde{v}_i^2}$
 p_1, p_2 les coefficients de distorsion tangentielle

Ce modèle n'intègre pas l'erreur d'orthogonalité éventuelle entre les lignes et les colonnes de pixels sur le CCD.

2.2 MISE EN OEUVRE ET RESULTATS DE CALIBRATION

Une série d'images est acquise en orientant le damier (figure 4-4) dans 25 positions différentes par rapport à la caméra. L'éclairage de la scène est adapté pour limiter les variations de luminosité entre les différentes vues. L'intensité lumineuse de l'éclairage est volontairement forte, ce qui permet de faciliter la détection des motifs du damier par un bon contraste de l'image et de fermer le plus possible le diaphragme pour augmenter la profondeur de champ. La focalisation retenue est celle qui correspond à la future distance de travail (distance plan du disque d'épandage – caméra).

La mise en oeuvre du modèle proposé par Heikkilä et Silvén (1997) est ensuite réalisée par le biais des outils développés avec le logiciel Matlab par Bouguet (2003).

La prise en compte d'un coefficient de distorsion radiale de 6^{ème} ordre et d'un défaut d'orthogonalité des axes du CCD n'apportant pas de différence significative dans le résultat de la calibration, les paramètres intrinsèques retenus se limitent à ceux fournis dans le tableau 4-1.

Une estimation de l'erreur commise sur chacun des paramètres est fournie par l'algorithme de Bouguet (2003) en considérant la valeur de 3 écarts-types.

La correspondance entre les paramètres calculés par l'algorithme et les coefficients mentionnés dans le modèle de Heikkilä et Silvén (1997) est explicitée dans la dernière colonne du tableau 4-1.

			Erreur	Correspondance
Distance focale de l'objectif (en pixels) :	$fc(1)$:	945.87	0.52	$fc(1) = fD_u S_u$
	$fc(2)$:	945.79	0.51	$fc(2) = fD_v$
Position du point principal (en pixels) :	$cc(1)$:	511.18	0.60	$cc(1) = u_0$
	$cc(2)$:	517.45	0.60	$cc(2) = v_0$
Coefficients de distorsion :	- radiale	$kc(1)$:	0.0014	$kc(1) = f^3 k_1$
		$kc(2)$:	0.0035	$kc(2) = f^5 k_2$
	- tangentielle	$kc(3)$:	0.00014	$kc(3) = f^2 p_1$
		$kc(4)$:	0.00014	$kc(4) = f^2 p_2$

Tableau 4-1 : Valeurs des paramètres intrinsèques correspondant à la caméra équipée de son objectif de 8.5 mm. Les paramètres mentionnés sont ceux obtenus par application de l'algorithme de Bouguet. Leur correspondance avec les paramètres mentionnés par Heikkilä et Silvén (1997) est donnée en dernière colonne.

Le rapport des distances focales exprimées en pixels selon les lignes ($fc(1)$) et selon les colonnes ($fc(2)$) est sensiblement égal à 1 ce qui est en adéquation avec la forme carré des pixels.

Chaque pixel mesurant 9 μm , la longueur focale déterminée par la calibration correspond à 8,5 mm soit la valeur annoncée par le constructeur de l'objectif.

Les distorsions engendrées par l'objectif sont représentées graphiquement sur la figure 4-5.

Avec le système optique utilisé, les corrections appliquées sur les régions les plus périphériques de l'image dépassent 30 pixels.

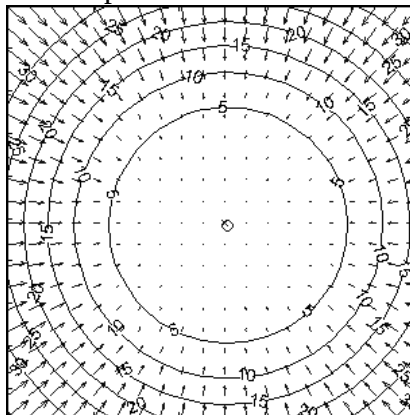


Figure 4-5 : Représentation des distorsions induites sur l'image par le système optique. La position du point principal est repérée par un petit cercle.

La précision de l'estimation des paramètres est notamment limitée par :

- les imprécisions du dessin du damier,
- les imprécisions de planéité du damier,
- les imprécisions dans l'extraction (réalisée par l'algorithme) des coins des carrés du damier.

2.3 RECTIFICATION DES IMAGES

En pratique, la rectification des images est un préalable indispensable à toute mesure et interprétation des positions relatives des objets identifiés dans l'image, en particulier lorsque la focale de l'objectif est courte.

Dans le cadre du travail décrit dans ce document, toutes les images acquises sont systématiquement rectifiées avant d'opérer un quelconque traitement.

3 PARAMETRES DE REFERENCE ASSOCIES AUX IMAGES

L'exploitation géométrique des images d'épandage nécessite la connaissance de deux paramètres : la localisation dans l'image de l'axe de rotation de la pale et le facteur de conversion millimètre-pixel.

Dans le cadre des essais réalisés, l'acquisition d'une série d'images d'épandage correspondant à une configuration donnée et une disposition fixée des éléments du dispositif expérimental s'accompagne d'une ou plusieurs images qualifiées d'«images de référence».

Dans la majorité des cas, une première image de référence est acquise avant l'essai d'épandage et une seconde image est acquise à la fin des essais. La cohérence des paramètres déterminés à partir de ces deux références permet d'assurer que les éléments du dispositif n'ont pas bougé pendant l'acquisition de l'intégralité de la série d'images.

L'image de référence est obtenue en plaçant un étalon à l'horizontale, dans le plan défini par la face supérieure du plateau rotatif. L'étalon est constitué d'une bande de papier cartonné de couleur claire sur laquelle des pastilles noires sont collées. L'espacement entre les points est connue de manière à permettre la déduction du facteur de conversion millimètre-pixel entre le plan défini par le plateau rotatif et l'image acquise par la caméra.

Dans la scène, l'étalon est placé précisément de manière à ce que la position du point de passage de l'axe de rotation du plateau puisse être déterminée par alignement et homothétie à partir des positions des pastilles dans l'image.

La figure 4-6 illustre le positionnement de l'étalon nécessaire à l'obtention d'une image de référence. L'horizontalité du support de l'étalon est systématiquement vérifiée avec la nivelle tubulaire d'un niveau de maçon.

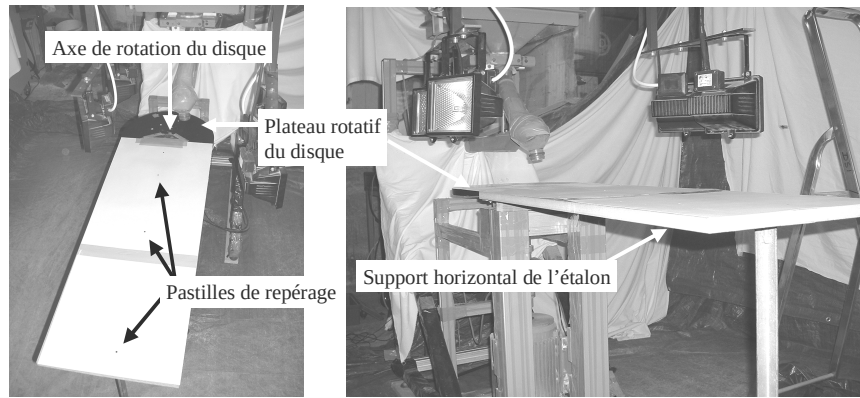


Figure 4-6 : Photographies de l'étalon placé dans le plan du plateau rotatif dans le but d'acquérir une image de référence.

Toute image de référence relative à une série d'images d'épandage est obtenue selon le protocole décrit dans ce paragraphe, quelle que soit la configuration du disque utilisé pour la distribution d'engrais.

Les paramètres de références étant définis dans un plan particulier de la scène (celui du plateau rotatif), il est important de souligner que leur valeur n'a de sens que dans ce plan. Il est donc indispensable de corriger ces valeurs en fonction de la hauteur par rapport à ce plan du point d'éjection des granules. La correction concerne le facteur de conversion millimètre-pixel, mais également la position attribuée à l'axe de rotation de la pale dans une image d'épandage.

Ces considérations correctives semblent ne pas avoir retenu l'attention des auteurs qui se sont attachés à estimer au moyen d'une caméra placée au dessus de la nappe d'épandage les angles d'éjections des granules (Olieslagers, 1997 ; Colin, 1997 ; Reumers, 2003 ; Cointault, 2001)

Ces problèmes ne concernent pas que le cas des disques tronconiques. En effet, dans le cas d'une pale en U, il a pu être observé que les granules éjectés par la pale ne sortaient pas au niveau de la pliure inférieure de la pale mais au niveau de la pliure supérieure soit, pour les pales utilisées, 28 mm plus haut. Cette situation est illustrée par la figure 4-7.

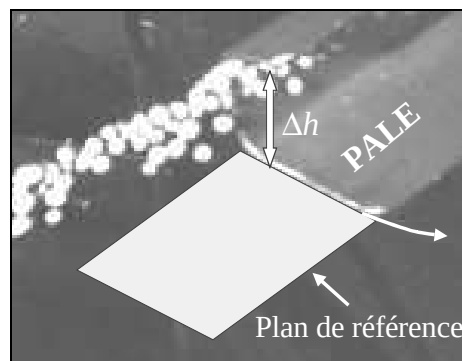


Figure 4-7 : Image permettant de visualiser l'extrémité de la pale et les granules éjectés pendant la phase d'épandage. L'image est obtenue par déclenchement d'un flash pendant la phase d'intégration du CCD.

Considérons deux plans $\mathcal{P}_1$ et $\mathcal{P}_2$ parallèles au plan image et situés à des distances qui diffèrent de la longueur Δh .

Soit η_1 le facteur de conversion millimètre-pixel déterminé pour le plan $\mathcal{P}_1$ et (x_{c1}, y_{c1}) les coordonnées de l'image du point de passage de l'axe de rotation du disque dans le plan $\mathcal{P}_1$.

En se basant sur le modèle de projection du sténopé, les paramètres de référence η_2 et (x_{c2}, y_{c2}) à considérer dans l'image pour l'étude de la géométrie de la scène par rapport au plan $\mathcal{P}_2$ s'expriment de la manière suivante à partir des valeurs relatives au plan $\mathcal{P}_1$:

$$\eta_2 = \frac{f_{pix} \cdot \eta_1 - \Delta h}{f_{pix}}$$

et

$$\begin{cases} x_{c2} = x_{c1} - \Delta h \frac{\Delta x_{opt}}{f_{pix} \cdot \eta_2} \\ y_{c2} = y_{c1} - \Delta h \frac{\Delta y_{opt}}{f_{pix} \cdot \eta_2} \end{cases}$$

avec : Δh la différence de distance (exprimée en mm) qui sépare le plan image des plans $\mathcal{P}_1$ et $\mathcal{P}_2$,
 f_{pix} la distance focale (exprimée en pixels),
 $\Delta x_{opt}, \Delta y_{opt}$ les différences de coordonnées (exprimées en pixels) entre le point de coordonnées (x_{c1}, y_{c1}) et le point principal

La démonstration de ces relations est résumée à l'annexe 1.

Il est important de souligner que les valeurs attribuées au facteur de conversion et à la position de l'axe de rotation de la pale conditionnent la validité de l'interprétation mécanique des résultats issus de l'analyse des images.

A titre d'exemple, dans le cas simple d'un disque plat et d'une prise de vue pour laquelle les paramètres seraient : $\eta_1 = 1$ mm/pix, $x_{c1} = -500$ pix, $y_{c1} = 0$ pix, le décalage de 28 mm mesuré entre le plan de référence et la pliure supérieure de la pale induit une diminution de 3 % du facteur de conversion et une variation de 15 pixels de la localisation de l'axe de rotation dans l'image.

4 CONCLUSION

Le dispositif expérimental se compose d'un ensemble mécanique reproduisant les principaux organes présents sur un distributeur centrifuge du commerce et d'un système d'acquisition des images utilisant une caméra CCD et un éclairage particulièrement simple et robuste.

Les paramètres intrinsèques de la caméra, équipée de son objectif, ont été déterminés lors d'une phase de calibration et seront utilisés pour rectifier systématiquement toutes les images acquises avec le dispositif.

L'exploitation des images d'épandage nécessite la connaissance du facteur de conversion millimètre-pixel et la position du point de passage de l'axe de rotation du disque au niveau du plan pris comme référence pour la scène. Les relations géométriques ont été établies pour permettre de déterminer la valeur de ces paramètres lors d'un changement de plan de référence.

Chapitre 5 : Traitement bas niveau de l'image

Après un prétraitement de rectification de l'image, basé sur les résultats de la calibration, un traitement bas niveau est envisagé sur l'image en niveau de gris dans le but de faire ressortir l'information utile : les axes de chaque trajectoire identifiable dans l'image.

L'obtention d'une image binaire offre l'avantage de diminuer le nombre de pixels qui feront l'objet de calculs ultérieurs.

L'image brute rectifiée fait apparaître les traces laissées par les granules qui traversent le champ de vision. Elle montre une forte disparité en terme de luminosité et présente également les défauts d'homogénéité de l'arrière plan (figure 5-1).

Les trajectoires présentes dans l'image sont alors considérées comme des contours qu'il est opportun de détecter.

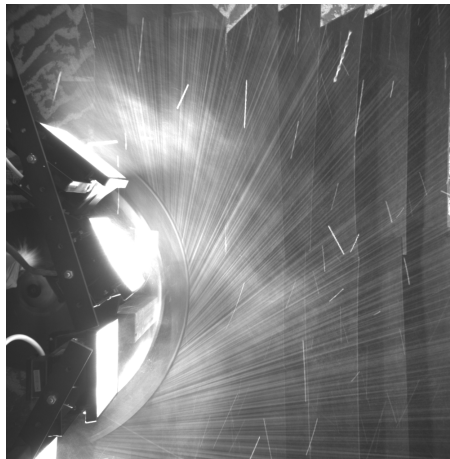


Figure 5-1 : Image brute.

L'objectif de ce chapitre est d'aborder le problème de la détection de contours de manière générale dans un premier temps en présentant quelques travaux de référence puis de s'intéresser plus particulièrement à la détection des contours correspondant aux trajectoires des granules d'engrais dans les images d'épandage.

Le sujet de la détection de contours étant trop vaste pour être abordé dans son intégralité, le chapitre se focalise sur l'approche dérivative et la recherche d'un filtre optimal.

1 NOTIONS SUR LA DETECTION DE CONTOURS

Avant d'aborder les techniques de détection, intéressons-nous tout d'abord à la notion de contour.

1.1 NOTION DE CONTOUR DANS UNE IMAGE

Dans une scène réelle, les objets sont usuellement en trois dimensions et sont définis par des contours matériels correspondant à des frontières par rapport auxquelles les propriétés physiques ou géométriques changent brusquement. Lorsque ces objets sont observés dans une image, la notion de contour est moins évidente. Le système optique ayant transformé une scène tridimensionnelle en un plan, les contours se définissent dans l'image comme le lieu des pixels connexes formant une transition relativement brutale des niveaux de gris. Cette transition est d'autant plus forte que la direction considérée est orthogonale à celle du contour. En analyse d'image, la notion de contour est donc plus large que dans le sens commun et ne correspond donc pas obligatoirement aux limites d'un objet.

De manière générale, la projection d'une scène tridimensionnelle sur le plan du CCD s'accompagne d'ambiguïtés au niveau de l'information présente dans l'image du fait du manque d'uniformité de l'illuminant, des effets d'ombrage, de la géométrie des objets... Il en résulte la disparition de discontinuités présentes dans la scène réelle ou l'apparition de nouvelles discontinuités faisant apparaître des contours fictifs dans l'image ce qui complexifie l'identification des contours réels dans l'image.

Néanmoins, les contours identifiables dans une image constituent généralement des attributs très importants.

Les auteurs distinguent couramment différents profils de contours : marche, rampe ou sigmoïde et toit ou pic.

Ces profils correspondent à différentes situations physiques en intégrant ou non un certain lissage associé aux effets de la prise de vue.

Les principaux modèles de contours sont illustrés ci-dessous.

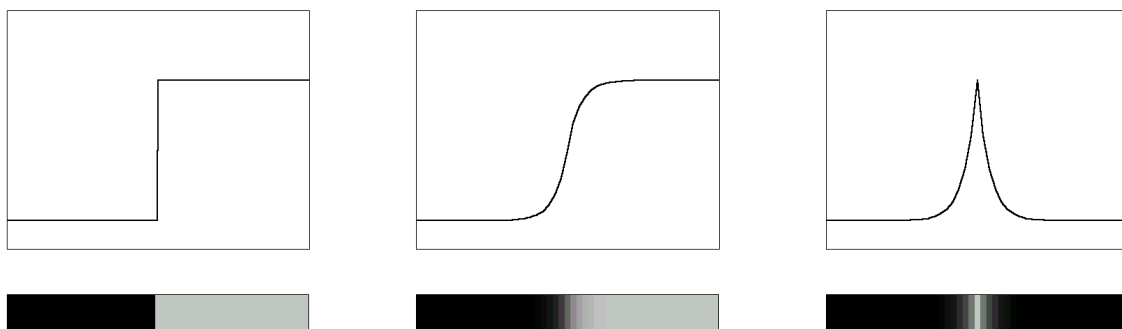


Figure 5-2 : Profil de contour et représentation de la transition correspondante en niveau de gris. De la gauche vers la droite : profil de type échelon, rampe ou sigmoïde et toit ou pic.

Dans le cas des images d'épandage acquises en filé, les traces laissées par les granules en mouvement seront qualifiées de contours en tant que lieux de pixels connexes subissant une variation brusque de niveau de gris.

1.2 OPERATEURS DE DETECTION

En vision numérique et traitement d'image, la détection de contours vise à localiser les fortes variations de niveau de gris pour identifier les phénomènes physiques qui les ont produites. L'objectif de la phase de détection de contours est de rehausser l'information utile de l'image tout en diminuant la quantité totale d'information. Cette étape constitue à ce titre une phase de prétraitement de l'information contenue dans l'image.

Le principal problème de la détection de contours réside dans la résistance du traitement au bruit lié à l'acquisition de l'image et aux hautes fréquences engendrées par la texture de la surface sur laquelle il est nécessaire de détecter des contours. En pratique, la difficulté est donc de lisser de manière suffisante les variations de niveaux de gris attribuées au bruit sans toutefois trop atténuer ni délocaliser les contours utiles à l'application envisagée.

1.2.1 DIFFERENTES APPROCHES

En définissant les contours comme des variations locales d'intensité, les approches dérivatives se conçoivent aisément dans l'objectif de détecter et localiser les variations du signal. Elles consistent principalement à rechercher dans la fonction de niveau de gris un extremum local de la dérivée première ou un passage par zéro de la dérivée seconde.

Dans les approches dérivatives du premier ordre, le contour présent dans une image $I(x, y)$ s'extrait sur la base du calcul du vecteur gradient dont l'expression est :

$$\overrightarrow{grad}(I(x, y)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial I(x, y)}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Ce gradient peut alors être caractérisé par son module $|\overrightarrow{grad}(I(x, y))|$ et son orientation θ dont les expressions sont données ci-dessous :

$$|\overrightarrow{grad}(I(x, y))| = \sqrt{\left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad \text{et : } \theta = \arctan\left(\frac{\frac{\partial I(x, y)}{\partial y}}{\frac{\partial I(x, y)}{\partial x}}\right)$$

Dans les approches du second ordre, la dérivée seconde directionnelle est usuellement approximée par le Laplacien exprimé en fonction des dérivées secondes selon deux directions orthogonales.

Dans le cas d'une image, la discrétisation du signal fait de la différentiation une étape délicate pour laquelle il n'existe pas de solution unique, la localisation du contour dépendant du choix de l'opérateur. Torre et Poggio (1984) ont montré que la différentiation numérique d'une image est un problème mal posé et que cette opération doit être précédée d'une régularisation. Pour l'opération de régularisation, Marr et Hildreth (1980 cités par Cocquerez et Philipp, 1995) préconisent l'utilisation d'un masque approximant la dérivée d'une gaussienne.

En pratique, la difficulté de la construction des opérateurs de détection basés sur une approche dérivative de premier ou de deuxième ordre réside dans la recherche d'un compromis entre deux objectifs antagonistes : la réduction du bruit et la conservation des contours.

Les approches surfaciques assimilent quant à elles l'image à une surface échantillonnée dont la troisième dimension est constituée par le niveau de gris des pixels. Certaines de ces

méthodes cherchent à modéliser la transition recherchée par un gabarit pour évaluer la correspondance avec chaque zone de l'image. Un pixel sera considéré comme appartenant à un contour s'il existe une forte corrélation entre le gabarit et la fenêtre de l'image centrée sur ce point. Une autre méthode consiste à approximer localement la fonction de niveau de gris en vue d'une localisation sub-pixel du contour. Ces approches aboutissent généralement à la construction de filtres à réponse impulsionnelle finie. A titre d'exemple, Liang et al. (1997) proposent l'utilisation d'un ajustement par une courbe B-spline cubique régularisée pour la détection de contours en forme de toit (profil triangulaire).

Les méthodes morphologiques se basent préférentiellement sur l'utilisation des maxima et minima des niveaux de gris dans un voisinage pour chaque pixel de l'image. Citons à titre d'exemple les techniques de gradients morphologiques et les algorithmes de ligne de partage des eaux. Les calculs de gradients morphologiques sont particulièrement sensibles au bruit et nécessitent une étape préalable de lissage de l'image. A titre d'exemple, Boulanger et al. (1987) extraient les contours au moyen d'un gradient « H-conditionnel » qui combine l'information issue d'un gradient morphologique et celle issue d'un codage paramétrique de l'image initiale dans le but d'amplifier les valeurs de gris du gradient.

Le filtrage adaptatif consiste à caractériser la configuration locale de la zone à traiter et à lui appliquer ensuite un filtre adapté.

Dans les approches stochastiques, l'image est considérée comme la réalisation d'un processus aléatoire. Dans ce champ aléatoire, les contours sont détectés sur la base des changements de propriétés statistiques. A titre d'exemple, Hou et Koh (2003) proposent de détecter des contours sur la base de statistiques calculées sur une famille de 4 masques. D'après les auteurs cette approche donne de meilleurs résultats que le filtre de Canny (1986) lorsque le bruit n'est pas gaussien. Pour une même image, le temps nécessaire à ce traitement est néanmoins 20 fois supérieur à celui nécessaire à l'algorithme de Canny. Gérard et al. (1999) posent quant à eux le problème de l'extraction des contours d'un objet comme un problème de restauration d'une séquence de morceaux de contours. Il proposent l'utilisation d'un réseau de neurones et d'une chaîne de Markov en introduisant des connaissances a priori sur la forme du contour à détecter. Les généralités sur les champs markoviens et les algorithmes stochastiques sont présentées dans Cocquerez et Philipp (1995).

Enfin, signalons que des approches globales ont été développées et se distinguent des opérateurs locaux en prenant en compte une notion de structure de contours au sein de l'image. Les techniques de contours actifs permettent par exemple la détection d'une grande variété de formes. Le principe général consiste à initialiser une courbe à proximité du contour recherché puis à déformer de manière élastique le modèle jusqu'à ce qu'il ajuste au mieux la frontière recherchée. La principale difficulté de mise en oeuvre réside dans la phase d'initialisation du processus. La technique est également sensible aux occlusions.

Le recensement de l'ensemble des méthodes utilisées pour la détection de contours dépasse très largement les objectifs du présent document. Une bonne synthèse des principales techniques utilisées pour la détection de contours est donnée par Ziou et Tabbone (1998).

Intéressons-nous plus particulièrement maintenant à la recherche de filtres « optimaux » sous la forme de filtres linéaires séparables dont l'étude peut être menée sur des fonctions monodimensionnelles avant d'être étendue en deux dimensions.

1.2.2 RECHERCHE D'UNE FONCTION OPTIMALE DE DETECTION

Les opérateurs de différentiation envisagés dans les approches dérivatives pour la détection de contour ont l'inconvénient de la sensibilité au bruit. Des méthodologies ont été proposées de manière à concevoir un détecteur de contours qualifié d'« optimal » qui se base sur une étude théorique pour rechercher le meilleur compromis en terme de résultat de filtrage. Une telle approche nécessite de formuler, en préalable à toute technique d'optimisation, des critères de performance permettant de quantifier la qualité du filtre.

Dans un premier temps, nous décrirons les principaux critères de performances utilisés dans la littérature en explicitant en particulier ceux définis par Canny (1986). Nous nous attacherons ensuite à décrire la démarche mise en œuvre par Canny pour concevoir, sur la base de ses critères, un filtre optimal pour la détection d'un contour de type échelon.

Un intérêt particulier est porté à la méthode variationnelle développée par Canny compte tenu de son utilisation par de nombreux auteurs et du fait qu'elle constitue également le fondement de l'approche qui sera proposée dans ce chapitre pour concevoir un filtre adapté aux images d'épandage.

1.2.2.1 Critères de performance d'un filtre

1.2.2.1.1 Critères de Canny

Canny (1986) considère le problème de recherche d'un opérateur de détection comme un problème d'optimisation d'une fonction destinée à extraire un contour dont le profil théorique est fixé. Il formule trois critères pour caractériser les performances d'un filtre de détection de contours en considérant que la détection dans une image peut être décomposée en opérations de convolution monodimensionnelles.

Il s'intéresse au cas d'un filtre de réponse impulsionnelle limitée à l'intervalle $[-W + W]$. Ce filtre est appliqué sur un signal d'entrée $e(x)$ qui se compose d'un modèle de contour théorique (dont la transition est en $x = 0$) corrompu par l'addition d'un bruit blanc gaussien centré.

L'auteur a défini trois critères pour évaluer la performance des filtres de détection de contours.

1.2.2.1.1.1 Critère de bonne détection

Le premier critère quantifie la bonne détection. Il est basé sur le rapport signal à bruit après détection. Il s'agit du rapport entre la réponse du filtre $f(x)$ à un signal non bruité $e(x)$ et la réponse du filtre au bruit seul (de variance σ_b^2). Le rapport est exprimé par Canny en amplitude et non en puissance :

$$\text{Rapport signal à bruit : } RSB = \frac{\left| \int_{-w}^{+w} e(-x) f(x) dx \right|}{\sigma_b \sqrt{\int_{-w}^{+w} f^2(x) dx}}$$

$$\text{Critère de détection : } \Sigma = \frac{\sigma_b}{A} RSB$$

Avec A l'amplitude du signal d'entrée non bruité.

1.2.2.1.1.2 Critère de bonne localisation

Le deuxième critère concerne la bonne localisation. Il mesure l'inverse de l'écart-type de la distance entre le maximum détecté du gradient calculé en présence de bruit et la position qu'aurait ce maximum en l'absence de bruit.

Soit $s_b(n)$ la réponse du filtre au signal d'entrée bruité $e_b(n)$. La dérivée du signal de sortie est : $s'_b(x) = s'(x) + b'_f(x)$ avec $s'(x)$ la réponse du filtre au contour seul et $b'_f(x)$ la réponse du filtre au bruit seul.

En supposant que le maximum local est localisé en $x = x_0$, on a :

$$s'(x_0) + b'_f(x_0) = 0$$

Canny utilise alors un développement limité de la réponse du filtre au contour autour de 0 :

$$s'(x_0) = s'(0) + s''(0)x_0 + \mathcal{E}(x_0^2) = 0 \text{ d'où : } s''(0)x_0 \approx s'(x_0) = -b'_f(x_0)$$

Ce qui permet d'exprimer x_0 et d'en déduire la variance :

$$x_0 = \frac{-b'_f(x_0)}{s''(0)} \text{ d'où : } E(x_0^2) = \frac{E(b_f'^2(x_0))}{s''^2(0)} = \frac{\sigma_b^2 \int_{-w}^{+w} f'^2(x) dx}{\left(\int_{-w}^{+w} e'(-x) f'(x) dx \right)^2}$$

La localisation est exprimée comme l'inverse de la racine de cette variance et le critère est normalisé par rapport à l'amplitude du signal et l'écart-type du bruit.

$$Localisation = \frac{\left| \int_{-w}^{+w} e'(-x) f'(x) dx \right|}{\sigma_b \sqrt{\int_{-w}^{+w} f'^2(x) dx}}$$

$$\text{Critère de localisation normalisé : } \Lambda = \frac{1}{A} \frac{\left| \int_{-w}^{+w} e'(-x) f'(x) dx \right|}{\sqrt{\int_{-w}^{+w} f'^2(x) dx}}$$

Compte tenu du développement limité réalisé autour de l'origine, l'établissement de ce critère nécessite que la réponse du filtre au contour soit dérivable en 0.

1.2.2.1.1.3 Critère de non-multiplicité des réponses

Le troisième critère caractérise la non multiplicité des réponses. Il mesure la distance moyenne entre deux maxima adjacents de la réponse du filtre au bruit.

Canny utilise le fait que cette distance moyenne est le double de la distance entre deux passages par zéro de la dérivée de la réponse au filtre. En s'appuyant sur les résultats de Rice (1945, cité par Canny) il obtient alors :

$$x_m = 2\pi \frac{\sqrt{\int_{-W}^{+W} f'^2(x) dx}}{\sqrt{\int_{-W}^{+W} f''^2(x) dx}}$$

Pour un filtre à réponse impulsionnelle finie, il en déduit le nombre de maxima contenus dans la réponse limitée à l'intervalle $[-W, +W]$: $N_n = \frac{2W}{x_m}$

1.2.2.1.1.4 Extension au cas d'un filtre à réponse impulsionnelle infinie

Les trois critères sont applicables également au cas d'un filtre à réponse impulsionnelle infinie pour un modèle de contour centré sur 0. Les bornes des intégrales sont alors étendues de $-\infty$ à $+\infty$. En conséquence, les critères ont été exprimés comme ci-dessous par Deriche (1987).

Détection	Localisation	Multiplicité des réponses
$\Sigma = \frac{1}{A} \frac{\left \int_{-\infty}^{+\infty} e(-x) f(x) dx \right }{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) dx}}$	$\Lambda = \frac{1}{A} \frac{\left \int_{-\infty}^{+\infty} e'(-x) f'(x) dx \right }{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx}}$	$x_m = 2\pi \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f''^2(x) dx}}$

1.2.2.1.2 Critères de Tagare et de Figueiredo

Tagare et de Figueiredo (1990) critiquent l'approche de Canny sur le fait qu'elle ne prend en considération que le premier passage par zéro de la dérivée de la réponse du filtre au signal bruité. Ils critiquent également l'établissement de la distance moyenne x_0 entre la position du contour et le premier maximum local détecté. Les auteurs soulignent que le calcul de la variance de la dérivée du bruit n'est possible que si x_0 est le même pour chaque réalisation du processus gaussien, ce qui n'est pas le cas en pratique. En se basant sur l'étude de la répartition des maxima dans la réponse du filtre au signal bruité, Tagare et de Figueiredo (1990) proposent un autre critère pour mesurer la performance de localisation et définir un filtre optimal de détection de contours.

Selon les auteurs le critère à maximiser pour la localisation est :

$$J = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f^2(x) dx}{2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx}$$

L'opérateur qui maximise ce critère est la dérivée d'une gaussienne.

Le critère de Tagare et de Figueiredo a également fait l'objet de critiques de la part de Boyer et Sarkar (1994). D'après ces derniers, la première remarque de Tagare et Figueiredo n'est pas fondée puisque Canny prend en compte les autres maxima de la réponse du filtre dans son troisième critère. Concernant la seconde objection, Sarkar et Boyer soutiennent que même si

une incorrection existe dans l'élaboration du critère telle qu'elle a été décrite par Canny, l'expression finale du critère reste correcte.

1.2.2.1.3 Critères de Sarkar et Boyer

Sarkar et Boyer (1991) reprennent les deux premiers critères de Canny en étendant simplement les limites à l'infini, pour pouvoir les utiliser dans le cas de l'élaboration d'un filtre à réponse impulsionnelle infinie.

Concernant la multiplicité des réponses, les auteurs prennent en compte la largeur w du filtre qu'ils définissent comme la racine de la moyenne des carrés des écarts de la fonction $f^2(x)$.

$$w = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) dx}}$$

Le critère de faible multiplicité des réponses est alors défini ainsi :

$$MRC = \frac{x_m}{w} = 2\pi \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f''^2(x) dx}} \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f^2(x) dx}}$$

1.2.2.1.4 Critères de Shen et Castan

Shen et Castan (1992) ont quant à eux choisi de rechercher un filtre optimal de régularisation $g(x)$ qui minimise un critère dont l'expression prend en considération trois énergies définies ci-dessous.

L'énergie due au bruit en sortie de filtre est donnée par : $E_b = \sigma_b^2 \int_{-\infty}^{+\infty} g^2(x) dx$

L'énergie due au bruit en sortie du filtre dérivé est : $E_b' = \sigma_b^2 \int_{-\infty}^{+\infty} g'^2(x) dx$

L'énergie du signal en sortie de filtre de détection en 0 est : $E_s = A^2 g^2(0)$

avec σ_b^2 la variance du bruit et A l'amplitude du modèle de contour.

Le critère à minimiser est : $\frac{E_b E_b'}{E_s}$

Ce critère combine la détection et la localisation. Les auteurs cherchent à maximiser la réponse au contour tout en minimisant les énergies du bruit.

1.2.2.2 Démarche de Canny

Canny (1986) a proposé une méthode pour concevoir un filtre linéaire de détection de contours en forme de marche.

Le modèle de contour considéré par Canny (1986) est un échelon d'amplitude A .

$$C(x) = \begin{cases} A & \text{pour } x \geq 0 \\ 0 & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

Ce contour théorique est corrompu par l'addition d'un bruit blanc, gaussien et centré.

Compte tenu des critères qu'il a définis, Canny recherche l'opérateur de détection monodimensionnel qui maximise le produit des critères de détection et de localisation ($\Sigma\Lambda$) sous la contrainte du critère de faible multiplicité des réponses ($x_m = \frac{2W}{N_n}$).

L'expression du produit à maximiser est donc :

$$\Sigma\Lambda = \frac{\left| \int_{-W}^0 f(x)dx \right|}{\sqrt{\int_{-W}^{+W} f^2(x)dx}} \frac{|f'(0)|}{\sqrt{\int_{-W}^{+W} f'^2(x)dx}}$$

L'auteur souligne que l'avantage du produit $\Sigma\Lambda$ est d'être invariant par changement d'échelle.

Pour faciliter la mise en oeuvre du calcul variationnel, Canny transforme ce problème de maximisation en un problème de minimisation sous contraintes.

Il cherche donc à minimiser l'intégrale du dénominateur du terme de détection sous la contrainte consistant à maintenir constants les autres termes ainsi que ceux présents dans le critère de faible multiplicité des réponses.

La fonction f recherchée étant impaire, la limitation du calcul des intégrales au domaine $[-W, 0]$ ne modifie que l'expression de $\Sigma\Lambda$ d'un facteur 2.

La fonction f est donc recherchée de manière à minimiser $\left| \int_{-W}^0 f^2(x)dx \right|$

sous les contraintes suivantes :

$$\int_{-W}^0 f(x)dx = c_1 \quad \int_{-W}^0 f'^2(x)dx = c_2 \quad \int_{-W}^0 f''^2(x)dx = c_3 \quad f'(0) = c_4$$

Les contraintes étant isopérimétriques (les limites d'intégration sont identiques à celles intervenant dans l'intégrale devant être minimisée), une fonction composite peut être construite en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange pour résoudre ce problème d'optimisation.

Le problème consistant à étudier les variations de la fonction f sur un intervalle fixé, il revient à rechercher la fonction $f(x)$ qui minimise une fonction composite Ψ ou fonctionnelle (*i.e.* une fonction de fonctions). La fonction composite est construite comme combinaison linéaire des fonctionnelles présentes dans les contraintes et dans l'expression à minimiser.

Dans le cas des contraintes définies par Canny, la fonctionnelle est :

$$\Psi(x, f, f', f'') = f^2 + \lambda_1 f'^2 + \lambda_2 f''^2 + \lambda_3 f \quad (5.1)$$

où $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 sont les multiplicateurs de Lagrange.

La recherche de la fonction f qui minimise cette fonctionnelle se réalise par le biais de l'équation d'Euler :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial f} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial f'} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial f''} \right) = 0 \quad (5.2)$$

Cette équation énonce sous la forme d'une équation différentielle, une condition nécessaire à l'existence d'un extremum de la fonctionnelle Ψ .

En introduisant (5.1) dans (5.2) la relation devient :

$$2f(x) - 2\lambda_1 f''(x) + 2\lambda_2 f''''(x) + \lambda_3 = 0$$

Avec $\lambda_2 - \lambda_1^2 / 4 > 0$, la solution générale obtenue par Canny sur $[-W, 0]$ est :

$$f(x) = a_1 e^{\alpha x} \sin \omega x + a_2 e^{\alpha x} \cos \omega x + a_3 e^{-\alpha x} \sin \omega x + a_4 e^{-\alpha x} \cos \omega x + c$$

Les conditions aux limites imposées à cette forme générale pour définir le filtre à réponse impulsionnelle infinie (RIF) recherché par Canny sont :

$$f(0) = 0 ; f(W) = 0 ; f'(0) = S ; f'(W) = 0$$

La solution f permettant de satisfaire cet ensemble de contraintes étant complexe, Canny en approxime la forme par la dérivée première d'une gaussienne de la forme :

$$f(x) = -\frac{x}{\chi^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

où χ est une constante de normalisation et σ joue le rôle de paramètre d'échelle.

La démarche de Canny (1986) a été reprise par divers auteurs qui, pour améliorer les performances du filtre élaboré, ont proposé des modifications concernant notamment :

- la définition des critères,
- l'expression à optimiser,
- le domaine de définition du filtre (réponse impulsionnelle finie ou infinie),
- le modèle de contour considéré.

Deriche (1987) change les limites des intégrales présentes dans l'expression des critères de performance de manière à rechercher un opérateur sous la forme d'un filtre à réponse impulsionnelle infinie (RII). Pour cela, il modifie également les conditions limites imposées à l'équation différentielle de Canny. Il définit alors un opérateur qui est une solution plus simple que celle proposée par ce dernier et pour laquelle il propose une mise en oeuvre récursive. L'avantage de cette approche réside dans l'absence de bruit de troncature et l'obtention d'un nombre réduit d'opérations par pixel. De plus l'adaptation de la réponse impulsionnelle du filtre à la résolution à laquelle les contours sont à détecter s'effectue par le choix de paramètres dont la valeur ne modifie pas le nombre de termes de l'équation aux différences.

Sarkar et Boyer (1991) ont également utilisé la démarche proposée par Canny mais en se basant sur une expression différente du troisième critère de performance. Ils aboutissent à une équation différentielle pour laquelle ils ne trouvent pas de solution analytique. Ils approximent alors la solution par une fonction de détection dont l'implémentation récursive est possible. En fixant l'un des paramètres à une valeur donnée, leur filtre correspond à celui proposé par Deriche.

Shen et Castan (1992) suivent la même méthode mathématique que Canny mais en optimisant une expression établie à partir de leurs propres critères. Ils définissent d'abord le filtre optimal de régularisation puis déduisent par dérivation le filtre de détection. Les filtres sont également à réponse impulsionnelle infinie et peuvent être implémentés de manière récursive.

Dans le but de prendre en compte l'effet de flou lié au dispositif optique de prise de vue, Bourennane et al. (1993) considèrent un modèle de contour de type sigmoïde. En appliquant la démarche de Canny, ils définissent un filtre de détection dont la mise en oeuvre s'effectue sous une forme récursive d'ordre trois. D'après les auteurs, ce filtre donne de meilleurs résultats que celui de Deriche lorsque les images sont floues et fortement bruitées.

L'annexe 2 donne des détails complémentaires concernant l'utilisation de la démarche de Canny par les auteurs cités précédemment.

1.2.2.3 Recherche d'un filtre optimal pour un signal discret

Les développements théoriques des approches dérivatives sont très majoritairement menés dans le domaine continu en considérant que l'image numérique est un échantillonnage d'une fonction à deux dimensions dérivable en tout point. Les travaux présentés précédemment en constituent des exemples.

Or, le passage d'une fonction optimale développée dans le domaine continu à une fonction échantillonnée dans le domaine discret est critiquable et demeure un point faible de ce type d'approche. En effet, l'échantillonnage de la réponse impulsionnelle continue est éparse et engendre des différences notables entre les propriétés du filtre discret et celles de son homologue continu.

Conscients des écarts de qualité entre un détecteur théorique et son implémentation échantillonnée et approximée, certains auteurs ont porté leur attention sur la possibilité de déterminer un filtre optimal directement dans le domaine discret.

Demigny et al. (1995), puis Demigny et Kamlé (1997) ont défini des équivalents analytiques des critères de Canny pour les filtres échantillonnés. Pour un filtre $f(k)$ discret et en considérant un modèle de contour de type échelon corrompu par un bruit additif, blanc, gaussien et centré, l'expression des critères est donnée ci-dessous.

$$\text{Critère de bonne détection : } Cd_1 = \frac{\sum_{k=-\infty}^0 h(k)}{\sqrt{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} h^2(k)}}$$

$$\text{Critère de bonne localisation : } Cd_2 = \frac{1}{\sqrt{\delta x_0^2}}$$

$$\text{Critère de faible multiplicité des réponses : } Cd_3 = \frac{2\pi}{\arccos(-\rho)}$$

Avec δx_0^2 la variance de l'écart moyen de détection par rapport à la position de la transition

$$\text{d'entrée et } \rho = \frac{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} h''^2(k)}{2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h^2(k)} - 1.$$

En se basant sur l'expression de ces critères, Demigny (2002) propose de déterminer un filtre optimal en menant un raisonnement directement dans le domaine discret.

Alors que le profil de contour choisi par Demigny est un échelon défini dans le domaine discret, Duvieubourg et al. (2003) utilisent un modèle de contour discret construit en échantillonnant un échelon continu. Cette considération permet aux auteurs de définir la

position réelle du contour au niveau sub-pixel à partir de la valeur de niveau de gris du pixel dans lequel a lieu la transition du modèle de contour non échantillonné.

Sur la base de cette approche, Duvieubourg et al. proposent une nouvelle expression du critère de localisation et définissent un critère de proximité destiné à évaluer l'influence des contours proches sur la qualité de la localisation.

Ces travaux ouvrent de nouvelles perspectives pour la détermination de filtres optimaux de détection. Néanmoins il faut noter qu'ils ont été conduits sur un modèle de contour de type échelon qui a l'avantage de simplifier les calculs mais qui traduit mal les transitions de niveaux de gris les plus courantes dans les images réelles.

1.2.3 FILTRE LINEAIRE DE DETECTION DE CONTOURS EN FORME DE CRETES

Les filtres présentés précédemment ont tous été développés pour des modèles de contours anti-symétriques.

Dans le cas des images d'épandage, les traces laissées par les granules présentent un profil transversal plus ou moins symétrique en forme de pic ou de toit. Il convient donc maintenant de décrire les travaux qui ont abordé la détection de contours en forme de crêtes.

La détection de lignes de crêtes a été abordée par approche dérivative de deux manières. L'une des méthodes consiste à considérer la crête comme une région dont l'axe est à rechercher au centre de deux contours latéraux de type échelon (Subirana-Vilanova et Sung, 1992 ; Filbois et Gemmerlé, 1994 ; Steger, 1998 ; Koller et al. 1995). Le modèle servant de point de départ à la réflexion est alors du type créneau. L'application typique de ces détecteurs est la détection de route dans des images aériennes.

Une autre approche consiste à considérer un profil de contour plus acéré et à rechercher un filtre optimal susceptible d'extraire cette structure (Ziou 1991, Laggoune 1995, Gouton et al. 2000).

Nous nous intéressons ici à cette deuxième approche basée sur la recherche d'un filtre optimal.

1.2.3.1.1 Filtre défini par Ziou

En procédant par optimisation numérique, Canny (1983, cité par Ziou, 1991), a montré que le détecteur optimal d'un contour en forme de toit doit avoir une allure du type de celle présentée en figure 5-3.

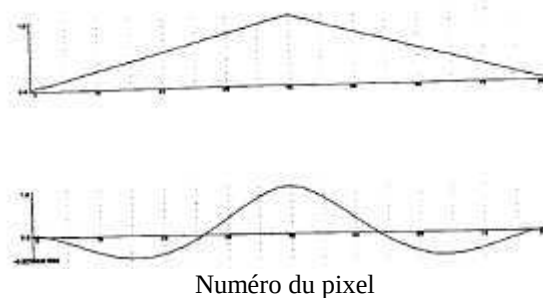


Figure 5-3 : Allures d'un profil de contour triangulaire (niveau de gris en fonction du numéro de pixel) et du filtre optimal de détection défini par Canny. Représentation extraite de la publication de Ziou et al. (1989).

L'analyse de la figure 5-3 et le souci d'efficacité ont conduit Ziou (1991) à choisir comme réponse impulsionnelle du filtre de détection l'expression donnée en (5.3). Cette expression est une approximation de la dérivée seconde d'une gaussienne.

$$f(x) = (a \sin \omega|x| + b \cos \omega|x|)e^{-\alpha|x|} \quad (5.3)$$

où a , b , α et ω sont des constantes.

L'auteur associe cette fonction à la détection d'un contour de type exponentiel de la forme :

$$C(x) = Ae^{-|x|}$$

Afin d'obtenir dans le domaine continu une réponse nulle à une entrée nulle, l'auteur choisit de prendre $a = -c.\alpha$ et $b = c.\omega$ de manière à ce que : $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 0$.

Le filtre de régularisation $g(x)$ est obtenu de manière à ce que $g''(x) = -f(x)$ en prenant :

$$g(x) = \frac{c}{\alpha^2 + \omega^2} (\alpha \sin(\omega|x|) + \omega \cos(\omega|x|)) e^{-\alpha|x|}$$

Les fonctions de détection et de régularisation discrètes sont obtenues par échantillonnage des expressions continues précédentes.

L'auteur calcule la constante « c » en normalisant le filtre de régularisation de manière à ce que : $\sum_{-\infty}^{+\infty} g(n) = 1$.

En calculant les transformées en Z des parties causales et anticausales correspondant à ces fonctions, les équations aux différences sont calculées de manière à proposer une implantation récursive d'ordre 2 pour ces filtres à réponse impulsionnelle infinie.

Le travail de Ziou a essentiellement été réalisé dans le domaine continu tant en ce qui concerne la forme du filtre qu'en ce qui concerne le choix des constantes a et b .

Le processus de discrétisation transformant les intégrales en sommes discrètes, la mise en œuvre de ce filtre ne permet pas d'obtenir une réponse nulle à une entrée constante différente de zéro. Ceci engendre un important biais dans la détermination de l'orientation du contour et rend délicate les opérations de seuillage sur l'image du gradient.

En effet, le calcul de la somme infinie montre que la condition :

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} f(n) = F(1) = 0$$

équivalait à :

$$c(\omega - 2\alpha \sin \omega e^{-\alpha} - \omega e^{-2\alpha}) = 0$$

Or cette relation ne peut être vérifiée que dans des cas très particuliers qui n'ont pas de sens du point de vue de la conception du filtre (par exemple $c = 0$ ou $\omega = 0$ ou $\omega \rightarrow 0$ et $\alpha = 0$).

1.2.3.1.2 Filtre défini par Laggoune

Les travaux de Laggoune (1995) complétés par Gouton et al. (2000) se basent sur la méthode de Canny pour rechercher le filtre de détection optimal d'un contour en toit modélisé par la fonction suivante :

$$C(x) = e^{-s|x|}$$

Les auteurs utilisent les critères de performance décrits par Canny en exploitant les propriétés de la dérivée d'un produit de convolution pour l'expression du critère de localisation. Pour le modèle de contour retenu, les expressions des critères sont fournies dans le tableau ci-dessous.

Détection	Localisation	Multiplicité des réponses
$\Sigma = \frac{\sqrt{2} \int_{-\infty}^0 e^{sx} f(x) dx}{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f'^2(x) dx}}$	$\Lambda = \frac{\sqrt{2s^2} \int_{-\infty}^0 e^{sx} f(x) dx}{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f''^2(x) dx}}$	$SMR = \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f'^2(x) dx}}{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f''^2(x) dx}}$

Tableau 5-1 : Expressions des critères de performance utilisés par Laggoune.

L'application de la méthode proposée par Canny conduit à écrire sur $] -\infty ; 0]$ la fonction composite suivante :

$$\Psi(x, f, f', f'') = f^2 + \lambda_1 e^{sx} f + \lambda_2 f'^2 + \lambda_3 f''^2$$

L'équation différentielle que doit vérifier f est obtenue au moyen de l'équation d'Euler :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial f} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial f'} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial f''} \right) = 0$$

soit

$$f(x) - \lambda_2 f''(x) + \lambda_3 f''''(x) = -\frac{\lambda_1 e^{sx}}{2}$$

Sur $] -\infty ; 0]$ la solution générale est :

$$f(x) = a_1 e^{\alpha x} \sin \omega x + a_2 e^{\alpha x} \cos \omega x + a_3 e^{-\alpha x} \sin \omega x + a_4 e^{-\alpha x} \cos \omega x + A_L e^{sx}$$

Laggoune impose ensuite les conditions suivantes :

$$f(x) = f(-x) ; \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 0 ; \lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = 0 ; \lim_{x \rightarrow \pm\infty} f'(x) = 0 ; f'(0) = 0$$

et propose l'expression ci-dessous pour le filtre f de dérivation :

$$f(x) = (-A_L \sin \omega |x| + \cos \omega |x|) e^{-\alpha |x|} - \left(\frac{A_L \omega + \alpha}{s} \right) e^{-s|x|}$$

$$\text{avec } A_L = \frac{-\alpha(\alpha^2 + \omega^2 - s^2)}{\omega(\alpha^2 + \omega^2 + s^2)}$$

Le filtre de régularisation $g(x)$ est déduit du filtre de dérivation $f(x)$ par :

$$g(x) = \iint f(x) dx$$

Ces opérateurs s'implémentent sous forme de filtres récursifs d'ordre 3.

Des facteurs de normalisation N_f et N_g sont respectivement appliqués au niveau des équations aux différences pour l'opération de dérivation et de lissage dans le but d'assurer :

$$\sum_{n=0}^{+\infty} N_f f(n) = 1 \text{ et } \sum_{n=-\infty}^{+\infty} N_g g(n) = 1$$

Plusieurs critiques peuvent être formulées vis à vis des filtres proposés.

La somme infinie de la fonction de dérivation échantillonnée n'est pas nulle. En effet son calcul donne :

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} f(k) = \frac{1 - e^{-2\alpha} - 2e^{-\alpha} A \sin \omega}{1 + e^{-2\alpha} - 2e^{-\alpha} \cos \omega} - \left(\frac{A\omega + \alpha}{s} \right) \frac{1 + e^{-s}}{1 - e^{-s}}$$

Cette expression laisse envisager une réponse non nulle à une entrée constante différente de zéro.

Néanmoins, en pratique il s'avère que la valeur de cette somme est peu élevée.

L'analyse des critères de performances calculés numériquement lorsque $s = 0.5$ pour $\alpha \in [0.02 ; 0.2]$ et $\omega \in [0.02 ; 0.2]$ conduit les auteurs à préconiser le choix des paramètres α et ω dans l'intervalle $]0 ; 0.04]$. Or les applications réalisées sur les images de tests sont proposées avec $s = 0.5$, $\alpha = 0.5$ et $\omega = 0.5$.

Les filtres obtenus avec des valeurs faibles des paramètres α et ω sont en fait très larges (cf. figure 5-4) dans le cas où $s = 0.5$, $\alpha = 0.02$ et $\omega = 0.02$.

D'autre part, les variations de formes du filtre de régularisation en fonction du choix des paramètres sont curieuses, comme l'illustre la figure 5-4. Concernant cet aspect, certaines combinaisons de paramètres engendrent des formes assez peu convaincantes. Les auteurs n'émettent cependant pas de restriction concernant le choix des paramètres.

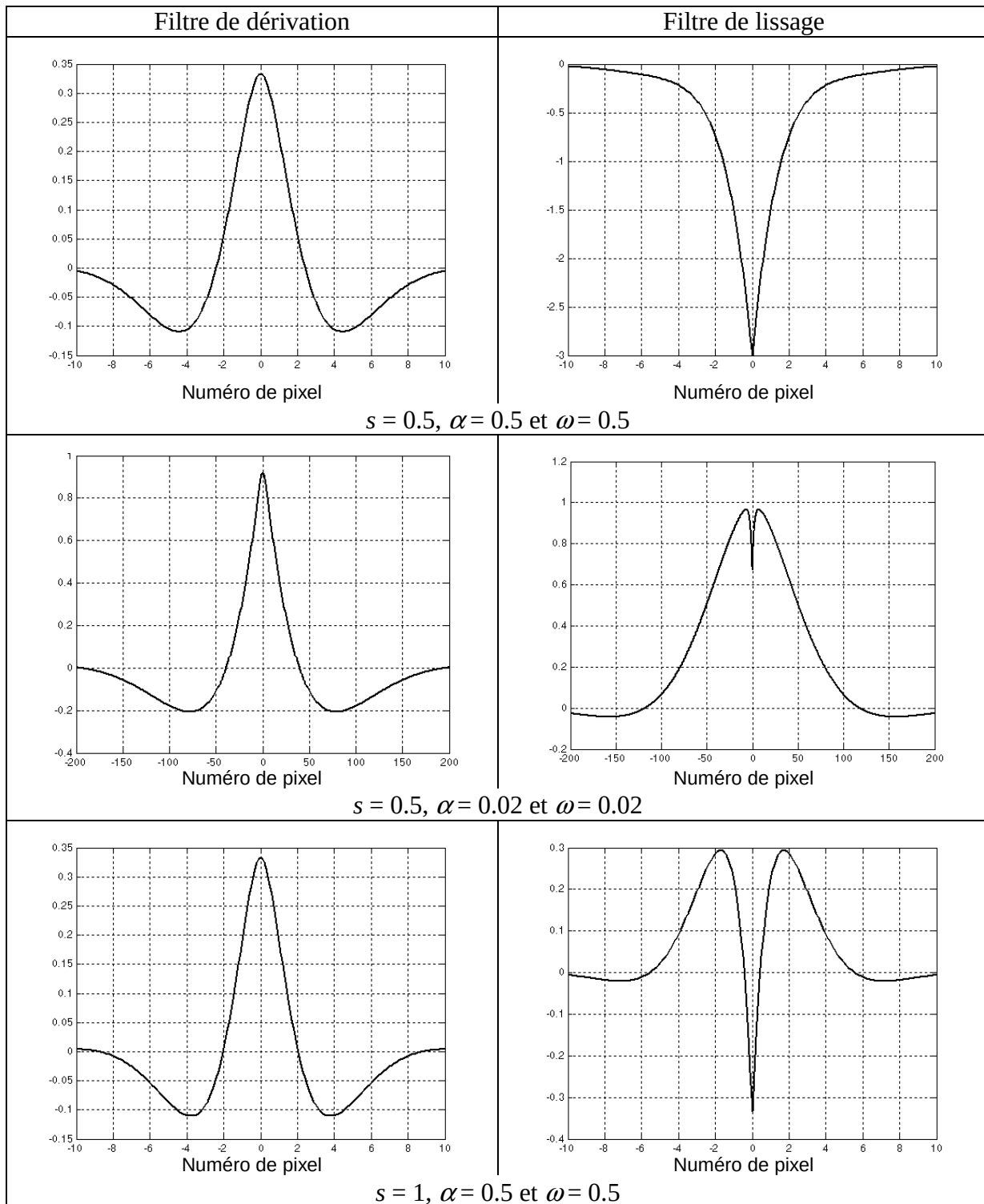


Figure 5-4 : Exemples de réponses impulsionnelles correspondant aux filtres de détection (à gauche) et de régularisation (à droite) proposés par Gouton et al. pour différentes combinaisons de paramètres.

1.3 BILAN SUR LES APPROCHES EXISTANTES

Le rapide panorama dressé dans les paragraphes précédents rappelle la grande variété des méthodes qui sont envisageables pour la détection des contours dans une image et illustre plus particulièrement la suite donnée aux travaux de Canny à travers différentes variantes de recherche d'un filtre optimal. La comparaison des résultats de détection obtenus par l'ensemble des approches proposées dans la littérature serait un travail titanesque du fait de la diversité des techniques (méthodes dérivatives, surfaciques, morphologiques...) et des variantes envisageables. Cette comparaison sort des objectifs de la présente thèse. De plus compte tenu des différences qui existent entre les diverses techniques dans la manière d'aborder la détection et compte tenu de la variété des images sur lesquelles cette détection peut être mise en oeuvre, chaque technique peut se révéler particulièrement adaptée ou non à une application donnée.

Cocquerez et Philipp (1995) présentent une comparaison de quatre techniques relevant de l'approche dérivative (opérateurs de premier et second ordre de Deriche, de Shen-Castan, opérateur linéaire MDIF et opérateur non-linéaire NAGDIF), deux techniques utilisant la modélisation markovienne (« Recuit par champs moyens » et « Graduated Non Convexity ») ainsi qu'une technique employant la morphologie mathématique (basée sur un gradient morphologique). Les tests ont été réalisés sur des images de synthèses comportant une seule transition de type échelon et sur des images réelles.

Dans le cas d'une image de synthèse présentant un signal de faible amplitude noyé dans le bruit, le calcul du gradient avec l'opérateur de premier ordre de Deriche donne les meilleurs résultats. Lorsque l'amplitude du signal est plus importante par rapport au bruit, toutes les techniques donnent de bons résultats sauf l'opérateur basé sur le calcul de la dérivée seconde de Shen et Castan.

Les tests pratiqués sur 6 images réelles différentes montrent que la technique qui donne le meilleur résultat change en fonction de l'image. Cocquerez et Philipp (1995) signalent notamment que les transitions franches dans des images peu bruitées sont bien détectées par l'ensemble des opérateurs. Les transitions lentes résultant d'un flou ou d'une variation d'éclairement sont mieux détectées par les filtres de Deriche ou Shen et Castan. Les contours de faible amplitude dans un environnement bruité sont mieux détectés par l'opérateur de Deriche. Les contours fins et marqués sont bien détectés par l'opérateur MDIF.

Dans le présent travail l'approche dérivative a été retenue pour la conception d'un filtre à réponse impulsionnelle infinie dont l'implémentation peut être réalisée sous forme récursive ce qui permet de limiter le temps de calcul et laisse plus facilement envisager une implantation temps réel dans le cas où la méthode développée serait amenée à être mise en oeuvre sur un équipement mobile.

Dans le cadre de cette approche, les travaux présentés montrent qu'il existe des divergences de points de vue voire des désaccords notamment dans la définition des critères de performance.

La démarche de Canny et le modèle de contour utilisé ont été critiqués par divers auteurs. Néanmoins les travaux de Canny font toujours référence et bien que de nombreux filtres présentent aujourd'hui des performances équivalentes ou supérieures, ils sont quasiment systématiquement comparés à celui de Canny ou à celui de Deriche (défini sur la base des mêmes considérations).

Nous avons vu que les travaux menés à la suite de ceux de Canny ont notamment cherché à élaborer des opérateurs adaptés à des profils de contours plus proches de ceux réellement rencontrés dans des images naturelles. Dans ce prolongement, un travail sera conduit dans les paragraphes suivants de manière à concevoir un filtre optimal au sens de Canny pour la détection des contours en forme de toit présents dans les images d'épandage. En effet, concernant ce profil particulier, il est apparu que les filtres proposés par Ziou (1991), Laggoune (1995) ou Gouton et al. (2000) ne donnaient pas entièrement satisfaction.

2 DEFINITION D'UN FILTRE OPTIMAL DE DETECTION DE CONTOURS POUR LES IMAGES D'EPANDAGE

Dans le cadre d'un traitement bas niveau appliqué aux images d'épandage, la détection de contours vise à localiser les variations significatives de niveau de gris de type « lignes de crête » en vue d'identifier les trajectoires des granules éjectés dans le processus d'épandage.

De manière générale, une image naturelle issue de la vie courante, comporte plusieurs types de contours alors que dans la définition d'un filtre optimal, un seul modèle (éventuellement paramétré) est considéré. Le filtrage linéaire « optimal » s'avère donc souvent insuffisant pour modéliser la complexité des images réelles. En revanche, dans le cas d'image d'épandage les contours recherchés sont tous du même type et relativement de même échelle.

De manière à concevoir un filtre de dérivation adapté à cette situation spécifique nous nous attacherons à définir un modèle de contour théorique proche des contours réels puis nous rechercherons le filtre optimal en utilisant les fondements de l'approche de Canny.

2.1 ESTIMATION DE L'ALLURE DES CONTOURS A DETECTER

Les contours à détecter dans l'image correspondent aux traces laissées par les granules lors de leur mouvement sous un éclairage constant. La définition de l'allure théorique de ces profils directement à partir d'une image d'épandage est assez délicate compte tenu, d'une part, du faible écartement des trajectoires et, d'autre part, des variations du niveau moyen de gris local et du bruit engendrés par l'arrière plan. La figure 5-5 illustre cette difficulté.

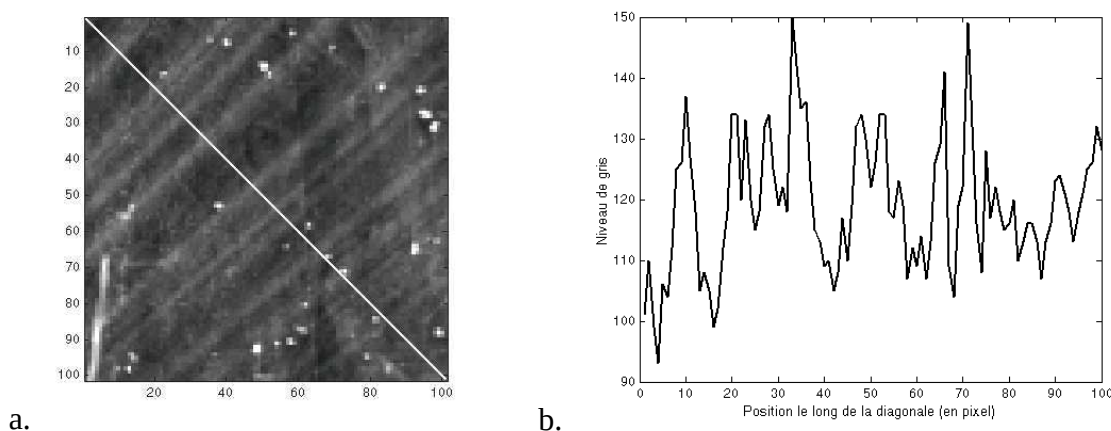


Figure 5-5 : Extrait d'une image d'épandage (a) et profil de niveau de gris (b) correspondant à la diagonale qui coupe les trajectoires transversalement.

De manière à approcher l'allure de ces contours en limitant l'offset et le bruit additif, il est possible d'assimiler l'allure du profil de la traînée laissée par un granule en mouvement à la somme des niveaux de gris des pixels représentant un granule immobile en projetant la valeur des niveaux de gris de chaque pixel sur un axe.

Pour mettre en oeuvre cette méthode, une image de granules immobiles est tout d'abord acquise. La zone contenant les granules étant extraite de cette image, les valeurs de niveaux de gris des pixels sont ensuite sommées selon les colonnes. Cette sommation fournit une courbe qui est une estimation du profil qui serait enregistré par une ligne de pixels devant laquelle le même granule se serait déplacé en étant animé d'un mouvement parallèle aux colonnes du CCD. Du fait de la sommation, cette courbe ne correspond pas à un simple profil de l'image des granules immobiles, elle simule l'intégration réalisée par les pixels lors du mouvement des granules en condition d'épandage.

La figure 5-6 illustre cette démarche.

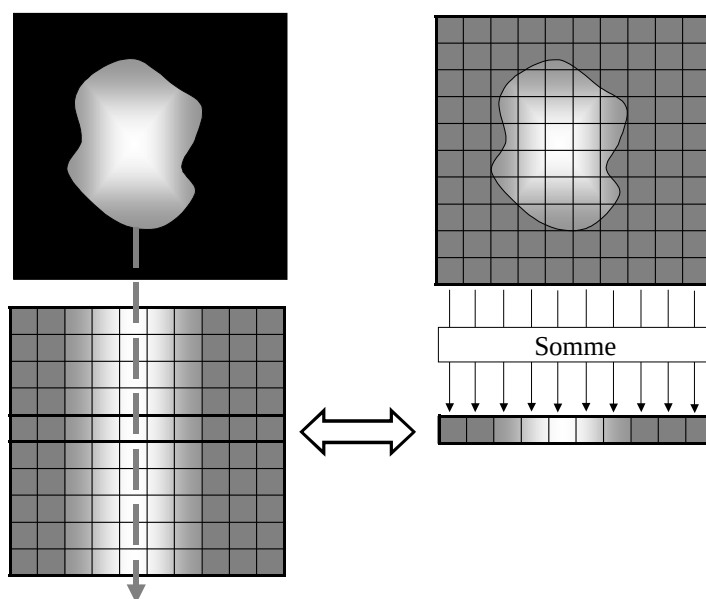


Figure 5-6 : Illustration de l'obtention du profil théorique d'une trajectoire à partir de l'image d'un granule statique.

En pratique, pour simuler les conditions réelles de prise de vue, un ensemble de granules est placé sous la caméra sur un plan horizontal à la même hauteur que le disque d'épandage. L'éclairage est réalisé par les projecteurs tels qu'ils sont utilisés pour l'acquisition des images d'épandage. Le niveau de gris de l'arrière plan est maintenu à une faible valeur au moyen d'un tissu noir. Le diaphragme de la caméra est réglé de manière à ce qu'aucun pixel ne sature dans la zone de l'image où sont localisés les granules.

Pour quatre catégories de granules (billes, ammonitrate, chlorure de potassium (KCl) et engrais ternaire NPK), une série de 8 échantillons est disposée sous la caméra sur un support dont l'altitude correspond à celle du disque d'épandage. Quatre billes neuves et quatre billes usagées sont utilisées. Pour les engrais, les granules sont choisis de manière à représenter au mieux la variété des formes (taille et conformation). Les granules sont grossièrement orientés de manière à ce que la plus grande dimension soit approximativement dans le sens des colonnes de pixels de l'image.

La figure 5-7 montre la disposition des granules et la zone de l'image contenant ces granules, telle qu'elle est obtenue par la caméra utilisée pour l'acquisition des images d'épandage.

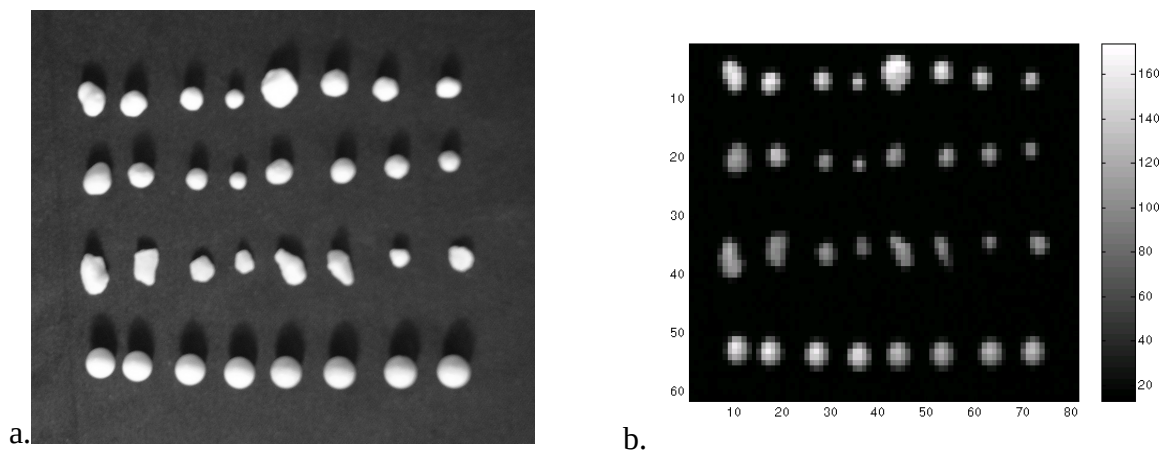


Figure 5-7 : a - Vue de la disposition des granules éclairés par les projecteurs. Du haut vers le bas : ammonitrate, NPK, KCl et billes (neuves à gauche et usagées à droite). b - Extrait de l'image correspondante, acquise par la caméra CCD de la maquette d'étude.

L'image acquise dans les conditions décrites précédemment a l'avantage d'être peu bruitée et présente un arrière plan dont le niveau de gris est relativement constant.

Les profils de contours établis à partir de cette image ont l'avantage d'intégrer les conditions réelles de prise de vue et notamment les paramètres suivants :

- la distance entre la caméra et les granules,
- la discrétisation de l'image des granules,
- l'éclairement latéral des granules par les projecteurs,
- la réflexion des granules.

A titre d'exemple, la figure 5-8 présente la courbe des profils de contours déduite de la zone de l'image correspondant aux granules de chlorure de potassium (KCl) ainsi que l'image synthétique des trajectoires qui lui correspondrait.

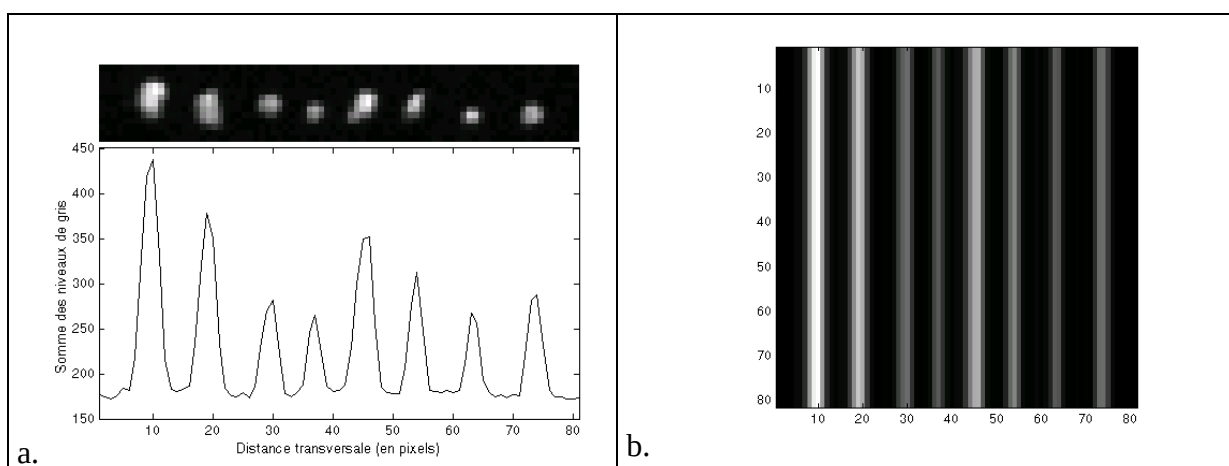


Figure 5-8 : a - Zone de l'image couvrant 8 granules de chlorure de potassium et profils, de contours correspondants, obtenus par sommation des niveaux de gris selon les colonnes. b - Image synthétique de trajectoires de granules construite sur la base des informations extraites de l'image de granules immobiles.

Les profils de niveaux de gris obtenus pour l'ammonitrate, l'engrais NPK, le chlorure de potassium et les billes sont fournis en annexe 3.

2.1.1 MODELISATION DE LA TRACE LAISSEE PAR DES GRANULES

Les contours en forme de toit déduits de la prise de vue des granules immobiles font apparaître une certaine largeur qui est mal modélisée par les modèles de contours proposés par Ziou ou Laggoune. Néanmoins, le modèle de Laggoune est préférable à celui de Ziou dans la mesure où il est plus proche du profil de contour estimé expérimentalement.

A titre d'exemple la figure 5-9 donne le meilleur ajustement des modèles de Ziou et de Laggoune au profil de niveau de gris estimé pour la trace d'un grain de chlorure de potassium.

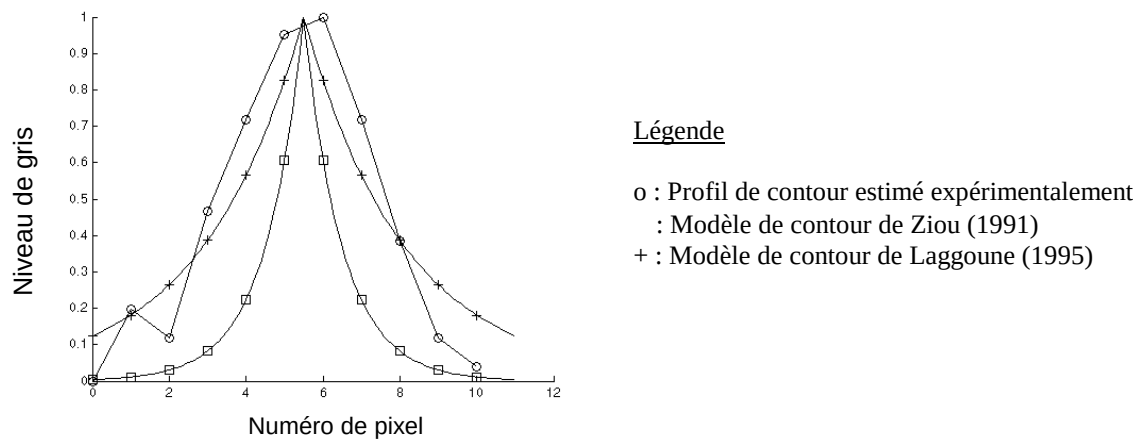


Figure 5-9 : Exemple de profil de contour estimé expérimentalement et essai d'ajustement par les modèles de contours proposés par Ziou (1991) et Laggoune (1995). Le paramètre du modèle de Laggoune est pris égal à 0.38 pour ajuster la courbe au mieux au sens des moindres carrés.

2.1.2 CHOIX DU MODELE DE CONTOUR

Les modèles proposés dans la littérature pour les contours en forme de toit ajustant relativement mal les contours estimés expérimentalement pour les trajectoires de granules d'engrais dans les images d'épandage, il est opportun de rechercher un modèle plus adapté.

Un profil de contour dérivable en 0 et permettant de donner une certaine largeur au pic est ainsi recherché. La dérivabilité en 0 est souhaitée pour l'expression des critères de performance dans l'objectif de la détermination du filtre optimal de détection.

2.1.2.1 Modèle exponentiel lissé

Les modèles exponentiels de Ziou et de Laggoune ayant une allure trop aiguë, il semble intéressant d'envisager un modèle exponentiel lissé pour élargir la zone sommitale de la courbe.

La convolution du modèle de Laggoune ($C(x) = e^{-s|x|}$) avec un filtre de lissage de type boîte de largeur $2d$:

$$h(x) = U(x+d) - U(x-d) \text{ où } U(x) \text{ est la fonction d'Heaviside,}$$

conduit à la définition du modèle de contour suivant :

$$C(x) = \begin{cases} -\frac{1}{s}(e^{s(x-d)} - e^{s(x+d)}) & \text{pour } x < -d \\ \frac{1}{s}(e^{-s(x-d)} - e^{-s(x+d)}) & \text{pour } x > d \\ \frac{2}{s} - \frac{1}{s}(e^{-s(x+d)} + e^{s(x-d)}) & \text{pour } -d \leq x \leq d \end{cases}$$

L'allure de ce modèle de contour (figure 5-10) est intéressante mais le changement d'expression en $-d$ et $+d$ ne facilite pas l'application de la méthode des multiplicateurs de Lagrange pour la recherche du filtre optimal de détection (les bornes d'intégration pour l'ensemble des fonctions intégrales devant être les mêmes).

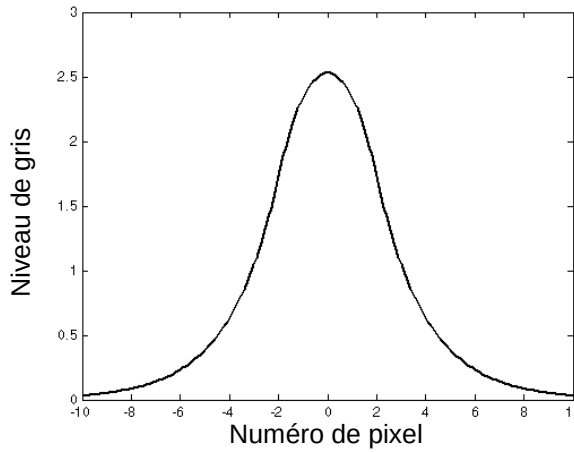


Figure 5-10 : Allure du profil de contour obtenu par convolution du modèle de Laggoune (en prenant $s = 0.5$) avec un filtre boîte (en prenant $d = 2$).

2.1.2.2 Modèle construit sur la base de deux exponentielles

Le modèle de contour précédent n'étant pas suffisamment pratique, une nouvelle expression est recherchée. Le modèle de contour a tout intérêt à être constitué d'exponentielles pour que la solution particulière à l'équation d'Euler reste simple.

L'expression est donc recherchée sous la forme d'une combinaison linéaire de deux exponentielles de la forme :

$$C(x) = ae^{-sx} + be^{-px}$$

en imposant les contraintes :

$$C'(0) = 0; C(\pm\infty) = 0; C(x) = C(-x); C'(x) < 0 \text{ sur } [0 + \infty[; C(0) = 1$$

L'expression suivante vérifie ces conditions :

$$C(x) = \frac{sp}{p-s} \left(\frac{e^{-s|x|}}{s} - \frac{e^{-p|x|}}{p} \right) \text{ pour } p > 0, s > 0 \text{ et } p \neq s \quad (5.4)$$

Cette fonction a la propriété d'être de classe C-infini (une démonstration de cette propriété est donnée en annexe 4).

En posant $s = m - d$ et $p = m + d$ l'expression (5.4) devient :

$$C(x) = \frac{m^2 - d^2}{2d} \left(\frac{e^{-(m-d)|x|}}{(m-d)} - \frac{e^{-(m+d)|x|}}{(m+d)} \right) \text{ avec } m > d > 0 \quad (5.5)$$

Il est possible de donner une valeur faible à d (par exemple $d = 0.01$) et de considérer ensuite seulement un paramètre variable m , comme illustré en figure 5-11.

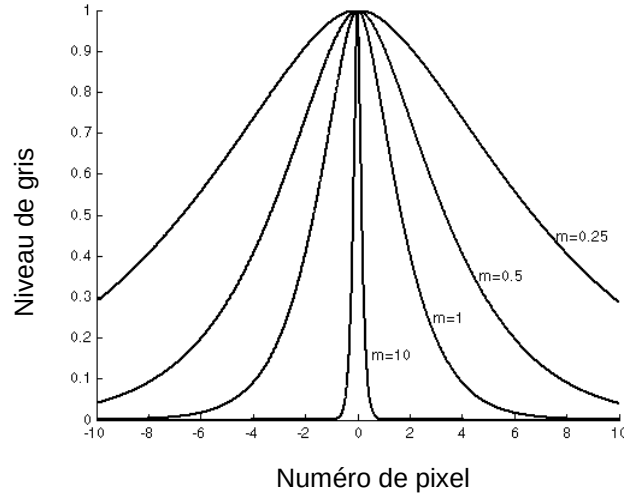


Figure 5-11 : Allures du modèle de contour pour différentes valeurs du paramètre m et $d = 0.01$.

Ce modèle de contour construit sur la base de deux exponentielles ajuste mieux les contours estimés expérimentalement que le modèle de Laggoune qui lui-même était préférable à celui de Ziou. A titre d'exemple, la figure 5-12 représente le meilleur ajustement (au sens des moindres carrés) du modèle de Laggoune et du modèle proposé ici pour un contour estimé expérimentalement à partir d'un grain de chlorure de potassium. La somme des carrés des écarts est respectivement de 0.18 et 0.06 pour le modèle de Laggoune et le modèle proposé dans ce paragraphe. Les ajustements obtenus par ces deux modèles pour l'ensemble des profils de contour estimés expérimentalement sont donnés à l'annexe 5.

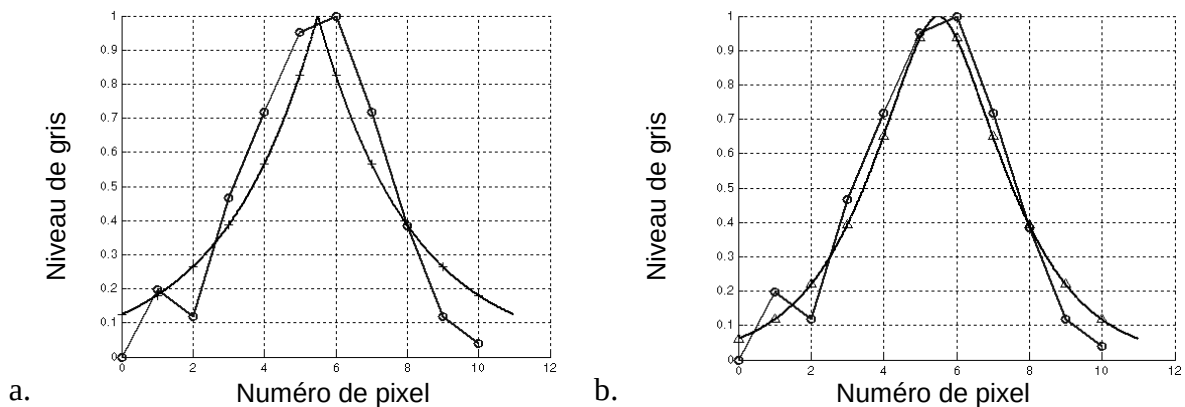


Figure 5-12 : Superposition de l'allure d'un contour estimé expérimentalement à partir d'un grain de chlorure de potassium (o) et du modèle de contour (+) de Laggoune (a) ou du modèle décrit dans ce paragraphe (b).

La recherche du filtre de détection des trajectoires de granules dans une image d'épandage sera réalisée en considérant ce modèle de contour théorique corrompu par l'addition d'un bruit blanc, gaussien et centré.

2.2 RECHERCHE DU FILTRE OPTIMAL PAR LA METHODE DE CANNY

Comme nous l'avons vu, la méthode de Canny consiste à rechercher le filtre optimal au sens de trois critères : bonne détection, bonne localisation et faible multiplicité des réponses. Cette technique est maintenant utilisée pour l'élaboration d'un filtre optimal de détection du profil de contour défini précédemment.

2.2.1 EXPRESSION DES CRITERES

La formulation mathématique du modèle de contour étant moins lourde avec l'expression (5.4), les calculs sont présentés en utilisant cette forme.

Pour ce modèle de contour les expressions des critères de Canny sont les suivantes :

$$\text{Détection : } \Sigma = \sqrt{2} \frac{\left| \int_{-\infty}^0 \frac{sp}{p-s} \left(\frac{e^{s|x|}}{s} - \frac{e^{p|x|}}{p} \right) f(x) dx \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f^2(x) dx}}$$

$$\text{Localisation : } \Lambda = \sqrt{2} \frac{\left| \int_{-\infty}^0 \frac{sp}{p-s} (se^{s|x|} - pe^{p|x|}) f(x) dx \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f'^2(x) dx}}$$

$$\text{Faible multiplicité des réponses : } x_m = 2\pi \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f'^2(x) dx}}{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f''^2(x) dx}}$$

2.2.2 RECHERCHE DE LA FONCTION OPTIMALE

2.2.2.1 Expression générale du filtre de détection

Le filtre de détection est recherché de manière à maximiser le produit des critères de détection et de localisation (donné ci-dessous) sous la contrainte du critère de faible multiplicité des réponses.

$$\Sigma\Lambda = 2 \frac{\left| \int_{-\infty}^0 \frac{sp}{p-s} \left(\frac{e^{s|x|}}{s} - \frac{e^{p|x|}}{p} \right) f(x) dx \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f^2(x) dx}} \frac{\left| \int_{-\infty}^0 \frac{sp}{p-s} (se^{s|x|} - pe^{p|x|}) f(x) dx \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^0 f'^2(x) dx}}$$

Le filtre optimal est recherché en minimisant $\int_{-\infty}^0 f^2(x) dx$ sous les contraintes suivantes :

$$\int_{-\infty}^0 f'^2(x)dx = c_1$$

$$\int_{-\infty}^0 f''^2(x)dx = c_2$$

$$\int_{-\infty}^0 \left(\frac{e^{s|x|}}{s} - \frac{e^{p|x|}}{p} \right) f(x)dx = c_3$$

$$\int_{-\infty}^0 \left(se^{s|x|} - pe^{p|x|} \right) f(x)dx = c_4$$

Ces contraintes sont isopérimétriques.

Sur $]-\infty ; 0]$ la fonction composite correspondant à ce problème d'optimisation est :

$$\Psi(x, f, f', f'') = f^2 + \lambda_1 f'^2 + \lambda_2 f''^2 + \lambda_3 \left(\frac{e^{s|x|}}{s} - \frac{e^{p|x|}}{p} \right) f(x) + \lambda_4 \left(se^{s|x|} - pe^{p|x|} \right) f(x)$$

où $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 sont les multiplicateurs de Lagrange.

En utilisant l'équation d'Euler :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial f} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial f'} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial f''} \right) = 0$$

l'équation différentielle que doit vérifier la fonction $f(x)$ recherchée est :

$$2f(x) - 2\lambda_1 f''(x) + 2\lambda_2 f''''(x) = - \left(\frac{\lambda_3}{s} + \lambda_4 s \right) e^{sx} + \left(\frac{\lambda_3}{p} + \lambda_4 p \right) e^{px} \quad (5.6)$$

La solution de l'équation différentielle homogène associée à (5.6) est celle établie par Canny sur $]-\infty 0]$:

$$f_H(x) = a_1 e^{\alpha x} \sin \omega x + a_2 e^{\alpha x} \cos \omega x + a_3 e^{-\alpha x} \sin \omega x + a_4 e^{-\alpha x} \cos \omega x \quad (5.7)$$

où a_1, a_2, a_3, a_4 sont des coefficients à déterminer et α, ω sont des paramètres du filtre.

Sur $]-\infty 0]$, une solution particulière de l'équation différentielle complète (5.6) est :

$$f_p(x) = a_5 e^{sx} + a_6 e^{px} \quad (5.8)$$

où a_5, a_6 sont des coefficients à déterminer et s, p sont des paramètres du filtre.

$$\text{avec : } a_5 = \frac{- \left(\frac{\lambda_3}{s} + \lambda_4 s \right)}{2(1 - \lambda_1 s^2 + \lambda_2 s^4)} \text{ et } a_6 = \frac{\left(\frac{\lambda_3}{p} + \lambda_4 p \right)}{2(1 - \lambda_1 p^2 + \lambda_2 p^4)} \quad (5.9)$$

Les fonctions définies par (5.7) et (5.8) ont été recherchées sur le domaine $]-\infty 0]$. En imposant la parité du filtre ($f(x) = f(-x)$), la forme générale de la solution sur $]-\infty +\infty[$ est :

$$f(x) = (a_1 \sin \omega |x| + a_2 \cos \omega |x|) e^{\alpha |x|} + (a_3 \sin \omega |x| + a_4 \cos \omega |x|) e^{-\alpha |x|} + a_5 e^{-s|x|} + a_6 e^{-p|x|}$$

Les coefficients a_1, a_2, a_3 et a_4 n'étant pas encore définis, les signes dus à la transformation de (5.7) sont intégrés aux coefficients pour alléger l'écriture.

Pour que le filtre soit stable, il doit vérifier : $f(+\infty) = f(-\infty) = 0$. En conséquence, la forme générale du filtre est finalement :

$$f(x) = (a_3 \sin \omega |x| + a_4 \cos \omega |x|) e^{-\alpha |x|} + a_5 e^{-s|x|} + a_6 e^{-p|x|} \quad (5.10)$$

La stabilité du filtre est assurée lorsque α , s et p sont strictement positifs (cf. annexe 6).

2.2.2.2 Expression générale du filtre de régularisation

Compte tenu du fait que $f(x)$ est une fonction paire et que la fonction de lissage $g(x)$ doit être paire, la fonction $g(x)$ est prise telle que $g''(x) = -f(x)$

$$g(x) = -(a_7 \sin \omega |x| + a_8 \cos \omega |x|) e^{-\alpha |x|} - \frac{a_5}{s^2} e^{-s|x|} - \frac{a_6}{p^2} e^{-p|x|}$$

avec :

$$a_7 = \frac{a_3(\alpha^2 - \omega^2) - 2a_4\alpha\omega}{(\alpha^2 + \omega^2)^2} \quad a_8 = \frac{a_4(\alpha^2 - \omega^2) + 2a_3\alpha\omega}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$$

2.2.2.3 Expression des coefficients des filtres

Les détails des calculs concernant l'expression des coefficients du filtre de détection et du filtre de lissage sont donnés en annexe 7.

Les contraintes imposées pour la détermination des coefficients sont synthétisées ci-dessous.

La fonction de détection devant être maximale en 0, sa dérivée doit être nulle en ce point. Cette condition sera vérifiée en imposant :

$$a_3\omega - a_4\alpha - a_5s - a_6p = 0$$

Il a également été choisi d'imposer à la fonction $f_p(x)$ d'être maximale en zéro ce qui implique :

$$a_5s + a_6p = 0$$

Ce choix n'est pas en contradiction avec les expressions établies en (5.9) pour a_5 et a_6 en prenant $s = (m-d)$ et $p = (m+d)$, avec d petit devant m .

Les coefficients du filtre de détection peuvent donc être écrits de la manière suivante :

$$a_5 = \frac{c_1}{s} ; a_6 = -\frac{c_1}{p} ; a_3 = \frac{c_2}{\omega} ; a_4 = \frac{c_2}{\alpha} \quad (5.11)$$

Par ailleurs, les coefficients de la fonction de détection sont choisis de manière à ce que l'opérateur réponde zéro à une entrée constante non nulle.

Le filtre développé étant destiné à une utilisation dans le domaine discret, la contrainte retenue est :

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k) = 0$$

ce qui conduit à vérifier :

$$a_3k_3 + a_4k_4 + a_5k_5 + a_6k_6 = 0 \quad (5.12)$$

Les coefficients k_3, k_4, k_5, k_6 sont donnés en annexe 7.

Enfin, de manière à conserver la dynamique de l'image lors de l'application de l'opérateur de régularisation la condition suivante est imposée :

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} g(k) = 1$$

Cette condition a pour expression :

$$(-a_3k_8 - a_4k_7)k_4 - (a_3k_7 - a_4k_8)k_3 - \frac{a_5}{s^2}k_5 - \frac{a_6}{p^2}k_6 = 1 \quad (5.13)$$

Les coefficients k_7, k_8 sont donnés en annexe 7.

Ces conditions ((5.11), (5.12), (5.13)) conduisent à exprimer les coefficients c_1 et c_2 de la manière suivante :

$$c_1 = \frac{1}{\left(\frac{k_5/s - k_6/p}{k_4/\alpha + k_3/\omega}\right) \left(\left(\frac{k_7}{\alpha} + \frac{k_8}{\omega}\right)k_4 + \left(\frac{k_7}{\omega} - \frac{k_8}{\alpha}\right)k_3 \right) - \left(\frac{k_5}{s^3} - \frac{k_6}{p^3}\right)}$$

$$c_2 = -\left(\frac{k_5/s - k_6/p}{k_4/\alpha + k_3/\omega}\right)c_1$$

2.3 IMPLEMENTATION RECURSIVE DES FILTRES EN 2D

Le passage à deux dimensions s'opère sur la base de la séparabilité en utilisant comme filtre de régularisation la double primitive du filtre de détection.

Le gradient horizontal est calculé par combinaison d'un lissage vertical et d'une dérivation horizontale, alors que le gradient vertical est calculé par combinaison d'un lissage horizontal et d'une dérivation verticale.

L'expression des transformées en Z conduit à une implémentation récursive de quatrième ordre des filtres de détection et de lissage.

Les parties causales $F_+(z)$ et anti-causales $F_-(z)$ de la transformée en Z du filtre $f(x)$ de dérivation peuvent être écrites sous la forme :

$$F_+(z) = \frac{a_{10} + a_{11}z^{-1} + a_{12}z^{-2} + a_{13}z^{-3}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}}$$

$$F_-(z) = \frac{a_{14}z + a_{15}z^2 + a_{16}z^3 + a_{17}z^4}{1 + b_1z^1 + b_2z^2 + b_3z^3 + b_4z^4}$$

Les équations aux différences de l'opérateur de détection sont déduites de ces expressions :

$$y_+(n) + b_1y_+(n-1) + b_2y_+(n-2) + b_3y_+(n-3) + b_4y_+(n-4)$$

$$= a_{10}x(n) + a_{11}x(n-1) + a_{12}x(n-2) + a_{13}x(n-3)$$

$$\begin{aligned}
& y_-(n) + b_1 y_-(n-1) + b_2 y_-(n-2) + b_3 y_-(n-3) + b_4 y_-(n-4) \\
& = a_{14} x(n+1) + a_{15} x(n+2) + a_{16} x(n+3) + a_{17} x(n+4)
\end{aligned}$$

Les coefficients a_i $i = 10$ à 17 et b_i $i = 1$ à 4 sont donnés en annexe 7.

Une normalisation peut être réalisée par un coefficient N_f :

$$y(n) = N_f (y_+(n) + y_-(n))$$

en définissant par exemple N_f de manière à rendre unitaire la réponse du filtre au modèle de contour en 0 :

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} N_f f(x) C(-x) = 1$$

L'expression de N_f est donnée en annexe 7.

De manière analogue, pour le filtre de régularisation, les parties causale $G_+(z)$ et anti-causale $G_-(z)$ de la transformée en z du filtre $g(x)$ sont :

$$\begin{aligned}
G_+(z) &= -\frac{a_{20} + a_{21}z^{-1} + a_{22}z^{-2} + a_{23}z^{-3}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}} \\
G_-(z) &= -\frac{a_{24}z + a_{25}z^2 + a_{26}z^3 + a_{27}z^4}{1 + b_1z^1 + b_2z^2 + b_3z^3 + b_4z^4}
\end{aligned}$$

Les équations aux différences de l'opérateur de régularisation sont déduites de ces expressions :

$$\begin{aligned}
& y_+(n) + b_1 y_+(n-1) + b_2 y_+(n-2) + b_3 y_+(n-3) + b_4 y_+(n-4) \\
& = -a_{20} x(n) - a_{21} x(n-1) - a_{22} x(n-2) - a_{23} x(n-3) \\
& y_-(n) + b_1 y_-(n-1) + b_2 y_-(n-2) + b_3 y_-(n-3) + b_4 y_-(n-4) \\
& = -a_{24} x(n+1) - a_{25} x(n+2) - a_{26} x(n+3) - a_{27} x(n+4) \\
& y(n) = y_+(n) + y_-(n)
\end{aligned}$$

Les coefficients a_i pour $i = 20$ à 27 et b_i pour $i = 1$ à 4 sont donnés en annexe 7.

2.4 CHOIX DES PARAMETRES DES FILTRES

Les paramètres s et p (ou m et d) caractérisent le modèle de contour. Ils peuvent être fixés sur la base de la connaissance des conditions de prise de vue.

Le choix des paramètres α et ω peut quant à lui être guidé par l'allure des critères de performance. L'objectif visé pour les opérateurs est une application sur des images, donc dans le domaine discret. En conséquence, les critères de détection, de localisation et de faible multiplicité des réponses sont étudiés dans le cas discret (Demigny et al. (1995), Demigny et Kamlé (1997)).

2.4.1 CRITERES DE PERFORMANCE

Les détails concernant le calcul des critères de Canny discrets sont donnés en annexe 8. Pour un rapport signal sur bruit de 20 dB, les allures des critères de détection, de localisation ainsi que la distance moyenne entre maxima sont représentées sur les figures 5-13, 5-14 et 5-15 en fonction des valeurs des paramètres α et ω pour $m = 1$ et $d = 0.01$.

La figure 5-16 représente quant à elle le produit des critères de détection et de localisation.

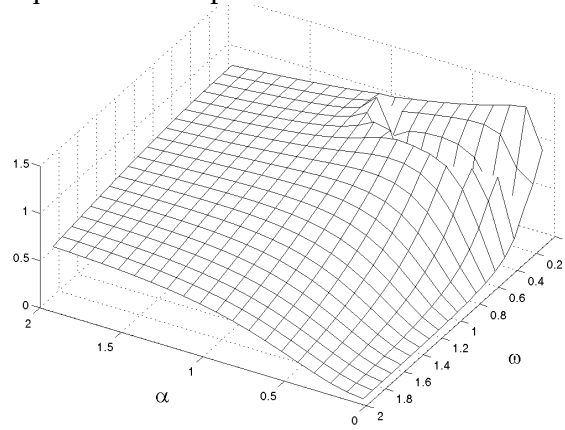


Figure 5-13 : Critère de détection en fonction des valeurs des paramètres α et ω .

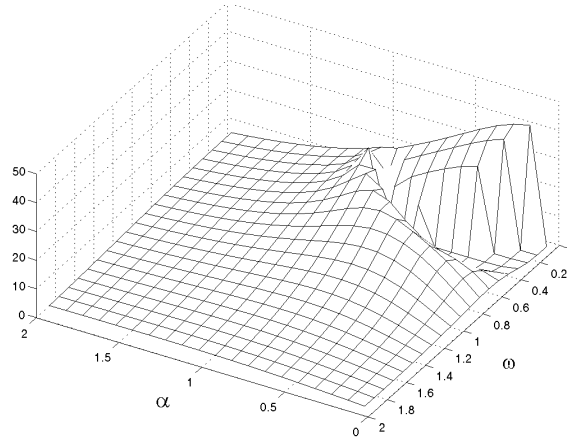


Figure 5-14 : Critère de localisation en fonction des valeurs des paramètres α et ω .

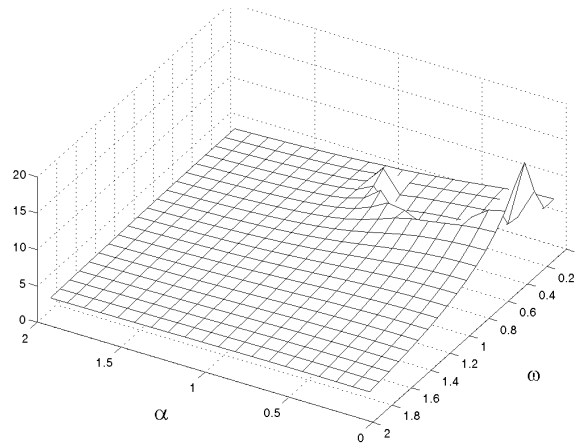


Figure 5-15 : Distance moyenne entre deux maxima en fonction des valeurs des paramètres α et ω .

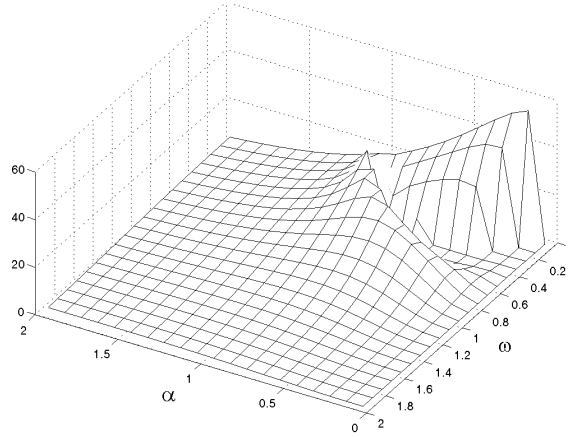


Figure 5-16 : Produit des critères de localisation et de détection en fonction des valeurs des paramètres α et ω .

L'observation des allures des critères de performance en fonction des paramètres α et ω conduit à choisir ω petit, par exemple $\omega = 0.01$.

Les allures des critères de performance tracées en fonction des paramètres α et ω font apparaître sous la forme d'un croissant un ensemble de combinaisons de paramètres à éviter. Ces combinaisons de paramètres correspondent aux valeurs pour lesquelles la fonction $f(x)$ présente un extremum en zéro mais qui n'est pas un maximum.

En effet, l'expression du filtre permet d'obtenir $f'(0) = 0$ quel que soit le choix des paramètres α et ω . En revanche, pour que la fonction présente un maximum en 0, il faut également que $f''(0) < 0$.

Cette condition se traduit par :

$$c_1(s-p) + c_2 \left(\frac{\alpha^2 - \omega^2}{\alpha} - 2\alpha \right) < 0$$

La figure 5-17 permet d'illustrer graphiquement ce phénomène en indiquant en noir la zone correspondant à un couple de paramètres (α, ω) conduisant à $f''(0) > 0$. Les combinaisons de paramètres correspondant à cette zone sont à éviter.

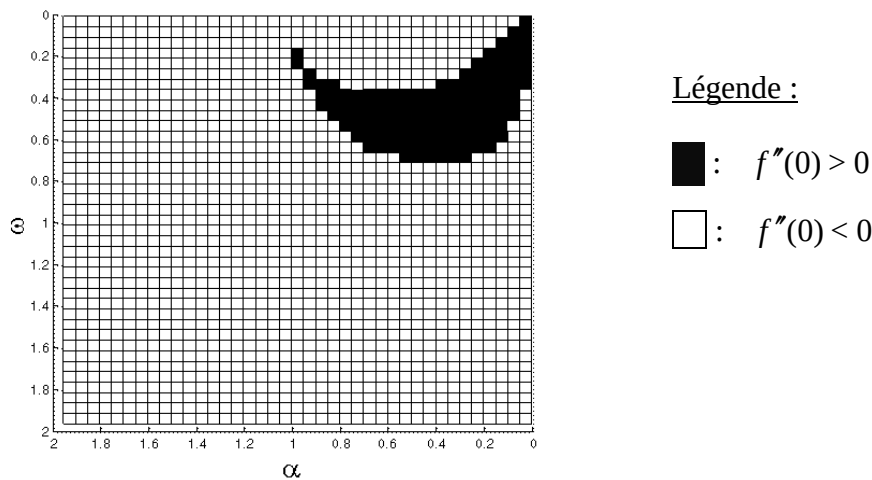


Figure 5-17 : Représentation de la fonction $\text{sign}(f''(0))$ en fonction des paramètres α et ω pour $m = 1$ et $d = 0.01$.

2.4.2 REPONSE EN FREQUENCE DES FILTRES

Dans le domaine discret, la transformée de Fourier est donnée par la valeur de sa transformée en Z sur le cercle de rayon unitaire en prenant $z = e^{j2\pi f}$ (la période d'échantillonnage étant de 1 pixel).

Les réponses fréquentielles des filtres de dérivation ($|F(e^{j2\pi f})|$) et de lissage ($|G(e^{j2\pi f})|$) sont des fonctions réelles et paires. Elles sont représentées sur la figure 5-18.

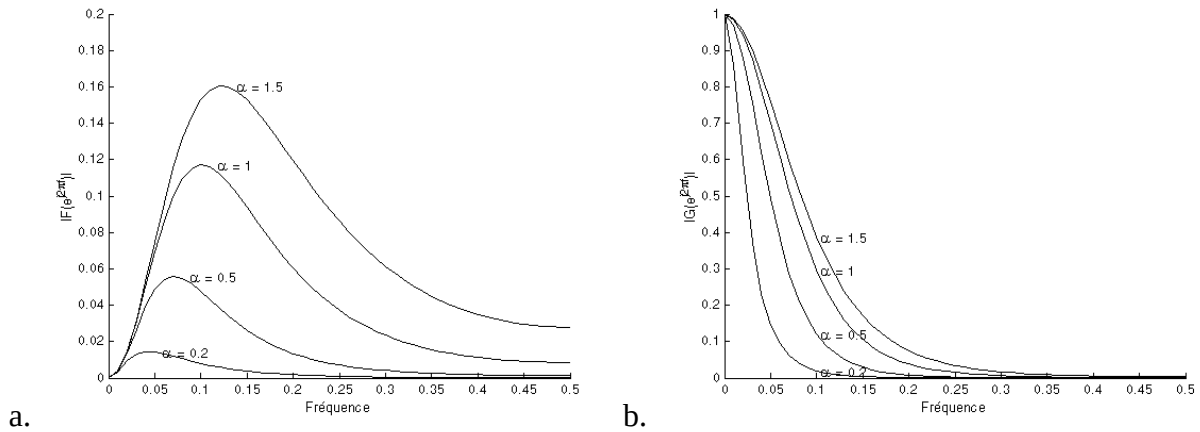


Figure 5-18 : Réponse en fréquence du filtre de dérivation $|F(e^{j2\pi f})|$ (a), et du filtre de lissage $|G(e^{j2\pi f})|$ (b), pour différentes valeurs de α et pour $\omega = 0.01$.

La largeur prévisible des traces laissées par les granules d'engrais dans les images d'épandage acquises en filé étant de l'ordre d'une petite dizaine de pixels, une valeur du paramètre α proche de 1 semble souhaitable.

Compte tenu de l'allure des critères de performance et des réponses fréquentielles des filtres, les valeurs à envisager pour les paramètres dans le cas de l'application du filtre aux images réelles d'épandage pourront être :

$$\omega = 0.01 \quad \text{et} \quad \alpha = 1$$

L'allure des réponses impulsionnelles des filtres de dérivation et de régularisation est donnée en figure 5-19 pour les paramètres choisis comme valeurs guides : $\omega = 0.01$, $\alpha = 1$, $m = 1$ et $d = 0.01$.

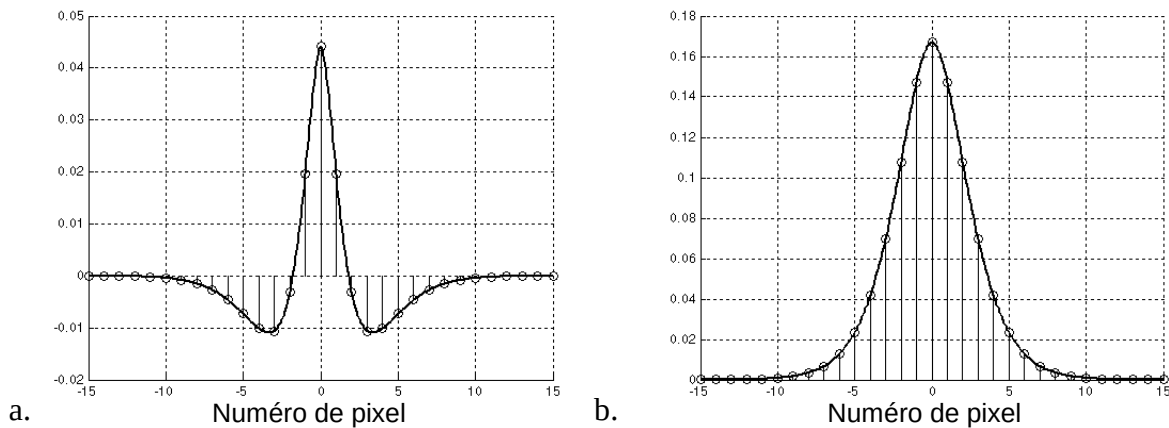


Figure 5-19 : Allure des réponses impulsionnelles du filtre de dérivation (a) et du filtre de lissage (b).

2.5 MISE EN OEUVRE DES FILTRES

2.5.1 DETERMINATION DE LA NORME DU GRADIENT ET DE L'ORIENTATION

Les filtres f et g précédemment décrits sont mis en oeuvre de manière récursive. L'image originale $I(x, y)$ est convoluée alternativement selon les lignes et selon les colonnes avec le filtre de détection f et le filtre de lissage g .

Les images de gradients qui en résultent sont :

$$I_x(x, y) = I(x, y) * f(x) * g(y)$$

$$I_y(x, y) = I(x, y) * f(y) * g(x)$$

où $*$ représente le produit de convolution.

Dans le cadre de notre application, seuls les contours en forme de toit présentant un maximum de niveau de gris sont recherchés. En conséquence, les valeurs négatives des pixels des images de gradients en x et en y sont mises à zéro avant le calcul de la norme du gradient :

$$I_{+x}(x, y) = \begin{cases} I_x(x, y) & \text{pour } I_x(x, y) \geq 0 \\ 0 & \text{pour } I_x(x, y) < 0 \end{cases}$$
$$I_{+y}(x, y) = \begin{cases} I_y(x, y) & \text{pour } I_y(x, y) \geq 0 \\ 0 & \text{pour } I_y(x, y) < 0 \end{cases}$$

La norme du gradient est alors calculée de la manière suivante :

$$N(x, y) = \sqrt{I_{+x}(x, y)^2 + I_{+y}(x, y)^2}$$

L'orientation du contour est calculée par :

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_{+y}(x, y)}{I_{+x}(x, y)}\right)$$

Le filtre de détection f étant une fonction paire, l'orientation n'est définie que sur l'intervalle $[0 \pi/2]$.

2.5.2 AFFINAGE ET SEUILLAGE PAR HYSTERESIS

Dans l'image de gradient, l'application d'un simple seuillage des valeurs de niveaux de gris permettrait d'accéder à un premier niveau d'information sur la localisation des principaux contours. Mais cette solution limiterait la qualité du résultat notamment en fournissant des contours épais, en favorisant les fausses détections de pixels dans les régions bruitées et en ne permettant pas la détection des pixels de contours pour lesquels le gradient est faible. Le résultat est amélioré en supprimant dans un premier temps les valeurs qui ne sont pas maximales dans la direction du gradient par rapport aux pixels adjacents (Canny, 1986).

Dans un second temps, l'image résultante est binarisée. L'application d'un seuil unique engendrerait de fortes discontinuités dans les contours obtenus, voire la disparition complète des contours dans certaines zones de l'image. L'utilisation de deux seuils de décision, proposée par Canny (1986), permet d'atténuer cette difficulté.

Les pixels dont la norme du gradient dépasse un seuil haut sont tout d'abord retenus. Les fractions de contours identifiées par ce premier seuillage sont ensuite prolongées par les points connexes dont le niveau de gris dépasse le seuil bas.

Bien que la méthode exposée par Canny soit la plus courante, de nombreuses autres techniques de seuillage ont été proposées pour déterminer de manière automatique des seuils pertinents (Rosin, 1995).

Dans le cadre de l'application du filtre aux images naturelles, les valeurs des seuils ont été définies sur la base d'un pourcentage de pixels détectés in fine par rapport au nombre total de pixels dans l'image de gradients. Le seuil haut a été choisi arbitrairement de manière à éliminer 50% des pixels de l'image de gradient et le seuil bas est pris égal à 50% du seuil haut.

Dans de nombreuses applications, l'extraction des contours est suivie d'une opération de fermeture de ceux-ci. Cette étape n'est pas utile dans le cadre de l'application sur les images d'épandage, l'opération de détection ayant ici seulement l'objectif de faire ressortir l'information utile et de réduire le volume des données. Ce premier niveau de traitement sera ensuite poursuivi par la recherche de primitives géométriques au moyen de la transformée de Hough.

3 EVALUATION PRATIQUE DE LA PERFORMANCE DE LA DETECTION

L'évaluation des algorithmes de détection de contours est en général un exercice délicat puisque sur une image naturelle il n'est pas possible de déterminer le résultat optimal. Les critères de qualité sont en toute rigueur fonction de l'application dans laquelle s'insère l'étape de détection de contours et peuvent être subjectifs.

Deux catégories d'évaluations pratiques de la détection de contours peuvent être distinguées :

- les évaluations nécessitant la connaissance de la position réelle des contours,
- les évaluations ne nécessitant pas la connaissance de la position réelle des contours.

Les méthodes nécessitant la connaissance de la position des contours ne peuvent être mises en oeuvre que sur des images synthétiques ou des images naturelles particulièrement simples. Dans les deux cas, les conclusions basées sur ces comparaisons peuvent être relativisées du fait de l'éloignement avec les conditions réelles de prise de vue ou de la complexité d'une scène réelle.

Généralement, les méthodes d'évaluation qui n'utilisent pas de connaissance sur les contours se basent sur une mesure de cohérence des positions de pixels détectés. En conséquence, ces approches sont mal adaptées à l'évaluation de la délocalisation engendrée par les opérateurs de détection.

3.1 EVALUATION SUR IMAGES SYNTHETIQUES

Il est possible d'évaluer la performance de la technique de détection en utilisant des images synthétiques. Les perturbations peuvent alors être additionnées à un profil de contour théorique tout en maîtrisant l'ampleur des dégradations. L'image résultant du traitement est ensuite confrontée à l'image du contour idéal.

Les performances du filtre décrit dans ce chapitre sont évaluées et comparées à celles d'autres détecteurs en utilisant l'indice de Pratt.

3.1.1 PRINCIPE DE L'INDICE DE PRATT

Les travaux de Fram et Deutsch (1975, cités par Cocquerez et Philipp 1995), ainsi que ceux de Abdou et Pratt (1979) consistent à calculer des indices de performance en considérant une image synthétique contenant un seul contour et dont l'image résultat après détection doit être binaire.

Le facteur de mérite (ou indice) proposé par Abdou et Pratt se base sur la distance moyenne qui sépare les pixels détectés du contour théorique. Il prend également en compte les non-détections et les fausses détections. Il suppose la sélection d'une fenêtre d'étude centrée sur le contour et éloignée des bords de l'image.

L'expression de l'indice est :

$$I_p = \frac{1}{\max(N_{Id}, N_D)} \sum_{i=1}^{N_D} \frac{1}{1 + \alpha d^2(i)}$$

avec :

N_{Id}	Nombre de pixels du contour idéal dans la fenêtre d'étude.
N_D	Nombre de pixels retenus par la procédure de détection après la binarisation dans la fenêtre d'étude par la méthode utilisée.
$d(i)$	Distance entre le $i^{\text{ème}}$ pixel retenu et la position idéale du contour (mesurée perpendiculairement au contour).
α	Facteur d'échelle constant induisant une pénalité relative entre un contour élargi et un contour décalé. Il est pris égal à 1/9 par les auteurs.

Dans le cas d'une détection parfaite, l'égalité entre N_{Id} et N_D ainsi que l'annulation des distances $d(i)$ conduit à la valeur maximale de l'indice soit : $I_p = 1$.

L'exploitation de cet indice est classiquement réalisée en traçant son évolution en fonction du RSB d'une série d'images intégrant des dégradations croissantes.

La binarisation nécessaire au calcul de l'indice de Pratt introduit dans la comparaison des filtres un biais lié au choix de la valeur utilisée pour le seuillage. Mériaudau et al. (1995) contournent cette difficulté en considérant qu'un pixel est détecté si son niveau de gris est supérieur à la moyenne statistique de l'image.

Le principal inconvénient reproché à cet indice est de rendre difficile l'analyse des erreurs commises par le détecteur évalué (Ziou et Tabbone, 1998).

3.1.2 CONSTRUCTION DE L'IMAGE DE SYNTHESE

L'image de synthèse est construite en considérant le profil de contour dont l'allure est définie en (5.5) en prenant $m = 1$ et $d = 0.01$ et en considérant une amplitude $A = 50$. Ce profil est superposé à un fond dont le niveau de gris évolue de manière linéaire de 0 à 150. La figure 5-20 illustre la construction de cette image de synthèse.

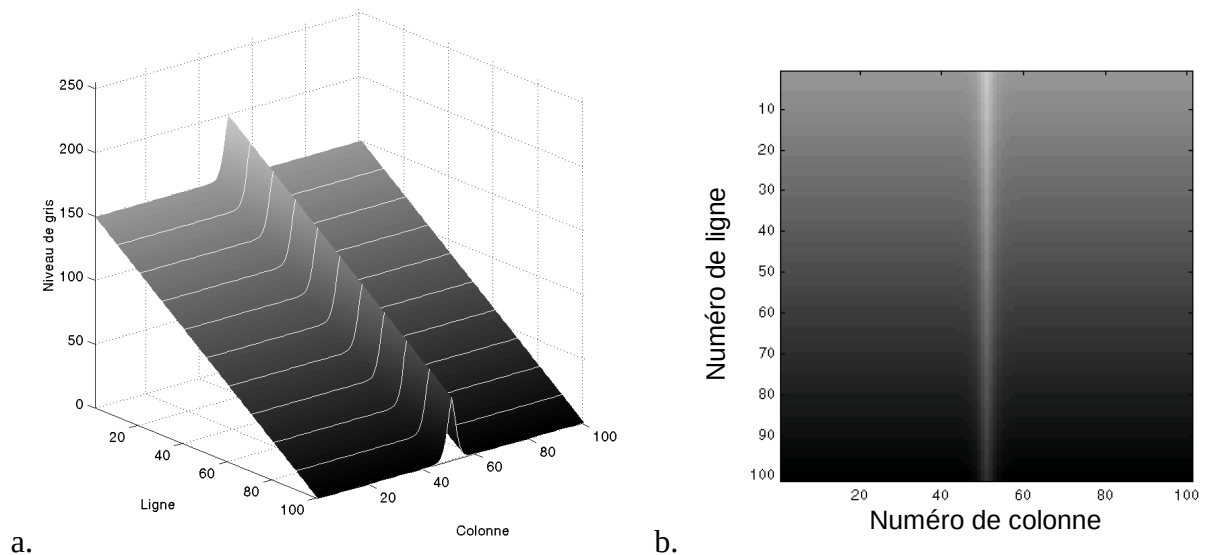


Figure 5-20 : a - Illustration de la construction d'une image de synthèse (ici 101x101). La dimension verticale correspond au niveau de gris des pixels. **b** – Image de synthèse (ici 101x101)

L'image est ensuite dégradée par un lissage au moyen d'un filtre moyennneur 3x3 et par l'addition d'un bruit, blanc, gaussien et centré. La figure 5-21 illustre cette dégradation.

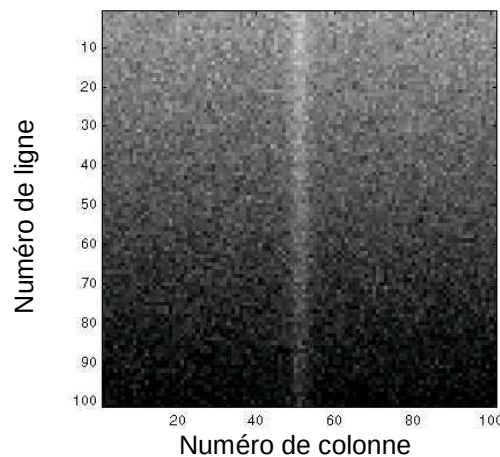


Figure 5-21 : Image de synthèse (101x101) dégradée par un bruit additif, blanc, gaussien et centré correspondant à un rapport signal à bruit (RSB) de 10 dB.

Pour pouvoir tracer l'évolution de l'indice de Pratt en fonction du rapport signal à bruit, une série de onze images a été créée avec les valeurs suivantes de RSB : 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40, 50 et 100 dB.

3.1.3 EVALUATION ET COMPARAISON AUX FILTRES DE LA LITTÉRATURE

Cinq filtres différents ont été appliqués sur les onze images de synthèse construites précédemment.

Le tableau ci-après donne la liste des filtres utilisés et présente les valeurs utilisées pour les paramètres des filtres.

Deriche	$\alpha = 1$
Ziou	$\alpha = 1, \omega = 0.01$
Ziou « modifié »	$\alpha = 1, \omega = 0.01$
Laggoune	$\alpha = 0.5, \omega = 0.5, s = 0.5$
Filtre proposé	$\alpha = 0.2, \omega = 0.01, m = 1 ; d = 0.01$

Les valeurs des paramètres ont été choisies parmi celles que les auteurs ont utilisées dans leurs publications.

Le filtre de Ziou « modifié » correspond à un filtre développé sur la base d'une fonction présentée par Ziou (1991) mais pour laquelle les coefficients ont été déterminés de manière à satisfaire une utilisation dans le cas discret. Les détails concernant ce filtre modifié sont donnés à l'annexe 9.

La procédure permettant de déterminer l'indice de Pratt pour chaque filtre et chaque image est la suivante. L'opération de filtrage est menée sur une image de taille 1101x1101 pixels. Un pourtour de 50 pixels est ensuite supprimé de manière à éviter les effets de bord. Après une étape d'extraction des maxima locaux dans la direction du gradient, l'image résultante est binarisée au moyen d'un seuil unique. La valeur du seuil est déterminée pour chaque filtre et chaque image de manière à être optimale au sens de l'indice de Pratt. Cette démarche évite ainsi les biais au niveau de la comparaison des résultats obtenus par les différents filtres.

La figure 5-22 donne l'évolution de l'indice de Pratt en fonction du rapport signal à bruit pour chacun des filtres cités ci-dessus.

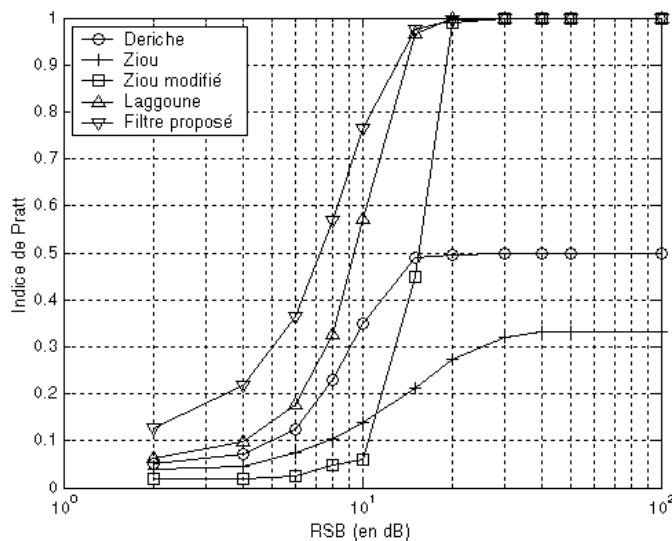


Figure 5-22 : Indice de Pratt en fonction du rapport signal à bruit (RSB) pour les filtres de Deriche, Ziou, Ziou « modifié », Laggoune ainsi que pour le filtre développé dans ce chapitre.

L'opérateur de dérivation de premier ordre de Deriche ne permet pas d'obtenir de bons résultats car il engendre une double détection de part et d'autre de l'axe du contour réel.

Le filtre de Ziou donne de mauvais résultats car il ne permet pas d'éliminer les valeurs de niveaux de gris constantes selon les lignes de l'image. En conséquence, l'étape de seuillage ne permet pas de recueillir les pixels de contour à travers toute l'image même pour des images très peu bruitées.

Le filtre de Ziou « modifié » dont les coefficients ont été adaptés à une utilisation dans le domaine discret donne des résultats très satisfaisants pour les images dont le RSB est supérieur ou égal à 20 dB.

Le filtre de Laggoune est plus performant que le filtre de Ziou modifié pour les images bruitées (en dessous de 20 dB).

Le filtre proposé offre une performance supérieure à l'ensemble des autres filtres testés pour les images bruitées. Il permet d'atteindre un indice de Pratt supérieur de 120 % à celui obtenu pour le filtre de Laggoune pour un RSB de 4 dB.

La figure 5-23 présente l'amélioration obtenue au niveau de l'indice de Pratt lorsque la détection est réalisée avec le filtre proposé dans ce chapitre par rapport à la valeur d'indice obtenue lorsque la détection est effectuée avec le filtre de Laggoune

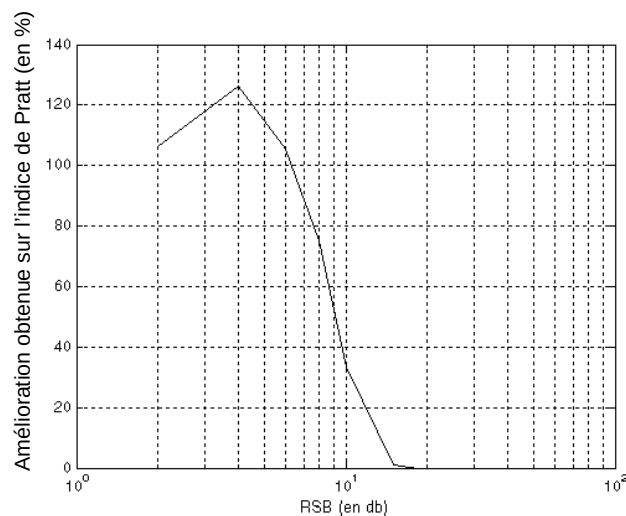


Figure 5-23 : Amélioration (en %) obtenue au niveau de l'indice de Pratt lorsque la détection est réalisée avec le filtre proposé par rapport à la valeur d'indice obtenue lorsque la détection est effectuée avec le filtre de Laggoune.

L'évaluation sur images de synthèse permet de montrer que les performances du filtre proposé dans ce document sont meilleures (au sens de l'indice de Pratt) que celles obtenues avec les autres filtres testés.

3.2 EVALUATION SUR IMAGES NATURELLES

Les évaluations sur des images naturelles peuvent être classées en deux catégories selon qu'elles font appel ou non à une expertise humaine.

D'après Salotti (1994), il est possible d'envisager une évaluation pragmatique en examinant les valeurs numériques de gris plutôt que l'image brute. D'après l'auteur, en utilisant l'expertise humaine sur ces valeurs, une carte de contours de référence peut être construite. Cependant, l'auteur admet qu'il est parfois difficile de se prononcer sur la présence d'une discontinuité ou de la localiser. En revanche, il souligne que l'analyse des niveaux de gris permet de mettre en exergue les erreurs et les faiblesses d'un algorithme.

Heath et al. (1997) proposent une méthode qui utilise une évaluation subjective des contours par un groupe d'individus évaluateurs. Dans leurs travaux, les auteurs ont appliqué cinq algorithmes de détection de contours avec différentes combinaisons de paramètres sur une série d'images d'objets de la vie courante. Chaque image est ensuite notée par chaque

évaluateur en fonction de la facilité avec laquelle l'image traitée permet la reconnaissance de l'objet. Les résultats de notation font ensuite l'objet de tests statistiques pour s'assurer de la corrélation entre les appréciations des différents évaluateurs.

Bien qu'une attention particulière ait été portée au choix des combinaisons de paramètres fournis aux algorithmes, les auteurs soulignent que l'obtention des paramètres optimaux n'est pas garantie, ce qui est une source de biais pour la comparaison des opérateurs de détection.

Heath et al. signalent également que les méthodes d'évaluation faisant abstraction de toute connaissance a priori de la position des contours ne permettent pas de juger de la qualité de la localisation des contours détectés.

Baker et Nayar (1999) proposent une évaluation de la performance sur la base de quatre mesures globales de cohérence. Chacun de ces indicateurs résulte d'une contrainte sur des contours particuliers dans une scène. Les quatre contraintes que se donnent les auteurs pour élaborer leurs mesures globales de performance sont : tous les contours sont colinéaires ou tous les contours se croisent ou tous les contours sont parallèles ou tous les contours suivent une ellipse. Pour répondre à ce type de contrainte, il semble que les images doivent pouvoir être scindées en scènes particulièrement simples.

Yitzhaky et Peli (2003) proposent une méthode objective d'évaluation des détections de contours basée sur une analyse de la correspondance des résultats de détection obtenus par différents opérateurs. D'après les auteurs, l'approche a l'avantage de ne requérir aucune intervention humaine ni spécification manuelle de paramètres.

La méthode considère qu'un pixel détecté dans une image au moyen de différents filtres et différentes combinaisons de paramètres a une forte probabilité d'appartenir à un contour.

L'approche fournit également une technique de choix automatique de paramètres. Néanmoins, il faut souligner que la combinaison de paramètres sélectionnée comme optimale pour une image donnée et un détecteur fixé ne peut qu'être extraite d'une série finie de combinaisons de paramètres fournie initialement à l'algorithme par l'utilisateur.

La littérature propose une grande variété d'approches en ce qui concerne l'évaluation des performances d'une détection de contours sur une image naturelle. Néanmoins, aucune de ces techniques ne semble encore être considérée comme méthode de référence.

3.2.1 EVALUATION DU FILTRE PROPOSE SUR UNE IMAGE TRADITIONNELLE

Bien que l'objectif du filtre élaboré dans ce document ne soit pas d'opérer une détection de contours sur des images de la vie courante il est néanmoins intéressant de l'appliquer à une image de test classique en traitement d'images de manière à souligner ses spécificités.

Une détection de contours au moyen du filtre proposé et avec le filtre de Deriche est ainsi opérée sur l'image « Léna » en niveau de gris, de taille 512x512 pixels et codée sur 8 bits (figure 5-24).



a.



b.



c.

Figure 5-24 : a - Image test « Léna » de taille 512x512 en niveaux de gris codés sur 8 bits ;
b - Résultat de la détection de contours obtenu avec le filtre proposé ($\alpha = 1$, $\omega = 0.01$, $m = 1$,
 $d = 0.01$) ; c – Résultat de la détection de contours obtenu avec le filtre de Deriche ($\alpha = 1$).

Face à ces différents résultats de détection, il apparaît clairement que les critères utilisés pour évaluer visuellement la qualité de la détection sont propres à chaque observateur et plus ou moins inconscients. De plus, l'aspect visuel est fonction du choix des paramètres des filtres et des traitements d'affinage éventuellement mis en oeuvre. Les images de contours présentées ici n'ont subi qu'une recherche des maxima locaux dans la direction du gradient suivie d'un seuillage hystérésis. Ces traitements sont rigoureusement les mêmes pour les deux filtres.

Notons que pour améliorer la qualité visuelle des images résultats, une opération d'affinage morphologique, un chaînage des contours ainsi qu'une opération de suppression des chaînes de pixels de faibles longueurs pourraient notamment être envisagés.

La figure 5-25 superpose sur un détail de l'image en niveaux de gris le résultat de la détection obtenu par le filtre proposé ou le résultat de la détection obtenu par le filtre de Deriche.



a.



b.

Figure 5-25 : Superposition sur un détail de l'image en niveaux de gris du résultat de la détection des contours obtenu au moyen du filtre proposé (a) ou du filtre de Deriche (b).

L'observation des détails de la détection montre clairement les différences de comportement des filtres. Le filtre proposé localise bien l'arête du nez et la mèche de cheveux, mais délocalise le contour de la joue et du miroir. Cette délocalisation est plus ou moins accentuée en fonction du choix des paramètres du filtre.

A l'inverse, le filtre de Deriche localise bien le contour de la joue et du miroir. En revanche, il engendre une double détection de l'arête du nez et de la mèche de cheveux.

Ces observations sont en cohérence avec les objectifs assignés à chacun des deux filtres, l'opérateur proposé dans ce document visant à détecter les profils en forme de toit présentant un maximum d'intensité alors que l'opérateur de Deriche vise à détecter les transitions en forme de marche.

Dans le cas général, il paraît donc difficile de comparer visuellement deux filtres de détection de manière objective sur une image naturelle.

En revanche, dans le cas des images d'épandage, l'évaluation visuelle du résultat de la détection à plus de sens puisque les objectifs de cette étape de traitement sont clairement définis.

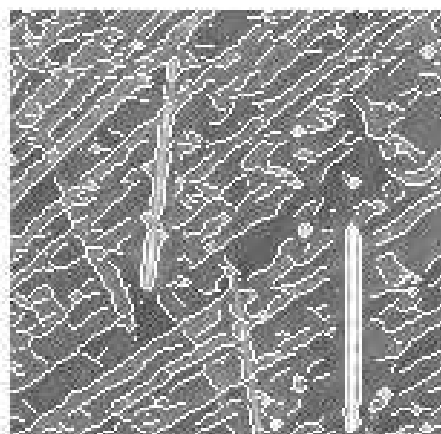
3.2.2 EVALUATION SUR UNE IMAGE D'EPANDAGE

La figure 5-26 présente un extrait d'une image d'épandage en niveaux de gris et les résultats de détection de contours obtenus avec le filtre de Deriche, le filtre de Ziou, le filtre de Ziou « modifié », le filtre de Laggoune et le filtre proposé dans ce document.

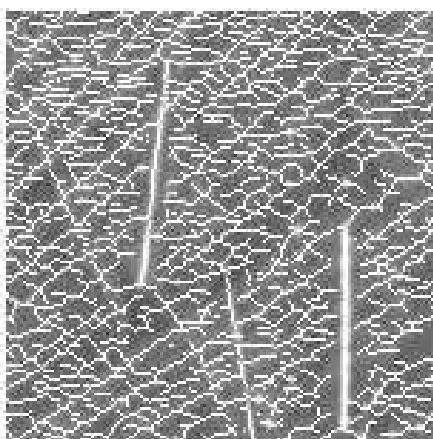
De manière prévisible, le filtre de Deriche engendre une double détection de chaque trajectoire. Ce comportement est caractéristique des opérateurs de dérivée première associés à une recherche du maximum du gradient. Le filtre de Ziou (1991) détecte de nombreux pixels qui ne se situent pas sur les axes des trajectoires empruntées par les granules. Ces fausses détections sont notamment dues au biais existant dans l'estimation de l'orientation du gradient lors de la phase d'affinage et seuillage. En revanche, la détection est satisfaisante lorsque la version « modifiée » du filtre de Ziou est utilisée.



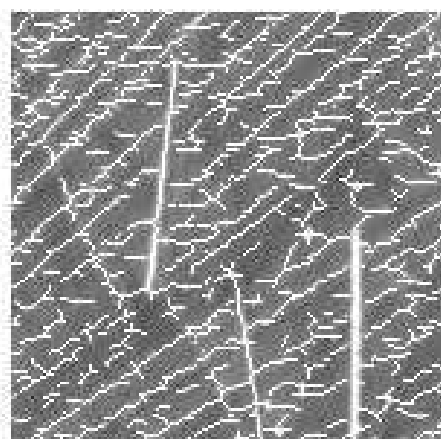
a.



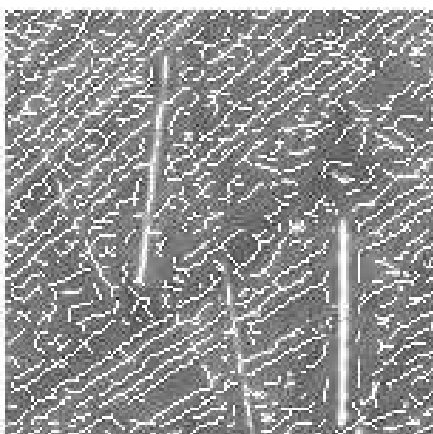
b.



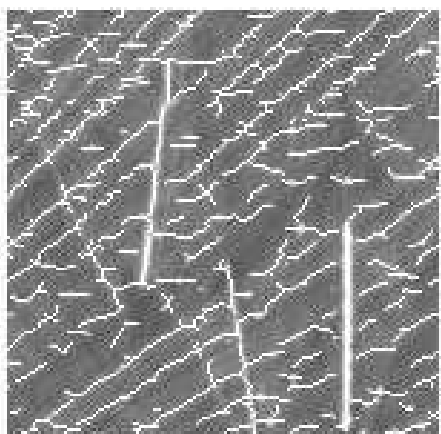
c.



d.



e.



f.

Figure 5-26 : a – Extrait d’une image d’épandage en niveaux de gris ; b – Résultat de la détection avec le filtre de Deriche ($\alpha = 1$) ; c – Résultat de la détection avec le filtre de Ziou ($\alpha = 1$, $\omega = 0.01$) ; d - Résultat de la détection avec le filtre de Ziou adapté au cas discret ($\alpha = 1$, $\omega = 0.01$) ; e - Résultat de la détection avec le filtre de Laggoune ($\alpha = 0.5$, $\omega = 0.5$, $s = 0.5$) ; f - Résultat de la détection avec le filtre proposé ($\alpha = 1$, $\omega = 0.01$, $m = 1$, $d = 0.01$).

Le filtre de Laggoune, appliqué tel qu'il est proposé par Laggoune (1995) et Gouton et al. (2000), détecte les lignes de crêtes (présentant un maximum local d'intensité) mais également les vallées (caractérisées par un minimum local d'intensité). La sélection des lignes de crêtes pourrait être réalisée en annulant les pixels de valeurs positives dans les images de gradients lorsque les paramètres sont $\alpha = 0.5$, $\omega = 0.5$, $s = 0.5$. Néanmoins, compte tenu de la variation de l'allure de la fonction de lissage proposée par Gouton et al. (2000), qui peut être positive ou négative en fonction du choix des paramètres, il serait préférable d'intervenir directement sur cette fonction.

L'appréciation visuelle de la détection de contours obtenue sur une image réelle d'épandage ne constitue pas une évaluation parfaite des filtres envisagés. Le résultat obtenu dépend notamment du choix des paramètres des filtres qui peut toujours être remis en question. Néanmoins, cette évaluation permet d'identifier les situations où les algorithmes donnent un résultat nettement incorrect vis à vis des objectifs visés.

Concernant le filtre proposé dans ce document, la figure 5-26-f montre qu'il permet d'atteindre l'objectif fixé en détectant dans une image bruitée les axes des traces laissées par les granules pendant leur vol au voisinage du disque d'épandage.

4 CONCLUSION

Dans notre application, le traitement bas niveau de l'image a pour objectif de sélectionner l'information utile et de réduire la quantité d'information globale initialement présente dans l'image.

Ce traitement est réalisé au moyen d'un filtre linéaire défini de manière optimale au sens de Canny. Le modèle de contour théorique, nécessaire à la mise en oeuvre de cette méthode, a été élaboré sur la base de données expérimentales permettant d'estimer les caractéristiques des contours à détecter dans les images réelles d'épandage.

Le travail réalisé conduit à proposer un filtre récursif d'ordre 4. Ce filtre a été caractérisé et comparé à d'autres détecteurs. Il donne de bons résultats sur des images de synthèse et sur les images réelles d'épandage qui sont particulièrement bruitées.

L'étape de détection de contours dans les images d'épandage se place en préalable à la phase d'identification et de caractérisation des trajectoires. Cette seconde phase est décrite dans le chapitre suivant.

Chapitre 6 : Identification et caractérisation des trajectoires

L'opération de filtrage développée dans le chapitre précédent permet de transformer une image en niveaux de gris en une image binaire. Le but de la phase d'analyse de cette image est d'identifier et de caractériser un nombre suffisant de lignes correspondant aux trajectoires empruntées par les granules d'engrais. Dans l'objectif d'estimer l'angle horizontal d'éjection des particules épandues, la caractérisation des trajectoires gagne à être réalisée par rapport à la position de la pale sur toute la zone d'éjection.

En analyse d'images, l'emploi de la transformée de Hough (1962) est très fréquent pour identifier et caractériser des lignes dans des contextes bruités. En 1988, Illingworth et Kittler ont dressé une synthèse des différentes approches de cette transformée, de ses mises en oeuvre et de ses applications. En 1993, Leavers a également fait un état de l'art de cette technique.

A titre d'exemple, l'utilisation de cette transformée peut être précisée dans le domaine des agroéquipements. Cette technique a notamment été mise en oeuvre pour le guidage d'engins agricoles par reconnaissance des rangs de cultures (Reid et al., 2000). Elle a été mise en oeuvre dans ce sens pour permettre la conduite automatique d'un véhicule autonome de pulvérisation de produits phytosanitaires sur les plantes (Marchant, 1996 ; Marchant et al., 1997 ; Hague et al., 1997). Elle a également été utilisée dans le cadre du contrôle du désherbage mécanique réalisé par un robot autonome (Åstrand et Baerveldt, 2002) ou dans le cadre de la détection des intersections des chemins d'accès aux parcelles pour un véhicule autonome de transport (Morimoto et al. 2005) . Son utilisation a récemment été proposée pour le guidage d'un semoir en se basant sur les traces laissées sur le lit de semence par le traceur ou simplement par les éléments semeurs lors du passage précédent sur la largeur de travail adjacente (Leemans et Destain, 2006). L'utilisation de la transformée de Hough est également envisagée pour l'identification des rangs de culture afin de discriminer les adventices situées dans l'inter-rang dans le but de permettre une application ciblée d'herbicide (Fontaine et Crowe, 2006 ; Gée et Truchetet, 2006).

Dans le cadre de notre application, en faisant l'hypothèse que les trajectoires des granules éjectés en sortie d'un distributeur d'engrais sont rectilignes, les primitives recherchées dans l'image sont des droites qui se caractérisent par seulement deux paramètres.

Le présent chapitre montre que ces paramètres peuvent être déterminés en calculant la transformée de Hough de l'image filtrée et que leurs valeurs permettent de déduire pour chaque trajectoire identifiée non seulement la direction empruntée par les granules mais également l'angle d'éjection des granules par rapport à la pale. Cette technique s'avère ainsi particulièrement bien adaptée à l'étude de l'épandage centrifuge.

1 VOCABULAIRE ET NOTATIONS

Le traitement décrit dans le présent chapitre s'applique à une image binaire qui correspond à une image d'épandage sur laquelle la procédure de détection de lignes a déjà été appliquée. Dans cette image, les pixels blancs résultant des opérations de détection seront qualifiés de « points » de l'image.

Dans la scène, lorsqu'une trajectoire est inclinée par rapport à l'horizontale, sa projection dans le plan horizontal est qualifiée de « composante horizontale de la trajectoire ». Il s'agit plus justement de la droite qui supporte la composante horizontale du vecteur vitesse d'éjection correspondant à la trajectoire considérée.

$\mathcal{D}\theta_H$	droite d'inclinaison θ_H passant par l'origine du repère de calcul de la transformée de Hough
$\varepsilon\rho$	Ecart $\rho_D - \rho_{HD}$ (pixel)
$\varepsilon\theta$	Ecart $\theta_{HD} - \theta_D$ (rad)
(ρ_H, θ_H)	paramètres polaires de l'espace de Hough discrétisé (pixel, rad)
(ρ_h, θ_h)	paramètres polaires de l'espace de Hough (pixel, rad)
(ρ_{hD}, θ_{hD})	caractéristiques polaires de la droite constituant le support du segment étudié (pixel, rad)
(ρ_{HD}, θ_{HD})	paramètres de l'accumulateur qui contient le couple (ρ_{hD}, θ_{hD}) (pixel, rad)
$(\rho_{Hor_im}, \theta_{Hor_im})$	caractéristiques polaires de l'image sur le CCD de la composante horizontale d'une trajectoire (pixel, radians)
(ρ_{im}, θ_{im})	caractéristiques polaires de l'image d'une trajectoire sur le CCD (pixel, rad)
λ_{ext}	angle entre la droite d'inclinaison θ_H et le rayon de l'extrémité extérieure du segment (rad)
θ_p	position angulaire de la pale (rad)
Δp	dimension du côté d'un pixel carré (m)
Δp_x	largeur d'un pixel (m)
Δp_y	hauteur d'un pixel (m)
$\Delta_q\rho$	pas de quantification de ρ_h (pixel)
$\Delta_q\theta$	pas de quantification de θ_h (rad)
(r_{eq}, θ_{eq})	paramètres équivalents d'une trajectoire dans la scène (m, rad)
$(r_{eq_pix}, \theta_{eq})$	paramètres équivalents d'une trajectoire dans l'image (pixel, rad)
ρ_{Sext}	position de la projection sur la droite d'inclinaison θ_H de l'extrémité du segment située sur l'extérieur de la couronne d'investigation
ρ_{Sint}	position de la projection sur la droite d'inclinaison θ_H de l'extrémité du segment située sur l'intérieur de la couronne d'investigation
f	focale de l'objectif de la caméra (m)
LS	longueur du segment correspondant à l'intersection de l'image d'une trajectoire et de la couronne d'investigation (pixel)
r_{ext}	rayon extérieur de la couronne d'investigation (pixel)
r_{int}	rayon intérieur de la couronne d'investigation (pixel)
r_{pale}	rayon de la pale (m)
r_{pale_pix}	image du rayon de la pale dans l'image (pixel)
r_{RT}	rapport de la composante radiale et de la composante tangentielle de la vitesse d'éjection
w	largeur du segment correspondant à l'intersection de l'image d'une trajectoire et de la couronne d'investigation (pixel)

Dans les expressions mathématiques établies dans ce chapitre, les grandeurs angulaires sont à exprimer en radians. Cependant pour plus de lisibilité lorsque les valeurs numériques sont précisées, elles sont données en degrés.

2 TRANSFORMEE DE HOUGH

2.1 PRINCIPE GENERAL

Le calcul de la transformée de Hough consiste à associer à une image un espace de paramètres. En considérant qu'une forme peut être définie par un ensemble (réduit) de paramètres, alors la présence de cette forme dans l'image se traduira par une singularité dans l'espace de Hough construit sur la base de ces variables.

Dans son brevet, Hough (1962) donne les règles d'une construction géométrique qui permet d'identifier de manière automatique des alignements de points présents dans une image. Les paramètres utilisés pour caractériser les droites sont alors la pente et l'ordonnée à l'origine. En 1972, Duda et Hart proposent d'étendre la technique à la caractérisation de droites décrites en coordonnées polaires et à l'identification d'autres formes paramétrées telles que les cercles. En 1981, Ballard (cité par Illingworth et Kittler, 1988) montre qu'une transformée de Hough généralisée peut être formulée pour identifier dans une image une forme quelconque, quelle que soit son orientation et quelle que soit son échelle.

Pour caractériser les lignes présentes dans l'image d'épandage filtrée, la transformée de Hough sera calculée en coordonnées polaires. A chaque point $P(x, y)$ de l'image est associée, dans l'espace des paramètres $\{\rho_h, \theta_h\}$, la sinusoïde d'équation :

$$\rho_h = x \cos \theta_h + y \sin \theta_h \quad (6.1)$$

Cette description polaire a l'avantage, par rapport à la description cartésienne, de donner une taille finie à l'espace des paramètres. L'intérêt de cette formulation a été mis en évidence par Duda et Hart dès 1972.

En outre le présent chapitre montrera que cette description est particulièrement adaptée à l'étude des images d'épandage centrifuge.

Pour une valeur θ_h donnée, le calcul du paramètre ρ_h pour un point $P(x, y)$ revient à calculer la position de la projection orthogonale de ce point sur une droite $\mathcal{D}_{\theta_h}$ passant par l'origine et inclinée d'un angle θ_h par rapport à l'axe des abscisses du repère de calcul.

Le principe de la transformée de Hough en coordonnées polaires est illustré en figure 6-1.

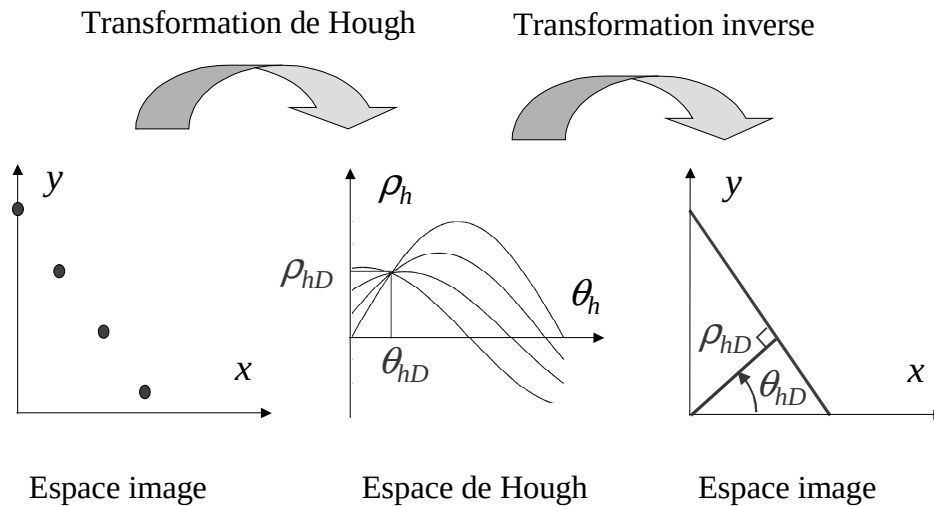


Figure 6-1 : Illustration du principe de la transformée de Hough calculée en coordonnées polaires

En optant pour la description polaire de la transformée de Hough, les propriétés remarquables sont les suivantes :

- Un point de l'espace image correspond à une sinusoïde dans l'espace des paramètres.
- Un point de l'espace des paramètres correspond à une droite dans l'espace image.
- Un ensemble de points alignés dans l'espace image correspond à un ensemble de sinusoïdes toutes sécantes en un même point dans l'espace des paramètres.
- Un ensemble de points situés sur une même sinusoïde dans l'espace des paramètres correspond à un ensemble de droites toutes sécantes en un même point dans l'espace image.

La transformation de Hough présentée ici est qualifiée de « 1 à m » (Maître, 2003) dans le sens où un point de l'espace image engendre m points dans l'espace de Hough.

En pratique, l'implémentation de la transformée de Hough conduit à discrétiser l'espace des paramètres qui peut alors être vu comme un tableau d'accumulateurs ou un histogramme à deux dimensions.

En représentation polaire, on procède à un échantillonnage de l'angle et à une quantification des rayons calculés pour chacun des pixels pris en compte dans l'espace image. Dans ce document, les valeurs échantillonnées des paramètres θ_h et ρ_h seront respectivement notées θ_H et ρ_H .

Initialement, tous les accumulateurs sont à zéro. Chaque point de l'image binaire donne lieu à des votes dans différents accumulateurs en fonction de la valeur de l'angle θ_H . Les accumulateurs sont incrémentés à chaque vote. Lorsque tous les angles θ_H ont été balayés, la position des accumulateurs qui présentent localement des valeurs maximales dans l'espace de Hough donne les caractéristiques polaires des droites identifiées dans l'espace image. Des méthodes d'accumulation plus fines ont été décrites dans la littérature (Niblack et Petkovic, 1990) pour prendre en compte dans deux accumulateurs voisins un vote proportionnel à l'écart qui sépare la valeur ρ_h des valeurs discrètes ρ_H de ces accumulateurs. Palmer et al. 1997, proposent un processus d'accumulation basé sur une fonction de la distance qui sépare le pixel considéré de l'axe de la ligne à laquelle il est susceptible d'appartenir dans le but de diminuer l'incidence des votes des pixels éloignés de cet axe.

Le choix de la taille des accumulateurs est usuellement assez délicat. En effet une taille trop grande ne permet pas une caractérisation précise des droites alors qu'une taille trop petite conduit à un nombre de votes trop restreint pour être significatif. D'autre part, pour une image donnée, la taille des accumulateurs conditionne le nombre de calculs nécessaires à l'obtention de la transformée et les dimensions de la mémoire nécessaire pour son stockage.

Des méthodes ont été proposées pour adapter la taille des accumulateurs de manière locale en augmentant leur densité dans les régions de l'espace de Hough qui recueillent un nombre de votes important. Illingworth et Kittler (1988) ont recensé des méthodes dynamiques utilisant des subdivisions récursives pour obtenir une forte résolution au niveau des accumulateurs dans les régions de l'espace des paramètres où il existe une forte densité de votes accumulés. A titre d'exemple, Breuel (1996) propose un algorithme de détection de lignes dans des images binaires en décomposant l'espace des paramètres en fonction d'une mesure de qualité qui évalue la correspondance entre la zone considérée dans l'espace des paramètres et la série de primitives correspondantes dans l'image.

L'étape finale du traitement consiste classiquement à rechercher dans l'espace de Hough les cellules qui contiennent un nombre de votes supérieur à un seuil et/ou qui forment un maximum local.

Dans le cas général, une normalisation de la transformée est nécessaire pour tenir compte des différences d'effectifs des pixels qui peuvent potentiellement être projetés dans chaque accumulateur et éviter de privilégier certaines directions comme les diagonales de l'image par exemple. A ce titre, Cohen et Toussaint (1977) ont souligné que la procédure qui consiste à rechercher des maxima dans l'espace de Hough sans traitement particulier fonctionne assez bien pour des images relativement peu bruitées mais est tenue en échec lorsque les lignes recherchées dans l'image sont discontinues et situées dans un contexte bruité. Dans le cas d'une rétine circulaire, les auteurs proposent alors deux techniques pour compenser l'incidence du bruit en fonction de la connaissance ou non de sa densité de probabilité.

2.2 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

En se limitant à une implémentation simple basée sur la description précédente et dans le cadre de l'identification et de la caractérisation de droites dans une image binaire, les principaux avantages de la transformée de Hough sont :

- sa robustesse notamment vis à vis des occlusions sur la forme recherchée,
- ses possibilités d'adaptation aux images bruitées et de mauvaise qualité,
- l'identification possible de toutes les directions du fait de l'utilisation d'une description polaire,
- sa capacité à identifier un nombre quelconque de primitives similaires dans l'image.

Dans le même contexte, les principaux inconvénients sont :

- le nombre d'opérations (qui est proportionnel au nombre de pixels pris en compte),
- la difficulté d'optimiser la taille des accumulateurs,
- les changements d'aspect de la transformée d'un segment de droite donné dans l'espace de Hough en fonction de son orientation et de sa localisation dans l'image,
- la difficulté d'extraire un maximum local unique dans l'espace de Hough pour caractériser un segment présent dans l'image.

Concernant les temps de calcul, Illingworth et Kittler (1988) ont souligné que, pour la transformée de Hough, chaque pixel est traité indépendamment ce qui rend possible la parallélisation des opérations. En 1993, Leavers recensait déjà une série de travaux menés sur des architectures parallèles pour le calcul de la transformée. Illingworth et Kittler (1988) font également remarquer que l'efficacité de la transformation est grandement augmentée lorsque l'utilisation de données annexes permet de diminuer la plage des paramètres considérés.

Dans le cadre de l'identification et de la caractérisation des trajectoires de granules éjectés par la pale d'un distributeur centrifuge, la possibilité de prendre en compte les connaissances a priori issues de l'analyse mécanique du système est un avantage décisif permettant d'adapter spécifiquement le calcul de la transformée à l'application.

Ces adaptations portent sur le choix de l'origine de la représentation polaire, le choix de la zone d'intérêt dans l'image, le choix de la taille des accumulateurs.

3 ADAPTATION DE LA TRANSFORMÉE A L'ANALYSE D'IMAGES D'EPANDAGE

L'objectif de cette partie est de définir les paramètres qui permettent d'adapter le calcul de la transformée de Hough à l'application visée.

De manière à simplifier la présentation de la technique employée, il est considéré dans un premier temps que les traces laissées par les granules dans l'image correspondent aux composantes horizontales des trajectoires des particules qui quittent la pale.

Cette situation est vérifiée lorsque les granules se déplacent tous dans un plan parallèle au plan du CCD.

Le cas des trajectoires non coplanaires sera abordé dans un second temps en fin de chapitre.

3.1 CHOIX DE L'ORIGINE DE LA REPRESENTATION POLAIRE

L'angle d'éjection θ_{ej} d'une particule accélérée sur la pale d'un distributeur centrifuge a été défini dans le chapitre consacré à l'analyse mécanique du processus d'épandage comme l'angle entre la trajectoire empruntée par le granule et la composante horizontale tangentielle de la vitesse d'éjection. La figure 6-2 rappelle cette définition et les principaux paramètres géométriques relatifs à la pale (cf. chapitre 3).

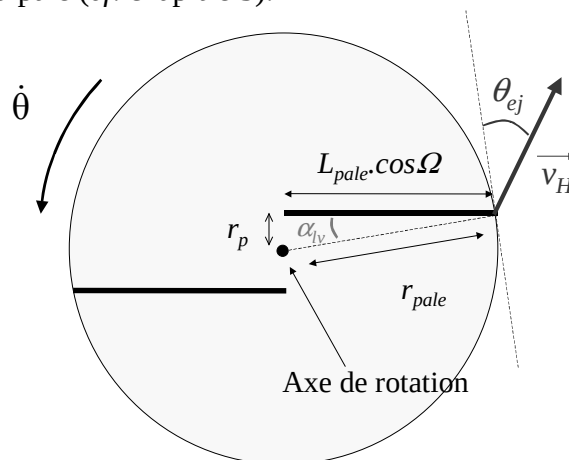


Figure 6-2 : Vue de dessus du disque d'épandage. Rappel des principaux paramètres géométriques relatifs à la pale et à la définition de l'angle d'éjection.

Une alternative à la mesure directe de l'angle d'éjection θ_{ej} entre deux directions consiste à caractériser l'éjection par le « rayon équivalent » d'éjection r_{eq} . Cette grandeur est définie comme le rayon d'une « pale équivalente » imaginaire dont les granules s'échapperaient orthogonalement. Cette pale équivalente est ainsi perpendiculaire à la trajectoire empruntée par un granule au moment de son éjection. La figure 6-3 fait apparaître le rayon équivalent ainsi défini dans le cas d'un disque équipé de pales radiales ou de pales inclinées.

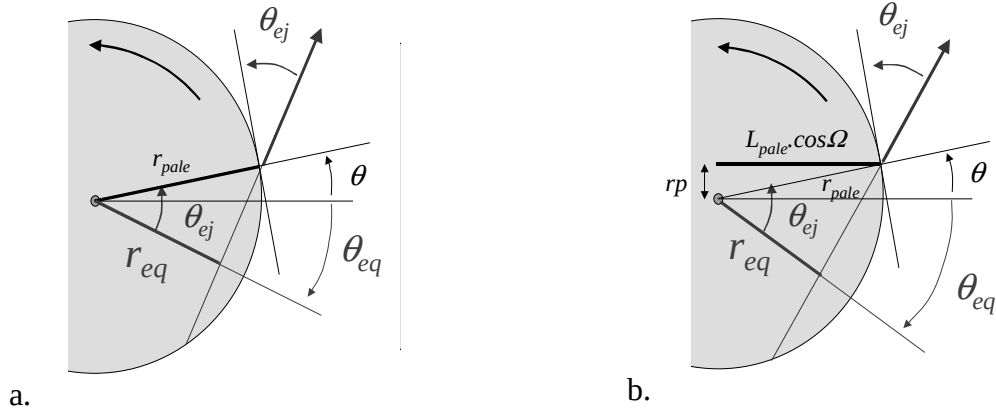


Figure 6-3 : Représentation géométrique des paramètres d'éjection équivalents sur la vue de dessus d'un disque équipé de pales radiales (a) ou de pales inclinées (b).

Quel que soit le type de pales (radiales ou inclinées), le rayon équivalent d'éjection est défini par la même expression en fonction du rayon de la pale et de l'angle horizontal d'éjection :

$$r_{eq} = r_{pale} \cos(\theta_{ej}) \quad (6.2)$$

Dans l'image la relation est :

$$r_{eq_pix} = r_{pale_pix} \cos(\theta_{ej}) \quad (6.3)$$

où r_{eq_pix} et r_{pale_pix} sont les valeurs en pixels correspondant aux images de r_{eq} et r_{pale} et obtenues à partir de l'application du facteur de conversion millimètre/pixel.

La position angulaire de la pale équivalente est également donnée de manière très simple en fonction de l'angle d'éjection θ_{ej} et de la position angulaire de la pale réelle θ au moment où le granule quitte la pale :

$$\theta_{eq} = \theta - \theta_{ej} \quad (6.4)$$

La première conséquence de l'analyse mécanique du processus d'épandage est d'orienter le choix du repère à utiliser pour calculer la transformée de Hough.

En effet, il apparaît que quelle que soit la configuration d'un disque équipé de pale droites, la trajectoire d'un granule peut être caractérisée au moment de son éjection par deux paramètres : r_{eq} et θ_{eq} .

En choisissant de calculer la transformée dans un repère dont l'origine coïncide avec l'axe de rotation du disque d'épandage, les paramètres polaires (ρ_h, θ_h) de l'espace de Hough s'interprètent directement comme les paramètres équivalents d'éjection $(r_{eq_pix}, \theta_{eq})$ définis dans l'image.

Cette particularité justifie également le choix de la description polaire pour le calcul de la transformée.

Dans le chapitre 3 consacré à l'analyse mécanique du système d'épandage centrifuge, il a été montré que l'angle d'éjection de la particule est borné. Il en résulte que le rayon équivalent d'éjection est borné :

$$\frac{r_{pale}}{\sqrt{1+r_{RT\ Max}^2}} \leq r_{eq} \leq \frac{r_{pale}}{\sqrt{1+r_{RT\ Min}^2}}$$

L'expression générale du rapport r_{RT} de la composante horizontale radiale sur la composante horizontale tangentielle de la vitesse d'éjection a été établie au cours de l'analyse dynamique du système. La valeur minimale et la valeur maximale de ce rapport sont calculées en fonction des caractéristiques dimensionnelles du disque et des valeurs extrêmes du coefficient de frottement μ de l'engrais sur la pale. Les expressions de ces valeurs limites ont déjà été établies au cours de l'analyse dynamique du système en considérant $\mu \in [0 ; 1]$.

En conséquence, l'espace de Hough utile à l'application est réduit à la région définie par :

$$r_{eq_pix\ Min} \leq \rho_h \leq r_{eq_pix\ Max}$$

avec : $r_{eq_pix\ Min} = \frac{r_{pale_pix}}{\sqrt{1+r_{RT\ Max}^2}}$ et $r_{eq_pix\ Max} = \frac{r_{pale_pix}}{\sqrt{1+r_{RT\ Min}^2}}$ (6.5)

Cette considération permet de diminuer sensiblement la taille de l'espace de Hough.

3.2 CHOIX D'UNE ZONE D'INVESTIGATION DANS L'IMAGE

Le calcul de la transformée de Hough ne sera pas réalisé sur l'intégralité de l'image filtrée mais sur une portion de couronne centrée sur l'axe de rotation du disque comme illustré par la figure 6-4. Cette couronne d'investigation est définie par son rayon intérieur r_{int} et son rayon extérieur r_{ext} . Elle délimite ainsi un segment sur chaque trajectoire.

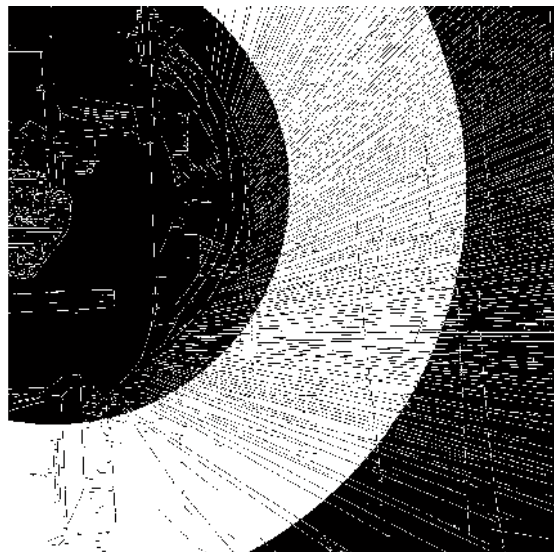


Figure 6-4 : Exemple de délimitation de la zone étudiée (fond blanc) sur une image binaire d'épandage.

Pour le calcul et l'exploitation de la transformée, ce choix permet de diminuer le nombre d'opérations en réduisant le nombre de pixels pris en compte, et d'analyser toutes les trajectoires potentielles dans des conditions similaires. En effet, les segments correspondant aux trajectoires intersectées par la couronne se situent tous à une même distance par rapport au point d'éjection et correspondent à des temps de parcours similaires.

L'analyse de ces segments de droite dans des conditions analogues permet la maîtrise des conditions de calcul de la transformée. Les paragraphes suivants montreront qu'il est ainsi possible de choisir de manière optimale le pas d'échantillonnage et le pas de quantification.

Dans le chapitre consacré à l'analyse mécanique, il a été montré que, sous certaines hypothèses, l'angle d'éjection est une fonction des caractéristiques dimensionnelles du disque, de la vitesse de rotation et du coefficient de frottement de l'engrais sur la pale. En considérant les paramètres mécaniques du système d'épandage fixés, l'angle d'éjection serait donc constant en théorie pour un engrais donné. Les segments de trajectoires situés sur la couronne d'analyse seraient donc tous de même longueur.

En conséquence, sur toute la plage angulaire d'épandage, tous les segments ont la même potentialité à être détectés et aucune étape de normalisation n'est nécessaire en préambule à la recherche des « pics » dans l'espace de Hough.

L'intérêt du choix de la zone d'investigation sur l'image ayant été explicité, il est maintenant nécessaire de préciser les dimensions de cette zone.

En terme d'orientation angulaire, la précision de l'information portée par le segment de trajectoire pris en considération est fonction de sa longueur.

En considérant qu'en pratique, le segment est une bande de largeur w , la longueur L_s du segment permettant d'atteindre dans le cas le plus défavorable la précision $\Delta\theta_{L_s}$ est :

$$L_s \geq \frac{w}{\Delta\theta_{L_s}} \quad (6.6)$$

La largeur w peut être interprétée comme l'étendue de l'erreur de localisation des pixels autour de l'axe réel de la trajectoire.

La longueur du segment L_s intersecté au niveau d'une trajectoire par la couronne d'analyse est calculée en fonction du rayon équivalent de la trajectoire dans l'image, du rayon intérieur et du rayon extérieur de la couronne sélectionnée :

$$L_s = \sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pix}^2} - \sqrt{r_{int}^2 - r_{eq_pix}^2}$$

Cette relation géométrique est facilement obtenue en considérant la figure 6-5.

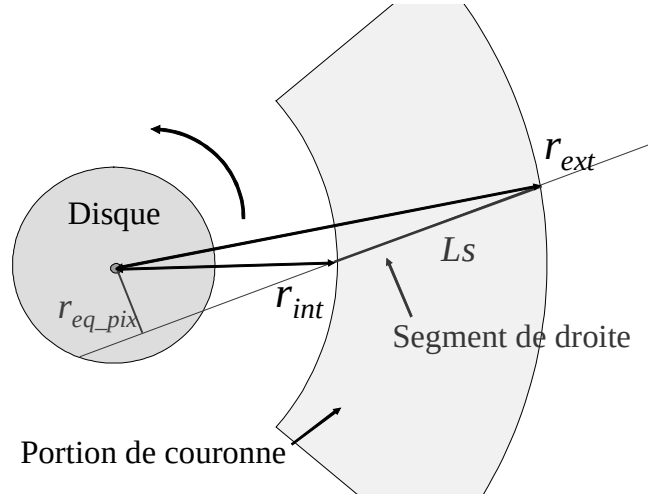


Figure 6-5 : Illustration des relations géométriques entre la longueur du segment analysé, les caractéristiques de la trajectoire et les caractéristiques dimensionnelles de la couronne d'investigation dans l'image.

Pour des rayons r_{ext} et r_{int} fixés, la longueur minimale du segment est obtenue pour la valeur minimale du rayon équivalent. La longueur du segment étudié est alors :

$$Ls_{Min} = \sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pixMin}^2} - \sqrt{r_{int}^2 - r_{eq_pixMin}^2} \quad (6.7)$$

Si le rayon extérieur est fixé, le rayon intérieur maximum est :

$$r_{int} = \sqrt{\left(\sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pixMin}^2} - Ls_{Min} \right)^2 + r_{eq_pixMin}^2} \quad (6.8)$$

Lorsque que le rayon intérieur et le rayon extérieur de la couronne sont fixés, la longueur réelle du segment étudié peut s'avérer dans la réalité inférieure à celle prévue du fait des occlusions éventuelles sur les contours détectés lors du passage de l'image en niveaux de gris à l'image binaire.

3.3 CHOIX DE LA TAILLE DES ACCUMULATEURS DE LA TRANSFORMEE DE HOUGH

Notons $\Delta_q \theta$ et $\Delta_q \rho$ respectivement le pas d'échantillonnage de l'angle et le pas de quantification du rayon de la transformée de Hough. La discrétisation de l'espace de Hough revient à considérer celui-ci comme un tableau dont chaque case est un accumulateur de taille $\Delta_q \theta \times \Delta_q \rho$.

De manière générale, le choix de la taille des accumulateurs est délicat. Ainsi Lam et al. (1993) concluent-ils qu'il n'est pas possible de quantifier l'espace de Hough de manière optimale pour extraire des lignes de longueur quelconque. La publication de Hansen et Andersen (1997) conduit à une analyse similaire.

Cependant, dans le cas où l'on souhaite caractériser des segments de droite présents dans une couronne centrée sur l'origine du repère de calcul de la transformée, l'optimisation de l'échantillonnage et de la quantification devient réalisable.

3.3.1 RELATION ENTRE $\Delta_q\theta$ ET $\Delta_q\rho$

Le choix du pas d'échantillonnage de l'angle θ_h de la transformée est lié au choix du pas de quantification du rayon ρ_h .

Considérons un segment S, de longueur L_s et dont le support est une droite de coordonnées polaires (ρ_{hD}, θ_{hD}) .

Soit (ρ_{HD}, θ_{HD}) les paramètres (valeurs discrètes) de l'accumulateur qui contient le couple (ρ_{hD}, θ_{hD}) tel que :

$$|\rho_{HD} - \rho_{hD}| \leq \Delta_q\rho/2 \text{ et } |\theta_{HD} - \theta_{hD}| \leq \Delta_q\theta/2$$

L'angle d'éjection d'une particule qui quitte le disque d'épandage étant calculé au moyen du paramètre ρ_{hD} caractérisant la droite support de la trajectoire empruntée par la particule, le pas de quantification de ce paramètre est étudié en priorité.

Le pas de quantification $\Delta_q\rho$ est recherché de manière à accueillir l'ensemble des votes correspondant aux pixels du segment S dans l'accumulateur de paramètres (ρ_{HD}, θ_{HD}) .

La condition à vérifier est :

$$\sqrt{r_{ext}^2 - \rho_{hD}^2} \cdot \Delta_q\theta \leq \Delta_q\rho \quad (6.9)$$

Cette relation entre $\Delta_q\rho$ et $\Delta_q\theta$ est établie sur la base d'un raisonnement géométrique détaillé à l'annexe 10.

Dans le cas le plus défavorable, dans la limite de la zone utile de l'espace des paramètres, la condition à vérifier est :

$$\sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pixMin}^2} \cdot \Delta_q\theta \leq \Delta_q\rho \quad (6.10)$$

Cette condition assure que la taille de l'accumulateur comportant ρ_{hD} permet de retenir l'ensemble des votes issus du segment étudié, mais elle n'empêche pas un autre accumulateur de contenir également l'ensemble des votes.

Pour que la projection du segment analysé déborde d'un accumulateur situé à $2\Delta_q\rho$ de ρ_{HD} , il faut vérifier la condition suivante :

$$r_{int} \leq \sqrt{\frac{1}{4}r_{ext}^2 + \frac{3}{4}r_{eq_pixMin}^2} \quad (6.11)$$

La démonstration de cette relation est également donnée en annexe 10.

Le respect des conditions (6.10) et (6.11) permet d'assurer que les votes des points d'un segment dont le support est caractérisé par (ρ_{hD}, θ_{hD}) seront intégralement contenus dans l'accumulateur (ρ_{HD}, θ_{HD}) et ne pourront être que partiellement contenus dans un accumulateur distant de plus de $\Delta_q\rho$. La recherche du maximum dans l'espace de Hough correspondant au segment caractérisé par (ρ_{hD}, θ_{hD}) devrait donc conduire à retenir ρ_{HD} , $\rho_{HD} - \Delta_q\rho$ ou $\rho_{HD} + \Delta_q\rho$ pour l'estimation de ρ_{hD} .

En se basant sur l'étude des pentes des sinusoides engendrees dans l'espace des parametres, Lam et al. (1993) ont etabli deux conditions pour que la projection d'un segment ne deborde pas d'un accumulateur : $\Delta_q \rho > L_s \sin\left(\frac{\Delta_q \theta}{2}\right)$ et $|\rho_{Sc} - \rho_{HD}| < \frac{1}{2}(\Delta_q \rho - \Delta \rho_{Ls})$

avec ρ_{Sc} la position de la projection du centre du segment considere sur la droite d'inclinaison θ_{HD} et $\Delta \rho_{Ls}$ l'etendue de la projection de ce segment de longueur L_s .

Pour les petites valeurs de $\Delta_q \theta$, la premiere condition peut s'ecrire : $\Delta_q \rho > L_s \frac{\Delta_q \theta}{2}$.

Dans le cas de l'analyse des images d'epandage, pour l'etude des segments defines sur la couronne d'investigation, $\sqrt{r_{ext}^2 - \rho_{hD}^2}$ est superieur a la longueur L_s du segment. La condition (6.9) est donc plus forte que la premiere condition imposee par Lam et al. (1993). En revanche elle integre a elle seule l'ensemble des contraintes alors que Lam et al. adjoignent une seconde condition.

La contrainte proposee n'est donc pas en contradiction avec le travail de Lam et al. (1993). D'autre part, le choix d'un pas d'echantillonnage et d'un pas de quantification verifiant la contrainte (6.9) implique a fortiori la validation de la premiere condition imposee par Lam et al..

En analysant le support de la sinusoides dans l'espace de Hough discret, Hansen et Andersen (1997) ont defini un rayon critique r_{crit} au dela duquel le traitement d'un point de l'image n'est plus optimal : $r_{crit} = \frac{\Delta_q \rho}{\Delta_q \theta}$ pour le calcul de la transformee.

En analysant egalement la continuite du support de la sinusoides engendree dans l'espace de Hough par un point $P(x, y)$ de l'image, Yuen et Ma (1997) montrent que les coordonnees des points a considerer dans l'image doivent verifier la condition suivante pour conduire a un vote de maniere optimale : $\sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{\Delta_q \rho}{\Delta_q \theta}$. Bien que menes de maniere independante, les travaux de Hansen et Andersen et ceux de Yuen et Ma aboutissent a la meme contrainte.

Dans le cadre de la situation etudiee dans ce chapitre, les travaux de Yuen et Ma (1997) ainsi que ceux de Hansen et Andersen (1997) conduiraient a choisir : $r_{ext} \leq \frac{\Delta_q \rho}{\Delta_q \theta}$.

En premiere lecture, comme $\sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pixMin}^2} < r_{ext}$, la condition definie en (6.10) (deduite de (6.9)) pourrait sembler insuffisante pour garantir la continuite des sinusoides engendrees dans l'espace de Hough par l'ensemble des points consideres dans l'image. En fait, cette condition est verifiee du fait de l'utilisation d'une couronne d'investigation sur l'image et du fait des bornes definies pour les valeurs possibles de ρ_{hD} .

La condition (6.9) n'est donc pas en desaccord avec les raisonnements menes par Hansen et Andersen ou Yuen et Ma, mais affine l'expression generale qu'ils proposent dans le cas ou ρ_{hD} peut etre borne. La condition definie en (6.10) implique ainsi la continuite du support des sinusoides engendrees dans l'espace de Hough par les points consideres sur la couronne de selection appliquee sur l'image etudiee. Ces considerations sont demontrees a l'annexe 10.

3.3.2 INCIDENCE DU PAS DE QUANTIFICATION SUR LA PRECISION OBTENUE

Dans l'objectif de déterminer la vitesse d'éjection des granules d'engrais lorsqu'ils quittent le disque d'épandage centrifuge, la valeur recherchée avec la meilleure précision est celle de l'angle d'éjection θ_{ej} . Cette valeur peut être déduite de la relation (6.3) en prenant $r_{eq_pix} = \rho_{HD}$ où ρ_{HD} caractérise la trajectoire empruntée par un granule.

Par différenciation de la relation (6.3) on déduit :

$$\partial r_{eq_pix} = -r_{pale_pix} \sin(\theta_{ej}) \partial \theta_{ej}$$

La précision de l'angle d'éjection estimé à partir des valeurs discrètes ρ_{HD} issues de l'espace de Hough dépend du pas de quantification $\Delta_q \rho$. Dans le cas le plus défavorable, lorsque l'angle d'éjection est minimum, l'erreur maximale commise sur l'estimation de l'angle d'éjection du fait des valeurs discrètes ρ_{HD} est :

$$\Delta \theta_{ej_ \rho_{HD}} = \frac{\Delta_q \rho}{r_{pale_pix} \cdot \sin(\theta_{ej_Min})} \quad (6.12)$$

Cette erreur maximale est celle qui correspond à l'utilisation directe de la valeur discrète ρ_{HD} extraite de l'espace de Hough pour le calcul de l'angle d'éjection de la trajectoire identifiée. Nous verrons ultérieurement qu'après identification de la région dans laquelle une trajectoire est présente, il est possible d'envisager une détermination plus fine de la position de cette trajectoire.

3.4 **CALCUL DE LA TRANSFORMEE DE HOUGH**

La transformée de Hough étant calculée par rapport à une origine qui coïncide avec l'axe de rotation du disque, la plage utile de la transformée correspond a priori à $\rho_H \in [r_{eq_pix\ Min}, r_{eq_pix\ Max}]$.

Pour diminuer le nombre d'opérations, il est possible de déterminer la zone occupée par les pixels susceptibles d'apporter un vote situé dans l'intervalle $[r_{eq_pix\ Min}, r_{eq_pix\ Max}]$ comme illustré sur la figure 6-6.

Soit A, B, C et D les points permettant de déterminer la zone utile de la couronne pour une valeur d'angle θ_H donnée ; les coordonnées polaires de ces points sont :

$$\begin{array}{ll} r_A = r_{int} & \alpha_A = \theta_H + \arccos(r_{eq_pix\ Min} / r_{int}) \\ r_B = r_{ext} & \alpha_B = \theta_H + \arccos(r_{eq_pix\ Min} / r_{ext}) \\ r_C = r_{ext} & \alpha_C = \theta_H + \arccos(r_{eq_pix\ Max} / r_{ext}) \\ r_D = r_{int} & \alpha_D = \theta_H + \arccos(r_{eq_pix\ Max} / r_{int}) \end{array}$$

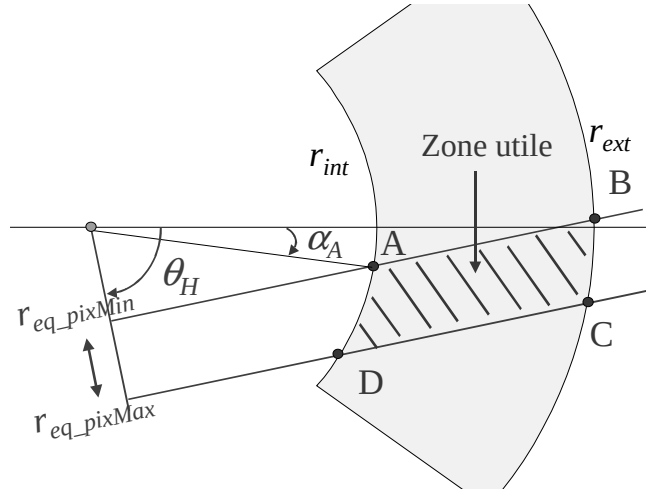


Figure 6-6 : Représentation graphique de la zone utile au calcul pour une valeur de θ_H donnée.

En pratique, pour chaque valeur de θ_H l'algorithme identifie les points dont les coordonnées (x, y) vérifient :

$$\text{Min}(x_A, x_B, x_C, x_D) < x < \text{Max}(x_A, x_B, x_C, x_D) \text{ et } \text{Min}(y_A, y_B, y_C, y_D) < y < \text{Max}(y_A, y_B, y_C, y_D).$$

3.5 EXEMPLES DE VALEURS POUR LES PARAMETRES DE CALCUL DE LA TRANSFORMEE

Considérons un disque plat équipé de pales radiales dont le rayon r_{pale} est de 325 mm.

Si le rayon extérieur de la couronne étudiée sur l'image est fixé à 700 pixels et en considérant un facteur de conversion millimètre-pixel égal à 1, les relations établies précédemment permettent d'obtenir :

- le rayon équivalent minimum : $r_{eq_pix\ Min}$ 230 pix. d'après (6.5)
- le rayon équivalent maximum : $r_{eq_pix\ Max}$ 300 pix. d'après (6.5)
- le rayon intérieur (maximum) de la couronne : r_{int} 403 pix. d'après (6.11)
- la longueur minimale du segment correspondant : LS_{Min} 330 pix. d'après (6.7)

En considérant une erreur de 1 pixel de part et d'autre des pixels censés localiser l'axe d'une trajectoire dans l'image filtrée, on obtient à partir de la relation (6.6) en prenant $w = 3$ pixels une précision potentielle de 0.5° au minimum sur la direction de la trajectoire.

Si on fixe pour objectif $\Delta\theta_{ej_pHD} \leq 1^\circ$ on obtient :

- le pas de quantification de ρ_H : $\Delta_q\rho$ 2.17 pix. d'après (6.12)
- le pas d'échantillonnage de θ_H : $\Delta_q\theta$ 0.19° d'après (6.10)

En pratique le pas d'échantillonnage et le pas de quantification peuvent être arrondis à :

$$\Delta_q\rho = 2 \text{ pixels et } \Delta_q\theta = 0.15^\circ.$$

Dans la situation prise ici pour exemple, la quantification de ρ_h et l'échantillonnage de θ_h conduirait à moins de 40 valeurs discrètes ρ_H et à 1200 valeurs discrètes θ_H pour couvrir une plage angulaire d'éjection de 180° .

Le choix du rayon extérieur de la couronne d'étude (700 pixels) est assez arbitraire. Il permet simplement de laisser une marge suffisante pour la détermination du rayon intérieur et de ne pas trop limiter la plage angulaire d'éjection analysée dans l'image.

L'annexe 11 donne d'autres exemples de valeurs pour les paramètres relatifs au calcul de la transformée de Hough pour diverses configurations de disques.

4 EXTRACTION DES PICS DE L'ESPACE DE HOUGH

Les caractéristiques des droites qui constituent le support des segments analysés dans l'image, sont obtenues par extraction des « pics » présents dans l'espace de Hough.

En pratique, cette phase de traitement est assez délicate et les solutions proposées dans la littérature sont variées.

Dans le cas de la recherche de droites au moyen de la transformée de Hough en description polaire, Leavers et Boyce (1987) ont analysé la forme potentielle de la distribution des votes dans l'espace des paramètres. Sur cette base, ils suggèrent de convoluer l'espace de Hough avec un masque qui exploite la forme de « papillon » qu'induisent des sinusoides autour de leur point d'intersection dans l'espace des paramètres.

Le masque de convolution préconisé est :
$$\begin{bmatrix} 0 & -2 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 0 & -2 & 0 \end{bmatrix}.$$

En considérant une distribution gaussienne des points autour de l'axe d'une droite dans une image, Niblack et Petkovic (1990) proposent de convoluer l'espace de Hough avec un filtre gaussien monodimensionnel selon ρ_H dont les paramètres changent pour chaque accumulateur en fonction de ρ_H et θ_H .

Dans le cadre de l'analyse d'images d'épandage, l'application d'un filtre combiné à une méthode de seuillage reste délicate. Elle se heurte aux inconvénients suivants :

- difficulté de choix des seuils,
- possibilité de multiplicité des maxima locaux relatifs à un même segment de droite,
- possibilité de fausses détections.

Pour répondre de manière satisfaisante à l'objectif final de cette étude, il n'est pas nécessaire de caractériser l'ensemble des alignements présents dans l'image filtrée. Il est préférable d'obtenir des caractéristiques fiables pour des segments correspondant réellement à des axes de trajectoires et éviter toute fausse détection.

De manière à obtenir l'unicité des caractéristiques pour chaque segment identifié, deux méthodes d'extraction itératives ont été mises en oeuvre.

Méthode 1

La première méthode consiste à caractériser chaque trajectoire par les valeurs discrètes (ρ_{HD}, θ_{HD}) obtenues directement à partir de la position des maxima locaux dans l'espace de Hough.

Elle se compose des étapes suivantes :

- 1 - Le maximum global de la transformée de Hough de l'image filtrée est repéré : (ρ_{HD}, θ_{HD}) .
- 2 - Les coordonnées des pixels du segment théorique S_T caractérisé par (ρ_{HD}, θ_{HD}) sont calculées.
- 3 - La transformée de Hough de cet ensemble de pixels (S_T) est calculée de manière « locale » puis la transformée du segment S_T est soustraite de la transformée globale (de l'image) qui se trouve donc modifiée à ce stade.
- 4 - De manière itérative, on revient à l'étape 1 tant que la valeur du maximum global obtenu sur la transformée de l'image (modifiée à chaque cycle) est supérieure à un seuil M_s .

La transformée « locale » du segment S_T est calculée en limitant l'échantillonnage de l'angle θ_h à la plage qui permet aux points de S_T de fournir une valeur ρ_h comprise dans $[r_{eq_pixMin}, r_{eq_pixMax}]$.

En pratique, on parcourt la gamme qui va de la première valeur discrétisée inférieure à θ_{Hinf} jusqu'à la première valeur discrétisée supérieure à θ_{Hsup} avec :

$$\theta_{Hinf} = \theta_{HD} + 2 \arctan \left(\frac{\sqrt{r_{int}^2 - \rho_{HD}^2} - \sqrt{r_{int}^2 - r_{eq_pixMin}^2}}{r_{eq_pixMin} + \rho_{HD}} \right)$$

$$\theta_{Hsup} = \theta_{HD} + 2 \arctan \left(\frac{\sqrt{r_{int}^2 - \rho_{HD}^2} - \sqrt{r_{int}^2 - r_{eq_pixMax}^2}}{r_{eq_pixMax} + \rho_{HD}} \right)$$

Méthode 2

La seconde méthode cherche à s'affranchir des conséquences de la discrétisation de l'espace de Hough sur la détermination de l'angle d'éjection. Elle se compose des étapes suivantes :

- 1 - Le maximum global de la transformée de Hough de l'image filtrée est repéré : (ρ_{HD}, θ_{HD}) .
- 2 - La transformée de Hough est recalculée localement sur l'image en échantillonnant θ_h selon un pas de $\Delta_q \theta / 2$ sur la plage $[\theta_{HD} - \Delta_q \theta, \theta_{HD} + \Delta_q \theta]$ et en quantifiant les valeurs calculées pour ρ_h selon un pas de $\Delta_q \rho / 2$ sur la plage $[\rho_{HD} - \Delta_q \rho, \rho_{HD} + \Delta_q \rho]$. Les maxima locaux de cet espace de Hough restreint sont extraits. Dans le cas où il y a plusieurs maxima, le maximum retenu est celui dont la localisation $(\rho_{HD2}, \theta_{HD2})$ permet de construire le segment théorique dont la corrélation avec l'image binaire est la meilleure.
- 3 - L'ensemble des points de la couronne d'investigation dont les coordonnées polaires vérifient : $\rho \in [\rho_{HD2} - \Delta_q \rho / 2, \rho_{HD2} + \Delta_q \rho / 2]$ et $\theta \in [\theta_{HD2} - \Delta_q \theta / 2, \theta_{HD2} + \Delta_q \theta / 2]$ sont identifiés. Les caractéristiques de l'axe d'inertie $(\rho_{HDI}, \theta_{HDI})$ de ce nuage de points sont alors déterminées en calculant les moments géométriques (annexe 12).
- 4 - Les coordonnées des pixels du segment théorique S_T caractérisé par $(\rho_{HDI}, \theta_{HDI})$ sont calculées.
- 5 - La transformée de Hough de cet ensemble de points (S_T) est calculée de manière « locale » puis la transformée du segment S_T est soustraite de la transformée globale (de l'image) qui se trouve donc modifiée à ce stade.

- 6 - La « corrélation » Γ entre les points constituant le segment et l'image filtrée est calculée : $\Gamma = \frac{\text{nombre de points communs au segment et à l'image filtrée}}{\text{nombre de points du segment}}$
- Si Γ est supérieur à un seuil Γ_s alors les caractéristiques $(\rho_{HDi}, \theta_{HDi})$ sont mémorisées, sinon elles sont ignorées.
- 7 - De manière itérative, on revient à l'étape 1 tant que la valeur du maximum obtenu sur la transformée de l'image (modifiée à chaque cycle) est supérieure à un seuil M_s .

Les étapes 2 et 3 offrent l'avantage de caractériser le nuage de points identifié par des paramètres $(\rho_{HDi}, \theta_{HDi})$ définis au sens des moindres carrés à partir des moments géométriques d'ordres 1 et 2 (V_y, V_x, V_{xx}, V_{xy} et V_{yy}) de la manière suivante :

$$\rho_{HDi} = V_x \cdot \sin \theta_{HDi} + V_y \cdot \cos \theta_{HDi}$$

$$\theta_{HDi} = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{V_{yy} - V_{xx}}{2V_{xy}} \right) + \frac{\pi}{4} \text{sign}(V_{xy})$$

Ces étapes permettent donc de s'affranchir pour le résultat final de la discrétisation induite par l'espace de Hough. Cette étape conditionne également l'efficacité de l'étape 6.

Dans le cas où l'image binaire est peu bruitée, l'angle d'éjection correspondant à la trajectoire identifiée sera ainsi déterminé avec une précision meilleure que celle attribuée à la discrétisation de ρ_h . Pour une image très fortement bruitée, dans le pire des cas, l'axe d'inertie calculé serait celui de la surface définie par l'intersection de la zone d'investigation et de la région définie par $\rho \in [\rho_{HD2} - \Delta_q \rho / 2, \rho_{HD2} + \Delta_q \rho / 2]$ et $\theta \in [\theta_{HD2} - \Delta_q \theta / 2, \theta_{HD2} + \Delta_q \theta / 2]$. Le résultat obtenu ne serait alors pas plus erroné que celui qui serait fourni par la première méthode.

5 EVALUATION DE LA METHODE

5.1 TEST REALISE SUR DES IMAGES D'EPANDAGE

Une première évaluation de la méthode mise en oeuvre peut être réalisée visuellement en contrôlant que les trajectoires identifiées par l'algorithme correspondent bien aux trajectoires présentes dans l'image d'épandage considérée.

La figure 6-7 illustre l'identification réalisée par l'algorithme proposé (seconde méthode) des trajectoires présentes dans une image d'épandage d'engrais. Les droites identifiées correspondent effectivement aux trajectoires suivies par les granules.

A titre d'exemple, sur une plage angulaire de 80° environ, en fixant $M_s = 0,4.Ls_{Min}$ et $\Gamma_s = 0,5$ une soixantaine de trajectoires sont identifiées sur une image d'épandage d'ammonitrate.

Le critère d'arrêt choisi pour l'algorithme a pour objectif d'éviter les fausses identifications et caractérisations de trajectoires. En revanche, il ne permet pas d'assurer l'identification de toutes les traces présentes dans l'image, cette exhaustivité n'étant pas recherchée.

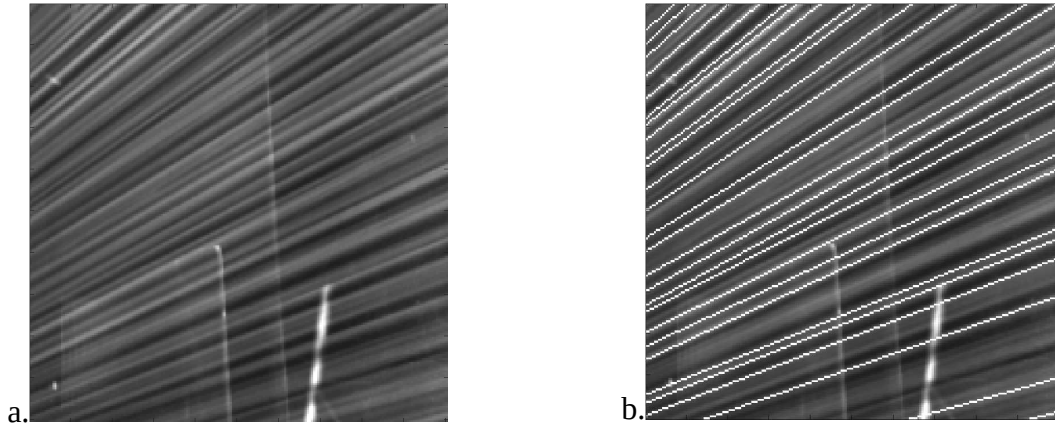


Figure 6-7 : Extrait d'une image d'épandage (a) et superposition des trajectoires identifiées par l'algorithme de mise oeuvre de la transformée de Hough (b). Les lignes blanches sur l'image de droite sont tracées à partir de leur caractéristiques (ρ_{HDi} , θ_{HDi}).

Néanmoins, l'utilisation d'images réelles d'épandage d'engrais ne permet pas de vérifier quantitativement la qualité des résultats puisque les directions des trajectoires des granules ne sont pas connues a priori.

5.2 TEST REALISE SUR DES IMAGES DE SYNTHESE

Pour évaluer la précision et la robustesse de l'algorithme d'identification et de caractérisation des trajectoires, celui-ci est testé sur des images binaires synthétiques.

Une image est tout d'abord construite en simulant les trajectoires de particules qui quitteraient un disque plat équipé de pales radiales de 325 mm avec un angle proche de 40°. L'image est construite avec 18 trajectoires espacées chacune d'environ 5°. Cette image parfaite est ensuite dégradée par un bruit de type « poivre et sel » en changeant aléatoirement l'état (noir ou blanc) de chaque pixel avec une probabilité de 10, 30 ou 50 %.

Des extraits de l'image initiale et de ses versions corrompues par les différents niveaux de bruit sont présentés en figure 6-8.

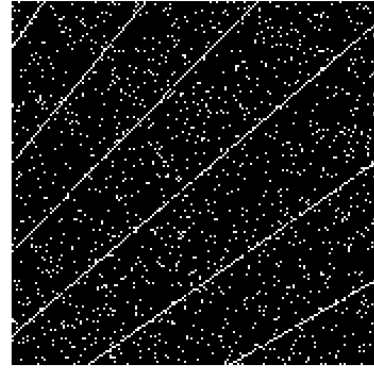
Les quatre images sont ensuite traitées par l'algorithme permettant de calculer et d'exploiter la transformée de Hough, optimisée pour l'étude de l'épandage centrifuge, décrite dans ce chapitre. Les paramètres caractéristiques du calcul de la transformée sont ceux établis précédemment pour une configuration identique à celle considérée dans la simulation : $\Delta_q \rho = 2$ pixels, $\Delta_q \theta = 0,15^\circ$ et $r_{ext} = 700$ pixels.

Les valeurs de références des angles d'éjection sont obtenues en sélectionnant manuellement sur l'image « pure » la région contenant chaque segment et en déterminant les caractéristiques sur la base des moments géométriques de l'alignement des points considérés.

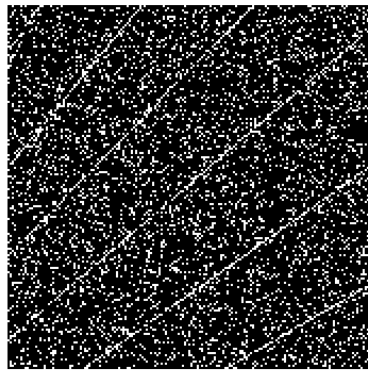
Les caractéristiques des trajectoires présentes dans les images de synthèse ont été déterminées en utilisant les deux méthodes présentées précédemment pour l'extraction des maxima de l'espace de Hough.



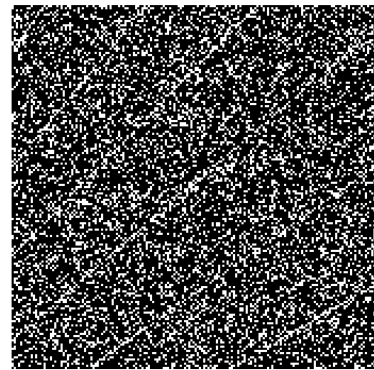
a.



b.



c.



d.

Figure 6-8 : Extrait des images binaires de synthèse. Image sans bruit (a) et versions corrompues par un bruit de type « poivre et sel » avec une probabilité de 10% (b), 30% (c) et 50% (d).

Les résultats obtenus avec la première approche dans le cas de l'image non bruitée et dans le cas de l'image la plus bruitée (probabilité de 50%) sont présentés sur la figure 6-9. Cette figure montre que les accumulateurs retenus pour caractériser les trajectoires sont soit ceux correspondant effectivement à la valeur réelle de l'angle d'éjection simulé, soit leur premier voisin. Cette constatation est en adéquation avec la démarche théorique qui a conduit à choisir la couronne d'investigation et la taille des accumulateurs.

La robustesse de la méthode par rapport au bruit est mise en évidence par l'obtention de résultats similaires sur l'image sans bruit et sur l'image la plus bruitée (avec une probabilité de 50%).

L'impact de la discrétisation de l'espace de Hough est également visible à travers les trois valeurs discrètes que propose l'algorithme pour caractériser l'angle d'éjection correspondant à la simulation.

L'erreur commise sur l'estimation de l'angle d'éjection, présentée en figure 6-10, est inférieure à 1° pour chaque trajectoire. Cette observation est conforme avec la contrainte $\Delta\theta_{ej_pHD} \leq 1^\circ$ fixée pour déterminer les paramètres du calcul de la transformée de Hough.

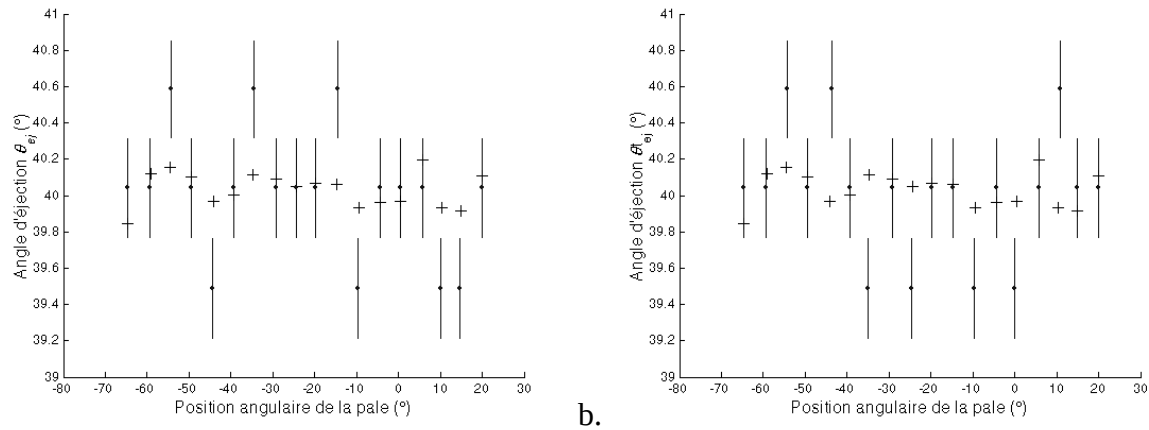


Figure 6-9 : Résultats obtenus en caractérisant chaque trajectoire par les valeurs discrètes (ρ_{HD} , θ_{HD}) déterminées directement à partir de la position des maxima locaux dans l'espace de Hough. a – Sur l'image de synthèse non bruitée. b - Sur l'image de synthèse bruitée (50%). + valeur de référence ; • valeur correspondant à l'accumulateur identifié comme maximum dans l'espace de Hough. Les barres verticales représentent la largeur des accumulateurs exprimée en angle d'éjection.

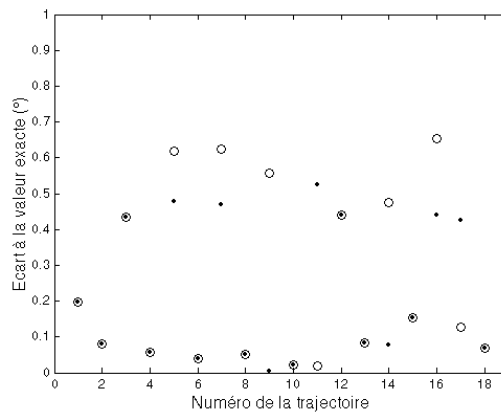


Figure 6-10 : Erreur commise sur l'estimation de l'angle d'éjection lorsqu'il est estimé à partir des valeurs discrètes issues directement de la recherche des maxima dans l'espace de Hough dans le cas de l'image non bruitée (•) et dans le cas de l'image bruitée (○) avec une probabilité de 50%.

Les résultats obtenus avec la seconde approche en recherchant l'axe d'inertie des nuages de points correspondants aux accumulateurs retenus dans l'espace de Hough sont présentés sur la figure 6-11. Lorsque l'image n'est pas bruitée, les valeurs déterminées de manière automatique par l'algorithme sont rigoureusement identiques aux valeurs de références.

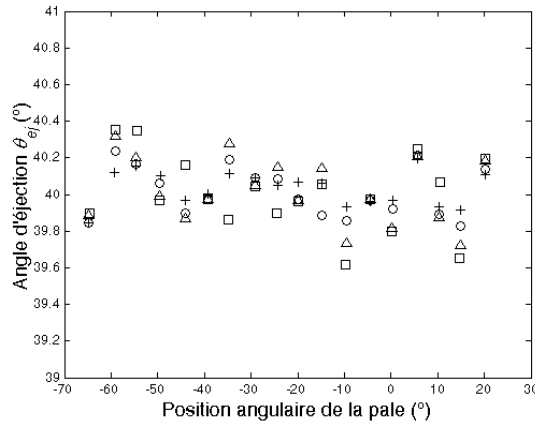


Figure 6-11 : Valeurs des angles d'éjection estimés en utilisant la seconde méthode. + valeur de référence identique à celle obtenue par l'algorithme sur l'image non bruitée ; o cas de l'image bruitée à 10% ; Δ cas de l'image bruitée à 30% ; □ cas de l'image bruitée à 50% .

La figure 6-12 présente, pour les différents niveaux de bruit appliqués sur l'image de synthèse « pure », les écarts entre les estimations de l'angle d'éjection obtenues par l'algorithme (seconde méthode) et les valeurs de références pour chacune des 18 trajectoires simulées. Les erreurs commises augmentent avec le niveau de bruit de l'image. Néanmoins, sur les tests réalisés, les erreurs restent inférieures à 0.35° pour l'image dont la valeur de chaque pixel a été changée aléatoirement avec une probabilité 50 % ce qui correspond à une situation fortement bruitée (figure 6-8).

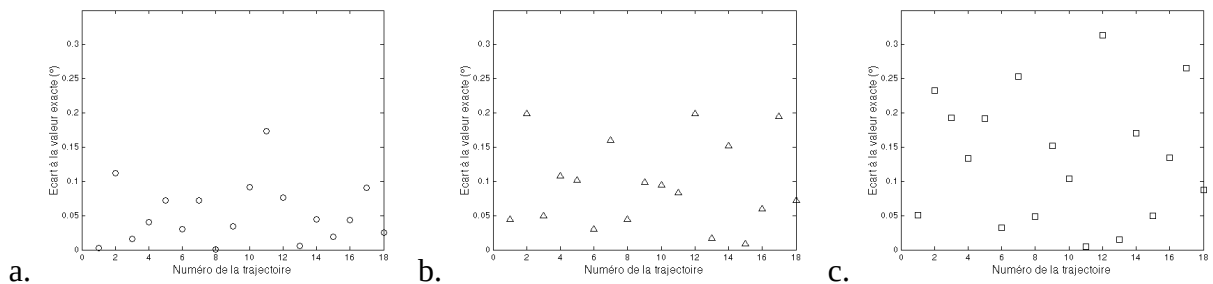


Figure 6-12 : Ecart entre les estimations de l'angle d'éjection obtenus par l'algorithme (seconde méthode) et les valeurs de références pour chacune des 18 trajectoires simulées.
a – Image bruitée à 10% ; b – Image bruitée à 30% ; c – Image bruitée à 50% .

La seconde variante de l'algorithme permet donc de conserver une bonne robustesse vis à vis du bruit tout en limitant l'impact de la discrétisation liée à la construction de l'espace de Hough.

Les tests réalisés sur les images de synthèse ont permis de vérifier que l'algorithme proposé permet d'atteindre une bonne précision sur l'estimation de l'angle d'éjection. A titre d'exemple, en considérant un disque plat équipé de pale radiales de 325 mm entraîné à la vitesse de 800 tr/min, des erreurs de 0.35° et 1° sur l'estimation de l'angle d'éjection voisin de 40° conduiraient respectivement à des écarts de 0.2 et 0.5 m.s^{-1} sur l'estimation de la vitesse à l'éjection soit 0.5 % et 1.4 % d'une vitesse voisine de 35.5 m.s^{-1} .

Les mêmes tests ont été réalisés pour une image de synthèse construite sur la base d'un angle d'éjection de l'ordre de 30° . Les résultats obtenus sont similaires à ceux présentés ici. L'algorithme conduit sur les images de synthèse à des erreurs sur l'estimation de l'angle

d'éjection inférieures à 1° pour la première variante et inférieures à 0.45° pour la seconde variante. Le détail des résultats est donné à l'annexe 13.

Dans le cas où la trace induite dans l'image par le mouvement des granules peut être assimilée au support de la composante horizontale de la vitesse d'éjection, la valeur obtenue par l'algorithme décrit précédemment pour estimer l'angle d'éjection peut être directement utilisée pour déduire la vitesse du granule. En revanche, dans le cas où l'orientation de la trajectoire enregistrée dans l'image diffère de celle de la composante horizontale de la vitesse, la valeur d'angle estimée à partir de l'image de la scène nécessite une correction. Cette situation est étudiée dans les paragraphes qui suivent.

6 CAS OU LES TRAJECTOIRES DES GRANULES NE SONT PAS COPLANAIRES

6.1 DEFINITION DU PROBLEME ET APPROCHE PROPOSEE

Dans le cas d'une distribution centrifuge réalisée avec un disque plat il est raisonnable de penser que dans le voisinage du disque les trajectoires suivies par les granules après leur éjection sont proches de l'horizontale.

Dans cette situation, le mouvement des particules étant supposé dans un plan horizontal, l'angle d'éjection est mesuré par imagerie en réglant verticalement l'axe optique de la caméra. Le plan image est alors parallèle au plan de déplacement des particules et les angles mesurés dans le plan image sont égaux aux angles existants dans le plan de la scène considérée comme bidimensionnelle.

En revanche dans le cas d'un disque de forme tronconique, les trajectoires des particules éjectées ne se répartissent pas dans un plan. Il est alors inutile de chercher à incliner l'axe de la prise de vue par rapport à l'axe de rotation de la caméra pour placer le plan du CCD parallèle aux trajectoires puisque celles-ci ne sont pas coplanaires. Quelle que soit la configuration du disque, le plan image sera réglé à l'horizontale ou plus précisément de manière orthogonale à l'axe de rotation du disque d'épandage. Dans cette situation, les trajectoires des granules et le plan d'acquisition des images ne seront pas parallèles ce qui rend délicat la mesure des orientations dans une scène tridimensionnelle à partir d'une image à deux dimensions.

Une approche classique de la reconstruction de la scène en trois dimensions consisterait en la mise en place d'un dispositif stéréoscopique suivi d'une mise en correspondance (mise en relation dans les différentes images des primitives appartenant à la scène). Dans notre situation, cette approche se heurte à deux inconvénients majeurs. Le premier est l'augmentation de la complexité du système de prise de vue nécessaire à l'acquisition des couples stéréoscopiques simultanés. Le second est lié à la probable difficulté de mise en oeuvre des algorithmes de correspondance compte tenu de la nature des objets recherchés dans l'image : ensemble de traces floues (toutes plus ou moins similaires) laissées par le passage de granules en mouvement sur un arrière plan bruité. En outre la définition d'un système d'acquisition trop complexe ou trop fragile serait un handicap en cas de volonté de transfert du système sur un distributeur du commerce.

L'objectif de cette partie est donc de proposer une méthode qui réduit l'espace des solutions du problème en intégrant une information complémentaire permettant de remonter de l'image (bidimensionnelle) à la scène (tridimensionnelle).

Les contraintes appliquées à la détermination des caractéristiques des trajectoires (mesure de l'angle horizontal d'éjection) sont issues des connaissances a priori obtenues au chapitre 3 par l'analyse mécanique du système d'éjection centrifuge.

La méthode envisagée consiste à caractériser la projection de la trajectoire dans le plan image par les algorithmes déjà décrits puis à réaliser une correction sur chacune des caractéristiques déterminées dans l'image pour prendre en compte l'inclinaison de la trajectoire par rapport à l'horizontale dans la scène.

Rappelons que l'angle d'éjection recherché est l'angle mesuré dans le plan horizontal : il s'agit de l'angle entre la tangente au cercle décrit par l'extrémité de la pale et la projection de la trajectoire de la particule dans le plan horizontal.

6.2 MODELISATION GEOMETRIQUE DU PROBLEME

Le problème posé est celui du passage de la scène (tridimensionnelle) à l'image (bidimensionnelle) et de la transformation inverse concernant les caractéristiques déduites de l'image. Pour aborder son étude, il est nécessaire de se doter d'un modèle de projection et de définir les repères utiles à l'analyse.

Le repère caméra est défini comme le repère orthonormé direct $(C, \mathbf{i}_C, \mathbf{j}_C, \mathbf{k}_C)$ qui prend son origine au foyer de l'objectif avec $\mathbf{k}_C$ un vecteur vertical orienté de la caméra vers la scène observée.

Le modèle de projection considéré est celui du sténopé. Il conduit à établir la relation suivante entre les coordonnées d'un point M du monde dans le repère caméra $(x_C(M), y_C(M), z_C(M))$ et les coordonnées de son image dans le repère image $(u(M), v(M))$.

$$\begin{pmatrix} u(M) \\ v(M) \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{z_C} \begin{bmatrix} f / \Delta p_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f / \Delta p_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_C(M) \\ y_C(M) \\ z_C(M) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.13)$$

avec : f focale de l'objectif de la caméra
 Δp_x largeur d'un pixel
 Δp_y hauteur d'un pixel
 (u_0, v_0) coordonnées du point principal P dans l'image

Compte tenu du pavage carré du CCD utilisé la taille des pixels est simplement donnée par $\Delta p_x = \Delta p_y = \Delta p$.

La géométrie de la scène et de la prise de vue est illustrée sur la figure 6-13.

Plus la projection horizontale de la trajectoire est éloignée du point principal, plus l'écart entre l'image de la trajectoire et l'image de sa projection horizontale augmente.

6.3 ECART ANGULAIRE ENTRE L'IMAGE D'UNE TRAJECTOIRE ET L'IMAGE DE SA PROJECTION DANS LE PLAN DE REFERENCE

6.3.1 EXPRESSION EN FONCTION DE L'INCLINAISON VERTICALE DE LA TRAJECTOIRE

Quel que soit l'écart entre (ρ_{im}, θ_{im}) et $(\rho_{Hor_im}, \theta_{Hor_im})$ la position du point E_i image du point E sur le plan du CCD permet de déduire directement et sans biais la position du point E dans la scène. En effet, la position du point E_i dans l'image est obtenue comme l'intersection de l'image de la trajectoire et du cercle correspondant au rayon de la pale. La position de ce point d'intersection dans l'image est indépendante de l'inclinaison de la trajectoire dans la scène. En travaillant dans les repères dont les origines sont prises en E ou E_i et dont les orientations sont définies par la direction de l'image de la trajectoire ou la direction de la composante horizontale de la trajectoire, l'écart angulaire ε_θ est établi de la manière suivante :

$$\sin \varepsilon_\theta = -y_{ETi}(P) \tan(\Omega_{ej}) \frac{\Delta p}{f} \quad (6.14)$$

avec $y_{ETi}(P)$ l'ordonnée du point principal de l'image dans le repère direct $(E_i, \mathbf{i}_{ETi}, \mathbf{j}_{ETi})$ défini dans le plan image tel que $\mathbf{i}_{ETi}$ soit colinéaire à T_{im} et orienté dans le sens du mouvement de la particule éjectée.

L'établissement de cette relation n'est pas immédiat. Les calculs sont décrits à l'annexe 14.

La position du point E_i variant dans l'image pour chaque position de pale, l'ordonnée $y_{ETi}(P)$ est exprimée en fonction des caractéristiques (ρ_{im}, θ_{im}) des lignes qui sont extraites de l'image. Le seul point fixe de la scène étant le point A (point de passage de l'axe de rotation du disque dans le plan de référence $\mathcal{P}_E$), l'expression de $y_{ETi}(P)$ est recherchée par rapport à A_i image de A dans le plan du CCD.

Soit $(x_{Ai}(P), y_{Ai}(P))$ les coordonnées du point principal dans $(A_i, \mathbf{i}_i, \mathbf{j}_i)$ repère orthonormé direct défini avec $\mathbf{i}_i$ orienté selon les lignes dans le sens croissant des indices des colonnes et $\mathbf{j}_i$ orienté selon les colonnes dans le sens décroissant des indices des lignes.

L'expression de $y_{ETi}(P)$ est:

$$y_{ETi}(P) = \rho_{im} - x_{Ai}(P) \cos(\theta_{im}) - y_{Ai}(P) \sin(\theta_{im})$$

En remplaçant dans (6.14), on obtient :

$$\sin \varepsilon_\theta = (x_{Ai}(P) \cos(\theta_{im}) + y_{Ai}(P) \sin(\theta_{im}) - \rho_{im}) \tan(\Omega_{ej}) \frac{\Delta p}{f} \quad (6.15)$$

Cette relation permet d'obtenir l'écart angulaire ε_θ à partir des caractéristiques polaires (ρ_{im}, θ_{im}) de l'image d'une trajectoire à condition que l'inclinaison Ω_{ej} de la trajectoire par rapport à $\mathcal{P}_E$ soit connue.

6.3.2 PRISE EN COMPTE DES CONNAISSANCES A PRIORI

L'analyse cinématique du système mécanique menée dans le chapitre 3 a montré (3.18) que :

$$\tan(\Omega_{ej}) = \frac{\sin(\theta_{ej})}{\cos(\alpha_{lv})} \tan(\Omega)$$

En combinant cette relation avec (6.15), et en considérant $\varepsilon_\theta = \theta_{ej} - \theta_{im}$ l'expression de l'écart ε_θ est obtenue comme suit :

$$\varepsilon_\theta = \arctan \left(\frac{K(\rho_{im}, \theta_{im}) \sqrt{r_{pale}^2 - \rho_{im}^2}}{\frac{f}{\Delta p} \cos(\alpha_{lv}) r_{pale} - K(\rho_{im}, \theta_{im}) \rho_{im}} \right) \quad (6.16)$$

avec : $K(\rho_{im}, \theta_{im}) = (x_{Ai}(P) \cos(\theta_{im}) + y_{Ai}(P) \sin(\theta_{im}) - \rho_{im}) \tan(\Omega)$

L'angle horizontal d'éjection peut également être directement déterminé à partir de l'expression suivante :

$$\theta_{ej} = \arctan \left(\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\rho_{im}}{r_{pale}} \right)^2}}{\frac{\rho_{im}}{r_{pale}} + (\rho_{im} - x_{Ai}(P) \cos(\theta_{im}) - y_{Ai}(P) \sin(\theta_{im})) \frac{\Delta p \tan \Omega}{f \cos \alpha_{lv}}} \right) \quad (6.17)$$

Ces relations permettent de déterminer l'écart angulaire ε_θ ou l'angle horizontal d'éjection θ_{ej} en fonction :

- des caractéristiques polaires (ρ_{im}, θ_{im}) de la droite considérée dans l'image,
- de la configuration du disque donnée par r_{pale} et α_{lv} ,
- des caractéristiques de l'objectif (f) et du capteur CCD (Δp),
- de la position de l'axe de rotation du disque par rapport à la caméra.

Ces relations s'appliquent sans biais tant que le plan de référence $\mathcal{P}_E$ est parallèle au plan image.

6.4 CORRECTION DES CARACTERISTIQUES POLAIRES

L'algorithme d'analyse d'images, basé sur la transformée de Hough, fournit les caractéristiques polaires (ρ_{im}, θ_{im}) des droites T_{im} identifiées dans l'image. La description polaire étant particulièrement pratique pour caractériser l'éjection des granules, il est intéressant de préciser l'expression des coordonnées polaires $(\rho_{Hor_im}, \theta_{Hor_im})$ de T_{Hor_im} (composante horizontale de T_{im}).

Ces expressions sont obtenues géométriquement comme suit à partir de la figure 6-14.

$$\rho_{Hor_im} = -\sqrt{r_{pale}^2 - \rho_{im}^2} \sin \varepsilon_\theta + \rho_{im} \cos \varepsilon_\theta \quad (6.18)$$

$$\theta_{Hor_im} = \theta_{im} - \varepsilon_\theta \quad (6.19)$$

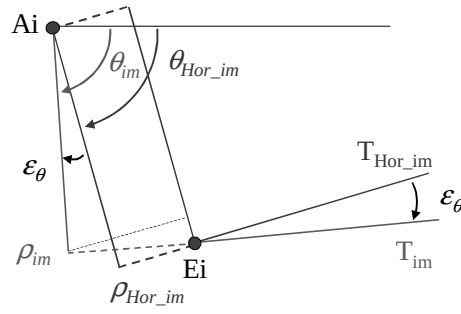


Figure 6-14 : Représentation géométrique des caractéristiques polaires de T_{im} et T_{Hor_im} . (Dans la situation illustrée les valeurs de θ_{Hor_im} , θ_{im} et ϵ_θ sont négatives).

7 CONCLUSION

Ce chapitre propose une méthode d'estimation des angles horizontaux d'éjection des granules éjectés par un distributeur centrifuge à partir d'une image binaire des axes des trajectoires suivies par ceux-ci.

La méthode repose sur le calcul de la transformée de Hough en coordonnées polaires en intégrant des informations issues de l'analyse mécanique du système de distribution centrifuge. Cette prise en compte de connaissances a priori permet de choisir de manière pertinente l'origine utilisée pour la transformation, la zone d'investigation considérée dans l'image, et de déterminer de manière optimale la dimension des accumulateurs de l'espace des paramètres.

Le raisonnement mené pour déterminer les paramètres de calcul de la transformée considère un segment de droite défini de manière continue dans l'espace image. En pratique, cet espace est discret ce qui peut engendrer des biais par rapport aux conclusions obtenues sur la localisation de l'intégralité des votes liés à un segment donné. D'autre part, le raisonnement n'intègre pas la prise en compte de la distribution des pixels autour de l'axe du segment considéré.

Néanmoins, les tests pratiqués sur des images synthétiques ont donné des résultats en accord avec les prévisions issues d'une considération continue de l'espace image.

La prise en compte de connaissances a priori permet de réduire considérablement la taille de l'espace des paramètres. En effet, en absence de telles considérations, le calcul classique de la transformée de Hough pour une image de taille $N_l \times N_c$ conduirait à un espace des paramètres

de taille $\frac{\sqrt{N_l^2 + N_c^2}}{\Delta_q \rho} \times \frac{\pi}{\Delta_q \theta}$. La dimension des images utilisées étant de 1008×1018 pixels, la

taille de l'espace de Hough serait de 716×1200 cellules en considérant : $\Delta_q \rho = 2$ pixels et $\Delta_q \theta = 0.15^\circ$. En considérant une distribution sur 180° (valeur rarement atteinte), la taille de l'espace utilisé en intégrant les informations a priori est de 38×1200 soit près de 19 fois plus petite.

Comme les points de l'image considérés pour le calcul de la transformée sont uniquement ceux situés sur la couronne d'investigation, le nombre d'opérations nécessaires au calcul de la transformée est réduit par rapport à la prise en compte de l'intégralité de l'image.

D'autre part, le nombre maximal de votes enregistrables dans un accumulateur est fixé.

Enfin, compte tenu du choix de l'origine de calcul, du choix de la zone d'investigation, et du caractère borné de l'angle d'éjection, la normalisation de l'espace de Hough n'est pas nécessaire.

L'exploitation des pics présents dans l'espace des paramètres est réalisée de manière itérative. Une méthode est proposée pour s'affranchir de la discrétisation de l'espace des paramètres lors de la détermination des caractéristiques polaires du segment de trajectoire identifié.

Les caractéristiques polaires des trajectoires identifiées dans l'image peuvent être directement converties en angles horizontaux d'éjection lorsque les particules éjectées se déplacent dans un plan parallèle au plan image. En revanche, lorsque les trajectoires ne sont pas coplanaires, il est nécessaire de corriger les caractéristiques déduites de l'image. Cette correction intègre la géométrie de la scène et de la prise de vue ainsi que des connaissances a priori sur le système mécanique.

Notons que le calcul d'une transformée de Hough directement sur une image en niveau de gris est envisageable mais le nombre de pixels à prendre en compte serait beaucoup plus important et un biais apparaîtrait du fait de l'hétérogénéité de l'éclairage et de l'arrière plan.

Chapitre 7 : Confrontation et analyse des résultats

L'objectif de ce chapitre est de mettre en œuvre la technique d'acquisition et d'analyse d'images qui a été définie dans les chapitres précédents pour caractériser le flux d'engrais éjecté par un disque d'épandage centrifuge en terme de vitesse, de direction et indirectement de répartition angulaire.

Les valeurs déduites des images acquises en filé seront confrontées à des valeurs obtenues par d'autres méthodes afin de valider les résultats obtenus.

1 VALIDATION EN CONDITION STATIQUE

L'objectif de ce paragraphe est de valider expérimentalement le modèle géométrique proposé pour déterminer l'angle horizontal d'éjection à partir d'images acquises en filé. Il s'agit également de vérifier de manière globale la validité du système d'acquisition et de traitement des informations proposé dans les chapitres précédents.

1.1 MATERIEL ET METHODE

Une maquette est réalisée pour simuler des trajectoires de granules sortant d'une pale fictive avec des angles d'éjection horizontaux et verticaux connus. La maquette consiste en un plateau d'environ 1 m² positionné de manière horizontale. Sur ce plateau est fixé un axe vertical autour duquel peut tourner une planchette mobile glissant sur le plan support (figure 7-1). Une cordelette est tendue entre deux fixations selon un angle Ω_{ej_sim} par rapport à l'horizontale. Cette cordelette simule la trajectoire d'une particule. Par construction, quelle que soit l'orientation de la planchette mobile autour de son axe, les angles horizontaux θ_{ej_sim} et verticaux Ω_{ej_sim} simulés sont constants.

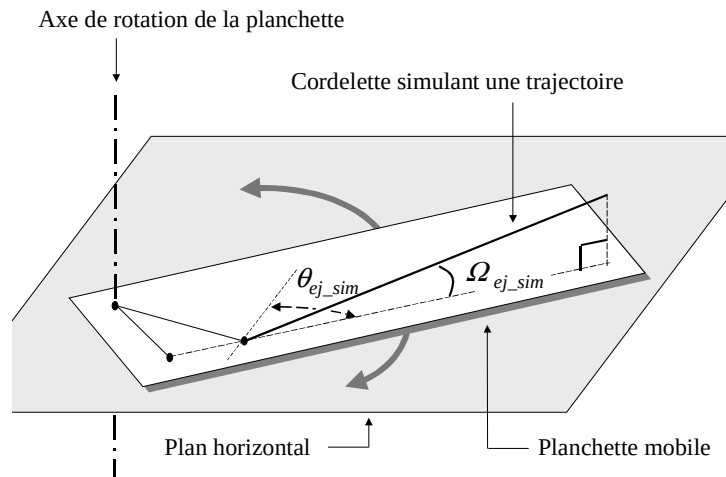


Figure 7-1 : Schéma de la maquette utilisée pour simuler la trajectoire d'une particule dans différentes directions avec des angles d'éjection horizontaux et verticaux constants.

Trois simulations ont été réalisées en fixant une valeur pour l'angle horizontal d'éjection et trois valeurs différentes pour l'angle vertical d'éjection. Les valeurs issues des mesures manuelles réalisées sur la maquette dans chacune de ces trois situations et servant de référence pour évaluer la méthode d'imagerie sont données dans le tableau 7-1. Les estimations des erreurs maximales relatives à la mesure manuelle de ces angles sont développées en annexe 15.

Paramètre simulé		Mesure manuelle	Erreur maximale
Angle horizontal d'éjection	cas 1 à 3	34.9°	0.5°
Angle vertical d'éjection	cas 1	0°	0.2°
	cas 2	4.8°	0.3°
	cas 3	12.35°	0.3°

Tableau 7-1 : Valeurs des angles mesurés manuellement sur la maquette pour chacune des trois simulations.

Pour chaque simulation, la caméra est placée au dessus de la maquette et l'axe de visée est réglé verticalement de manière à être perpendiculaire au plan horizontal du montage. La distance entre la caméra et la cordelette est de l'ordre de celle utilisée pour la prise de vue lors d'un épandage d'engrais. En faisant tourner la planchette autour de son axe, on obtient une succession de positions angulaires de la pale fictive et de la trajectoire correspondante.

La cordelette se projette alors selon différentes directions sur le CCD et une image est acquise pour chaque position de la planchette.

Au niveau du traitement, chaque image subit une étape de détection de lignes (cf. chapitre 5). Les résultats de chaque détection sont ensuite cumulés dans une seule et même image. Les angles horizontaux sont alors calculés de deux façons à partir de cette image :

- 1) en utilisant uniquement les caractéristiques (θ_{im}, ρ_{im}) de la ligne identifiée dans l'image,
- 2) en intégrant la connaissance de l'angle vertical pour corriger l'estimation initiale de l'angle déduit directement de l'image. D'après la relation (6-15) établie dans le chapitre

6, la correction est :
$$\varepsilon_{\theta} = \arcsin \left(\left(x_{Ai}(P) \cos(\theta_{im}) + y_{Ai}(P) \sin(\theta_{im}) - \rho_{im} \right) \tan(\Omega_{ej}) \frac{\Delta p}{f} \right)$$

Pour cette validation en condition statique, la valeur de ε_θ est calculée pour chaque trajectoire en considérant l'angle d'éjection vertical Ω_{ej} comme connu ($\Omega_{ej} = \Omega_{ej_sim}$, valeur mesurée manuellement sur la maquette).

Les valeurs ainsi obtenues pour l'estimation de l'angle horizontal d'éjection seront comparées à la valeur mesurée manuellement sur la maquette.

1.2 CONFRONTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

Pour chacune des trois simulations, les valeurs des angles horizontaux d'éjection estimées en appliquant ou non une correction à l'angle déduit directement de l'image sont représentées graphiquement sur la figure 7-2 en fonction de la position de la pale fictive.

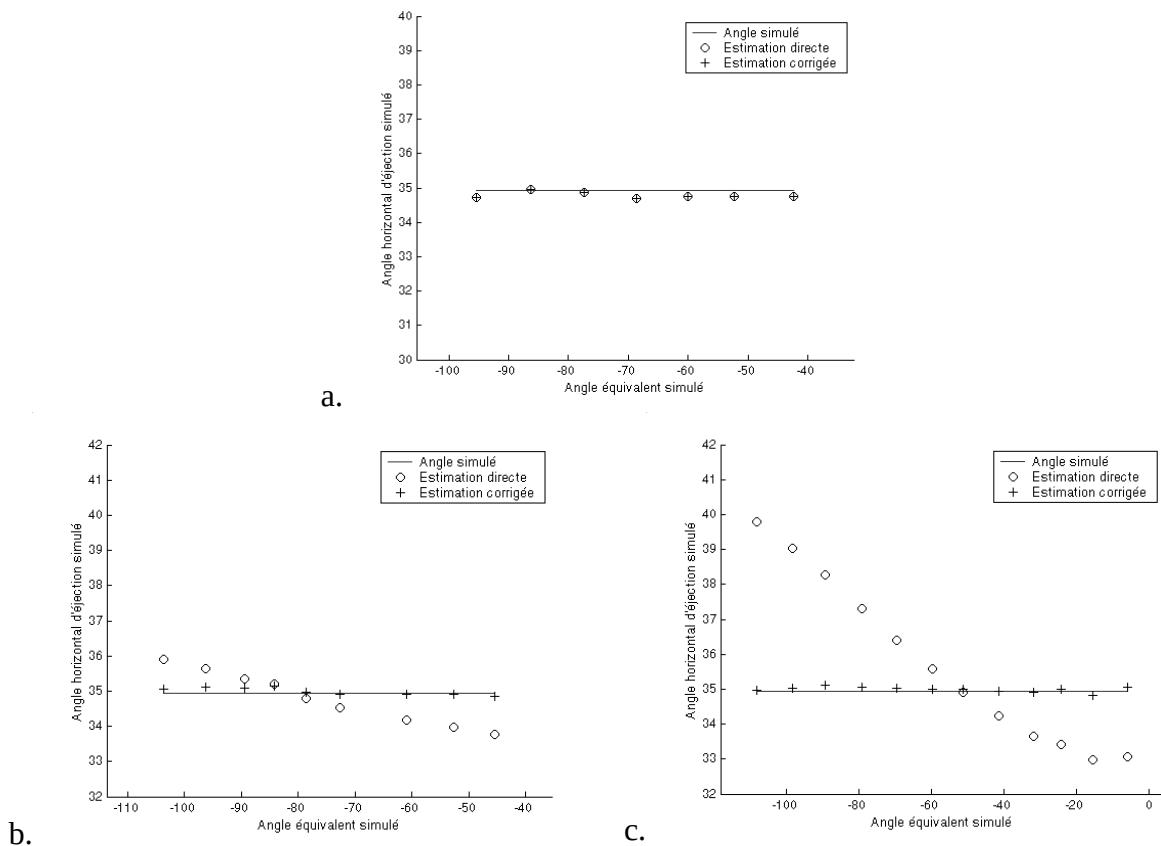


Figure 7-2 : Représentation graphique de la valeur d'angle horizontal d'éjection simulé et des estimations de cet angle au moyen du système d'imagerie proposé en appliquant ou non une correction à l'angle déduit directement de l'image. Les valeurs sont tracées en fonction de la position de la pale simulée par la maquette. Les valeurs sont indiquées en degrés. a : Cas où $\Omega_{ej_sim} = 0^\circ$; b : Cas où $\Omega_{ej_sim} = 4.8^\circ$; Cas où $\Omega_{ej_sim} = 12.35^\circ$.

Dans le cas où la trajectoire est horizontale, l'application de la formule (6.15) n'a aucun effet puisque le paramètre Ω_{ej} est nul. Cette situation permet donc simplement de vérifier que la méthode de mesure de l'angle horizontal d'éjection fonctionne correctement dans le cas d'un disque plat. Elle a l'avantage d'intégrer l'ensemble des biais inhérents à la prise de vue et à l'algorithme de traitement.

Dans le cas d'une inclinaison de 4.8° par rapport à l'horizontale, une interprétation directe des positions des trajectoires dans l'image laisserait penser à une évolution de l'angle d'éjection en fonction de la position angulaire de la pale. En revanche, la prise en compte de l'angle

vertical et l'utilisation de la formule de correction (6.15) dans l'estimation de l'angle horizontal d'éjection permet d'annuler ce biais. Après correction, quelle que soit la position angulaire de la planchette, les valeurs estimées par imagerie restent proches de la valeur mesurée manuellement sur la maquette.

Dans le cas d'une inclinaison de 12.35° par rapport à l'horizontale, les remarques sont identiques à celle formulées pour l'inclinaison de 4.8°. Comme dans la situation précédente, la prise en compte de l'angle vertical permet d'annuler le biais sur l'estimation de l'angle d'éjection. L'effet de la correction (utilisant l'expression (6.15)) est encore plus marqué que dans la situation précédente.

Le tableau 7-2 synthétise pour les trois situations étudiées les valeurs moyennes et les écarts-types obtenus pour l'angle horizontal d'éjection estimé par imagerie en prenant en compte l'angle vertical d'inclinaison des trajectoires simulées. Le tableau mentionne également les écarts maxima $\Delta\theta_{ej\ max}$ constatés entre les angles horizontaux d'éjection estimés par imagerie (en intégrant la correction nécessaire) et la valeur mesurée manuellement sur la maquette.

	$\overline{\theta_{ej}}$	$\sigma_{\theta_{ej}}$	$\Delta\theta_{ej\ max}$
Cas 1	34.78°	0.09°	0.23°
Cas 2	34.99°	0.11°	0.22°
Cas 3	34.99°	0.081°	0.18°

Tableau 7-2 : Résultats obtenus par le système d'imagerie pour les trois simulations réalisées avec la maquette. $\overline{\theta_{ej}}$ est la valeur moyenne, $\sigma_{\theta_{ej}}$ est l'écart-type et $\Delta\theta_{ej\ max}$ est l'écart maximal avec la valeur de référence.

Les écarts maxima $\Delta\theta_{ej\ max}$ constatés entre la valeur de l'angle horizontal d'éjection estimée par analyse d'image et la mesure manuelle de cet angle sont inférieurs à l'erreur maximale envisageable sur la mesure manuelle.

Le modèle géométrique proposé pour prendre en considération l'angle vertical d'éjection et corriger le biais engendré par cette inclinaison sur l'estimation de l'angle horizontal d'éjection peut donc être considéré comme validé.

Ces tests valident également le système d'acquisition de l'image dans sa globalité (réglage de l'orientation de la caméra, détermination de la position de l'axe de rotation de la pale, détermination du facteur de conversion millimètre-pixel).

2 VALIDATION EN CONDITION DYNAMIQUE

Les tests réalisés précédemment ne valident que partiellement la méthode proposée pour déterminer la vitesse d'éjection des granules lorsque ceux-ci quittent la pale. En effet, seule la mesure de l'angle horizontal d'éjection a fait l'objet d'une vérification sur la base de la connaissance de l'angle vertical d'éjection. Or en pratique, l'angle vertical d'éjection des granules éjectés par un disque d'épandage n'est pas connu. De plus, les tests réalisés en statique ne permettent pas d'évaluer la technique en terme de mesure de vitesse d'éjection.

L'objet du présent paragraphe est donc d'évaluer la méthode de mesure en conditions dynamiques (*i.e.* en situation d'épandage) en utilisant le dispositif expérimental décrit au chapitre 4.

2.1 ESTIMATION DE LA VITESSE D'EJECTION

En condition dynamique, la vitesse d'éjection des particules n'est pas connue a priori. Les valeurs de vitesses déduites de l'analyse des images acquises en filé ne pourront donc pas être comparées à des valeurs exactes. En revanche, ces valeurs peuvent être confrontées à celles déduites d'une autre méthode d'estimation de la vitesse : l'approche stroboscopique.

2.1.1 MATERIEL ET METHODE

2.1.1.1 Acquisition des images et choix de la situation analysée

Afin de permettre une comparaison des résultats obtenus par la méthode d'acquisition en filé et par la méthode stroboscopique, la prise de vue est réalisée de manière à combiner les deux approches dans une même image. Pour cela, la scène est simultanément soumise à un éclairage continu réalisé par des projecteurs et à un éclairage stroboscopique. Le dispositif stroboscopique utilisé met en œuvre une série de flashes successifs (Cointault, 2001). L'intervalle entre deux illuminations consécutives est de 4 ms.

Les images ainsi obtenues (figure 7-3) font apparaître d'une part les trajectoires des particules en mouvement durant le temps d'exposition et d'autre part les positions stroboscopiques.

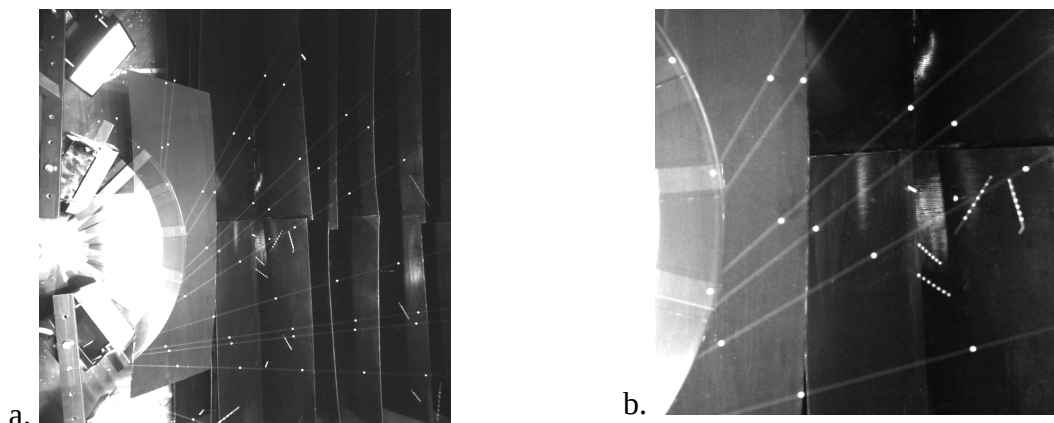


Figure 7-3 : Exemple d'une image combinant la prise de vue en filé et l'approche stroboscopique dans le cas d'une éjection de billes sphériques en matière plastique avec un très faible débit. a – Vue d'ensemble de l'image. b – Détail de l'image.

De manière à obtenir le maximum de précision sur l'estimation de la vitesse par la méthode stroboscopique, la série d'images destinée à la confrontation des deux méthodes est réalisée en utilisant un disque plat équipé de pales présentant un profil en V. Les particules utilisées sont des billes sphériques en plastique de 6 mm de diamètre et dont la masse volumique est d'environ $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La pale est alimentée à partir du centre du disque avec un débit très faible de manière à favoriser le mouvement des sphères le long de la gorge de la pale pendant la phase d'accélération centrifuge. Ces précautions permettent de faire l'hypothèse que le déplacement des particules éjectées a lieu dans un plan parallèle au plan de l'image.

Le choix de billes calibrées, toutes identiques, permet d'envisager un comportement similaire pour chacune d'elles lors de la phase d'accélération sur le disque et lors de la phase de vol après éjection.

Les données présentées ici ont été obtenues avec une pale de 400 mm de diamètre, inclinée vers l'avant ($r_p = -24$ mm) et une vitesse de rotation de 800 tr/min. Le facteur de conversion millimètre-pixel est de 1.17 mm/pixel pour la série d'images utilisées.

2.1.1.2 Traitement des données issues de l'approche « filé »

Lors du traitement des images par la méthode basée sur l'acquisition en filé, il est apparu que les trajectoires présentaient une certaine courbure. La figure 7-4 illustre ce phénomène en présentant la distribution des pixels d'une trajectoire par rapport à l'axe du nuage de points déterminé par l'algorithme de traitement. Une correction a donc été intégrée dans l'algorithme pour éviter un biais sur l'estimation de l'angle d'éjection résultant de la différence entre la droite des moindres carrés caractérisant le nuage de points et l'orientation de la trajectoire au moment où la particule quitte la pale. Cette correction consiste à déduire l'orientation de la trajectoire au moment de l'éjection en modélisant le nuage de points par un polynôme d'ordre 2 puis à calculer la dérivée de la courbe au point de départ de la trajectoire (point d'éjection). La caractérisation de la tangente à l'origine de la trajectoire permet ainsi de corriger la valeur de l'angle d'éjection.

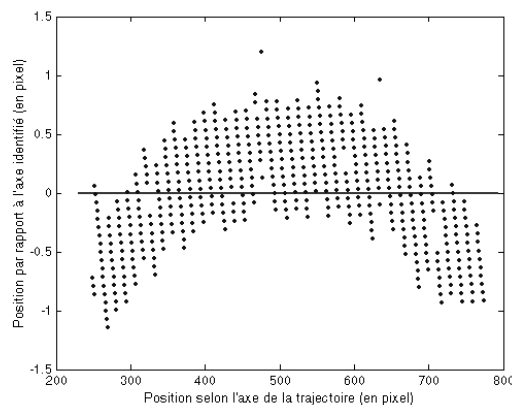


Figure 7-4 : Position des pixels correspondant à la trajectoire d'une bille sphérique par rapport à l'axe moyen identifié pour le nuage de points.

2.1.1.3 Traitement des données issues de l'approche stroboscopique

Concernant l'approche stroboscopique, l'exploitation des données consiste dans un premier temps à déterminer la vitesse moyenne à partir de chaque couple de positions d'une même particule pour chaque trajectoire présente dans l'image. La détermination de la distance séparant deux positions stroboscopiques successives est réalisée de manière semi-manuelle. Pour chacune des deux positions considérées, une petite région contenant l'image de la particule est sélectionnée manuellement. Une valeur de niveau de gris est également déterminée pour seuiller chaque région de manière à permettre l'estimation du centre de la particule au moyen d'un simple calcul de barycentre.

Pour chaque trajectoire, les différents couples de positions stroboscopiques fournissent ainsi une évaluation des vitesses moyennes de la bille au cours de son déplacement.

Les valeurs de vitesses mesurées le long d'une trajectoire (dans le sens du déplacement de la bille) sont globalement décroissantes. Cette diminution de la vitesse au cours du mouvement n'est pas surprenante compte tenu de la force de traînée qui s'applique sur chaque bille.

De manière à évaluer la vitesse au moment de l'éjection et non après une durée de vol variable, une régression linéaire de premier ordre est calculée entre la position de la bille et la vitesse moyenne. La vitesse à l'éjection est alors obtenue comme l'ordonnée à l'origine de la

droite de régression de la vitesse en fonction de la position le long de la trajectoire. La figure 7-5 illustre cette méthode d'analyse des données.

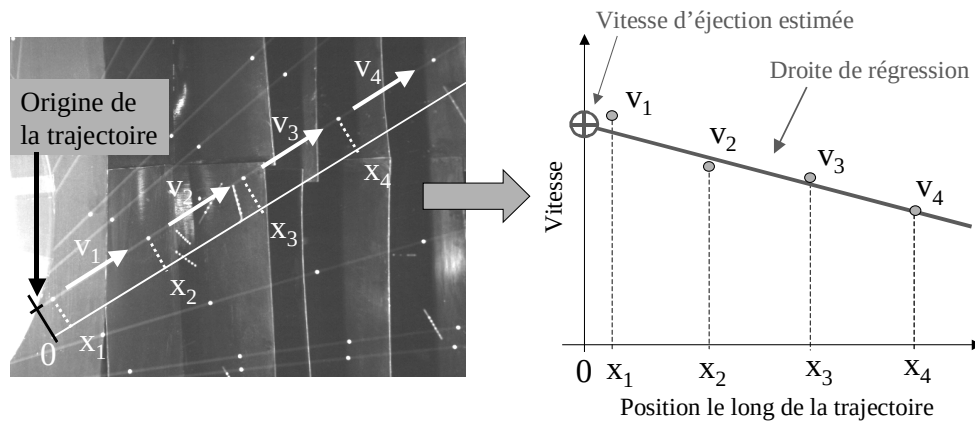


Figure 7-5 : Illustration de la méthode utilisée pour exploiter les données issues de l'approche stroboscopique.

2.1.2 CONFRONTATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

2.1.2.1 Résultats obtenus

Les données présentées ci-dessous résultent de l'analyse de soixante trajectoires obtenues à partir d'une série de 7 images.

Lorsque l'on considère l'ensemble des trajectoires, la moyenne et l'écart-type de la vitesse d'éjection déduite de l'approche « filé » sont identiques aux valeurs obtenues par l'approche stroboscopique. Les deux méthodes donnent une valeur moyenne de 43.66 m.s^{-1} et un écart-type de 0.59 m.s^{-1} .

La comparaison entre les deux méthodes de mesure a également été réalisée en considérant non pas les paramètres statistiques de la vitesse d'éjection pour l'ensemble des trajectoires étudiées mais en analysant les valeurs obtenues pour chaque trajectoire prise individuellement. Dans ce cas des différences parfois sensibles apparaissent entre les valeurs estimées par chacune des méthodes. La figure 7-6 présente un histogramme des différences constatées sur chaque trajectoire.

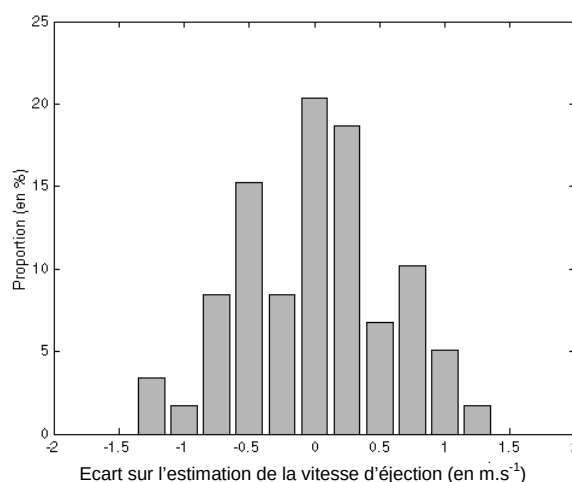


Figure 7-6 : Histogramme des écarts constatés sur l'estimation de la vitesse d'éjection pour chaque trajectoire par l'approche « filé » et l'approche stroboscopique.

L'écart maximum observé entre les estimations de vitesse d'éjection réalisées par les deux méthodes est de 1.24 m.s^{-1} soit 2.8 % de la vitesse moyenne.

L'écart-type des différences observées est de 0.57 m.s^{-1} soit 1.3% de la vitesse moyenne.

Dans le cas de la configuration étudiée, le point d'éjection étant à 70 cm au dessus du sol, les billes éjectées à 43.66 m.s^{-1} ont une portée théorique de 13.7 m. Des variations de 0.57 m.s^{-1} et 1.24 m.s^{-1} autour de cette vitesse d'éjection conduiraient respectivement à des variations de portée d'environ 0.15 m et 0.3 m. Ces valeurs qui demeurent théoriques sont relativement faibles.

2.1.2.2 Discussion relative à l'analyse des erreurs

2.1.2.2.1 Imperfections de la méthode stroboscopique

Concernant la méthode stroboscopique, le dispositif mis en œuvre ne constitue pas une méthode de référence parfaite pour la mesure de la vitesse des particules. Différentes sources d'erreurs sont envisagées et discutées ci-après.

Il est tout d'abord permis de s'interroger sur la précision de la localisation des particules dans l'image. En pratique, les particules étant des billes blanches parfaitement sphériques, elles apparaissent sous forme de disques bien définis dans l'image. Afin d'évaluer l'erreur commise sur la position de la bille dans l'image, le processus de localisation est mis en œuvre sur une région d'analyse volontairement décentrée par rapport à la position de la bille (figure 7-7a). Le seuil de binarisation étant choisi à 0.6 par l'opérateur compte tenu de son expertise (sur une échelle de 0 à 1), examinons quelles sont les conséquences du choix d'un seuil différent au niveau du calcul du barycentre sur l'image seuillée. Pour un seuil inférieur à 0.25, l'écart de localisation est de l'ordre de 10 pixels, mais pour les seuils voisins de 0.6, la figure 7-7b montre que les écarts de localisation sont inférieurs à 0.4 pixels.

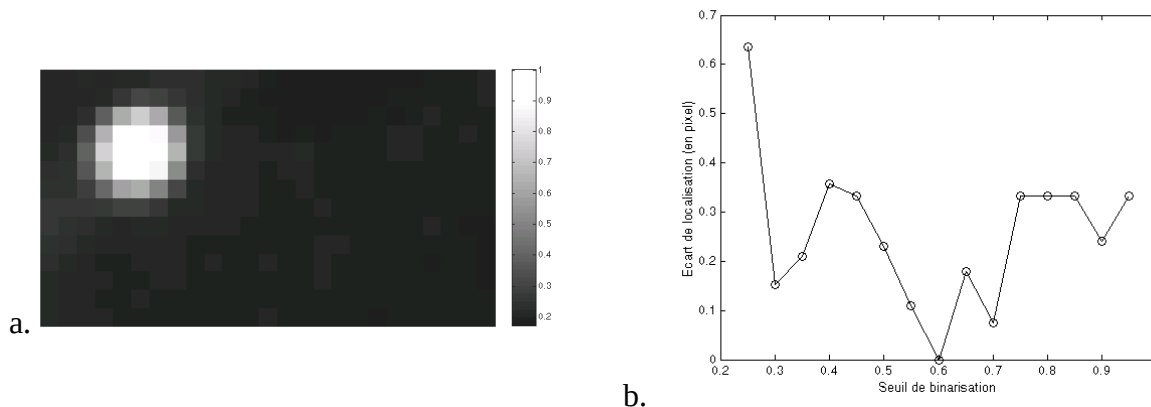


Figure 7-7 : Illustration de l'incidence du choix du seuil sur la détermination de la position de la bille dans l'image. a – Région sélectionnée dans l'image (volontaire décentrée) ; b – Ecart de localisation en fonction du seuil par rapport à la position définie dans le cas d'un seuil choisi à 0,6.

En se plaçant dans les conditions défavorables d'une erreur de localisation de 0.4 pixels sur chacune des deux positions déterminées pour évaluer le déplacement et sachant que l'intervalle de temps est de 4 ms, l'erreur maximale sur l'estimation de la vitesse serait de l'ordre de 0.2 m.s^{-1} (en considérant un facteur de conversion de 1 mm/pixel).

L'erreur commise sur le calcul de la position de la bille dans l'image est donc relativement faible.

La méthode d'estimation de la vitesse mérite également une réflexion. Les particules étudiées n'étant pas en mouvement uniforme, il existe un biais entre la vitesse moyenne déterminée par le rapport de la distance parcourue sur l'intervalle de temps qui sépare deux flashes stroboscopiques et la vitesse instantanée de la particule au moment où elle est éclairée. Dans la situation étudiée ici, ce biais peut être corrigé en prenant en compte le coefficient de résistance aérodynamique spécifique K_a des particules. En effet les caractéristiques physiques de ces particules sont connues puisqu'il s'agit de billes calibrées, toutes identiques.

Dans le cas d'un disque plat, la vitesse instantanée v_i correspondant à la première position d'un couple de positions stroboscopiques peut être déduite (cf. annexe 16) de la vitesse moyenne v_m au moyen de l'expression suivante :

$$v_i = \frac{e^{K_a v_m \Delta t}}{K_a \Delta t}$$

En pratique, l'estimation de la vitesse d'éjection par régression linéaire calculée à partir de la vitesse instantanée au lieu de la vitesse moyenne n'a pas permis d'obtenir de meilleurs résultats. L'écart-type sur les différences constatées pour chaque trajectoire entre la vitesse estimée par approche « filé » et par approche stroboscopique est resté de 0.57 m.s^{-1} malgré la prise en compte de cette correction.

Une autre source d'erreur relative à la méthode stroboscopique mise en œuvre ici est la sensibilité de la mesure de vitesse à l'inclinaison verticale de la trajectoire. En effet, la détermination de la vitesse à partir des positions relevées dans l'image suppose que le déplacement a lieu parallèlement au plan du CCD. Or en pratique, cette hypothèse n'est pas parfaitement vérifiée du fait de l'action de la pesanteur et du fait de la dispersion verticale des particules pendant la phase de vol. En fonction de la zone étudiée dans l'image et en fonction de l'inclinaison de la trajectoire par rapport à l'horizontale, les déplacements mesurés dans l'image peuvent être sur-évalués ou sous-évalués. La figure 7-8 illustre cette situation.

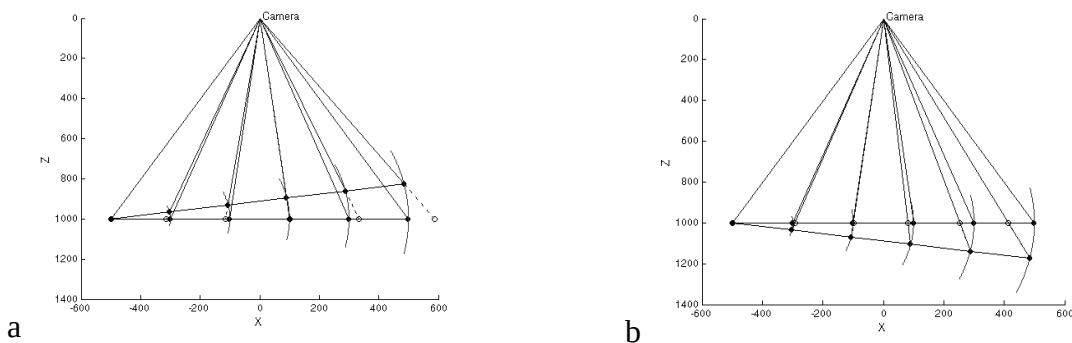


Figure 7-8 : Illustration de l'erreur commise sur l'évaluation du déplacement supposé dans le plan horizontal lorsque la trajectoire est inclinée vers le haut (a) ou vers le bas (b).

De manière à apprécier quantitativement ce biais, une simulation de la vitesse déduite des positions dans l'image a été réalisée pour différentes inclinaisons de la trajectoire par rapport à l'horizontale. Le résultat de cette simulation est présenté sur la figure 7-9. La courbe en gras (0°) correspond aux valeurs correctes, c'est à dire à celles qui sont déduites de l'image si la trajectoire est horizontale. Les autres courbes font apparaître le biais sur la mesure de vitesse en fonction de l'inclinaison de la trajectoire. Une variation d'inclinaison de 0.7° correspond à l'écart-type constaté sur l'angle vertical d'éjection dans la situation étudiée.

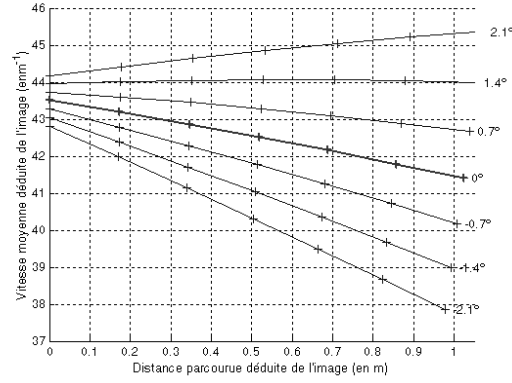


Figure 7-9 : Simulation numérique des valeurs de vitesses déduites de l'image par analyse stroboscopique. Les calculs ont été réalisés en considérant que la distance horizontale entre le point d'éjection et l'axe optique de la caméra est de 250 mm.

Sur l'exemple modélisé par la figure 7.9, une variation de 0.7°, 1.4° ou 2.1° par rapport à l'hypothèse d'horizontalité implique une erreur théorique respectivement de 0.23, 0.45 ou 0.7 m.s⁻¹ soit 0.5, 1 et 1.6 % sur l'estimation de la vitesse par le procédé stroboscopique mis en œuvre.

Dans la situation modélisée par la figure 7.9, les vitesses mesurées dans l'image ne présentent pas de décélération en fonction de la distance parcourue par la particule si l'inclinaison verticale est de l'ordre de 1.4°. Dans le cas d'une inclinaison de 2.1°, les vitesses mesurées par l'approche stroboscopique laisseraient même croire à une accélération en cours de vol.

De telles situations ont effectivement été observées lors de l'analyse des données obtenues par la méthode stroboscopique.

Le manque de parallélisme entre les trajectoires et le plan image constitue sans doute la source d'erreur la plus importante au niveau des mesures basées sur les positions stroboscopiques.

2.1.2.2.2 Imperfections de la méthode basée sur l'acquisition en filé

En ce qui concerne la mesure de vitesses par la méthode d'analyse des images acquises en filé, le non respect de l'hypothèse d'horizontalité des trajectoires a également un impact sur la précision des mesures réalisées dans le cas d'un disque plat.

D'après la relation (3.20) établie dans le chapitre 3, l'erreur relative commise sur l'expression de la vitesse s'exprime de la manière suivante, en fonction de l'erreur commise sur l'angle d'éjection :

$$\frac{\Delta v_{ej}}{v_{ej}} = \frac{\sin \theta_{ej} - \cos \theta_{ej} \tan \alpha_{lv}}{\cos \theta_{ej} + \sin \theta_{ej} \tan \alpha_{lv}} \Delta \theta_{ej}$$

Or, lorsque la trajectoire n'est pas parallèle au plan du CCD, le biais qui existe sur l'angle horizontal d'éjection déduit directement de l'image est :

$$\varepsilon_{\theta} = \arcsin \left(-y_{ETI}(P) \tan(\Omega_{ej}) \frac{\Delta p}{f} \right)$$

d'après la relation (6.14) établie dans le chapitre 6.

En combinant ces deux expressions, l'erreur relative commise sur l'estimation de la vitesse a été modélisée (figure 7-10) pour les paramètres correspondant à la situation étudiée.

Cette erreur augmente avec la distance $y_{ETI}(P)$ entre la trajectoire et le point principal dans l'image.

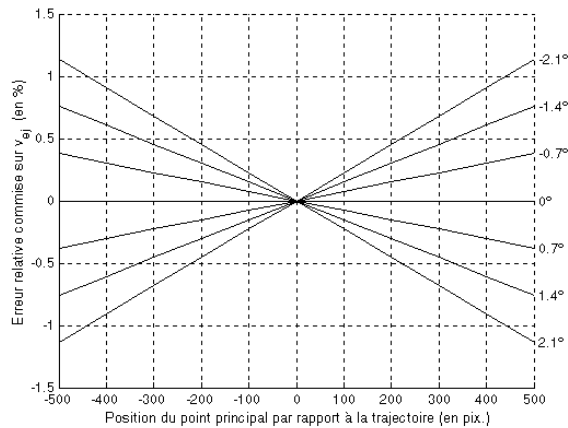


Figure 7-10 : Modélisation de l'erreur relative (en %) commise sur l'estimation de la vitesse en fonction de l'inclinaison de la trajectoire par rapport à l'horizontale pour un disque plat.

Dans le cas le plus défavorable, pour une trajectoire située à 500 pixels du point principal de l'image, l'erreur théorique commises sur l'estimation de la vitesse d'éjection pour un disque plat est de 0.4, 0.8 ou 1.1% lorsque l'inclinaison réelle de la trajectoire est respectivement de 0.7, 1.4 et 2.1°.

2.1.2.3 Conclusion

Bien que la méthode stroboscopique utilisée pour la confrontation des résultats obtenus ne soit pas une méthode de référence parfaite, elle est par son principe indépendante de la technique utilisée dans l'analyse des images acquises en filé. La cohérence des résultats obtenus par les deux méthodes constitue donc un gage de la validité de la mesure proposée dans cette thèse pour estimer la vitesse d'éjection à partir d'une image acquise en filé.

Les différences entre les estimations réalisées par l'approche stroboscopique et celles obtenues par approche « filé », pour chaque trajectoire prise individuellement sont relativement faibles (l'écart-type des différences est de l'ordre de 1.3 % de la vitesse mesurée). Ces écarts s'expliquent principalement par les variations d'inclinaison des trajectoires par rapport au plan horizontal correspondant au plan moyen de la nappe d'éjection dans le cas d'un disque plat.

Enfin, rappelons que sur l'ensemble des trajectoires étudiées, la moyenne et l'écart-type de la vitesse d'éjection déduite de l'approche « filé » sont identiques aux valeurs obtenues par l'approche stroboscopique.

2.2 ESTIMATION DE L'ANGLE VERTICAL D'EJECTION

La comparaison des estimations de vitesse, réalisée précédemment dans le cas d'un disque plat, ne permet pas de valider l'estimation des composantes de la vitesse en trois dimensions.

Une solution pour analyser le mouvement des particules en trois dimensions pourrait consister à combiner un système stéréoscopique et un éclairage stroboscopique pour réaliser des mesures de référence avec une précision suffisante. La conception d'un tel dispositif dans le but de valider la méthode d'analyse des images acquises en filé dépassant les objectifs de cette thèse, il est nécessaire d'envisager d'autres pistes de validation.

Dans ce paragraphe, on se propose de valider l'estimation du mouvement vertical des particules au voisinage du disque en se basant sur une preuve matérielle de la localisation des trajectoires dans l'espace.

2.2.1 MATERIEL ET METHODE

Une localisation concrète des points de passage des granules consiste à placer dans le flux un écran sur lequel seront enregistrés les impacts des particules. La distribution des impacts sera ensuite exploitée pour évaluer l'altitude moyenne des trajectoires au niveau de l'écran d'interception.

En pratique, un écran (panneau de contreplaqué) est placé à une distance connue de l'axe de rotation du disque. Une feuille de format A3 recouverte d'un papier carbone est fixée sur cet écran comme illustré par la figure 7-11. L'ensemble est protégé par un tissu pour éviter la détérioration du papier.

Pour obtenir une caractérisation de la distribution verticale des trajectoires, ce dispositif est exposé au flux des granules pendant un temps choisi en fonction du débit. La feuille de relevé des impacts est référencée verticalement par rapport au plan d'éjection (*i.e.* altitude sortie de pale) et horizontalement par rapport à la projection orthogonale du centre du disque sur l'écran.

Deux types de particules ont été utilisés pour réaliser les essais : des billes calibrées de 6 mm de diamètre en matière plastique et du chlorure de potassium (KCl).

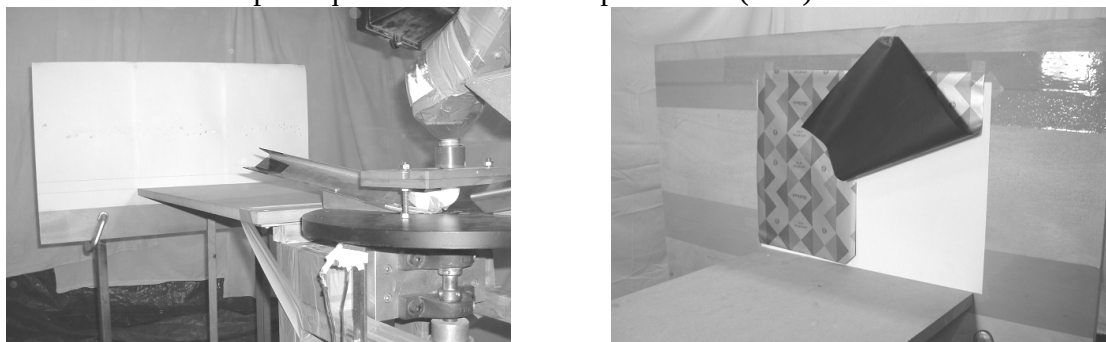


Figure 7-11 : Photos de l'écran d'interception placé au voisinage du disque pour intercepter le flux de particules et enregistrer la distribution verticale des particules éjectées.

Pour chaque situation étudiée, au moins deux feuilles de relevé d'impacts en format A3 sont exposées au flux. Chaque demi-feuille est ensuite scannée en format A4 de manière à pouvoir être exploitée informatiquement. Les traitements appliqués aux images ainsi obtenues pour déterminer l'altitude moyenne des trajectoires au niveau de l'écran d'interception sont décrits à l'annexe 17.

Cette valeur d'altitude est ensuite confrontée à l'altitude calculée par application du modèle de vol balistique en fonction des conditions initiales de vol (vitesse et angle vertical d'éjection) déterminées à partir de l'analyse d'images acquises en filé.

Pour estimer l'altitude d'un impact au moyen d'un modèle de vol balistique paramétré par les conditions initiales d'éjection (estimée par imagerie), il est indispensable de connaître la distance horizontale d_{EI} qui a été parcourue par le granule considéré.

L'angle horizontal d'éjection étant obtenu par l'algorithme d'analyse d'images, la distance horizontale qui sépare un impact du point d'éjection correspondant peut être estimée par application de relations géométriques. L'annexe 18 donne davantage de détails sur le calcul de cette longueur de vol balistique.

2.2.2 CONFRONTATION DES DONNEES EXPERIMENTALES

Plusieurs séries d'essais ont été réalisées pour deux configurations de disque :

-configuration 1 : disque plat équipé d'une pale en V inclinée vers l'avant

($r_{pale} = 400$ mm, $r_p = -24$ mm) ;

-configuration 2 : disque tronconique équipé d'une pale en V inclinée vers l'avant

($\Omega = 10.7^\circ$, $r_{pale} = 390.7$ mm ; $r_p = -24$ mm).

Les essais ont été effectués avec des billes de 6 mm en alimentant la pale en continu au moyen d'un coude placé sur l'axe de rotation du disque puis avec de l'engrais (chlorure de potassium) en alimentant la pale de manière traditionnelle (chute verticale d'un flux de granules sur le disque).

Différentes vitesses de rotation ont été testées : 500, 600, 700 et 800 tr/min.

Selon les essais, les impacts ont été relevés à deux distances différentes en plaçant l'écran à 1102 mm ou à 2000 mm de l'axe de rotation du disque.

Le principe de la confrontation des données issues de l'analyse d'images et des données issues des relevés d'impacts repose sur la comparaison de l'altitude moyenne des impacts avec l'altitude calculée au moyen du modèle de vol balistique (cf. chapitre 3).

Le modèle de vol balistique permet de transformer l'angle vertical d'éjection (Ω_{ej}) et la norme du vecteur vitesse à l'éjection (v) en une valeur d'altitude au niveau de l'écran d'interception moyennant la connaissance de la distance parcourue et des caractéristiques aérodynamiques des particules.

En pratique, les distances de vol balistique entre point d'éjection et point d'impact sur l'écran (lors de la rotation de la pale) ne varient pas de plus de 1 cm lorsque l'écran est placé à 2000 mm et ne varient pas de plus de 2 cm lorsque l'écran est placé à 1102 mm de l'axe de rotation du disque.

Dans le cas des billes plastiques, le coefficient de résistance aérodynamique spécifique K_a a été pris égal à 0.0376 m^{-1} en considérant un diamètre de 6 mm, une masse volumique de $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et un coefficient de traînée de 0.44.

Dans le cas des particules de chlorure de potassium, le coefficient de résistance aérodynamique spécifique K_a moyen a été estimé à 0.09 m^{-1} sur la base des travaux réalisés par Grift et al. (1997) et Walker et al. (1997). La validité de cette estimation a également fait l'objet d'une confrontation avec des données expérimentales relatives aux portées de projections réellement observées dans le cas d'un épandage (Piron, 2006). L'annexe 19 donne davantage de détails concernant la détermination de K_a pour le chlorure de potassium. L'annexe 19 montre que même si la valeur de K_a (de l'ordre de 0.09 m^{-1} pour le chlorure de potassium) n'est pas connue avec précision, les conséquences de cette incertitude sont faibles sur la modélisation de l'altitude du granule dans sa phase de vol au voisinage du disque. Cet aspect sera également discuté au paragraphe 2.2.3.

2.2.2.1 Essais menés avec des billes

Le tableau 7-3 synthétise les résultats obtenus dans le cas d'un épandage réalisé avec des billes et lorsque les impacts sont relevés sur un écran placé à 1102 mm de l'axe de rotation du disque.

Les valeurs moyennes de la vitesse v et de l'angle vertical d'éjection Ω_{ej} ont été déterminées par l'algorithme de traitement d'images. La distance d_{EI} de vol entre le point d'éjection et le point d'impact sur l'écran est calculée à partir de l'angle horizontal d'éjection également déduit de l'algorithme d'analyse d'images.

Dans un premier temps, le modèle de vol balistique est utilisé pour déterminer l'altitude z_{mod} de la trajectoire au niveau de l'impact sur la base des paramètres déduits du système d'imagerie.

L'écart entre z_{mod} et l'altitude moyenne z_{imp} déduite des relevés d'impacts est alors calculé :

$$\varepsilon_z = z_{imp} - z_{mod}.$$

De manière à évaluer la différence constatée sur les altitudes en terme d'erreur sur l'angle vertical d'éjection, la correction $\Delta\Omega_{ej}$ à appliquer sur Ω_{ej} est calculée pour que la trajectoire modélisée passe par l'altitude moyenne des impacts. Ce calcul est réalisé de manière dichotomique par application du modèle de vol balistique de manière à obtenir $z_{imp} = z_{mod}$.

La portée théorique p , calculée sur la base des informations extraites de l'image et la variation Δp correspondant à l'écart $\Delta\Omega_{ej}$ sont également déterminées. Ces valeurs permettent de concrétiser l'incidence de l'écart $\Delta\Omega_{ej}$ en terme de précision d'épandage.

Dans le cas du disque plat, la méthode proposée pour l'exploitation des images ne permet pas de déterminer l'écart-type sur Ω_{ej} . D'autre part, pour les situations étudiées avec le disque tronconique, l'écart-type sur Ω_{ej} évalué par imagerie est de l'ordre de 0.16° alors que selon les relevés d'impacts, l'écart-type serait de l'ordre de 0.75° .

	Imagerie		Ecran à 1102 mm			Modélisation du vol balistique			
ω	Ω_{ej}	v	d_{EI}	z_{imp}	$\sigma_{z_{imp}}$	ε_z	$\Delta\Omega_{ej}$	p	Δp
tr/min	($^\circ$)	m.s ⁻¹	mm	mm	mm	mm	($^\circ$)	m	m
Disque plat ($\Omega = 0^\circ$)									
800	0	41.8	836	-6.4	10.5	-4.4	-0.29	13.2	-0.53
700	0	36.2	840	-5.8	10.4	-3.14	-0.22	11.7	-0.32
600	0	30.7	843	-9.0	10.5	-5.21	-0.35	10.1	-0.39
500	0	25.1	851	-8.6	12.5	-2.81	-0.19	8.5	-0.15
Disque tronconique ($\Omega = 10.7^\circ$)									
800	5.9	40.9	845	73.7	11.1	-15.27	-0.76	23.1	-1.15
700	5.9	35.8	845	75.6	11.0	-12.6	-0.56	20.1	-0.74
600	5.8	30.5	848	74.5	11.3	-11.58	-0.51	16.8	-0.57
500	5.7	25.2	850	72.7	10.1	-10.47	-0.43	13.5	-0.38

Tableau 7-3 : Principaux résultats issus de l'algorithme de traitement des images acquises en filé et de l'exploitation des impacts sur un écran placé à 1102 mm. Notation : ω : régime de rotation du disque ; Ω_{ej} : angle vertical d'éjection ; v : norme du vecteur vitesse ; d_{EI} : distance moyenne qui sépare l'impact du point d'éjection correspondant ; z_{imp} : altitude de l'impact par rapport à l'altitude en sortie de pale ; $\sigma_{z_{imp}}$: écart-type sur z_{imp} ; ε_z : différence d'altitude entre la trajectoire modélisée et z_{imp} ; $\Delta\Omega_{ej}$: correction à appliquer sur l'angle d'éjection déterminé par traitement d'images ; p : portée théorique du vol balistique, Δp : modification de la portée due à la correction $\Delta\Omega_{ej}$.

D'après les résultats mentionnés dans le tableau 7-3, la correction maximale à apporter sur l'angle vertical d'éjection dans le cas d'un disque plat correspond à -0.35° . Elle se traduit par une variation théorique de 0.39 m sur la portée. Pour les différentes situations étudiées avec un disque plat, l'écart le plus important sur la portée correspond à une réduction de 53 cm soit 4% de la portée correspondante.

Dans le cas du disque tronconique, la correction maximale sur l'angle est de -0.76° ; elle engendre une réduction de la portée de 1.15 m soit près de 5%.

2.2.2.2 Essais menés avec de l'engrais (chlorure de potassium)

Une série d'essais intégrant l'acquisition d'images en filé et le relevé d'impacts sur un écran a été réalisée avec du chlorure de potassium (KCl). L'écran a été placé à deux distances différentes de l'axe de rotation du disque : 1102 mm et 2000 mm.

La comparaison des données déduites de l'analyse d'images et des données issues des relevés d'impacts est menée de manière similaire à celle précédemment décrite dans le cas des essais avec les billes en matière plastique.

Le tableau 7-4 fait une synthèse de l'exploitation de ces informations. En particulier, il donne pour chaque situation étudiée, l'écart $\Delta\Omega_{ej}$ constaté entre l'angle vertical d'éjection moyen déterminé par imagerie et la valeur d'angle permettant de calculer exactement l'altitude moyenne des impacts relevés sur l'écran. Cet écart a été calculé par application du modèle de vol balistique en considérant $K_a = 0.09 \text{ m.s}^{-1}$.

Dans le cas du disque plat, la méthode proposée pour l'exploitation des images ne permet pas de déterminer l'écart-type sur Ω_{ej} . Pour les situations étudiées ici avec le disque tronconique l'écart-type sur Ω_{ej} évalué par imagerie est de l'ordre de 0.17° alors que selon les relevés d'impact, il serait de l'ordre de 0.7° .

Imagerie			Ecran à 1102 mm					Ecran à 2000 mm			
ω	Ω_{ej}	v	p	d_{EI}	ε_z	$\Delta\Omega_{ej}$	Δp	d_{EI}	ε_z	$\Delta\Omega_{ej}$	Δp
tr/min	(°)	m.s ⁻¹	m	mm	mm	(°)	m	mm	mm	(°)	m
Disque plat ($\Omega = 0^\circ$)											
800	0	39.0	10.3	858	1,73	0.11	0.10	1784	-3,25	-0.10	-0.10
700	0	33.9	9.3	862	2,63	0.17	0.14	1787	-1,60	-0.05	-0.04
600	0	28.9	8.2	865	3,08	0.21	0.13	1790	-2,00	-0.06	-0.04
500	0	24.0	7.1	866	3,97	0.26	0.13	1791	-3,72	-0.12	-0.06
Disque tronconique ($\Omega = 10.7^\circ$)											
800	5.0	38.2	14.2	866	-2,70	-0.17	-0.11	1790	-6,77	-0.21	-0.14
700	5.1	33.5	12.8	865	-0,72	-0.04	-0.03	1789	-6,25	-0.20	-0.12
600	5.0	28.6	11.2	868	1,14	0.07	0.04	1792	-5,93	-0.18	-0.10
500	4.9	23.7	9.5	870	2,17	0.15	0.07	1794	-4,36	-0.14	-0.06

Tableau 7-4 : Principaux résultats issus de l'algorithme de traitement d'images et de l'exploitation des relevés d'impacts sur des écrans placés à 1102 mm et 2000 mm lors des essais menés avec de l'engrais (chlorure de potassium).

D'après les résultats mentionnés dans le tableau 7-4, l'écart maximum $\Delta\Omega_{ej}$ sur l'angle vertical d'éjection moyen constaté à travers les différentes situations étudiées (prises individuellement) est de 0.26° . Pour une configuration de disque et un régime de rotation donnés, la correction à appliquer à l'angle déterminé par traitement d'images est inférieure à 0.26° pour satisfaire au mieux la cohérence avec l'altitude moyenne des impacts au niveau des deux écrans. Les corrections d'angle à réaliser sur les valeurs estimées par analyse d'images se traduisent par des variations théoriques de portée inférieures à 15 cm.

La précision obtenue sur l'estimation par imagerie de l'angle vertical moyen d'éjection est donc tout à fait satisfaisante dans les situations de distribution d'engrais qui ont été étudiées avec le chlorure de potassium.

2.2.3 DISCUSSION

Les sources d'erreurs potentielles méritent d'être analysées notamment en ce qui concerne l'incidence du coefficient aérodynamique, les imperfections du dispositif expérimental ainsi que les approximations faites au niveau de la modélisation du vol balistique. D'autre part, il est utile de souligner la cohérence des résultats au niveau de la moyenne de l'angle vertical d'éjection tout en commentant la différence constatée sur l'estimation de l'écart-type correspondant à ce paramètre.

Compte tenu de l'incertitude qui réside sur l'estimation du coefficient aérodynamique K_a , en particulier dans le cas des essais réalisés avec de l'engrais, il est important de vérifier que le manque de précision sur l'estimation de ce paramètre ne remet pas en cause la méthode mise en œuvre pour calculer l'altitude d'une trajectoire au voisinage du disque.

De manière à comparer l'incidence des paramètres K_a et Ω_{ej} , sur la comparaison des altitudes modélisées et constatées au niveau de l'écran d'interception, intéressons-nous à la somme des carrés des écarts entre ces deux altitudes lorsque l'on fait varier K_a et Ω_{ej} . La figure 7-12 présente à titre d'exemple le résultat obtenu à partir des valeurs correspondant aux essais réalisés avec l'engrais, le disque tronconique et l'écran placé à 1102 mm (pour 500, 600, 700, et 800 tr/min).

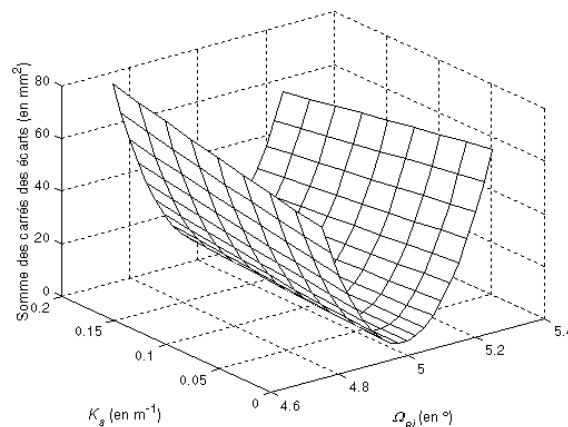


Figure 7-12 : Représentation de la somme des carrés des écarts entre les altitudes réelles des impacts et les altitudes calculées par le modèle de vol balistique en fonction des valeurs du coefficient aérodynamique K_a et de l'angle vertical d'éjection Ω_{ej} .

La figure 7-12 montre que la somme des carrés des écarts varie peu en fonction du coefficient aérodynamique K_a . En revanche elle évolue rapidement en fonction de l'angle vertical d'éjection. Cette représentation graphique permet de vérifier a posteriori que les conséquences de l'erreur commise sur la valeur de K_a pour estimer l'altitude de la trajectoire au voisinage du disque sont négligeables devant les conséquences d'une erreur commise sur la valeur de Ω_{ej} .

L'utilisation du modèle balistique pour la confrontation des résultats expérimentaux ne perd donc pas son intérêt du fait des approximations réalisées sur l'estimation de la valeur du coefficient aérodynamique K_a .

Néanmoins, la méthode mise en œuvre pour déterminer une « vérité terrain » en terme d'angle vertical d'éjection, par l'intermédiaire d'un relevé d'impacts et l'utilisation d'un modèle de

vol balistique, n'est pas parfaite. Des incertitudes existent tant sur le plan du dispositif expérimental que de la modélisation du vol balistique.

Au niveau du dispositif expérimental, le positionnement de références en élévation est délicat en pratique. On peut considérer que les altitudes obtenues sur les feuilles d'impacts sont établies à 1.5 mm près lorsque l'écran est à 1102 mm et à 3 mm près lorsqu'il se situe à 2000 mm. Compte tenu des distances estimées entre les points d'éjection et les points d'impacts ces imprécisions correspondent à des incertitudes de l'ordre de 0.1° en terme d'angle vertical.

Concernant le dispositif mécanique, un mouvement vertical des pales est perceptible lorsque le disque tourne à une vitesse suffisante. Ce déplacement est dû aux défauts de construction et de réglage du système d'épandage. La bride de fixation du disque sur l'axe de rotation n'est probablement pas rigoureusement orthogonale à l'axe. D'autre part le réglage de la verticalité de l'axe de rotation est délicat. Il a été réalisé en utilisant un niveau de chantier. Le mouvement vertical de la pale lors de sa rotation confère aux granules une accélération verticale supplémentaire qui n'est pas prise en compte.

Au niveau du vol balistique, soulignons que le modèle utilisé est une simplification de la réalité. Les principales hypothèses simplificatrices portent sur l'absence de prise en compte :

- de l'influence de la forme des granules,
- de l'influence d'un éventuel mouvement de rotation de ceux-ci,
- des interactions entre particules pendant le vol du fait de leur proximité,
- de l'influence du mouvement de l'air au voisinage du disque.

L'existence de telles interactions pourraient donc expliquer une partie des écarts constatés entre les valeurs obtenues par analyse d'images et celles déduites des relevés d'impacts.

En particulier, elle pourrait expliquer l'obtention de moins bons résultats dans le cas des essais réalisés avec les billes. En effet, il est probable que du fait de leur roulement sur la pale, les billes soient animées d'un fort mouvement de rotation au moment de leur éjection, contribuant à un comportement plus complexe lors de la phase de vol. A l'inverse, du fait de leur forme anguleuse et de leur déplacement moins individualisé sur la pale, il est peu probable que les granules de chlorure de potassium bénéficient d'une énergie de rotation significative. Ces hypothèses seront confirmées ultérieurement par l'analyse de la courbure des trajectoires dans le plan horizontal.

Il est également permis de s'interroger sur la signification de l'écart-type estimé sur l'angle vertical d'éjection par la méthode d'analyse d'images. L'angle vertical d'éjection a été déterminé à partir de l'angle horizontal d'éjection θ_{ej} par le biais de la relation (3.18) établie dans le chapitre 3 et rappelée ci-dessous :

$$\tan \Omega_{ej} = \frac{\sin \theta_{ej}}{\cos \alpha_{lv}} \tan \Omega$$

Cette relation montre que dans le cas d'un disque plat ($\Omega = 0$), l'angle vertical d'éjection est obligatoirement considéré comme nul pour toutes les trajectoires, quelle que soit la valeur de θ_{ej} . Il en résulte l'impossibilité de déterminer une valeur d'écart-type sur Ω_{ej} .

Dans le cas d'un disque tronconique ($\Omega \neq 0$), la configuration du disque étant constante en cours d'épandage, la relation (3.18) permet d'estimer l'écart-type sur Ω_{ej} en fonction de l'écart-type sur θ_{ej} . L'expression est la suivante :

$$\sigma_{\Omega_{ej}} = \left(\frac{\tan \Omega}{\cos \alpha_{lv}} \cos \theta_{ej} (\cos \Omega_{ej})^2 \right) \sigma_{\theta_{ej}} \quad (7.1)$$

A titre d'exemple pour les situations présentées dans le paragraphe précédent lorsque l'épandage est réalisé avec du chlorure de potassium et le disque tronconique, le rapport $\sigma_{\Omega_{ej}}/\sigma_{\theta_{ej}}$ est de l'ordre de 0.15. Sachant que sur ces essais la valeur de $\sigma_{\theta_{ej}}$ calculée à partir des valeurs de θ_{ej} estimées par imagerie est d'environ 1°, la valeur de $\sigma_{\Omega_{ej}}$ est nécessairement de l'ordre de 0.15°. Cette valeur correspond aux valeurs obtenues par l'algorithme de traitement des données en calculant l'écart-type à partir de l'ensemble des valeurs Ω_{ej} estimées pour chaque trajectoire.

Il apparaît donc que la dispersion réelle de l'angle vertical d'éjection est plus forte que celle qui est déduite de l'analyse théorique du mouvement, réalisée dans le chapitre 3. Il existe sensiblement une part de variation aléatoire des valeurs réelles autour de la valeur moyenne qui est quant à elle correctement évaluée par la description théorique du mouvement.

La méthode qui consiste à réaliser une estimation de l'angle vertical d'éjection Ω_{ej} à partir de la mesure de l'angle horizontal θ_{ej} en faisant appel à la relation établie par analyse mécanique du mouvement permet donc une bonne évaluation de la valeur moyenne de Ω_{ej} mais n'est pas satisfaisante pour estimer la dispersion réelle de l'angle autour de cette valeur moyenne.

2.3 REPARTITION ANGULAIRE DU FLUX

2.3.1 MATERIEL ET METHODE

2.3.1.1 Estimation au moyen des images acquises en filé

La connaissance de la vitesse d'éjection des granules d'engrais à la sortie du disque d'épandage centrifuge est indispensable à la modélisation du vol balistique de ces particules. Mais cette information ne permet pas à elle seule de prédire la répartition de l'engrais au sol. En effet, chaque granule éjecté n'induit pas la formation d'une trace identifiable dans l'image acquise en filé. Dans des conditions classiques d'épandage (*i.e.* débit suffisant, pale en U), l'analyse d'une image conduit à l'identification de 50 à 80 trajectoires alors qu'un calcul grossier laisse imaginer 400 granules de KCl par passage de pale pour un débit massique de l'ordre de 0.3 kg.s⁻¹. Cet échantillonnage est en partie dû aux contraintes imposées sur l'identification des trajectoires de manière à éviter les fausses détections (*cf.* chapitre 6). Mais il est surtout la conséquence de l'épaisseur du flux de granules qui quittent la pale. En effet, les traces laissées par les granules en mouvement dans la tranche supérieure du flux ont tendance à masquer les traces des particules se déplaçant au dessous.

En revanche, en début et en fin d'éjection, là où la densité de granules éjectés est plus faible, l'évolution de la fréquence d'identification des trajectoires traduit l'augmentation ou la diminution du flux massique.

Il est donc intéressant de tracer l'histogramme des positions angulaires de la pale qui correspondent à l'identification des trajectoires dans le but de caractériser le secteur angulaire d'épandage.

En cours d'épandage, alors que tous les paramètres de réglage sont constants, il est apparu que d'une image à l'autre la position du secteur angulaire d'épandage fluctue. Ces variations seront mises en évidence dans le paragraphe 2.3.3 (figure 7-17a). En conséquence l'histogramme des positions angulaires des trajectoires a été réalisé sur une série d'environ 30 images afin de moyenner les résultats.

2.3.1.2 Estimation au moyen d'une couronne compartimentée

Les valeurs de références concernant la répartition angulaire du flux massique des granules sont obtenues au moyen d'une couronne de réception compartimentée placée à proximité du passage de pale. Ce dispositif conçu par le Cemagref (Colin, 1997) permet de collecter le flux d'engrais à la sortie de la pale dans une série de 22 alvéoles couvrant chacune un secteur d'épandage de 10° . La figure 7-13 illustre la construction et la mise en œuvre de ce dispositif au voisinage du disque. Les parois de séparation de chacune des cellules de réception sont inclinées de 45° par rapport à la tangente de la couronne dans le but de limiter les rebonds sur ces cloisons. La couronne est centrée sur l'axe de rotation du disque et l'interstice qui la sépare du lieu de passage de l'extrémité des pales est de l'ordre de 1 cm pour les essais présentés ici.

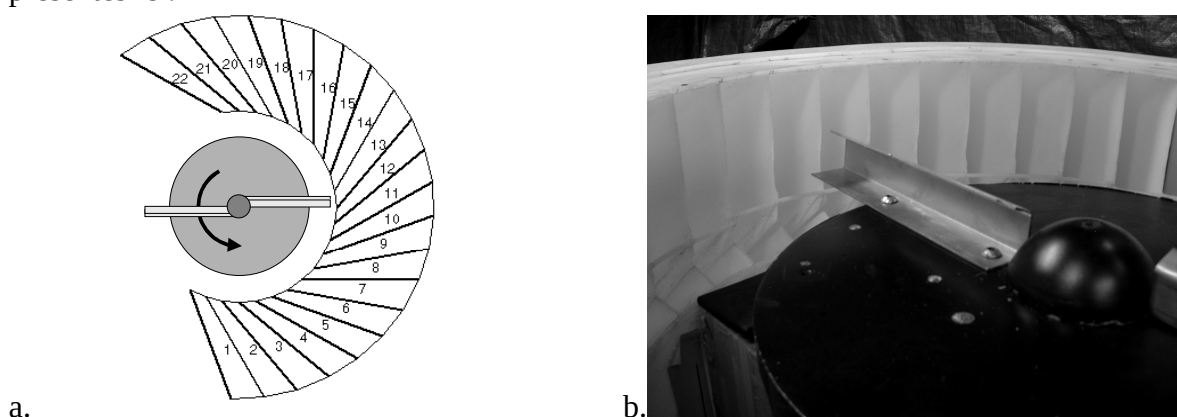


Figure 7-13 : a – Schéma de la couronne compartimentée, placée à proximité du disque d'épandage pour recueillir le flux d'engrais à la sortie des pales (vue de dessus); b - Photographie de la partie interne de la couronne située à proximité du passage de pale.

Après une phase d'épandage, les quantités d'engrais collectées par chaque alvéole sont pesées et permettent de tracer l'histogramme de la répartition angulaire du flux.

La couronne a été marquée de repères permettant de définir son orientation. A chaque essai, une image de la position du dispositif est acquise pour permettre la comparaison des résultats issus de ce dispositif avec les résultats obtenus par analyse d'images.

L'acquisition des images en filé et la mesure de la répartition angulaire au moyen de la couronne sont réalisés successivement de manière indépendante.

2.3.2 CONFRONTATION DES RESULTATS

Les essais ont été conduits pour un débit de l'ordre de 0.4 kg.s^{-1} de chlorure de potassium. Deux configurations de disque ont été utilisées :

Disque plat : pale radiale, profilée en U, $r_{pale} : 294 \text{ mm}$, $r_p = 0 \text{ mm}$,
 $\omega = 800 \text{ tr.min}^{-1}$.

Disque tronconique : pale radiale, profilée en U, $r_{pale} : 287 \text{ mm}$, $r_p = 0 \text{ mm}$,
 $\Omega = 10.7^\circ$, $\omega = 800 \text{ tr.min}^{-1}$.

Pour chaque configuration les essais ont été réalisés pour deux positions différentes du point de chute de manière à vérifier la détection de la variation du secteur d'épandage par les techniques de mesure mises en œuvre.

De manière à éviter tout biais du fait de l'interstice entre la pale et le rayon interne de la couronne de réception, une correction a été prise en compte sur la base de l'angle horizontal d'éjection déduit de l'analyse d'images.

La figure 7-14 présente un exemple de confrontation entre la répartition angulaire estimée au moyen de la couronne et celle obtenue à partir des images dans le cas du disque plat. Les données sont présentées par rapport aux positions angulaires des compartiments de la couronne.

Alors que la distribution obtenue avec la couronne est d'allure gaussienne, la courbe déduite de l'analyse des images paraît tronquée dans sa région sommitale.

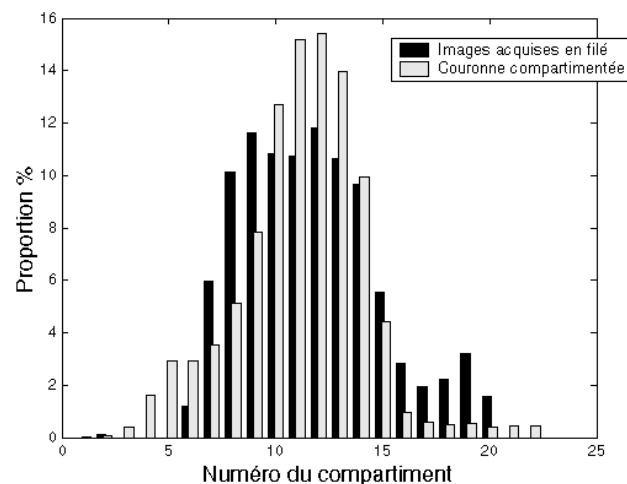


Figure 7-14 : Exemple de confrontation de la répartition angulaire déduite de l'analyse des images acquises en filé et des quantités d'engrais collectées au moyen de la couronne compartimentée.

De manière synthétique, pour chaque essai, la répartition angulaire du flux a été caractérisée par la moyenne et l'écart-type de la distribution ramenée à la position angulaire θ_{pale} de la pale. La mise en correspondance des compartiments de la couronne avec l'angle θ_{pale} est illustré par la figure 7-15. L'angle θ_{pale} est comptabilisé par rapport à une référence arbitraire correspondant à la direction des lignes des images acquises en filé.

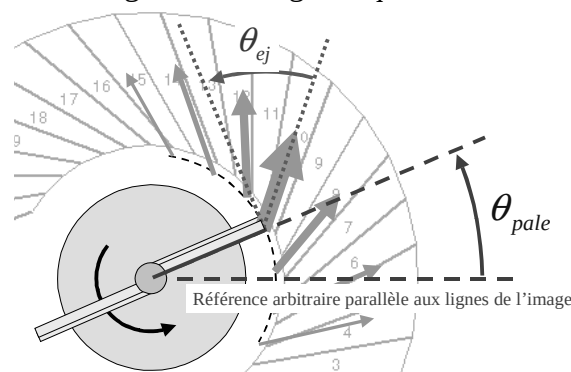


Figure 7-15 : Caractérisation de la répartition angulaire du flux (déduite par analyse d'images ou au moyen de la couronne compartimentée) sur la base de la position angulaire de la pale.

Le tableau 7-5 présente les résultats obtenus par les deux méthodes (couronne compartimentée et analyse d'images). Pour les quatre situations étudiées, les valeurs obtenues

par imagerie correspondent aux résultats issus de l'analyse d'une trentaine d'images. La situation 4 correspond aux histogrammes présentés en figure 7-14.

		Analyse d'images		Couronne compartimentée		Ecart	
		$\overline{\theta}_{pale}$	$\sigma_{\theta_{pale}}$	$\overline{\theta}_{pale}$	$\sigma_{\theta_{pale}}$	$\Delta\theta_{pale}$	$\Delta\sigma_{\theta_{pale}}$
Disque plat	cas 1	0.8°	37.7°	5.6°	31.8°	-4.8°	5.9°
	cas 2	36.6°	37.4°	31.8°	28.3°	4.8°	9.1°
Disque tronconique	cas 3	12.5°	37.9°	12.3°	32.4°	0.2°	5.5°
	cas 4	28.1°	32.2°	22.6°	30.0°	5.5°	2.2°

Tableau 7-5 : Valeurs caractéristiques de la distribution obtenues par analyse d'images acquises en filé et par pesée des quantités d'engrais recueillies dans la couronne de réception.

Notation : $\overline{\theta}_{pale}$: angle moyen de la distribution ramenée à la position angulaire de la pale ; $\sigma_{\theta_{pale}}$: écart-type de la distribution.

Les cas 1 et 2 d'une part, et les cas 3 et 4 d'autre part, correspondent à des positions angulaires différentes du point de chute de l'engrais sur le disque.

Concernant la direction moyenne de la nappe d'épandage, les écarts constatés atteignent 5.5° entre les valeurs obtenues à partir de la couronne compartimentée et celles déduites des trajectoires identifiées par analyse d'images. Pour ce qui est de l'écart-type de la distribution, la différence constatée atteint 9.1°. Sur ces quatre essais, l'erreur moyenne commise sur l'estimation de la direction moyenne de la nappe est de 3.8° et l'erreur moyenne commise sur l'écart-type de la distribution est de 5.7°.

A titre indicatif, soulignons qu'une erreur de 5° sur la direction d'une particule implique un écart de 0.9 m, 1.7 m et 2.6 m pour des distances de projection respectivement de 10, 20 et 30 m.

2.3.3 DISCUSSION

Comparées aux résultats obtenus dans les tests mis en œuvre pour évaluer la mesure des angles et de la vitesse d'éjection, les erreurs commises sur l'estimation de la répartition angulaire du flux sont les plus importantes.

L'estimation de ce paramètre à partir de l'identification des trajectoires dans les images acquises en filé mériterait donc des développements et des tests complémentaires.

Concernant le traitement des données issues de l'analyse d'images, le calcul d'une valeur moyenne et d'un écart-type sur l'ensemble de l'histogramme n'est probablement pas la méthode la plus adaptée à la caractérisation de la distribution. A titre d'exemple, nous illustrerons nos propos à partir des répartitions présentées à la figure 7-14 et d'une des images (figure 7-16) correspondant à la situation étudiée (cas 4).

L'histogramme de la position angulaire des trajectoires identifiées par analyse d'images fait apparaître un mode principal dont le sommet est aplati et un prolongement sur les compartiments 16 à 20 correspondant à la fin de l'éjection. L'analyse visuelle des images confirme la présence de trajectoires sur la fin du secteur angulaire d'éjection mais ces granules ne constituent probablement pas un flux massif important. La proportion apparente sur l'histogramme de ces granules est amplifiée par la « saturation » du nombre de trajectoires identifiées dans la zone centrale de l'éjection. En conséquence, l'angle moyen calculé sur la base des trajectoires identifiées se trouve décalé vers la fin de l'éjection par rapport à l'axe du mode principal. De même, l'écart-type calculé se trouve surévalué par rapport à la dispersion réelle du flux. Une identification et une caractérisation du mode

principal pourrait ainsi conduire à une meilleure estimation des paramètres de la distribution réelle du flux massique.

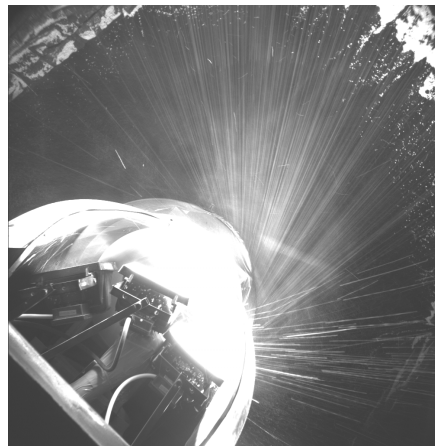


Figure 7-16 : Exemple d'une des images acquises en filé et utilisée dans le cadre de la détermination de la répartition angulaire du flux présentée en figure 7-14.

D'autre part, l'histogramme déduit des quantités d'engrais pesées dans chaque compartiment a la forme d'une gaussienne légèrement dissymétrique. Le « surplus » de début d'éjection (compartiments 3 à 6) correspond aux granules incorrectement pris en pale qui ne font pas partie du flux principal. Ces granules qualifiés d'« incontrôlés » sont collectés dans les premiers compartiments de la couronne de réception mais sont volontairement ignorés au niveau de l'analyse d'images (puisque leur direction et leur vitesse sont aléatoires). Dans cette situation, l'angle moyen déterminé à partir des quantités d'engrais recueillies dans la couronne est décalé vers le début de l'éjection.

Les remarques formulées sur la forme des histogrammes expliquent les écarts constatés entre les moyennes et les écarts-types calculés sur la base des informations issues de l'image et de la mise en œuvre de la couronne compartimentée.

Il serait également intéressant de s'interroger sur l'incidence de la présence de la couronne au voisinage immédiat du disque vis à vis de la répartition du flux.

Enfin soulignons qu'en terme d'estimation de la direction moyenne de la nappe d'éjection, une variabilité assez importante est observée entre les différentes images acquises. La figure 7-17 illustre l'évolution de la direction moyenne et de l'écart-type de la répartition en fonction du nombre d'images prises en compte (pour la situation 4). Concernant la dispersion angulaire du flux, les variations s'estompent à partir du cumul d'une dizaine d'images. Au niveau de la direction moyenne de la nappe d'épandage une évolution de ce paramètre au cours de la série de prises de vues n'est pas impossible.

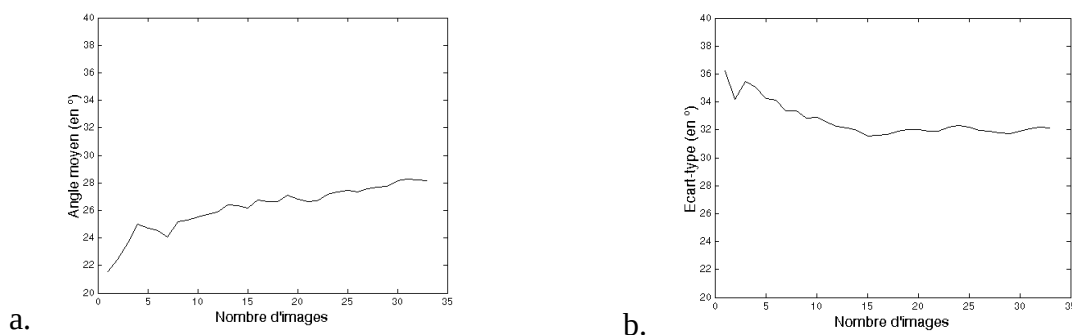


Figure 7-17 : a – Valeur estimée pour l'angle moyen en fonction du nombre d'images considérées ; b – Valeur estimée pour l'écart-type en fonction du nombre d'images considérées.

3 UTILISATION DES RESULTATS FOURNIS PAR LES ALGORITHMES

3.1 PROFIL DE VITESSE

La mise en œuvre des algorithmes proposés dans cette thèse pour le traitement et l'analyse des images d'épandage acquises en filé permet la détermination des composantes de la vitesse d'éjection de manière entièrement automatique. Les composantes de la vitesse étant estimées pour chaque trajectoire identifiée dans l'image, il est non seulement possible de déterminer leur valeur moyenne, mais également de tracer leur évolution en fonction de la position angulaire de la pale.

A titre d'exemple, la figure 7-18 présente les résultats obtenus, pour plus de 1000 trajectoires identifiées, dans le cas d'un épandage de chlorure de potassium avec un disque tronconique ($\Omega = 10.7^\circ$) entraîné à $800 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ et équipé de pales radiales profilées en U de 287 mm de rayon. Les résultats présentés ici correspondent à la situation dont la répartition angulaire a été caractérisée précédemment (figure 7-14 et cas 4 du tableau 7-5).

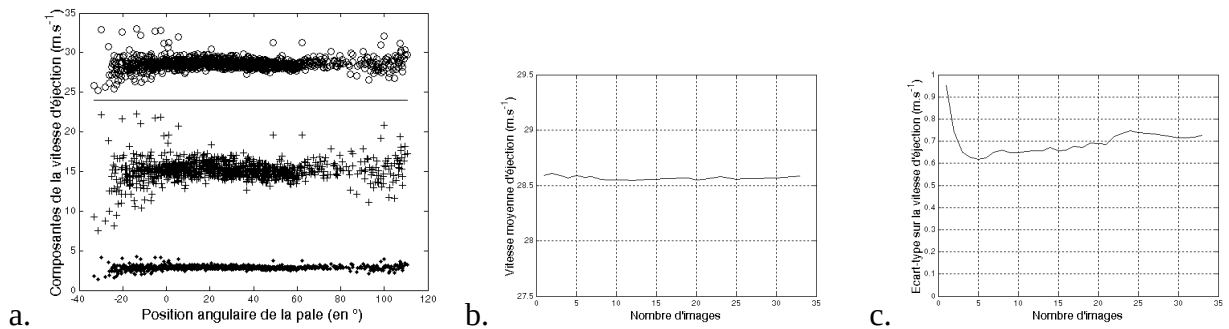


Figure 7-18 : a - Représentation des composantes de la vitesse estimées par analyse d'image en fonction de la position angulaire de la pale (• composante verticale ; + composante radiale ; - composante tangentielle ; O vitesse totale). b – Moyenne de la vitesse totale en fonction du nombre d'images considérées. c – Ecart-type sur la vitesse totale en fonction du nombre d'images considérées.

Les valeurs obtenues concernant les composantes de la vitesse ne mettent en évidence aucune évolution sensible en fonction de la position angulaire de la pale. En revanche la dispersion des valeurs mesurées apparaît plus importante en début et fin d'éjection. Cette augmentation de variabilité traduit probablement la plus grande liberté de mouvement des granules lorsqu'ils se déplacent de manière individualisée sur la pale. Néanmoins, l'effectif des trajectoires réellement atypiques (une quinzaine) est réduit par rapport à l'effectif total des trajectoires identifiées (plus d'un millier). Ces observations ne sont pas limitées à la situation d'épandage présentée ici. Elles sont confirmées par la plupart des essais qui ont été réalisés dans le cadre de cette thèse.

Concernant la composante tangentielle de la vitesse, la valeur obtenue est ici constante (cf. droite horizontale sur la figure 7-18) du fait de la relation cinématique utilisée (cf. équation (3.14) chapitre 3) et de la configuration étudiée ($\tan \alpha_v = 0$). En effet, dans le cas d'un disque équipé de pales radiales, cette composante est uniquement fonction de la vitesse de rotation et des caractéristiques dimensionnelles du disque. Elle est en particulier indépendante de l'angle d'éjection.

L'absence de variation significative de la vitesse en fonction de la position angulaire de la pale, peut permettre de simplifier l'expression des conditions générales d'éjection en ce qui concerne ce paramètre. La valeur moyenne et l'écart-type pourraient en effet être considérés comme des estimateurs suffisants pour caractériser la vitesse.

L'estimation de la vitesse moyenne d'éjection des particules évolue de moins de 0.1 m.s^{-1} en fonction du nombre d'images considérées (figure 7-18b). Les variations de l'écart-type sur les vitesses sont également maintenues en dessous de 0.15 m.s^{-1} dès le cumul de deux images. Un nombre d'images réduit (*e.g.* 2 images) permet donc de réaliser une bonne estimation de la moyenne et de l'écart-type concernant la vitesse d'éjection.

La conservation d'une vitesse d'éjection constante en moyenne en fonction de la position angulaire de la pale traduit la conservation de la valeur de l'angle horizontal d'éjection sur toute la plage angulaire d'épandage. Cette constatation diverge des résultats mentionnés par Olieslagers (1997) et Reumers et al. (2003a). L'angle d'éjection β mesuré par ces auteurs est l'angle que fait la trajectoire par rapport à la direction radiale de la pale. Sur une plage angulaire d'épandage de 90° et pour des essais réalisés avec des particules de Novolen, Olieslagers a mesuré une évolution de plus de 10° de l'angle d'éjection. Les angles ont été mesurés manuellement par rapport à un rayon tracé sur l'image, mais l'auteur ne donne pas de détail sur la manière dont la position de ce rayon a été définie pour chaque position angulaire de la pale.

En procédant à des mesures manuelles sur des tirages photographiques, Reumers et al. concluent également à une évolution de l'angle d'éjection en fonction de la position angulaire de la pale. Pour certains essais, les auteurs mettent en évidence une décroissance de l'angle d'éjection β et pour d'autres essais, ils montrent une augmentation suivie d'une diminution de cet angle. L'amplitude des variations constatées par Reumers et al. atteint 10° .

Les auteurs ne tenant pas compte des distorsions dues à l'objectif ni du manque de parallélisme entre les trajectoires étudiées et le plan image, les conclusions émises quant à l'évolution de l'angle d'éjection sont à considérer avec précaution. En effet, Reumers et al. ont réalisé des clichés de granules éjectés par un disque tronconique en orientant verticalement l'axe de l'appareil photo au dessus du flux. Or il a été montré dans le chapitre 6 que dans cette situation, des écarts existent entre l'angle réel d'éjection et l'angle apparent mesuré directement dans l'image. Ces écarts, et leur évolution en fonction de la position des trajectoires dans l'image ont également été mis en évidence de manière expérimentale dans le présent chapitre (*cf.* figure 7-2). D'autre part, concernant les mesures réalisées sur l'image, soulignons que la localisation de l'axe de rotation du disque doit être raisonnée en fonction de l'altitude du plan d'éjection des granules (*cf.* chapitre 4). Une erreur sur la position considérée pour cet axe de rotation dans l'image peut engendrer un biais important.

3.2 ESTIMATION DE LA REPARTITION AU SOL

Une estimation de la répartition au sol de l'engrais peut être obtenue à partir des données issues de l'analyse des images acquises en filé et des caractéristiques physiques des granules. L'objet de ce paragraphe est de présenter un exemple de résultat pour l'une des situations d'épandage étudiées (cas 4 du tableau 7-5 et figure 7-18).

L'algorithme de simulation du vol balistique utilisé pour calculer les portées de projection se base sur le modèle décrit dans le chapitre 3, en considérant que chaque granule est soumis à l'action du poids et de la force de traînée.

Les conditions initiales d'éjection fournies au modèle proviennent de l'exploitation des images acquises en filé. Il s'agit de la vitesse moyenne d'éjection $\overline{v_{ej}}$, de l'angle horizontal d'éjection moyen $\overline{\theta_{ej}}$, de l'angle vertical d'éjection moyen $\overline{\Omega_{ej}}$, de la position moyenne de la pale $\overline{\theta_{pale}}$ concernant la répartition angulaire du flux et de l'écart-type correspondant $\sigma_{\theta_{pale}}$.

Au niveau des caractéristiques physiques des granules, l'analyse granulométrique (cf. annexe 20) permet d'affecter à chaque diamètre considéré la part relative de la masse d'engrais correspondante. Pour chaque diamètre, le coefficient de résistance aérodynamique spécifique est déterminé en considérant un facteur de correction de 0.62 (« q-factor ») par rapport à celui de la sphère équivalente (Grift et al., 1997).

La répartition angulaire du flux massique de l'engrais est modélisée par une gaussienne centrée sur la direction principale déduite de $\overline{\theta_{ej}}$ et $\overline{\theta_{pale}}$, et dont l'écart-type est $\sigma_{\theta_{pale}}$.

Pour chaque direction angulaire, la position du point d'atterrissage correspondant à chaque diamètre de granule est calculée. La quantité relative d'engrais affectée à chaque position est déduite des informations issues de la distribution granulométrique et de la répartition angulaire du flux.

La figure 7-19 présente les résultats obtenus à partir d'une série d'images acquises en filé pour un épandage de chlorure de potassium. L'essai a été réalisé avec un disque tronconique ($\Omega = 10.7^\circ$) entraîné à 800 tr.min^{-1} et équipé de pales radiales profilées en U de 287 mm de rayon. La hauteur du point d'éjection par rapport au sol est de 0.7 m.

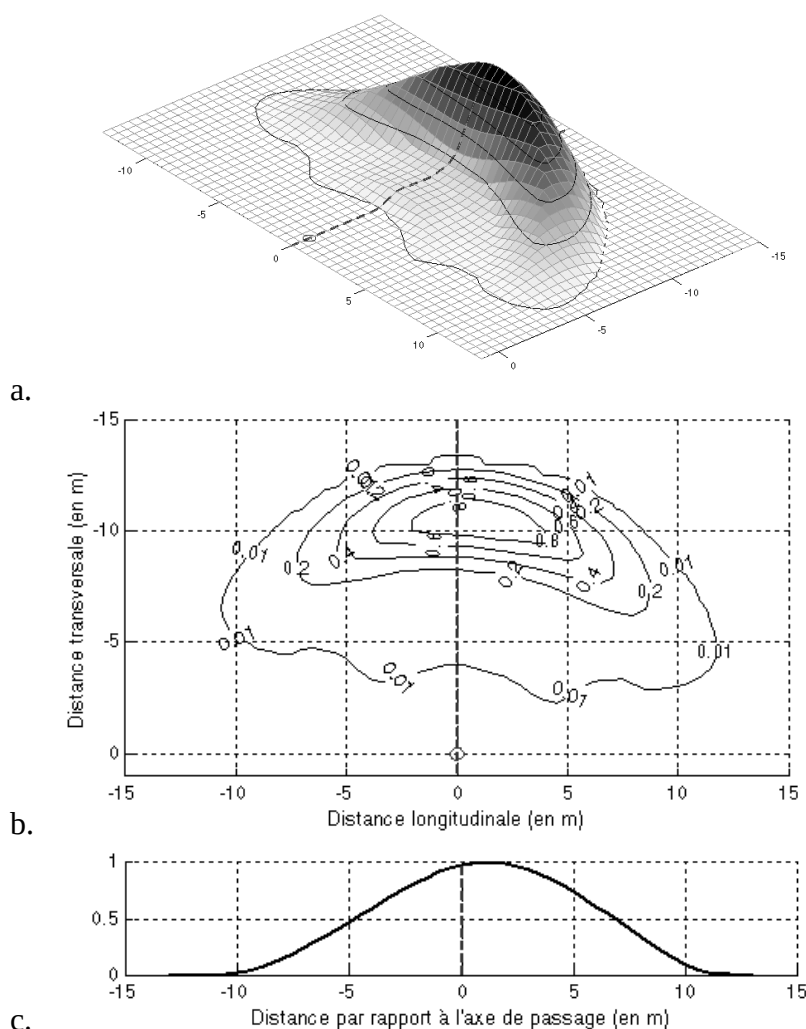


Figure 7-19 : Résultat de l'exploitation par un modèle de vol balistique des données issues de l'analyse d'images. a – Visualisation 3D de la répartition spatiale de l'engrais. b – Répartition de l'engrais par rapport au disque d'épandage (point (0,0)) et à l'axe de passage considéré (ligne pointillée verticale). Les courbes délimitent les zones recevant plus de 1%, 20%, 40%, 60% et 80% de la valeur maximale. c – Représentation de la distribution transversale (normalisée par rapport à la valeur maximale).

Les figures 7-19a et 7-19b illustrent la répartition spatiale de l'engrais en considérant que le distributeur est en position statique. La figure 7-19c illustre la répartition transversale correspondante en considérant un passage du distributeur.

Les résultats présentés à la figure 7-19 ont été obtenus via un modèle de vol balistique paramétrés par les conditions initiales d'éjection déduites de l'analyse d'images ($\overline{v_{ej}} = 28.6 \text{ m.s}^{-1}$; $\overline{\theta_{ej}} = 32.2^\circ$; $\overline{\Omega_{ej}} = 5.7^\circ$; $\overline{\theta_{pale}} = 28.1^\circ$; $\sigma_{\theta_{pale}} = 32.2^\circ$). Les images ayant été acquises dans un espace confiné (cf. quatrième chapitre), la répartition réelle de l'engrais au sol n'est pas connue. Les résultats de la modélisation présentée ici n'ont donc pas pu être confrontés à une réalité de terrain.

Notons qu'en l'absence de variation significative de la vitesse en fonction de la position angulaire de la pale, l'algorithme de prédiction de la répartition au sol n'utilise que les valeurs moyennes de la vitesse et des angles d'éjection (horizontal et vertical). Compte tenu des approximations réalisées au niveau des caractéristiques aérodynamiques des granules, il n'a pas paru utile de prendre en considération la dispersion des valeurs des conditions initiales de vol autour de leur moyenne. Dans ce schéma, la sous-estimation de l'écart-type sur l'angle vertical d'éjection n'a donc aucune incidence.

3.3 INTERACTIONS MATERIAU-MATERIEL

Bien que l'objet de la thèse ne soit pas de produire une analyse détaillée des interactions matériau-matériel, il est intéressant de présenter brièvement quelques observations concernant le comportement des granules à l'éjection. Ces résultats sont issus de l'analyse des images acquises en filé dans différentes situations d'épandage.

Les engrais qui ont été utilisés sont : de l'ammonitrate (NH_3NH_4), du chlorure de potassium (KCL) et de l'engrais ternaire (NPK 17-17-17). Les caractéristiques granulométriques de ces engrais sont fournies en annexe 20.

3.3.1 COEFFICIENT DE FROTTEMENT DYNAMIQUE EQUIVALENT

L'analyse dynamique du mouvement d'une particule animée d'un glissement pur sur la pale d'un distributeur centrifuge a été menée dans le chapitre 3. Sous l'hypothèse d'une pale suffisamment longue, cette analyse a permis d'établir de manière analytique la relation théorique entre l'angle d'éjection, les caractéristiques dimensionnelles du disque et le coefficient de frottement dynamique de la particule sur la pale (cf. équation (3.41) chapitre 3). Cette relation permet donc également de déterminer le coefficient de frottement à partir de la valeur de l'angle d'éjection et de la connaissance des conditions d'épandage (vitesse de rotation et configuration du disque). L'angle moyen mesuré en situation normale d'épandage, c'est à dire lorsqu'un flux de particules se déplace le long de la pale, permet ainsi de déduire le coefficient de frottement dynamique équivalent μ_{eq} de l'engrais. Le qualificatif « équivalent » signifie que la valeur, déterminée sur la base de la relation (3.41), est celle qui correspondrait au coefficient de frottement d'une particule seule animée d'un glissement pur et qui aurait le même angle d'éjection que les particules du flux réellement étudié.

Le tableau 7-6 fournit un extrait des résultats obtenus pour différents engrais, différentes configurations de disques, différentes vitesses de rotation et différents débits (les ouvertures de 20 et 30 mm correspondent approximativement à des débits de 0.25 et 0.4 kg.s^{-1}). Les pales utilisées lors de ces essais étaient en acier inoxydable.

N°	Engrais	r_{pale} (mm)	r_p (mm)	Ω (°)	profil	Ouv.	ω (tr.min ⁻¹)	$\overline{\Omega}_{ej}$ (°)	$\overline{\theta}_{ej}$ (°)	μ_{eq}	$\sigma_{\mu eq}$
1	NH ₃ NH ₄	325	0	0	U	20	800	0	40.6	0.16	0.04
2	NH ₃ NH ₄	325	50	0	U	20	800	0	44.0	0.18	0.08
3	KCl	325	0	0	U	20	800	0	34.0	0.40	0.08
4	KCl	325	50	0	U	20	800	0	37.3	0.44	0.09
5	KCl	325	0	0	U	20	1000	0	35.7	0.33	0.07
6	KCl	325	0	0	U	20	800	0	34.7	0.37	0.09
7	KCl	325	0	0	U	20	600	0	33.8	0.41	0.06
8	KCl	325	0	0	U	30	1000	0	35.2	0.35	0.05
9	KCl	325	0	0	U	30	800	0	34.4	0.38	0.06
10	KCl	325	0	0	U	30	600	0	34.3	0.39	0.06
11	KCl	325	50	0	U	20	1000	0	38.1	0.39	0.09
12	KCl	325	50	0	U	20	800	0	38.2	0.39	0.09
13	KCl	325	50	0	U	20	600	0	37.3	0.43	0.07
14	KCl	400	0	0	U	20	800	0	35.1	0.36	0.05
15	KCl	400	50	0	U	20	800	0	38.6	0.36	0.07
16	KCl	395	0	10.7	U	20	800	6.1	34.5	0.32	0.05
17	KCl	395	0	10.7	U	20	700	5.9	33.3	0.36	0.04
18	KCl	395	0	10.7	U	20	600	5.9	33.2	0.36	0.04
19	KCl	395	0	10.7	U	20	500	5.9	33.5	0.35	0.03
20	KCl	400	-24	0	V	30	800	0	28.3	0.58	0.044
21	KCl	394	-24	6.2	V	30	800	2.8	27.1	0.57	0.041
22	KCl	391	-24	10.7	V	30	800	5.1	28.0	0.49	0.036
23	KCl	400	0	0	U	20	800	0	34.3	0.39	0.062
24	KCl	400	0	0	U	20	700	0	34.4	0.39	0.05
25	KCl	400	0	0	U	20	600	0	34.3	0.39	0.05
26	KCl	400	0	0	U	20	500	0	34.2	0.40	0.05
27	KCl	400	-24	0	V	20	800	0	27.5	0.62	0.06
28	KCl	400	-24	0	V	20	700	0	26.9	0.64	0.05
29	KCl	400	-24	0	V	20	600	0	26.3	0.67	0.06
30	KCl	400	-24	0	V	20	500	0	26.2	0.68	0.07
31	KCl	391	-24	10.7	V	20	800	5.0	27.3	0.51	0.04
32	KCl	391	-24	10.7	V	20	700	5.1	27.5	0.50	0.03
33	KCl	391	-24	10.7	V	20	600	5.0	27.0	0.52	0.04
34	KCl	391	-24	10.7	V	20	500	4.9	26.6	0.54	0.043
35	KCl	294	0	0	U	30	800	0	34.3	0.39	0.08
36	KCl	287	0	10.7	U	30	800	5.7	32.1	0.40	0.08
37	NPK	325	0	0	U	20	1000	0	40.3	0.17	0.05
38	NPK	325	0	0	U	20	800	0	39.5	0.19	0.04
39	NPK	325	0	0	U	20	600	0	38.6	0.22	0.04
40	NPK	325	50	0	U	20	800	0	43.0	0.22	0.09
41	NPK	325	50	0	U	20	600	0	42.9	0.22	0.08
42	NPK	275	0	0	U	20	800	0	38.5	0.23	0.05

Tableau 7-6 : Récapitulatif des résultats obtenus pour différentes situations d'épandage. Notation : r_{pale} : rayon de la pale ; r_p : rayon d'inclinaison de la pale ; Ω : inclinaison verticale de la pale ; Ouv. ; ouverture de la trappe ; ω : vitesse de rotation du disque ; $\overline{\Omega}_{ej}$: angle vertical moyen d'éjection ; $\overline{\theta}_{ej}$: angle horizontal moyen d'éjection ; μ_{eq} , $\sigma_{\mu eq}$: moyenne et écart-type du coefficient de frottement équivalent.

La comparaison des essais {1, 3, 38} ou {2, 4, 40} montrent que pour des conditions d'épandage fixées le coefficient équivalent μ_{eq} varie fortement en fonction de l'engrais. D'autre part, la comparaison des essais {1, 2} ou {3, 4} ou {38, 40} ou {14, 15} montre que pour différentes inclinaisons horizontales de pale, le coefficient μ_{eq} reste sensiblement constant alors que l'angle d'éjection varie de manière significative. Cette observation laisserait envisager la possibilité de caractériser l'engrais par le coefficient μ_{eq} de manière indépendante de la situation d'épandage.

Les divers essais réalisés permettent d'évaluer partiellement cette possibilité en analysant cette éventuelle indépendance à travers les résultats disponibles.

Lorsque les pales sont suffisamment longues (essais {3, 23}) il semble que la variation de rayon r_{pale} n'affecte pas la valeur de μ_{eq} . En revanche lorsque la comparaison est menée avec des pales plus courtes {38, 42}, la valeur de μ_{eq} semble changer avec la longueur de la pale. Cette constatation pourrait s'expliquer par le non respect de l'hypothèse faite sur la longueur suffisante des pales pour l'établissement de la relation (3.41).

La comparaison de la série d'essais {27 à 30} avec la série {31 à 34} montre que l'inclinaison verticale Ω de la pale peut également affecter la valeur de μ_{eq} . Néanmoins, les essais {20, 21, 22} pourraient laisser penser que l'incidence de Ω n'est sensible que pour des valeurs assez élevées de cet angle (*i.e.* 10°). Par ailleurs, lorsque les essais sont réalisés avec une pale en U et un débit d'engrais plus important ({35, 36}) la variation de μ_{eq} en fonction de Ω n'a pas été observée.

Les série d'essais {5 à 7} ou {27 à 30} ou {37 à 39} laissent envisager une diminution du coefficient μ_{eq} lorsque la vitesse de rotation augmente. Néanmoins, cette variation est relativement faible : de l'ordre de l'écart-type de la mesure pour des variations de vitesse de rotation de 300 à 400 tr.min⁻¹. Ces observations sont cohérentes avec les expérimentations menées par Hofstee (1992). En effet, en enregistrant la force exercée sur un grain d'engrais en fonction de la vitesse de la surface sur laquelle il est en frottement, l'auteur a montré que le coefficient de frottement diminuait avec la vitesse.

En revanche, cette tendance est moins nette pour les séries d'essais {8, 9, 10} ou {11, 13} ou {16 à 19}. La série d'essais {23 à 26} ne montre quant à elle aucune évolution concernant l'influence de la vitesse de rotation du disque.

La comparaison entre les séries d'essais {5, 6, 7} et {8, 9, 10} ne permet pas de mettre en évidence l'incidence éventuelle du débit d'engrais dont les variations sont ici relativement modérées. Des essais présentant des variations de débit plus importantes seraient nécessaires pour pouvoir évaluer l'influence de ce paramètre. Néanmoins, au niveau du flux d'engrais en mouvement sur la pale, soulignons qu'une diminution de la vitesse de rotation du disque induit une augmentation de la quantité d'engrais sur la pale et s'apparente donc en partie à une augmentation de débit.

Si on considère que l'inclinaison horizontale de la pale a une incidence très limitée sur la valeur de μ_{eq} , la comparaison de la série {23 à 26} avec la série {27 à 30} montre une forte influence du profil de la pale sur la valeur du coefficient de frottement équivalent.

Pour conclure, il semble que le coefficient de frottement équivalent déduit de la relation théorique modélisant le mouvement d'une particule seule animée d'un glissement pur ne permet pas de caractériser l'engrais de manière absolue quelles que soient les conditions d'épandage. Toutefois, la mesure du paramètre μ_{eq} , pour un engrais donné et une situation d'épandage fixée semble permettre la prédiction de l'angle d'éjection du même engrais pour une autre inclinaison horizontale de la pale (les autres paramètres étant conservés constants). Cette particularité, si elle est confirmée par des essais complémentaires, pourrait être intéressante dans la mesure où chez certains constructeurs, l'inclinaison horizontale de la pale est un paramètre de réglage du dispositif. Pour un engrais donné, l'effet d'une modification de réglage pourrait ainsi faire l'objet d'une estimation précise.

La définition des lois de variation du coefficient de frottement équivalent en fonction des différents paramètres d'incidence nécessiterait des essais complémentaires à ceux présentés ici.

Enfin, soulignons que pour l'ensemble des essais, les valeurs déterminées pour μ_{eq} à partir des angles d'éjection sont comprises entre 0.16 et 0.68. Cette observation permet de vérifier a posteriori la validité de l'hypothèse utilisée dans le cadre du développement de l'algorithme de traitement des images pour borner entre 0 et 1 les valeurs du coefficient de frottement.

Les valeurs de coefficient de frottement obtenues pour le chlorure de potassium sont assez proches de celles obtenues par Kweon (2006). Cet auteur déduit le coefficient de frottement à partir du temps de déplacement d'une particule dans un tube en acier entraîné en rotation. Les valeurs obtenues par l'auteur s'échelonnent de 0.44 à 0.56 pour des vitesses de rotation du tube allant respectivement de 800 à 300 tr.min⁻¹. En revanche les valeurs obtenues dans le cas de l'ammonitrate diffèrent fortement. Kweon obtient des valeurs comprises entre 0.31 et 0.36 pour des régimes de rotation allant de 800 à 300 tr.min⁻¹ alors que les résultats obtenus ici par analyse d'images sont inférieurs à 0.2 (cf. essais {1, 2}). Il est alors important de souligner que le système utilisé par Kweon consiste à analyser le temps de déplacement de particules introduites une à une dans un tube en rotation. Compte tenu de la forme relativement sphérique d'un granule d'ammonitrate, et de son déplacement individuel dans un tube cylindrique de 10 mm de diamètre, il est probable que le roulement de ce granule soit prépondérant par rapport à son glissement pendant l'accélération centrifuge. A l'opposé, le dispositif mis en œuvre dans cette thèse conduit au déplacement d'un amas de particules sur une pale (situation réellement rencontrée lors d'un épandage). Il ne serait alors pas surprenant que le coefficient proposé par Kweon soit sensiblement différent de celui obtenu dans le cadre des travaux décrits ici. Pour le chlorure de potassium, la rotation des granules dans le tube de Kweon est beaucoup moins probable compte tenu de la forme anguleuse de ce matériau.

Dans le cas des essais mentionnés dans cette thèse et conduits avec de l'ammonitrate, l'absence de courbure des trajectoires tend à justifier l'absence d'un mouvement de rotation prononcé des granules sur la pale. Cet aspect est analysé dans le paragraphe suivant (3.3.2).

Enfin, notons que la comparaison entre les valeurs obtenues dans le cadre de cette thèse et celles obtenues par Kweon est discutable du fait de la différence de matériaux utilisés au niveau du tube (acier) ou de la pale (acier inoxydable) ainsi qu'au niveau des engrais (différence de fabricants, différence de conditions de stockage, différence d'humidité...)

3.3.2 COURBURE DES TRAJECTOIRES

L'analyse des images acquises en filé permet d'apporter des compléments d'information sur la forme des trajectoires des particules dans leur première phase de vol. En effet, chaque trajectoire identifiée au voisinage du disque a été dans un premier temps caractérisée par ces

paramètres polaires dans l'image. Compte tenu de l'algorithme décrit dans le chapitre 6, ces paramètres sont ceux de l'axe d'inertie du nuage de points qui a permis l'identification de la trajectoire considérée. Il est donc possible de replacer a posteriori par rapport à chaque axe identifié, la position du nuage de points correspondant. Rappelons que ces points correspondent aux pixels de l'image binaire obtenue par le traitement appliqué à l'image en niveaux de gris et notamment l'opération de détection de lignes.

On se propose ici d'observer la forme des nuages de points identifiés dans deux situations d'épandage différentes :

- *situation 1* : épandage de billes sphériques de 6 mm de diamètre réalisé au moyen d'un disque plat équipé d'une pale profilée en V de 400 mm de rayon et inclinée vers l'avant ($r_p = -24$ mm). Le débit d'alimentation en billes est très faible (les billes se déplacent de manière indépendantes sur la pale).
- *situation 2* : épandage d'ammonitrate réalisé au moyen d'un disque plat équipé d'une pale profilée en U de 325 mm de rayon et inclinée vers l'arrière ($r_p = 50$ mm). Le débit d'engrais est de l'ordre de $0.4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3.2.1 Cas d'une éjection de billes sphériques

La figure 7-20a illustre la forme obtenue dans le plan horizontal pour 5 trajectoires différentes lors d'un épandage réalisé avec des billes (*situation 1*). Chacune de ces trajectoires présente une courbure dans le sens opposé au sens de rotation du disque d'épandage. De manière globale cette tendance est confirmée par la forme du nuage de points obtenus en cumulant 68 trajectoires (figure 7-20b).

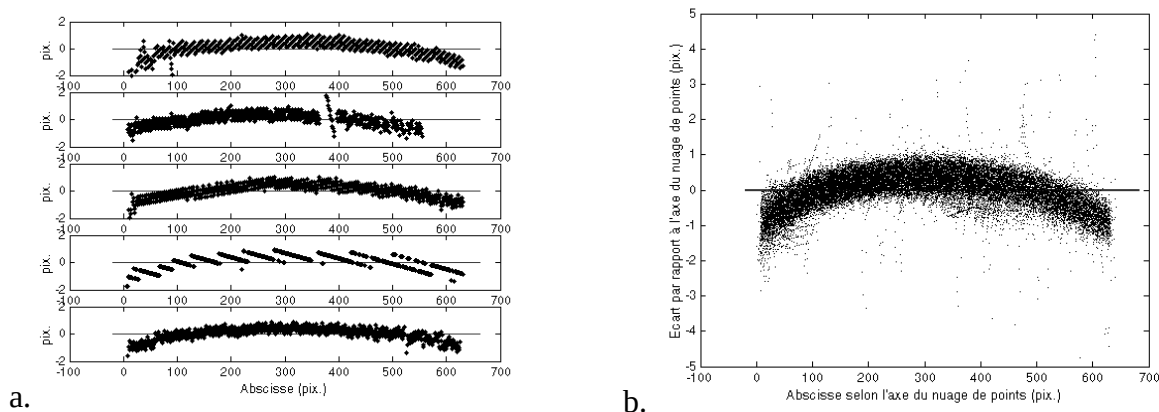


Figure 7-20 : a – Illustration de la forme de 5 trajectoires différentes obtenues pour des billes. b – Nuage de points correspondant au cumul de 68 trajectoires. Les axes horizontaux correspondent aux axes caractérisés par la transformée de Hough.

Il est possible d'interpréter la courbure observée en prenant en considération les caractéristiques de la situation d'épandage. La forme en V de la pale et la forme parfaitement sphérique des billes conduisent intuitivement à imaginer un roulement de celles-ci au fond de la gorge de la pale. Si la vitesse de rotation acquise est suffisamment importante, alors elle pourrait induire par effet Magnus une déviation des billes, pendant la phase de vol, par rapport à la direction empruntée initialement au moment de l'éjection.

L'analyse des conditions de prise de vue permet de vérifier que le sens de la déviation observée correspond bien à la manifestation de l'effet Magnus. La caméra servant à la prise de vue étant placée verticalement au dessus du disque, celui-ci apparaît dans l'image comme animé d'une rotation dans le sens anti-horaire (figure 7-21a). La bille est donc quant à elle animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe vertical dans le sens horaire. En conséquence, l'effet Magnus engendre une déviation de la bille vers la droite par rapport à

une trajectoire rectiligne qui correspondrait à la direction du vecteur vitesse au moment de l'éjection. Comme l'illustre la figure 7-21b ce sens de déviation est celui qui est observé dans les images.

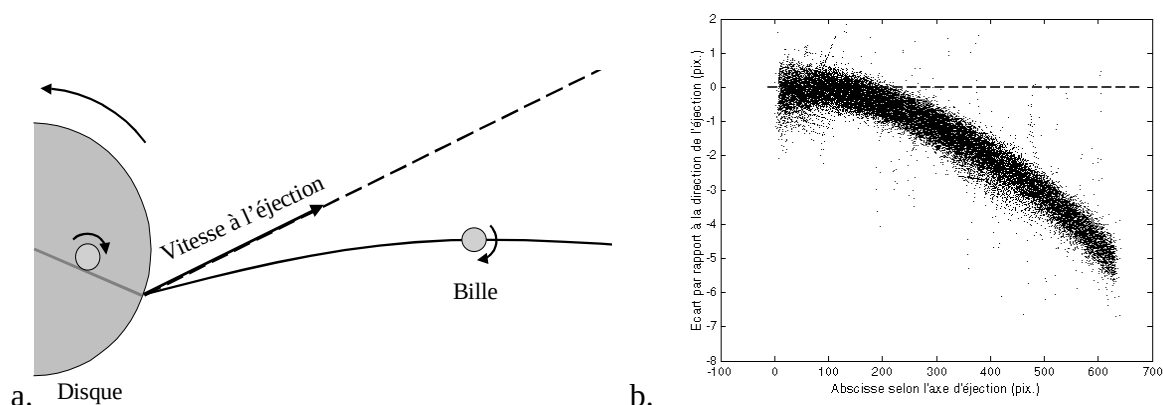


Figure 7-21 : a - Représentation du sens de rotation des éléments en mouvement dans le champ de vision de la caméra. b – Nuage de points, obtenu en cumulant 68 trajectoires, représenté par rapport à la direction de l'axe d'éjection (déduite de la courbure du nuage).

3.3.2.2 Cas d'une éjection d'ammonitrate

La figure 7-22 montre que dans le cas d'un épandage réalisé avec de l'ammonitrate et un débit de l'ordre de 0.4 kg.s^{-1} (*situation 2*), les trajectoires des granules d'engrais ne présentent pas de courbure particulière au voisinage du disque.

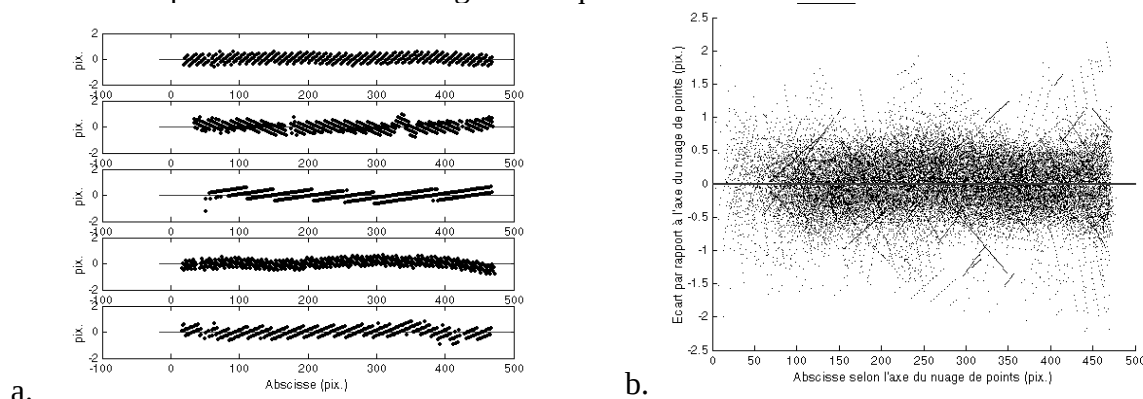


Figure 7-22 : a – Illustration de la forme de 5 trajectoires différentes obtenues pour de l'ammonitrate. b – Nuage de points correspondant au cumul de 70 trajectoires. Les axes horizontaux correspondent aux axes caractérisés par la transformée de Hough.

De manière plus générale, les essais menés avec l'ammonitrate, l'engrais ternaire NPK 17-17-17 et le chlorure de potassium, n'ont pas permis de mettre en évidence une courbure des trajectoires des granules au voisinage du disque. Cette observation s'oppose à celle réalisée dans le cas de l'utilisation de billes. Il est permis de penser que l'absence de courbure traduit l'absence de mouvement de rotation des granules ou au moins l'absence d'une vitesse de rotation suffisante pour engendrer une manifestation sensible de l'effet Magnus lors de la phase de vol des granules. La faible rotation des granules lors de leur accélération sur la pale s'explique en partie par leur forme qui rend le roulement plus difficile que dans le cas des billes sphériques. Cette remarque est particulièrement valable dans le cas du chlorure de potassium de forme anguleuse mais elle est plus discutable dans le cas de l'engrais ternaire et de l'ammonitrate dont les granules présentent une certaine sphéricité. Pour ces derniers, la

raison principale de l'absence de rotation prononcée est probablement liée au mouvement d'ensemble de l'amas de particules sur la pale. En effet, le flux vertical d'alimentation du disque en engrais se trouve tronçonné à chaque passage de pale. De ce fait, la très grande majorité des particules se déplace sur la pale tout en restant en contact les unes avec les autres, ce qui limite leurs rotations et privilégie leurs glissements sur la pale dans un mouvement d'ensemble de l'amas.

4 SYNTHÈSE DES RESULTATS ET DISCUSSION

Les différents tests pratiqués en statique sur maquette en simulant une trajectoire en trois dimensions ont permis de valider la méthode géométrique mise en œuvre pour déterminer sans biais la valeur de l'angle horizontal d'éjection d'une trajectoire lorsque celle-ci n'est pas parallèle au plan image. Les écarts maximaux constatés sur l'estimation de cet angle sont de l'ordre de 0.2° par rapport à la valeur prise comme référence.

Par ailleurs, il a été vérifié expérimentalement dans le cas d'un disque plat que la vitesse d'éjection peut être déduite de l'angle horizontal d'éjection. En particulier, sur soixante trajectoires, les valeurs obtenues pour la moyenne et l'écart-type de la vitesse d'éjection déduites de l'analyse des images acquises en filé se sont avérées identiques à celles obtenues par une approche stroboscopique. Pour la situation d'épandage testée, l'écart-type sur les différences constatées entre les deux méthodes au niveau de l'estimation de la vitesse pour chaque trajectoire considérée individuellement a été de 0.57 m.s^{-1} soit 1.3% de la vitesse moyenne mesurée. Dans la situation étudiée, cet écart se traduirait par une variation théorique de portée de 0.15 m.

En l'absence de dispositif de référence pour la mesure tridimensionnelle de vitesse de granules, l'estimation du vecteur vitesse en trois dimensions a été validée au niveau de la direction de la composante verticale. Il a ainsi été montré que l'angle vertical moyen d'éjection était correctement estimé par analyse d'images. Concernant ce paramètre, l'écart maximal constaté par rapport à la valeur prise comme référence est de 0.26° pour l'ensemble des cas étudiés. Pour ces situations, les variations théoriques de portée, liées à l'erreur commise sur l'angle vertical, seraient de 0.15 m.

Les résultats obtenus par la méthode qui consiste à déterminer en trois dimensions le vecteur vitesse d'éjection à partir de l'angle horizontal d'éjection sont donc cohérents avec les observations concrètes réalisées au voisinage du disque.

En toute rigueur, il serait intéressant de confronter les résultats obtenus par analyse des images acquises en filé aux résultats d'une méthode susceptible de fournir des valeurs de référence en terme de mesure de vitesses en trois dimensions. Cette vérification impose la construction d'un dispositif spécifique qui pourrait combiner une approche stéréoscopique et un éclairage stroboscopique. Il est également permis d'envisager une validation plus globale de la méthode proposée en terme de prédiction de la distribution de l'engrais au sol. Le développement actuel d'un nouveau dispositif de caractérisation en deux dimensions de la répartition spatiale (Piron et Miclet, 2005) facilitera la confrontation des résultats.

En ce qui concerne l'estimation de la répartition angulaire du flux massique de l'engrais, les écarts constatés par rapport aux valeurs prises comme référence vont de 0.2° à 5.5° sur l'estimation de la direction moyenne de la nappe et s'échelonnent de 2.2° à 9.1° au niveau de l'écart-type caractérisant la dispersion de la nappe. Au niveau de la répartition angulaire, il semble donc utile de procéder à des séries d'essais complémentaires pour confronter les résultats obtenus par analyse d'images aux résultats obtenus au moyen de la couronne compartimentée et au moyen d'autres méthodes. En particulier il serait intéressant de dresser une cartographie de la répartition horizontale et verticale du flux d'engrais sur la base d'un

relevé d'impacts couvrant toute la plage angulaire de distribution. Cette méthode aurait notamment l'avantage de ne pas perturber l'éjection et de permettre la réalisation d'essais pour différentes longueurs de pales. Une confrontation aux valeurs déduites d'un système piézoélectrique serait également intéressante de manière à situer la précision de la méthode proposée par rapport aux autres méthodes envisageables pour la mesure de ce paramètre.

Concernant l'estimation de la répartition angulaire du flux, l'exploitation des données issues de l'analyse des images mérite d'être affinée au niveau du traitement de l'histogramme de répartition déduit de l'identification des trajectoires dans l'image. La méthode basée sur l'utilisation de cet histogramme a l'avantage de bénéficier de la robustesse des techniques de détection et d'identification qui ont été développées dans cette thèse. Elle se distingue ainsi des méthodes cherchant à exploiter l'hypothèse d'une proportionnalité entre le flux massique et le niveau de gris dans l'image qui ont été suggérées par Cointault (2001). La méthode envisagée ici est beaucoup moins sensible au biais engendré par l'arrière plan, par les variations d'éclairage et par les suspensions de poussières d'engrais au voisinage du disque.

L'avantage d'une comparaison globale des résultats sur la base d'une confrontation entre prédiction de la répartition au sol et répartition réelle est de permettre une évaluation de la méthode directement sur l'objectif final recherché. Sur le plan de la prévision de la répartition au sol de l'engrais, l'analyse des images fournit à un modèle de vol balistique les conditions initiales du mouvement, mais de nombreuses incertitudes demeurent quant à la validité des paramètres aérodynamiques considérés pour les particules. La confrontation aux répartitions réelles permettra là encore de mettre en évidence les éventuelles lacunes de la méthode.

La vitesse et l'angle vertical d'éjection étant deux paramètres dont l'estimation semble fiable compte tenu des tests déjà réalisés, il serait utile de valider dans un premier temps la prédiction du rayon moyen de projection. La confrontation de la portée moyenne modélisée à la valeur réellement mesurée permettrait de tester la validité des paramètres aérodynamiques utilisés dans le modèle de vol balistique. L'analyse de la distribution autour de la portée moyenne apportera également une information utile quant à la nécessité ou non d'estimer avec précision l'écart-type sur l'angle vertical d'éjection. Dans un second temps l'analyse devra se porter sur la précision de la localisation angulaire de la nappe d'épandage.

Dans un objectif d'utilisation concrète de l'information au niveau d'un système de contrôle embarqué sur un distributeur, il semble plus opportun de s'intéresser à quelques paramètres caractéristiques plutôt qu'à la détermination de la forme exacte de la distribution. Ces paramètres sont : la portée moyenne de projection, l'écart-type sur la portée, la direction de l'axe moyen de la répartition au sol ainsi que la dispersion angulaire autour de cet axe.

Il est également nécessaire de prendre en compte l'importance relative de ces paramètres vis à vis de leur incidence sur la répartition transversale. Cette analyse devrait de même permettre de définir la précision utile à rechercher sur l'estimation de ces caractéristiques.

A ce jour, le dispositif de prise de vue n'a été mis en œuvre que dans des conditions contrôlées. Bien que des tests aient été réalisés sur des images de synthèse pour s'assurer de la robustesse des traitements proposés, il est indispensable d'évaluer le système dans des conditions réelles (au champ) d'éclairage et d'arrière plan.

Sur le plan de l'acquisition il paraît intéressant d'éclairer spécifiquement le volume traversé par le flux d'engrais au voisinage du disque. De manière à concentrer l'éclairage dans cette zone, il semble souhaitable de se procurer ou de réaliser des projecteurs plus adaptés (réflecteur, lentille) que ceux utilisés actuellement.

La méthode de traitement d'images décrite dans cette thèse a permis de réaliser une analyse assez fine des conditions d'éjection notamment sur le plan de la caractérisation des vitesses et

des angles d'éjection. Cette analyse a permis de montrer que ces paramètres restaient sensiblement constants sur tout le secteur angulaire d'éjection. Sur la base de ce constat, il est permis d'envisager maintenant une simplification de la méthode d'analyse des données dans l'objectif d'estimer uniquement les valeurs moyennes des angles horizontaux et verticaux sans obligatoirement chercher à caractériser chaque trajectoire individuellement.

En supposant que les angles horizontaux et verticaux sont constants en moyenne, il devient par exemple possible d'estimer la valeur de ces paramètres sans recourir à l'utilisation du modèle cinématique de l'éjection. En effet, ces valeurs peuvent être déduites directement des relations géométriques caractérisant la prise de vue et de l'analyse des angles apparents mesurés dans l'image en fonction de la distance des trajectoires par rapport au point principal. L'estimation des paramètres moyens directement à partir de l'espace de Hough, sans nécessiter l'identification individuelle des trajectoires dans l'image, est également une piste séduisante.

La comparaison des résultats obtenus et les différences constatées avec d'autres travaux, menés en utilisant des techniques différentes, soulignent l'intérêt de la présente approche qui prend en compte les conditions réelles d'épandage (flux dense de granules) et cherche à limiter les biais dus au système d'acquisition.

Conclusion et perspectives

Aujourd'hui, l'un des défis de l'agriculture est de concilier une activité rémunératrice de production avec la conservation du potentiel des ressources exploitées.

Sur le plan de la fertilisation minérale, les distributeurs d'engrais centrifuges doivent s'adapter à ce contexte et aux besoins d'une agriculture de précision capable de répondre aux exigences environnementales, économiques et techniques dans le cadre d'un développement durable de la production agricole. Pour permettre cette évolution et valoriser les efforts déjà entrepris en terme de définition des besoins des cultures et de préconisation des apports, il est indispensable d'améliorer la qualité des épandages. Cette amélioration nécessite une parfaite compréhension du processus d'épandage et la mise à disposition du secteur agricole, d'outils de diagnostic pratiques et performants. Par ailleurs, pour répondre de manière satisfaisante aux objectifs de la gestion spatialisée des intrants, il est nécessaire de doter les appareils de distribution d'engrais d'un système de contrôle en continu de la nappe d'épandage. Dans ce contexte, des solutions techniques doivent être envisagées pour mesurer, au niveau de l'appareil de distribution, les paramètres nécessaires à la prédiction de la répartition de l'engrais.

Une méthode a ainsi été conçue et mise en oeuvre pour mesurer la vitesse d'éjection de l'engrais, en norme et en direction, en analysant des images acquises en filé au voisinage d'un disque de distribution centrifuge. Ces images ont la particularité de faire apparaître les trajectoires suivies par les granules d'engrais. Associée à une caractérisation de la répartition angulaire du flux, également obtenue par analyse d'images, l'estimation de la vitesse fournit à un modèle de vol balistique les conditions initiales du mouvement des granules pour prédire la répartition de l'engrais au sol.

En procédant à l'analyse mécanique du système d'épandage centrifuge, il a été démontré que chacune des trois composantes de la vitesse d'éjection (radiale, tangentielle et verticale) s'exprime au moyen de relations cinématiques fonctions de l'angle horizontal d'éjection. L'étude dynamique du mouvement a d'autre part défini les limites du domaine de valeurs admissibles pour cet angle. Le modèle développé généralise les travaux existants dans la littérature et donne la solution analytique à une situation qui n'était jusqu'alors abordée que numériquement (cas des disques tronconiques équipés de pales inclinées).

Sur la base de cette étude, il devient possible d'estimer les vitesses d'éjection en mesurant les angles horizontaux d'éjection dont l'appartenance à un domaine borné facilite la détermination par traitement d'images. Le modèle proposé peut également trouver son utilité dans l'analyse des conséquences sur l'éjection d'une modification de la configuration du disque.

De manière à sélectionner dans les images acquises en filé l'information utile à la détermination de l'angle horizontal d'éjection, un filtre de détection de lignes a été développé. Ce filtre est conçu en appliquant la méthodologie de Canny à un modèle de contour dont le profil dérive d'une approche expérimentale qui intègre les caractéristiques des granules d'engrais et du dispositif d'acquisition des images. Le détecteur de lignes ainsi construit est utilisé pour transformer l'image originale de la scène d'épandage en une image binaire mettant en exergue les axes des trajectoires suivies par les granules d'engrais. Ce traitement

offre l'avantage d'être peu sensible aux hétérogénéités d'illumination de la scène et de réflexion de l'arrière plan.

L'image binaire, obtenue par application du filtre de détection de lignes, présente d'une part, des alignements de points qui correspondent aux axes des trajectoires et d'autre part, un bruit lié aux hautes fréquences produites par l'arrière plan de la scène. Cette image est analysée par une technique qui repose sur le calcul de la transformée de Hough dont la mise en œuvre est spécifiquement adaptée à la situation étudiée. Cette adaptation se base sur une étude géométrique du calcul de la transformée en intégrant les connaissances a priori issues de l'analyse mécanique du processus d'épandage. Elle conduit à définir l'origine du repère de calcul, la localisation de la zone d'investigation et à optimiser la taille des accumulateurs de l'espace de Hough. Cette phase d'identification des trajectoires est particulièrement robuste vis à vis du bruit potentiellement présent dans les images.

La méthode proposée a l'avantage de caractériser la position des trajectoires directement par rapport à la pale du disque d'épandage, c'est à dire par rapport à une référence qui est en mouvement pendant la phase d'intégration du CCD.

Dans le cas d'un disque de forme tronconique, l'angle d'éjection apparent mesuré dans l'image est corrigé du biais engendré par l'absence de parallélisme entre les trajectoires et le plan image. La correction appliquée a été déduite d'une modélisation géométrique basée sur l'analyse de la prise de vue et des connaissances relatives à l'analyse mécanique du système d'épandage.

Les angles horizontaux d'éjection déduits de l'identification et de la caractérisation des trajectoires sont alors convertis en valeurs de vitesses d'éjection. Les informations concernant la répartition dans les images des trajectoires identifiées sont également utilisées pour estimer la distribution angulaire du flux.

Les tests pratiqués sur des images de synthèse ont permis de vérifier la performance et la robustesse des méthodes proposées pour le traitement des images. D'autre part, des mesures concrètes ont été réalisées sur des simulations et en situation d'épandage afin de valider globalement l'ensemble de la procédure : acquisition des images en filé et traitement. Les résultats obtenus sur l'estimation de l'angle horizontal, de la vitesse, de l'angle vertical et de la répartition angulaire ont été confrontés aux valeurs expérimentales déduites d'autres méthodes de mesure. Ces comparaisons montrent que la précision des résultats déduits de l'analyse d'images acquises en filé permet de caractériser de manière satisfaisante les conditions d'éjection de l'engrais. Concernant la répartition angulaire du flux, il semble envisageable d'améliorer encore la précision de son estimation.

La validation globale et définitive de la méthode proposée pour prédire la répartition de l'engrais au sol et la largeur de travail nécessiterait maintenant une confrontation avec une répartition réelle. L'analyse des résultats permettrait également d'évaluer la qualité du modèle de vol balistique retenu et la validité des paramètres aérodynamiques utilisés.

L'analyse des images acquises en filé a apporté des informations sur le comportement de l'engrais à l'éjection. Pour les situations d'épandage étudiées, il apparaît qu'il n'existe pas d'évolution sensible des angles d'éjection du début à la fin du secteur d'épandage. D'autre part, les trajectoires des granules d'engrais ne présentent pas de courbure prononcée dans les premiers instants de la phase de vol. Une réflexion a également été menée sur la possibilité de caractériser un engrais par son coefficient de frottement équivalent. L'indépendance absolue de ce coefficient par rapport aux conditions d'épandage ne semble pas acquise. Néanmoins, dans plusieurs situations, il semble envisageable de considérer ce coefficient comme relativement constant vis à vis de certains paramètres de réglage des organes de distribution.

Le dispositif d'acquisition et la méthode de traitement automatisé des images qui ont été développés, constituent un outil de caractérisation des conditions d'éjection des granulés d'engrais pour différentes configurations de disques (disques plats ou tronconiques équipés de pales radiales ou inclinées).

Sous réserve de validations complémentaires en terme de prédiction de la répartition de l'engrais au sol et moyennant certaines adaptations, l'utilisation concrète de ce dispositif est envisageable à plusieurs niveaux.

Dans une optique de mise en œuvre de la méthode proposée en tant que système de mesure sur un distributeur du commerce, de nombreux aspects restent à étudier. Les possibilités d'adaptation de la méthode à des formes de pales plus complexes et à des disques équipés de plusieurs pales différentes méritent une attention particulière. De même, l'application de la méthode à des engrais de faible granulométrie (*e.g.* urée) sont autant de situations qu'il conviendra d'analyser avec précaution.

La compatibilité du dispositif avec l'ambiance poussiéreuse et caustique des opérations d'épandage, l'intégration du système à la construction du distributeur sont aussi des contraintes à prendre en considération.

Avant d'envisager le développement du dispositif en tant que système embarqué sur un distributeur centrifuge, il est également nécessaire d'estimer le coût d'un tel système. En préambule à cette estimation, la résolution nécessaire au système d'acquisition aura tout intérêt à être étudiée en fonction de la précision fixée pour l'estimation des paramètres recherchés.

De manière générale, la précision envisageable au niveau de la prédiction de la répartition au sol ou de la largeur effective de travail ne dépend pas uniquement de la qualité de la mesure de la vitesse et de l'orientation des trajectoires par rapport au disque au moment de l'éjection. En effet, elle est également tributaire de la modélisation du vol balistique. Outre les incertitudes concernant les caractéristiques aérodynamiques de l'engrais, la qualité de cette modélisation est particulièrement sensible aux perturbations pendant la phase de vol (vent) et aux mouvements verticaux du distributeur.

La réalisation d'un système embarqué de contrôle de la répartition de l'engrais en vue de réaliser une boucle de rétroaction sur les actionneurs de réglage de la distribution constitue la valorisation la plus ambitieuse de la technique d'analyse des images acquises en filé. Mais il ne s'agit pas de la seule possibilité d'utilisation de ce dispositif de mesure. En effet, le système pourrait conduire au développement d'outils de diagnostic et d'aide au réglage évitant le recours systématique aux tests traditionnels de plus en plus délicats à réaliser en hall d'essais et assez peu pratiqués sur le terrain du fait de leur caractère contraignant. Le développement de ce type d'outil s'inscrit également dans une logique de meilleure compréhension du processus d'épandage en permettant une caractérisation rapide de l'incidence d'une modification de réglage.

Dans le cadre du développement d'un système de mesure destiné à fonctionner à poste fixe, il est bien entendu plus facile de maîtriser la prise de vue en terme d'arrière plan et d'éclairage du flux.

Utilisé en accompagnement des mesures expérimentales de répartition transversale, ce genre de dispositif est à envisager pour réduire le nombre d'essais nécessaires à la définition des réglages d'un distributeur. L'utilisation combinée des modèles théoriques et des mesures réalisées par analyse d'images au voisinage du disque d'épandage devrait permettre de définir assez précisément les réglages à effectuer avant une validation définitive par un test normalisé.

Dans le cadre du diagnostic et de l'aide au réglage des distributeurs déjà en service, un banc mobile peut également être imaginé pour offrir aux exploitants la possibilité de contrôler facilement et rapidement la validité des réglages qu'ils réalisent usuellement en bout de champ.

En laboratoire, la mesure de l'angle d'éjection, convertie ou non en une valeur de coefficient de frottement, est une grandeur utilisable pour réaliser une classification relative des engrais. En effet, pour une configuration de disque fixée, les valeurs mesurées caractérisent de manière globale le comportement de l'engrais sur la pale. Il est donc permis de penser que deux engrais présentant le même coefficient équivalent pour une configuration donnée auront un comportement également similaire pour une autre configuration. La production d'un tableau d'équivalence des engrais commercialisés en terme de comportement à l'éjection s'avérerait particulièrement utile. En effet, l'utilisation d'une grande diversité de fertilisants minéraux présents sur le marché se heurte au nombre limité d'engrais répertoriés dans les banques de données des constructeurs de matériel. Dans le cas d'un engrais inconnu, le réglage est usuellement réalisé par référence à l'engrais dont les propriétés physiques sont considérées comme similaires. Mais en pratique, ce choix est particulièrement délicat et conduit bien souvent à des épandages de mauvaise qualité.

Notons que pour réaliser un tableau d'équivalence en terme de réglage, il sera nécessaire de prendre en considération le comportement de l'engrais à l'éjection mais également le comportement pendant la phase de vol balistique.

La technique proposée pour l'analyse des images acquises en filé ouvre donc des perspectives en terme de conception d'un capteur pour le contrôle en continu de la distribution mais également en terme d'outil de diagnostic à poste fixe et de système de classification des engrais.

Sur le plan de la technique d'imagerie, outre la poursuite des travaux pour améliorer l'estimation de la répartition angulaire du flux massique, plusieurs axes d'étude se dessinent pour augmenter encore la robustesse et l'efficacité de la méthode. En ce qui concerne la détection de lignes, il serait particulièrement intéressant de rechercher l'expression du filtre optimal directement dans le domaine discret et ainsi éviter l'échantillonnage d'une fonction préalablement optimisée dans le domaine continu. Cette approche pourrait permettre d'améliorer les performances de la détection dans le cas d'images particulièrement floues et bruitées. D'autre part, les méthodes alternatives à l'approche dérivative pourront être examinées en fonction de leur capacité à extraire l'information recherchée sur des images fortement dégradées.

Au niveau de l'analyse de l'image, l'identification individuelle d'un nombre important de trajectoires a permis une analyse relativement fine des angles d'éjection de l'engrais. Dans l'hypothèse où ces angles sont relativement constants sur tout le secteur d'épandage, il est opportun de rechercher une caractérisation globale des conditions d'éjection directement à partir de l'information contenu dans l'espace de Hough, sans chercher à localiser individuellement les pics.

Dans l'objectif de diminuer le coût du dispositif d'acquisition nécessaire à la construction d'un système de caractérisation de la nappe d'épandage, il est pertinent d'envisager une réduction de la résolution de l'image en analysant son impact sur la qualité des résultats obtenus.

Le test des méthodes de traitement sur des images acquises en conditions extérieures sera déterminant pour la définition des axes de recherche à privilégier et l'évaluation des potentialités d'application du système d'imagerie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdel-Aziz, Y I, Karara, H M, 1971. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana, Illinois, 1-18.
- Abdou I E, Pratt W K, 1979. Quantitative design and evaluation of enhancement/Thresholding edge detectors. Proceedings of the IEEE, 67(5), 753-763.
- Adrian R J, 1997. Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry. Measurement Science and Technology, 8, 1393-1398.
- Ahmad I S, Reid J F, Noguchi N, Hansen A C, 1999. Nitrogen sensing for precision agriculture using chlorophyll maps. ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting. , 18-21 July 1999, Toronto, Canada, Paper n° 993035.
- Alaways L W, 1998. Aerodynamics of the curve-ball : An investigation of the effects of angular velocity on baseball trajectories. PhD Thesis, University of California, California.
- Alchanatis V, Schmilovitch Z, 2005. In-field assessment of single leaf nitrogen status by spectral reflectance measurements. Precision Agriculture, 6, 25-39.
- Anonyme, 2002. Determination of the drag coefficient of sphere - Report from a laboratory experiment conducted on March 13, 2002 as part of ENGR 351 – Experimental Methods. College of Engineering and Science, Louisiana Tech University, 15 pages.
- Anonyme, 2004a. Practical test : Amazone, Bogballe, Rauch, Sulky and Vicon spreaders - Dishing the « fert ». Profi International, 4, 18-22.
- Anonyme, 2004b. Remote sensing for nitrogen applications - Precision farming into practice. Profi International, 5, 44-47.
- Anonyme, 2005a. Guide des prix de revient et des références techniques - CUMA Est, page 19.
- Anonyme, 2005b. Gagner en efficacité avec l'azote minéral pour protéger l'environnement. Dossier technique de l'UNIFA. 16 pages.
- Anonyme, 2005c. British Survey of Fertiliser Practice, Fertiliser use on farm crops for crop year 2004. Department for Environment, Food and Rural Affairs, Scottish Executive – Environment and Rural Affairs Department, 114 pages.
- Anonyme, 2006. Driving impression : Amazone ZA-M ultra 3600 profiS fertiliser spreader – Welcome to spin city. Profi International, 3, 26-27.
- Aphale A, Bolander N, Park J, Shaw L, Svec J, Wassgren C, 2003. Granular fertiliser particle dynamics on and off spinner spreader. Biosystems Engineering, 85(3), 319-329.
- Asch G, Charnay G, Schon J-P. Chapitre 12 : Capteurs de vitesse, débit, niveau de fluides – Les capteurs en instrumentation industrielle. Dunod, Paris, 1991. 547-586.
- Ashby F M, 2000. Choix des matériaux en conception mécanique. Edition Dunod, Paris, 70-71.
- Åstrand B, Baerveldt A-J, 2002. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. Autonomous Robots, 13, 21-35.
- Baker S, Nayar S, 1999. Global measures of coherence for edge detector evaluation. Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, Colorado, USA, 373-379.
- Ballard D H, 1981. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes, Pattern Recognition, 13, 111-122.

- Balsari P, Tamagone M, Marucco P, 2006. Field tests on GPS lightbar guidance systems for agricultural machines. Proceedings of the World Congress : Agricultural Engineering for a Better World. Archive n° 440119580335, Bonn, 3-7 September 2006.
- Barricau P, Lempereur C, Mathé J M., Mignosi A, Buchet H, 2002. Doppler Global Velocimetry : Development and wind tunnel test. Proceedings of 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics 8-11 July 2002, Lisbon, Portugal.
- Basclé B, Blake A, Zisserman A, 1996. Motion deblurring and super-resolution from an image sequence. Proceedings of the Fourth European Conference on Computer Vision, 15-18 April 1996, Cambridge, England, 573-581.
- Ben-Ezra M, Nayar S K, 2004. Motion-based motion deblurring. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 26(6), 689-698.
- Bouguet, J-Y. Camera calibration toolbox for Matlab. http://newbologna.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html. Consulté le 5 mars 2003.
- Boulanger F, Soussaline F, Preteux F. Le gradient H-conditionnel : extracteur de contours numériques. Actes du 11^{ème} colloque GRETSI, 1-5 juin 1987, Nice, 563-566.
- Bourennane E, Paindavoine M, Truchetet F, 1993. Amélioration du filtre de Canny-Deriche pour la détection des contours sous forme de rampe. Journal de Traitement du Signal et des Images, 10(4), 297-310.
- Boyer K L, Sarkar S, 1994. On the localization performance measure and optimal edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 16(1), 106-108.
- Bradley M S A, Farnish R J, 2005. Segregation of blended fertiliser during spreading : the effect of differences in ballistic properties. Proceedings of the International Fertiliser Society at a Meeting in London, 14 April 2005, 16 pages.
- Breuel T M, 1996. Finding lines under bounded error. Pattern Recognition, 29(1), 167-178.
- Briggs L J, 1959. Effect of spin and speed on the lateral deflection (curve) of a baseball and the Magnus effect for smooth spheres. American Journal of Physics, 27, 589-596.
- Canny J F, 1983. Finding edges and lines in images. Technical Report No. 720, Massachusetts Institute of Technology.
- Canny J F, 1986. A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6), 679-698.
- Carré M J, Asai T, Akatsuka T, Haake S J, 2002. The curve kick of a football II : flight through the air. Sport Engineering, 5, 193-200.
- Chang C S, Martin C R, Lai F S, 1986. Grain velocity measurement with optical sensors. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 29(5), 1451-1455.
- Clarke T A, Fryer J G, 1998. The Development of Camera Calibration Methods and Models - Photogrammetric Record, 16(91), 51-66.
- Cocquerez J-P, Philipp S. Analyse d'images : filtrage et segmentation. Edition Masson, Paris, 1995.
- Cohen M, Toussaint G, 1977. On the detection of structures in noisy pictures. Pattern Recognition, 9, 95-98.
- 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.
- Cointault F, Sarrazin P, Paindavoine M, 2002. High resolution low cost imaging system for particle projection analysis: Application to fertilizer centrifugal spreading. Measurement Science and Technology, 13, 1087-1093.
- Colin A, 1997. Etude du procédé d'épandage centrifuge d'engrais minéraux. Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, France.
- Csizmazia Z, Polyak N I, 2001. Movement of particles in the air. Agrartudományi közlemények, Acta Agraria Debreceniensis, 5 pages.
- Cunningham F M, 1963. Performance characteristics of bulk spreaders for granular fertilizer. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 6(2), 108-114.
- Cunningham F M, Chao E Y S, 1967. Design relationships for centrifugal fertilizer distributors. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 10(1), 91-95.

- Délery J, 2002. Méthodes de mesure en aérodynamique. <http://www.onera.fr/cours/mesures-aerodynamique/14-velocimetrie-laser-franges.html>. Document mis à jour le 15 juillet 2002, consulté le 29 novembre 2005.
- Demigny D, 2002. On optimal linear filtering for edge detection. *IEEE Transactions on image processing*, 11(7), 728-737.
- Demigny D, Kamlé T, 1997. A discrete expression of Canny's criteria for step edge detection performances evaluation. *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19, 1199-1211.
- Demigny D, Lorca F G, Kamlé T, Kessal L, 1995. Critères de Canny discrets pour la comparaison de filtres détecteurs de contours. Actes du 15^{ième} colloque GRETSI, 18-21 septembre 1995, Juan-les-pins.
- Deriche R, 1987. Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector. *International Journal of Computer Vision*, 1, 167-187.
- Dintwa E, Liedekerke P V, Olieslagers R, Tijssens E, Ramon H, 2004. Model for simulation of particle flow on a centrifugal fertiliser spreader, 87(4), 407-415.
- Dubois F, Vedernikov A, Callens N, 2004. Micro-vélocimétrie 3D par holographie digitale. Actes du 9^{ième} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser. 14-17 Septembre 2004.
- 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.
- Duvieubourg L, Stoclin V, Postaire J G, 2003. Critères discrets de comparaison de filtres de détection de contours. Actes du 19^{ième} colloque GRETSI, 8-11 septembre 2003, Paris.
- Dyakowski T, Williams R A, 1993. Measurement of particle velocity distribution in a vertical channel. *Powder Technology*, 77, 135-142.
- Fekete A, Földesi I, Kovacs L, 2006. GPS-based automatic and manual vehicle steering. *Proceedings of the World Congress : Agricultural Engineering for a Better World*. Archive n° 440119580333, Bonn, 3-7 september 2006.
- Fiedler O, Werther J, Labahn N, Kumpart J, Christofori K, 1997. Measurement of local particle velocities and velocity distributions in gas-solid flows by means of the spatial filter method. *Powder Technology*, 94, 51-57.
- Filbois A, Gemmerlé D, 1994. From step edge to line edge : combining geometric and photometric information. *Proceedings of MVA'94 IAPR, Workshop on Machine Vision Application*, 87-90.
- Fiscus D E, Foster G H, Kaufmann H H, 1971. Grain stream velocity measurements. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 14(1), 162-166.
- Fölster N, 2005. Fertilizer application advisory service – A systematic approach to optimum spreading quality. *Proceedings of the 1st International Symposium on Centrifugal Fertiliser Spreading*, 15-16 september 2005, Leuven, Belgium.
- Fontaine V, Crowe T G, 2006. Development of line-detection algorithms for local positioning in densely seeded crops. *Canadian Biosystems Engineering*, 48(7), 19-29.
- Fournier C, Barat C, Ducottet C, Fournel T, 2003. Digital holography applied to PIV : hologram reconstruction and selection of a cloud of particles in the reconstructed volume. *Proceedings of PSFVIP-4*, 3-5 June 2003, Chamonix, France, Paper F4093.
- Fram J R, Deutsch E S, 1975. On the quantitative evaluation of edge detection schemes and their comparison with human performance. *IEEE Transactions on Computers*, 24(6), 616-628.
- Frick R, 2002. Distributeurs d'engrais centrifuges au banc d'essai - Distributeurs modernes à deux disques avec largeurs de travail élevées et grande précision d'épandage. Rapport FAT n° 580, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles, Ettenhausen, Suisse, 28 pages.
- Fulton J P, Shearer S F, Higgins, S F, Hancock D W, Stombaugh T S, 2005a. Distribution pattern variability of granular VRT applicators. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 48(6), 2053-2064.
- Fulton J P, Shearer S F, Higgins, S F, Hancock D W, Stombaugh T S, 2005b. Rate response assessment from various granular VRT applicators. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 48(6), 2095-2103.
- Gée C, Truchetet F, 2006. A cascaded Hough transform for a crop row detection from aerial and in-field agronomic images. *Proceedings of the 8th International Conference on Precision*

- Agriculture and Other Resource Management, Minneapolis, USA. July 23-26, MN. CD-ROM. ASA-CSSA-SSSA (Eds.).
- Gérard O, D'Alché-Buc F, Makram-Ebeid S, Gallinari P, Artières T, 1999. Modèle Markovien et programmation dynamique pour l'extraction de contours : application à des images médicales. Actes du 17^{ième} colloque GRETI, 13-17 septembre 1999, Vannes, 1205-1208.
- Gouton P, Laggoune H, Kouassi R, Paindavoine M, 2000. Ridge-line optimal detector. Optical Engineering, 39(6), 1602-1611.
- Griepentrog H-W, Persson K, 2001. A model to determine the positional lag for fertiliser spreaders. Proceedings of the third European Conference on Precision Agriculture, 18-20 June 2001, Montpellier, France, 671-676.
- Griffis C L, Ritter D W, Matthews E J, 1983. Simulation of rotary spreader distribution patterns. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 26(1), 33-37.
- Grift T E, 2001. Mass flow measurement of granular materials in aerial application, Part 1: Simulation and modeling. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 44(1), 19-26.
- Grift T E, Hofstee J W, 1997a. Measurement of velocity and diameter of individual fertilizer particles by an optical method. Journal of Agricultural Engineering Research, 66, 235-238.
- Grift T E, Hofstee J W, 1997b. Development of a fertilizer particle accelerator, Journal of Agricultural Engineering Research, 66, 229-233.
- Grift T E, Hofstee J W, 2002. Testing an online spread pattern determination sensor on a broadcast fertiliser spreader. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 45(3), 561-567.
- Grift T E, Kweon G, Hofstee J W, Piron E, Villette S, 2006. Dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles. Biosystems Engineering, à paraître.
- Grift T E, Walker J T, Hofstee J W, 1997. Aerodynamic properties of individual fertilizer particles. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 40(1), 13-20.
- Grift T E, Walker J T, Hofstee J W. 2001. Mass flow measurement of granular materials in aerial application, Part 2: Experimental model validation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 44(1), 27-34.
- Hague T, Marchant J A, Tillett N D, 1997. A system for plant scale husbandry. Precision Agriculture, Precision Agriculture'97, Vol. II: Technology, IT and Management. BIOS Scientific Publishers, SCI, Warwick. 635-642.
- Hansen K, Andersen J D, 1997. Understanding the Hough transform : Hough cell support and its utilisation. Image and Vision Computing, 15, 205-218.
- Heath M D, Sarkar S, Sanocki T, Bowyer K W, 1997. A robust visual method for assessing the relative performance of edge-detection algorithms.
- Heertjes P M, Verloop J, Willems R, 1970. The measurement of local mass flow rates and particle velocities in fluid-solid. Powder Technology, 4, 38-40.
- Heikkilä J, Silvén O, 1996. Calibration procedure for short focal length off-the-shelf CCD cameras. Proceeding of the 13th International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria, 166-170.
- Heikkilä J, Silvén O, 1997. A Four-step camera calibration procedure with implicit image correction. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97), San Juan, Puerto Rico, 1106-1112.
- Hofstee J W, 1992. Handling and spreading of fertilizers : Part 1, Physical properties of fertilizer, measuring methods and data. Journal of Agricultural Engineering Research 53, 141-162.
- Hofstee J W, 1992. Handling and spreading of fertilizers : Part 2, Physical properties of fertilizer, measuring methods and data. 53, 141-162.
- 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.
- Hofstee J W, 1995a. Handling and spreading of fertilizer: Part 4, The reciprocating spout type fertilizer spreader. Journal of Agricultural Engineering Research, 62, 9-24.
- Hofstee J W, 1995b. Handling and spreading of fertilizer: Part 5, The spinning disc type fertilizer spreader. Journal of Agricultural Engineering Research, 62, 143-162.

- Hofstee J W, Huisman W, 1990. Handling and spreading of fertilizers : Part 1, Physical properties of fertilizer in relation to particle motion. *Journal of Agricultural Engineering Research* 47(4), 213-234.
- Hou Z, Koh T S, 2003. Robust edge detection. *Pattern Recognition*, 36, 2083-2091.
- Hough P V C, 1962. Methods and means for recognizing complex patterns. US patent n° 3 069 654, 18 December 1962.
- Illingworth J, Kittler J, 1988. Survey. A survey of the Hough transform. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 44, 87-116.
- Inns F M, Reece A R, 1962. The theory of centrifugal distributor. II : Motion on the disc, off-centre feed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(4), 345-353.
- Inns F M, Reece A R, 1962. The theory of centrifugal distributor. II : Motion on the disc, off-centre feed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(4), 345-353.
- Keane R D, Adrian R J, Zhang J, 1995. Super-resolution particle-imaging velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 6, 754-768.
- Keller D L, El-Saiedi A F, Rubin R M, Converse H H, 1972. Measuring corn-kernel velocities in pneumatic conveyor by a radioactive tracer technique. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 15(5), 932-934.
- Koller T M, Gerig G, Székely G, Dettwiler D, 1995. Multiscale detection of curvilinear structures in 2-D and 3-D image data. In *proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision*, Cambridge, Massachusetts, June 1995, 864-869.
- Komine H, 1990. System for measuring velocity field of fluid flow utilizing a laser Doppler spectral image converter. US patent n°4 919 536, 24 April 1990.
- Kweon G, 2006. Analysis and control of rate and uniformity for granular fertilizer application systems. PhD Thesis, University of Illinois, USA, 129 pages.
- Kweon G, Grift T E, 2006. Feed gate adaptation of a spinner spreader for uniformity control. *Biosystems Engineering*, 95(1), 19-34.
- Laggoune A, 1995. Contribution à l'étude des filtres optimaux pour des contours de formes 2D et 3D quelconques. Thèse de Doctorat de l'université de Bourgogne. 154 pages.
- Lakshman Rao V, Venkateswarlu D, 1973. Determination of velocities and flow patterns of particles in mass flow hoppers. *Powder Technology*, 7, 263-265.
- Lam W C Y, Lam L T S, Yuen K S Y, Leung D N K, 1993. An error analysis on quantizing the Hough space. *Proceedings of ICSP'93*, 946-949.
- Lamb D, Frazier P, Kumar L, 2004. Remote sensing and satellite technology : implementation and capabilities. *Proceedings of Australian Fertilizer Industry Conference*, 2-5 August 2004. Stradbroke Island.
- Leavers V F, 1993. Survey. Which Hough transform ? *Computer Vision, Graphics, and Image Processing : Image Understanding*, 58(2), 250-264.
- Leavers V F, Boyce J F, 1987. The Radon transform and its application to shape parametrization in machine vision. *Image and Vision Computing*, 5(2), 161-166.
- Leemans V, Destain M-F, 2006. Application of the Hough transform for seed row localisation using machine vision. *Biosystems Engineering*, 94(3), 325-336.
- Lekakis I, 1996. Calibration and signal interpretation for single and multiple hot-wire/ hot-film probes. *Measurement Science and Technology*, 7, 1313-1333.
- Leterme P-Y, 2000. Précision des épandages : une situation contrastée. *Perspectives Agricoles*, 263, 62-64.
- Liang K-H, Tjahjadi T, Yang Y-H, 1997. Roof edge detection using regularized cubic B-spline fitting. *Pattern Recognition*, 30(5), 719-728.
- Liberzon A, Gurka R, Hetsroni G, 2004. XPIV-Multi-plane stereoscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 36, 355-362.
- Mac Bratney A, Whelan B, Ancev T, Bouma J, 2005. Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 6, 7-23.
- Maccoll J W, 1928. Aerodynamics of a spinning sphere. *The Journal of the Royal Aeronautical Society*, 28, 777-798.
- Maître H (sous la direction de). *Le traitement des images (Traité IC2, série Traitement du signal et de l'image)*, Edition Hermès, Paris - Collection IC2, 2003. 366 pages.

- Makowski D, Tremblay M, Debroize D, Laurent F, 2000. Epandage hétérogène d'engrais azotés : Quel impact économique et environnemental ? *Perspectives Agricoles*, 263, 56-61.
- Marchant J A, 1996. Tracking of row structure in three crops using image analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 15, 161-179.
- Marchant J A, Hague T, Tillett N D, 1996. Row-following accuracy of an autonomous vision-guide agricultural vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 16, 165-175.
- Marr D, Hildreth E, 1980. Theory of edge detection, *Proceedings of Royal Society of London*, 207, 187-217.
- Marsheck R M, Gomezplata A, 1965. Particle flow patterns in a fluidized bed. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 11(1), 167-173.
- Mehta R D, 2000. References related to sports ball aerodynamics. Fluid Mechanics Laboratory, NASA Ames Research Center. <http://widget.ecn.purdue.edu/~me610/balls.html>. Consulté le 2 janvier 2006.
- Mennel R M, Reece A R, 1963. The theory of the centrifugal distributor. III : Particle trajectories. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(3), 78-84.
- Mériaudeau F, Lalignant O, Truchetet F, 1995. Etudes comparatives de différents détecteurs de contours et segmentation au sens contours par frames multiéchelles. Actes du 15^{ème} colloque GRETSI, 18-21 septembre 1995, Juan-les-pins.
- Meyers J F, Komine H, 1991. Doppler global velocimetry - A new Way to look at velocity. *Proceedings of the 4th International Conference on Laser Anemometry*, 3-9 August 1991, Cleveland, Ohio.
- Meyers J F, Lee J W, 2000. Identification and minimization of errors in Doppler global velocimetry measurements. *Proceedings of the 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. 10-13 July 2000, Lisbon, Portugal.
- Miller P C H, Parkin C S, 2005. Procedures for classifying the physical qualities of fertilisers. *Proceedings n° 557, International Fertiliser Society*, York, UK, 20 pages.
- Miquel G, 2003. Rapport sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France. Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques. Rapport enregistré à la Présidence de l'Assemblée Nationale le 19 mars 2003.
- Miserque O, Picard E, Schenkel Y, 2005. Spreading segregation of bulk blends. *Proceedings of the 1st International Symposium on Centrifugal Fertiliser Spreading*, 15-16 September 2005, Leuven, Belgium.
- Morimoto E, Suguri M, Umeda M, 2005. Vision-based navigation system for autonomous transportation vehicle. *Precision Agriculture*, 6, 239-254.
- Niblack W, Petkovic D, 1990. On improving the accuracy of the Hough transform. *Machine Vision and Applications*, 3, 87-106.
- Noh H, Zhang Q, Han S, Shin B, Reum D, 2005. Dynamic calibration and image segmentation methods for multispectral imaging crop nitrogen deficiency sensors. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 48(1), 393-401.
- Oki K, Walawender W P, Fan L T, 1977. The measurement of Local Velocity of Solid Particles. *Powder technology*, 18, 171-178.
- Olieslager R, 1997. Fertilizer distribution modelling for centrifugal spreader design. PhD Thesis, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, K. U. Leuven, Belgium.
- Olieslagers R, Ramon H, De Baerdemaeker J, 1996. Calculation of fertilizer distribution patterns from a spinning disc spreader by means of a simulation model. *Journal of agricultural Engineering Research*, 63, 137-152.
- Ostendorf M, Schwedes J, 2005. Application of Particle Image Velocimetry measurements during silo discharge. *Powder Technology*, 158, 69-75.
- Palmer P L, Kittler J, Petrou M, 1997. An optimizing line finder using a Hough transform algorithm. *Computer Vision and Image Understanding*, 67(1), 1-23.
- Pan X-H, Luo R, Yang X-Y, Yang H-J, 2002. Three-dimensional particle image tracking for dilute particle-liquid flows in a pipe. *Measurement Science and Technology*, 13, 1206-1216.
- Patterson D E, Reece A R, 1962. The theory of the centrifugal distributor. I : Motion on the disc, near-centre feed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(3), 232-240.

- Pein C, Röhrich D, Skjodt P, McClure J, 2006. Combining GPS- and camera steering- (LPS) systems : in-field applications and experiences. Proceedings of the World Congress : Agricultural Engineering for a Better World. Archive n° 440119580331, Bonn, 3-7 September 2006.
- Pereira F, Gharib M, 2002. Defocusing digital particle image velocimetry and the three dimensional characterization of two-phase flows. *Measurement Science and Technology*, 13, 683-694.
- Persson K, Skovsgaard H, Weltzien C, 2003. Technical solutions for variable rate fertilisation. Proceedings of the European Conference on Precision Agriculture. 545-550.
- Petrou M, Kittler J, 1991. Optimal edge detector for ramp edges. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(5), 483-491.
- Piron E, 2006. Communication personnelle.
- Piron E, Miclet D, 2005. Experimental evaluation of spatial and transverse distributions for centrifugal fertiliser spreaders. Proceedings of the 1st international symposium on centrifugal fertiliser spreading, 15-16 September 2005, Leuven, Belgium.
- Pitt R E, Farmer G S, Walker L P, 1982. Approximating equations for rotary distributor spread patterns. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 25(6), 1544-1552.
- Ponchaut N F, Mouton C A, Hornung H G, Dabiri D, 2005. 3D particle tracking velocimetry method: Advances and error analysis. Report FM2005.004, Graduate Aeronautical Laboratories California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Prochnow M, 2002. Ecoulements denses de grains secs. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 309 pages.
- Pu Y, Song X, Meng H, 1999. Holographic PIV for diagnosing particulate flows. Proceedings of the 3rd International Workshop on PIV, 16-18 September 1999, Santa-Barbara, 351-364.
- Rav-Acha A, Peleg S, 2005. Two motion-blurred images are better than one. *Pattern Recognition Letters*, 26, 311-317.
- Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, Dickson M, 2000. Agricultural automatic guidance research in North America. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25, 155-167.
- Reumers J, Tijskens E, Ramon H, 2003a. Experimental characterisation of the tangential and cylindrical fertiliser distribution pattern from a spinning disc : A parameter study. *Biosystems Engineering*, 86(3), 327-337.
- Reumers J, Tijskens E, Ramon H, 2003b. Experimental characterisation of the cylindrical distribution pattern of centrifugal fertiliser spreaders : Towards an alternative for spreading hall measurements. *Biosystems Engineering*, 86(4), 431-439.
- Rice S O, 1945. Mathematical analysis of random noise. *Bell Syst. Tech. J.*, 24, 46-156.
- Ritter D W, Griffis C L, Matthews E J, 1980. Computer simulation of rotary spreader distribution patterns. Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Palmer House Chicago, Illinois, 2-5 December 1980, paper n° 80-1504, 16 pages.
- Roland R, Gauthier X, 2006. Farmstar : 10 000 agriculteurs utilisent le satellite pour une agriculture durable. Dossier de presse du 27 février 2006 pour le Salon International de l'Agriculture, Paris, France. 13 pages.
- Rosemann H, Stäger R, Kreplin H-P, 1996. Development and application of a quadruple hot-wire technique for turbulent flows. *Measurement Science and Technology*, 7, 1477-1491.
- Rosin P L, 1995. Edges : Saliency measures and automatic thresholding. Technical note N° I.95.58, Institute for Remote Sensing Applications, Italy.
- Saga T, Hu H, Kobayashi T, Murata S, Okamoto K, Nishio S, 2000. A comparative study of the PIV and LDV measurements on a self-induced sloshing flow. *Journal of Visualization*, 3(2), 145-156.
- Salotti M, 1994. Gestion des informations dans les premières étapes de la vision par ordinateur. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France. 203 pages.
- Sarkar S, Boyer K L, 1991. On optimal infinite impulse response edge detection filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(11), 1154-1171.
- Schächtl J, Huber G, Maidl F-X, Sticksel E, Schulz J, Haschberger P, 2005. Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence Measurements for Detecting the Nitrogen Status of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Canopies. *Precision Agriculture*, 6(2), 143-156.
- Schiller L, Naumann A, 1933. Über die grundlegende Berechnung bei der Schwerkraftaufbereitung. *Vereines Deutscher Ingenieure*, 77, 318-320.

- Schvartz C, Muller J-C, Decroux J. Guide de la fertilisation raisonnée. Collection Produire Mieux. Editions France Agricole, Paris, 2005. 416 pages.
- Shearer S A, Stombaugh T S, Fulton, J P, Mueller T G, 2002. Considerations for development of variable-rate controller test standard. ASAE Annual International Meeting, 28-31 July 2002, Chicago, Illinois, USA, paper n° 021191.
- Shen J, Castan S, 1992. An optimal linear operator for step edge detection. *Graphical Models and Image Processing*, 54(2), 122-133.
- Sheng J, Malkiel E, Katz J, 2003. Single beam two-views holographic particle image velocimetry. *Applied Optics*, 42, 235-250.
- Sielamowicz I, Kowalewski T A, Blonski S, 2004. Central and eccentric granular material flows in bins/hoppers registred by DPIV optical technique. *Acta Agrophysica*, 4(2), 519-531.
- Smits A J, Smith D R, 1994. A new aerodynamic model of a golf ball in flight. in : *The 1994 World Scientific Congress of Golf*, editions A J Cochan and M R Farrally, 340-347.
- Sommerfeld M, 2000. Theoretical and experimental modelling of particulate flows – Overview and fundamentals. Lecture, von Karman Intitute, Martin Luther University, Halle, Germany.
- Song H, Litchfield J B, 1991. Predicting method of terminal velocity for grains. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 34(1), 225-231.
- Stanislas M, Monnier J-C, 1997. Practical aspects of image recording in particle image velocimetry, *Measurement Science and Technology*, 8, 1417-1426.
- Steger C, 1998. An unbiased detector of curvilinear structures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(2), 113-125.
- Stitou A, Riethmuller M L, 2001. Extension of PIV to Super Resolution using PTV. *Measurement Science and Technology*, 12(9), 1398-1403.
- Stokes G G, 1851. On the effect of the internal frictions of fluids on the motion of pendulums. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 9, 8-106.
- Subirana-Vilanova J B, Sung K K, Multi-scale vector-ridge-detection for perceptual organization without edges. *Artificial Intelligence Memo 1318*, Massachusetts Institute of Technology Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge, Massachusetts, USA, December 1992.
- Swisher D W, Borgelt S C, Sudduth K A, 2002. Optical sensor for granular fertilizer flow rate measurement. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 45(4), 881-888.
- Tagare H D, de Figueiredo R J P, 1990. On the localization performance measure and optimal edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(12), 1186-1190.
- Tian H, Fowler B, El Gamale A, 2001. Analysis of temporal noise in CMOS photodiode active pixel sensor. 36(1), 92-101.
- Tijskens E, Van Liederkerke P, Ramon H, 2005. Modelling to aid assessment of fertiliser handling and spreading characteristics. *Proceedings of the International Fertiliser Society*, 14 April 2005, London.
- Timoshenco S, Young D H, 1948. *Advanced dynamics*. McGraw-Hill Book, New York.
- Tischer M, Bursik M, Pitman E B, 2001. Kinematics of sand avalanches using Particle Image Velocimetry. *Journal of Sedimentary Research*, 71(3), 355-364.
- Tissot S, Miserque O, Quenon G, 1999b. Chemical distribution patterns for blended fertilizers in the field. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74, 339-346.
- Tissot S, Queron G, Miserque O., 1999a. Tolérance d'une culture de froment à l'égard de l'hétérogénéité d'épandage des engrais azotés. *Biotechnology Agronomy Society Environment*, 3(3), 247-252.
- Torre V, Poggio T, 1984. On edge detection, *Artificial Intelligence Memo 768*, Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory. 40 p.
- Van Liedekerke P, Tijskens E, Ramon H, 2005. DEM modeling of centrifugal fertilizer spreading. *Proceedings of the 1st International Symposium on Centrifugal Fertiliser Spreading*, 15-16 September 2005, Leuven, Belgium.
- Vangeyte J, Sonck B, Van Liedekerke P, Ramon H, 2004. Comparison of two methods to measure the outlet velocity of fertiliser grains from a rotary disc. *Proceedings of AgEng 2004*, 336-337, 12-16 September 2004, Leuven, Belgium.

- Villette S, Piron E, Cointault F, Sarrazin P, 2003. Relation entre débit massique et couple d'entraînement d'un disque de distributeur d'engrais : modélisation et confrontations expérimentales. *Ingénieries Numéro Spécial 2003 Technologies pour les agrosystèmes durables*, 73-84.
- Virin T, Piron E, Koko, J, Martinet P, Berducot M, 2005. Spatial optimization of fertilizer application by centrifugal spreader. *Proceedings of the 1st International Symposium on Centrifugal Fertiliser Spreading*, 15-16 September 2005, Leuven, Belgium.
- Walker J T, Grift T E, Hofstee J W, 1997. Determining effects of fertilizer particle shape on aerodynamic properties. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 40(1), 21-27.
- Watts R G, Ferrer R, 1987. The lateral force on a spinning sphere : aerodynamics of a curve ball. *American Journal of Physics*, 55(1), 40-44.
- Westerweel J, 1997. Fundamentals of digital particle image velocimetry. *Measurement and Science and Technology*, 8, 1379-1392.
- Wuibaut G, Schneider T, Dupont P, Bois G, Caignaert G, 2004. Vélométrie par images de particules dans la roue et le diffuseur d'une pompe centrifuge. *Actes du 9^e Congrès Francophone de Vélométrie Laser*, 14-17 Septembre 2004, Bruxelles, Belgique.
- Yan Y, 1996. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. *Measurement Science and Technology*, 7, 1687-1706.
- Yang Y, Schrock M D, 1993. Image transformation method for determining kernel motion positions in three dimensions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 36(4), 1229-1234.
- Yitzhaky Y, Mor I, Lantzman A, Kopeika N S, 1998. Direct method for restoration of motion blurred images. *Journal of the Optical Society of America A*, 15(6), 1512-1519.
- Yitzhaky Y, Peli E, 2003. A method for objective edge detection evaluation and detector parameter selection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 25(8), 1027-1033.
- Yuen S Y, Ma C H, 1997. An investigation of the nature of parameterization for the Hough transform, *Pattern Recognition*, 30(6), 1009-1040.
- Ziani S, Rousselet M, 1990a. Epandage des engrais et verse des céréales. *Bulletin Technique du Machinisme et de l'Équipement Agricoles*, 45, 28-38.
- Ziani S, Rousselet M, 1990b. Qualité de l'épandage d'engrais – Enquête auprès des agriculteurs du Val d'Allier. *Bulletin Technique du Machinisme et de l'Équipement Agricoles*, 48, 9-17.
- Ziou D, 1991. Line detection using an optimal IIR filter. *Pattern Recognition*, 24(6), 465-478.
- Ziou D, Tabbone S, 1998. Edge detection techniques – An Overview. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 8(4), 537-559.
- Ziou D, Wrobel-Dautcourt B, 1989. Filtres récursifs pour la détection de contours « lignes de crêtes » et « marche ». *Actes du 12^{ième} Colloque GRETSI*, 12-16 juin 1989, Juan-les-pins.
- Zwaenepoel P, 2004. Résultats d'enquêtes auprès du secteur de la fabrication d'engrais et de la construction d'épandeurs. Communication lors de la réunion d'Unité Mixte de Recherche Cemagref-ENESAD du 8 juin 2004.

ANNEXES

1	Annexe relative aux corrections à appliquer aux paramètres de référence déterminés dans le plan du plateau rotatif.....	205
2	Annexe relative à l'utilisation de la démarche de Canny par Deriche, Shen et Castan, Sarkar et Boyer, et Bourennane.....	207
3	Annexe relative à l'estimation expérimentale du profil de contour des trajectoires.....	211
4	Annexe relative à la dérivabilité et à la continuité du modèle de contour	213
5	Annexe relative à l'ajustement du modèle de Laggoune et du modèle proposé aux profils de contours estimés	217
6	Annexe relative à la stabilité du filtre de dérivation.....	221
7	Annexe relative à la détermination des coefficients des filtres de détection et régularisation.....	223
8	Annexe relative à la définition des critères de Canny discrets	229
9	Annexe relative à l'adaptation discrète du filtre de Ziou	235
10	Annexe relative au choix de la taille des accumulateurs et de la longueur du segment analysé	241
11	Annexe présentant des exemples de valeurs caractérisant le calcul de la transformée de Hough.....	247
12	Annexe relative à la détermination de l'axe d'inertie du nuage de points identifié par un accumulateur	249
13	Annexe relative au test de l'algorithme d'identification et de caractérisation des trajectoires sur une image synthétique	251
14	Annexe relative à la détermination de l'écart angulaire entre l'image d'une trajectoire et l'image de sa projection horizontale dans le plan de référence	253
15	Annexe relative aux mesures manuelles réalisées sur la maquette simulant une trajectoire	257
16	Annexe relative à l'estimation de la vitesse instantanée à partir de la vitesse moyenne mesurée par approche stroboscopique	261
17	Annexe relative aux algorithmes de traitement des relevés d'impacts	263
18	Annexe relative à l'expression de la longueur du vol balistique entre le point d'éjection d'une particule et son point d'impact sur un écran.....	265
19	Annexe relative à l'estimation de K_a et à l'incidence d'une erreur sur l'estimation des paramètres entrant en jeu dans la prédiction de l'altitude de la trajectoire au voisinage du disque.	267
20	Annexe relative aux caractéristiques physiques des engrais utilisés.	273

1 ANNEXE RELATIVE AUX CORRECTIONS A APPLIQUER AUX PARAMETRES DE REFERENCE DETERMINES DANS LE PLAN DU PLATEAU ROTATIF

L'incidence de l'altitude du plan de référence associé à l'image analysée est étudiée ici en adoptant le modèle du sténopé.

Considérons deux plans $\mathcal{P}_1$ et $\mathcal{P}_2$ parallèles au plan image et éloignés respectivement du point focal des distances h_1 et $h_2 = h_1 - \Delta h$.

Soit η_1 le facteur de conversion millimètre-pixel déterminé pour le plan $\mathcal{P}_1$ et (x_{cl}, y_{cl}) les coordonnées de l'image du point de passage de l'axe de rotation du disque dans le plan $\mathcal{P}_1$.

1.1 CORRECTION DU FACTEUR DE CONVERSION

Considérons un segment de longueur L_{mm} exprimée en mm dans le plan réel observé et L_{pix} la longueur en pixels du segment correspondant dans le plan image (figure A1-1).

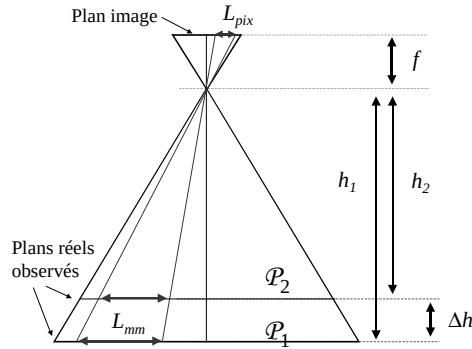


Figure A1-1 : Illustration de la correspondance de la longueur d'un segment dans le plan image et la longueur correspondante dans les plans réels observés.

Le facteur de conversion millimètre-pixel est défini par le rapport : $\eta = L_{mm} / L_{pix}$

Il peut également se définir en fonction de la longueur focale exprimée en pixels f_{pix} et de la distance d_{mm} qui le sépare du point focal exprimée en millimètres par :

$$\eta = d_{mm} / f_{pix}$$

Pour deux plans $\mathcal{P}_1$ et $\mathcal{P}_2$ situés à des distances différentes (h_1 et h_2) du centre de la projection, on déduit le rapport des deux facteurs de conversion correspondant (η_1 et η_2) :

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{f_{pix}\eta_1 - \Delta h}{f_{pix}\eta_1}$$

d'où la relation :

$$\eta_2 = \frac{f_{pix}\eta_1 - \Delta h}{f_{pix}}$$

1.2 CORRECTION DE LA POSITION DE L'AXE DE ROTATION DU DISQUE DANS L'IMAGE

Le fait d'attribuer à l'image la représentation d'un plan $\mathcal{P}_2$ différent du plan de référence initial $\mathcal{P}_1$, engendre une modification de la position à attribuer sur le CCD à l'image du point de passage de l'axe de rotation du disque. Cette situation est illustrée sur la figure A1-2.

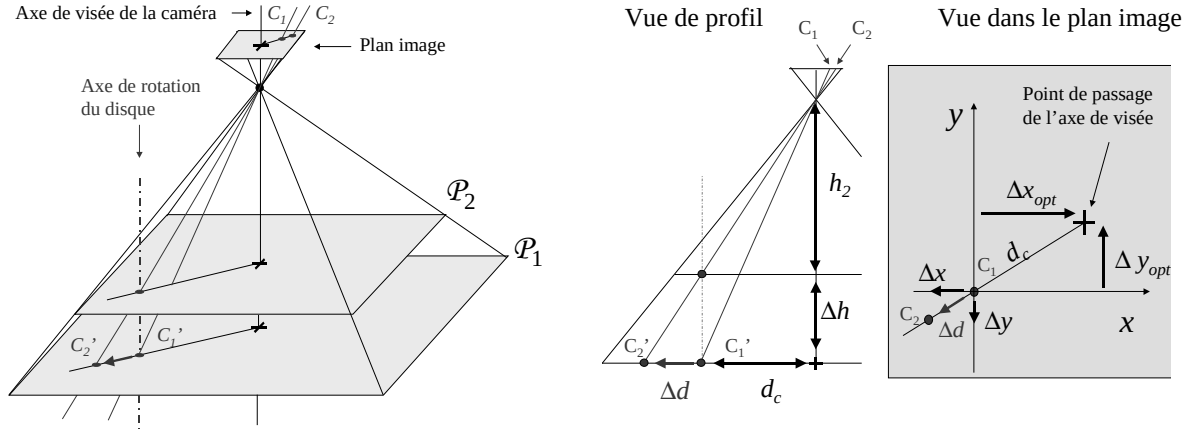


Figure A1-2 : Illustration du décalage de la position à attribuer sur le CCD de l'image du point de passage de l'axe de rotation du disque en fonction du plan de référence considéré dans la scène.

Soit :	C_1	la position dans l'image du point de passage de l'axe de rotation du disque dans le plan de référence.
	C_2	la position dans l'image du point de passage de l'axe de rotation du disque dans un plan différent du plan de référence.
	C_1', C_2'	les points correspondant à C_1 et C_2 dans le plan de référence initial.
	$\Delta x_{opt}, \Delta y_{opt}$	les différences de coordonnées (exprimées en pixels) entre C_1' et le point principal (point de passage de l'axe de visée dans le plan image).
	d_c	la distance (en pixels) entre le point principal et C_1 .
	Δd	la distance (en pixels) qui sépare C_2 de C_1 .
	Δh	la différence de hauteur entre le plan de référence et le plan considéré (exprimée en mm).
	$\Delta x, \Delta y$	correction à appliquer pour passer des coordonnées de C_1 aux coordonnées de C_2 (exprimées en pixels).

Les considérations géométriques permettent d'obtenir les relation suivantes:

$$\Delta d = \frac{d_c}{h_2} \Delta h$$

$$\begin{cases} \Delta x = -\Delta d \frac{\Delta x_{opt}}{d_c} \\ \Delta y = -\Delta d \frac{\Delta y_{opt}}{d_c} \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta x = -\Delta h \frac{\Delta x_{opt}}{h_2} \\ \Delta y = -\Delta h \frac{\Delta y_{opt}}{h_2} \end{cases} \quad \text{d'où :} \quad \begin{cases} \Delta x = -\Delta h \frac{\Delta x_{opt}}{f_{pix} \eta_2} \\ \Delta y = -\Delta h \frac{\Delta y_{opt}}{f_{pix} \eta_2} \end{cases}$$

2 ANNEXE RELATIVE A L'UTILISATION DE LA DEMARCHE DE CANNY PAR DERICHE, SHEN ET CASTAN, SARKAR ET BOYER, ET BOURENNANE.

Cette annexe synthétise les principales informations concernant les méthodes utilisées et les résultats obtenus par Deriche (1987), Shen et Castan (1992), Sarkar et Boyer (1991) ainsi que Bourennane et al. (1993) pour concevoir un filtre linéaire de détection de contour de type marche ou sigmoïde.

Toutes ces approches dérivent de la démarche proposées par Canny (1986).

2.1 FILTRE DE DERICHE

En se basant sur l'hypothèse de la séparabilité des filtres, Deriche (1987) recherche une fonction de dérivation monodimensionnelle $f(x)$ et opère le passage à deux dimensions en utilisant un filtre de régularisation obtenu comme la primitive de $f(x)$.

Deriche suit la méthode proposée par Canny et change les limites des intégrales présentes dans l'expression des critères de performance de manière à rechercher un opérateur sous la forme d'un filtre à réponse impulsionnelle infinie (RII).

Il obtient ainsi la même équation différentielle que Canny mais impose les conditions aux limites suivantes :

$$f(0) = 0 ; f(+\infty) = 0 ; f'(0) = 0 ; f'(+\infty) = 0.$$

En conséquence, Deriche propose le choix de la fonction optimale suivante :

$$f(x) = -e^{-\alpha|x|} \sin \omega x$$

Le filtre de lissage proposé par Deriche est la primitive $g(x)$ du filtre de dérivation $f(x)$.

L'auteur propose d'implanter ces filtres de manière récursive. Sur une image en deux dimensions, cette récursivité est appliquée dans deux directions orthogonales (selon les lignes et selon les colonnes).

Deriche définit donc un opérateur optimal au sens des critères de Canny qui est une solution plus simple que celle proposée par ce dernier et pour laquelle il propose une mise en oeuvre récursive. L'avantage de cette approche réside dans l'absence de bruit de troncature et l'obtention d'un nombre réduit d'opérations par pixel. De plus l'adaptation de la réponse impulsionnelle du filtre à la résolution à laquelle les contours sont à détecter s'effectue par le choix de paramètres dont la valeur ne modifie pas le nombre de termes de l'équation aux différences.

2.2 FILTRE DE SHEN ET CASTAN

Shen et Castan (1992) considèrent le même modèle de contour que Canny et suivent la même méthode mathématique.

Les auteurs déduisent ainsi, sur la base des critères de performance qu'ils ont définis, que le filtre optimal de régularisation $g(x)$ est solution de l'équation différentielle :

$$2g''(x) - 2\lambda g(x) = 0$$

En imposant la parité et la stabilité du filtre, ils retiennent pour le filtre de régularisation l'expression suivante :

$$g(x) = ce^{-\alpha|x|}$$

où c est un paramètre de normalisation et α joue le rôle de paramètre d'échelle.

Le filtre dérivateur $f(x)$ est obtenu par dérivation de $g(x)$ en fixant $f(0) = 0$ pour des raisons de symétrie :

$$f(x) = \begin{cases} -c\alpha e^{-\alpha x} & \text{pour } x > 0 \\ c\alpha e^{\alpha x} & \text{pour } x < 0 \\ 0 & \text{pour } x = 0 \end{cases}$$

2.3 FILTRE DE SARKAR ET BOYER

En utilisant une approche variationnelle similaire à celle de Canny mais en se basant sur une expression différente du troisième critère de performance, Sarkar et Boyer (1991) aboutissent à une équation différentielle pour laquelle ils ne trouvent pas de solution analytique :

$$(\lambda_1 + \lambda_3 x^2) f(x) - \lambda_2 f''(x) + f''''(x) = \frac{-\lambda_4}{2}$$

Les conditions aux limites imposées à la fonction sont:

$$f(0) = 0 ; f(W) = 0 ; f'(0) = S ; f'(W) = 0$$

La solution est une fonction à 5 paramètres dont les valeurs ont été déterminées numériquement.

De manière à permettre une implémentation récursive, les auteurs choisissent d'approximer le filtre de détection par une fonction ayant une réponse impulsionnelle similaire.

Pour $x > 0$, le filtre est approximé par :

$$f(x) = A(\cos \phi - \cos(\beta \alpha x + \phi)) \exp(-\alpha x) \text{ avec } \alpha > 0$$

où A et α sont respectivement l'amplitude et le facteur d'échelle, β et Φ sont calculés numériquement pour minimiser l'écart entre le filtre et son approximation.

En prenant $\Phi = \pi/2$, le filtre correspond à celui proposé par Deriche.

2.4 FILTRE DE BOURENNANE

Bourennane et al. (1993) reprennent les bases du travail de Petrou et Kittler (1991). Ils considèrent que le système d'acquisition d'une image est un filtre passe bas et qu'en conséquence le choix d'un modèle en forme de rampe est préférable à celui d'une marche. Le modèle de contour considéré est alors défini par la fonction sigmoïde suivante :

$$C(x) = \begin{cases} 1 - 0.5e^{-sx} & \text{pour } x \geq 0 \\ 0.5e^{sx} & \text{pour } x < 0 \end{cases} \text{ avec } \alpha > 0$$

L'expression du critère de localisation est transformée par rapport à celle de Canny en utilisant les propriétés de la dérivée d'un produit de convolution :

$$\Lambda = \frac{1}{A} \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} C''(-x) f(x) dx \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx}}$$

La recherche du filtre optimal est conduite comme chez Canny en cherchant à maximiser le produit des critères de détection et de localisation sous la contrainte de faible multiplicité des réponses mais de manière à définir un filtre à réponse impulsionnelle infinie.

En appliquant la méthode proposée par Canny, les auteurs construisent la fonction composite :

$$\Psi(x, f, f', f'') = f^2(x) + \lambda_1 f'^2(x) + \lambda_2 f''^2(x) + \lambda_3 f(x)e^{sx} + \lambda_4 f(x)(1-e^{sx})$$

L'équation d'Euler permet alors de construire une équation différentielle dont la solution générale est de la forme :

$$f(x) = a_1 e^{\alpha x} \sin \omega x + a_2 e^{\alpha x} \sin \omega x - a_2 e^{\alpha x} \text{ pour } x \leq 0$$

En imposant les conditions suivantes :

$$f(x) = -f(-x), f(+\infty)=0 ; f'(+\infty)=0$$

Le filtre optimal proposé est :

$$f(x) = k e^{\alpha x} \sin(\omega x) + e^{\alpha x} \cos(\omega x) - e^{\alpha x} \text{ pour } x < 0$$

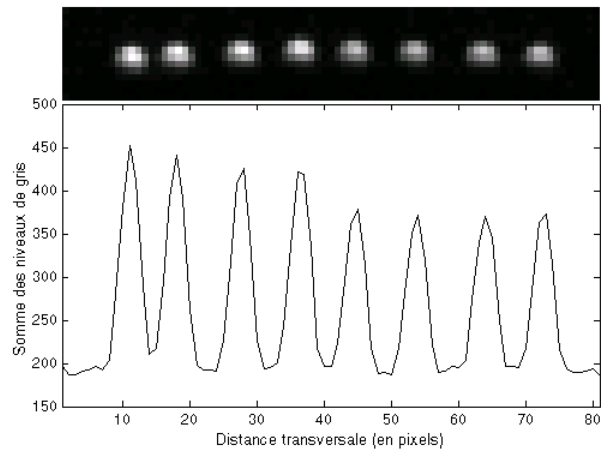
Ce filtre conduit à une implantation sous forme récursive d'ordre trois.

Les performances de ce filtre ont été comparées à celles du filtre de Deriche en utilisant l'indice de Pratt. Il donne de meilleurs résultats pour les images bruitées. Pour un RSB de 1 dB, l'amélioration est de 67%, pour un RSB de 2 elle est de 20% et pour un RSB de 10 dB elle est inférieure à 1% de la valeur de l'indice.

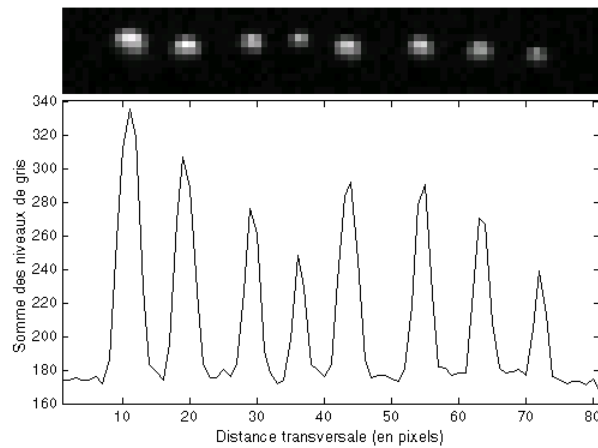
3 ANNEXE RELATIVE A L'ESTIMATION EXPERIMENTALE DU PROFIL DE CONTOUR DES TRAJECTOIRES

Cette annexe présente les images de granulés acquises en statique ainsi que l'allure des profils de contours qui en sont déduits.

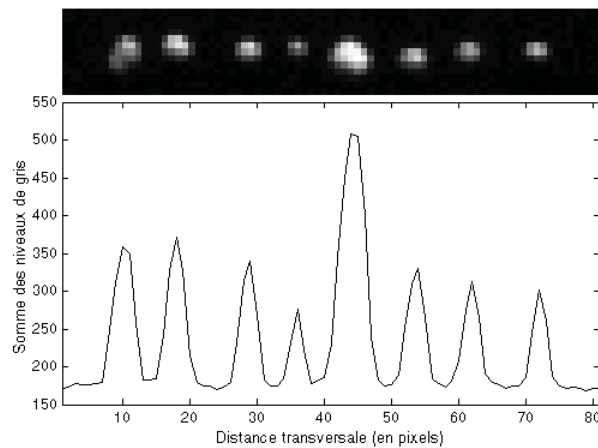
Cas des billes



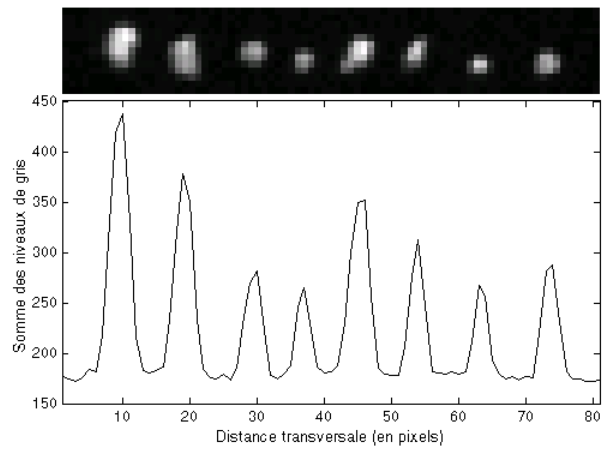
Cas de l'engrais NPK



Cas de l'ammonitrate



Cas du chlorure de potassium



4 ANNEXE RELATIVE A LA DERIVABILITE ET A LA CONTINUITE DU MODELE DE CONTOUR

L'objet de cette annexe est de montrer que la fonction utilisée comme modèle de contour :

$$C(x) = \frac{sp}{p-s} \left(\frac{e^{-s|x|}}{s} - \frac{e^{-p|x|}}{p} \right) \text{ pour } p \text{ et } s > 0 \text{ et } p \neq s$$

est de classe C-infini, c'est à dire continue et dérivable à n'importe quel ordre.

4.1 DERIVEE A L'ORDRE k POUR k IMPAIR

Pour k impair, montrons que la dérivée à l'ordre de k de $C(x)$ est :

$$C^{(k)}(x) = \frac{sp}{p-s} \text{sign}(x) \left(-s^{k-1} e^{-s|x|} + p^{k-1} e^{-p|x|} \right) \quad (\text{A4.1})$$

En distinguant les cas où x est positif et négatif :

$$C(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} \left(\frac{1}{s} e^{-sx} - \frac{1}{p} e^{-px} \right) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} \left(\frac{1}{s} e^{sx} - \frac{1}{p} e^{px} \right) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

L'expression de la dérivée de $C(x)$ est :

$$C'(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} \left(-e^{-sx} + e^{-px} \right) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} \left(e^{sx} - e^{px} \right) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

Cette écriture vérifie l'expression générale (A4.1) pour $k = 1$.

Supposons maintenant que l'expression (A4.1) est vraie pour $k = 2n+1$ avec $n \in \mathbb{N}$ et montrons que dans ce cas l'expression (A4.1) est vérifiée pour $k = 2n + 3$.

En distinguant les cas où x est positif et négatif on suppose :

$$C^{(2n+1)}(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} \left(-s^{2n} e^{-sx} + p^{2n} e^{-px} \right) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} \left(s^{2n} e^{sx} - p^{2n} e^{px} \right) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

Par dérivations successives, on obtient :

$$C^{(2n+2)}(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} \left(s^{2n+1} e^{-sx} - p^{2n+1} e^{-px} \right) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} \left(s^{2n+1} e^{sx} - p^{2n+1} e^{px} \right) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

$$C^{(2n+3)}(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} (-s^{2n+2} e^{-sx} + p^{2n+2} e^{-px}) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} (s^{2n+2} e^{sx} - p^{2n+2} e^{px}) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

Si on suppose l'expression (A4.1) vraie pour $k = 2n+1$ alors, elle est également vraie pour $k = 2n + 3$. Or cette relation est vérifiée pour $k = 1$. Cette expression est donc vérifiée pour tout k impair.

4.2 DERIVEE A L'ORDRE k POUR k PAIR

Pour k pair ($k \geq 2$), montrons que la dérivée à l'ordre de k de $C(x)$ est :

$$C^{(k)}(x) = \frac{sp}{p-s} (s^{k-1} e^{-s|x|} - p^{k-1} e^{-p|x|}) \quad (\text{A4.2})$$

En distinguant les cas où x est positif et négatif, l'expression de la dérivée seconde de $C(x)$ est :

$$C''(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} (se^{-sx} - pe^{-px}) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} (se^{sx} - pe^{px}) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

Cette écriture vérifie l'expression générale (A4.2) pour $k = 2$.

Supposons maintenant que l'expression (A4.2) est vraie pour $k = 2n$ avec $n \in \mathbb{N}$ et montrons que dans ce cas l'expression (A4.2) est vérifiée pour $k = 2n + 2$.

Supposons :

$$C^{(2n)}(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} (s^{2n-1} e^{-sx} - p^{2n-1} e^{-px}) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} (s^{2n-1} e^{sx} - p^{2n-1} e^{px}) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

Par dérivations successives, on obtient :

$$C^{(2n+1)}(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} (-s^{2n} e^{-sx} + p^{2n} e^{-px}) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} (s^{2n} e^{sx} - p^{2n} e^{px}) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

$$C^{(2n+2)}(x) = \begin{cases} \frac{sp}{p-s} (s^{2n+1} e^{-sx} - p^{2n+1} e^{-px}) & \text{pour } x \geq 0 \\ \frac{sp}{p-s} (s^{2n+1} e^{sx} - p^{2n+1} e^{px}) & \text{pour } x < 0 \end{cases}$$

En supposant l'expression (A4.2) vraie pour $k = 2n$ elle est également vraie pour $k = 2n + 2$. Or cette relation est vérifiée pour $k = 2$. Cette expression est donc vérifiée pour tout k pair.

4.3 CONTINUITE

Pour k impair : $C^{(k)}(0^+) = 0$ et $C^{(k)}(0^-) = 0$, la fonction $C^{(k)}(x)$ est continue sur $\mathbb{R}$.

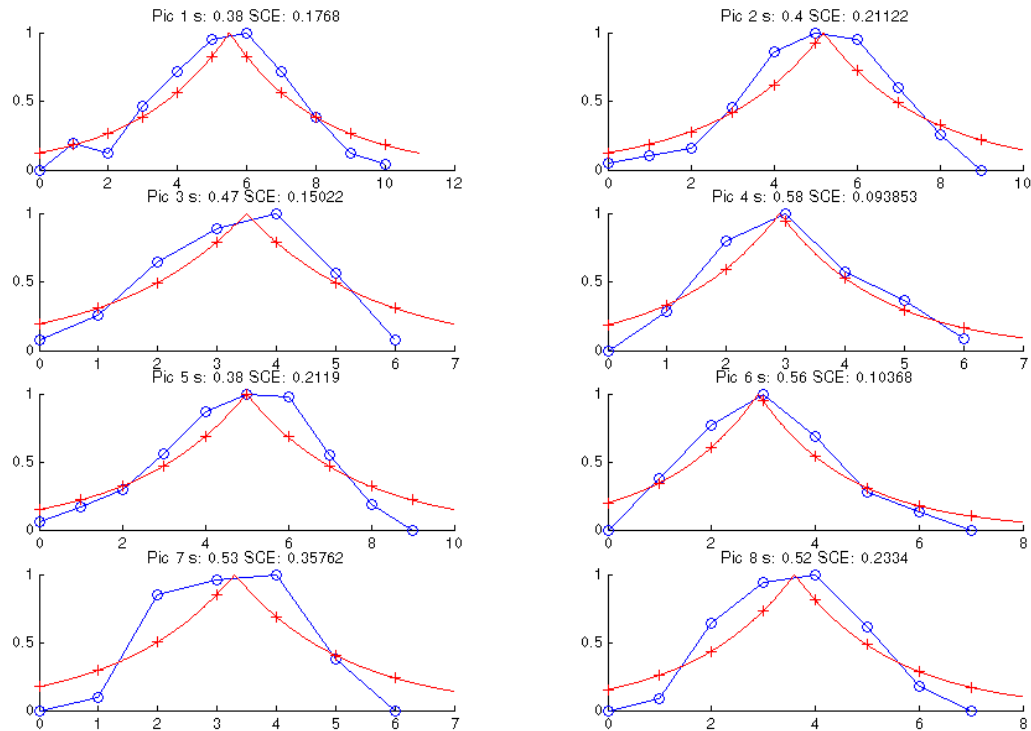
Pour k pair : $C^{(k)}(0^+) = \frac{sp}{p-s}(s^{k-1} - p^{k-1})$ et $C^{(k)}(0^-) = \frac{sp}{p-s}(s^{k-1} - p^{k-1})$, la fonction $C^{(k)}(x)$ est continue sur $\mathbb{R}$.

En conclusion la fonction $C(x)$ utilisée pour modéliser le profil de contour est de classe C -infini.

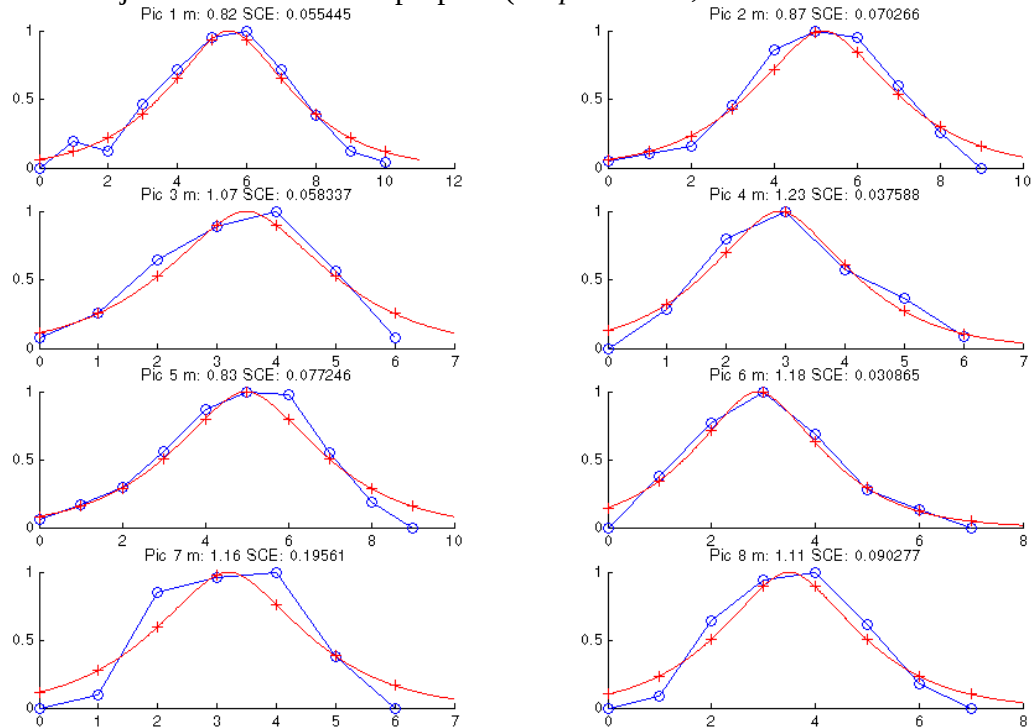
5 ANNEXE RELATIVE A L'AJUSTEMENT DU MODELE DE LAGGOUNE ET DU MODELE PROPOSE AUX PROFILS DE CONTOURS ESTIMES

Pour le chlorure de potassium :

Ajustement du modèle de Laggoune (s : paramètre ; SCE : Somme des carrés des écarts)

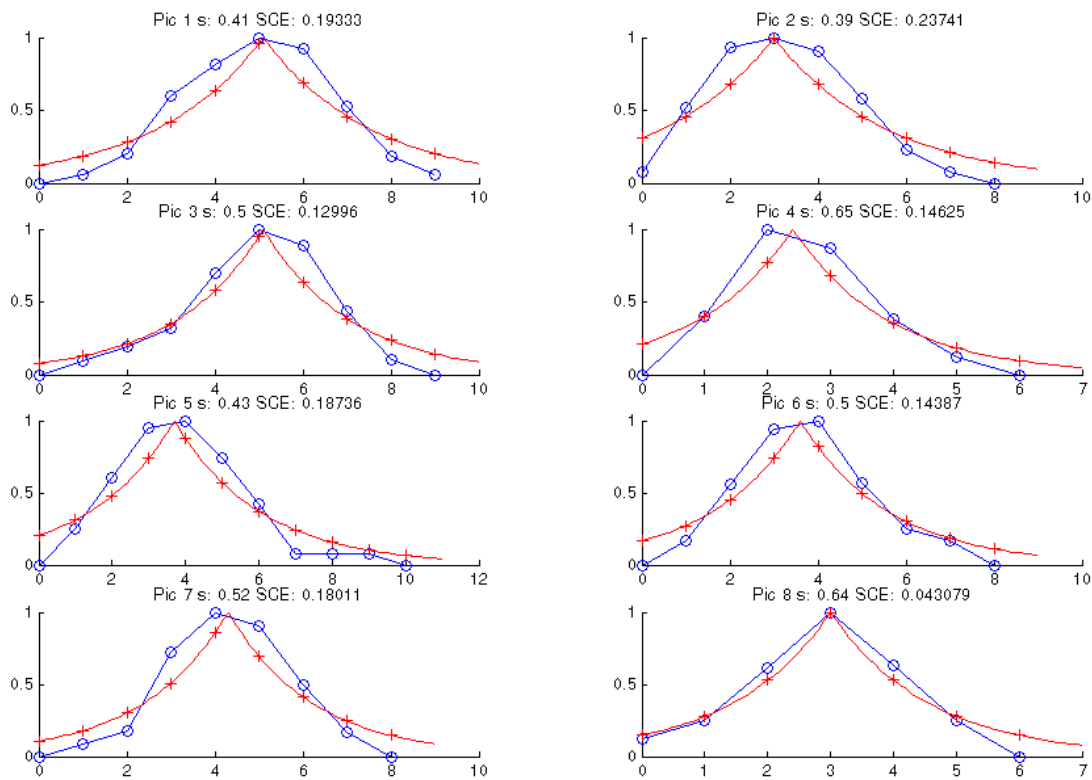


Ajustement du modèle proposé (m : paramètre ; SCE : Somme des carrés des écarts)

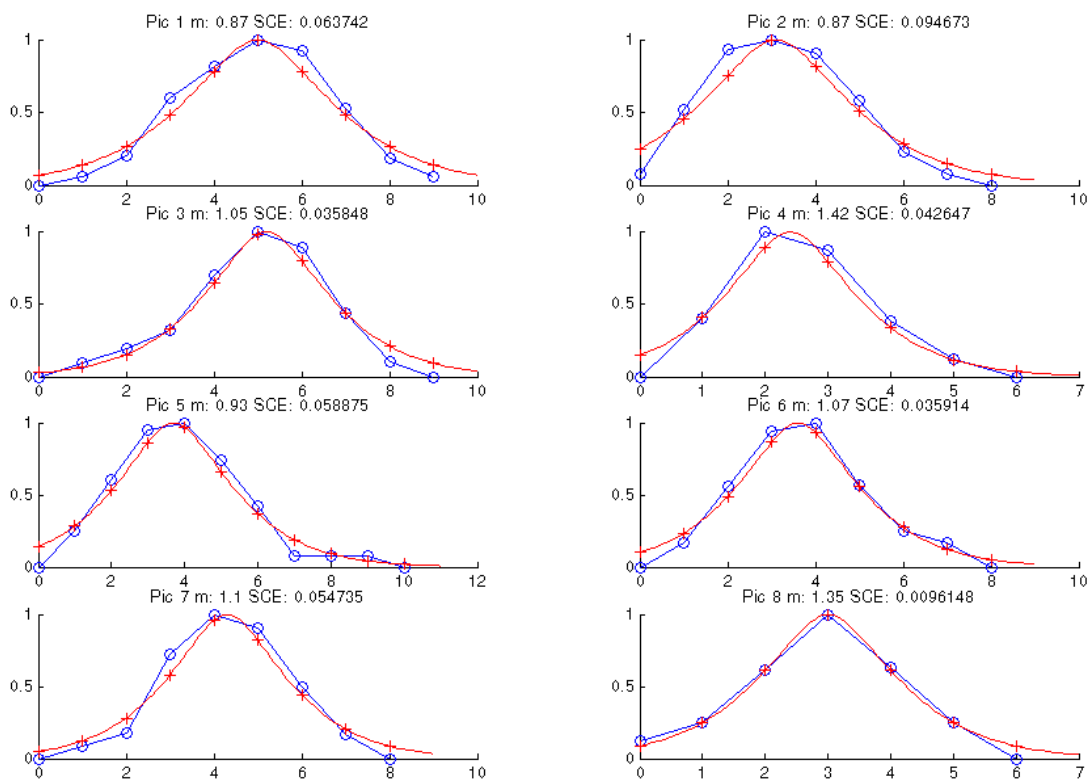


Pour l'engrais NPK :

Ajustement du modèle de Laggoune (s : paramètre ; SCE : Somme des carrés des écarts)

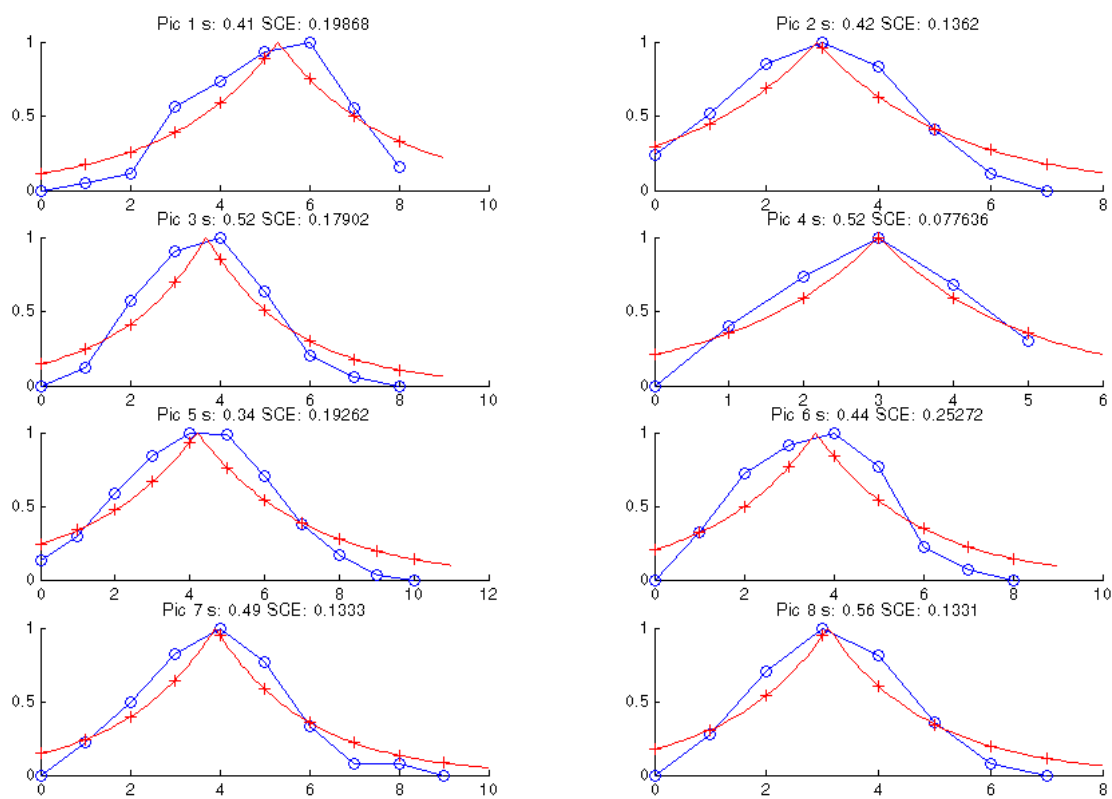


Ajustement du modèle proposé (m : paramètre ; SCE : Somme des carrés des écarts)

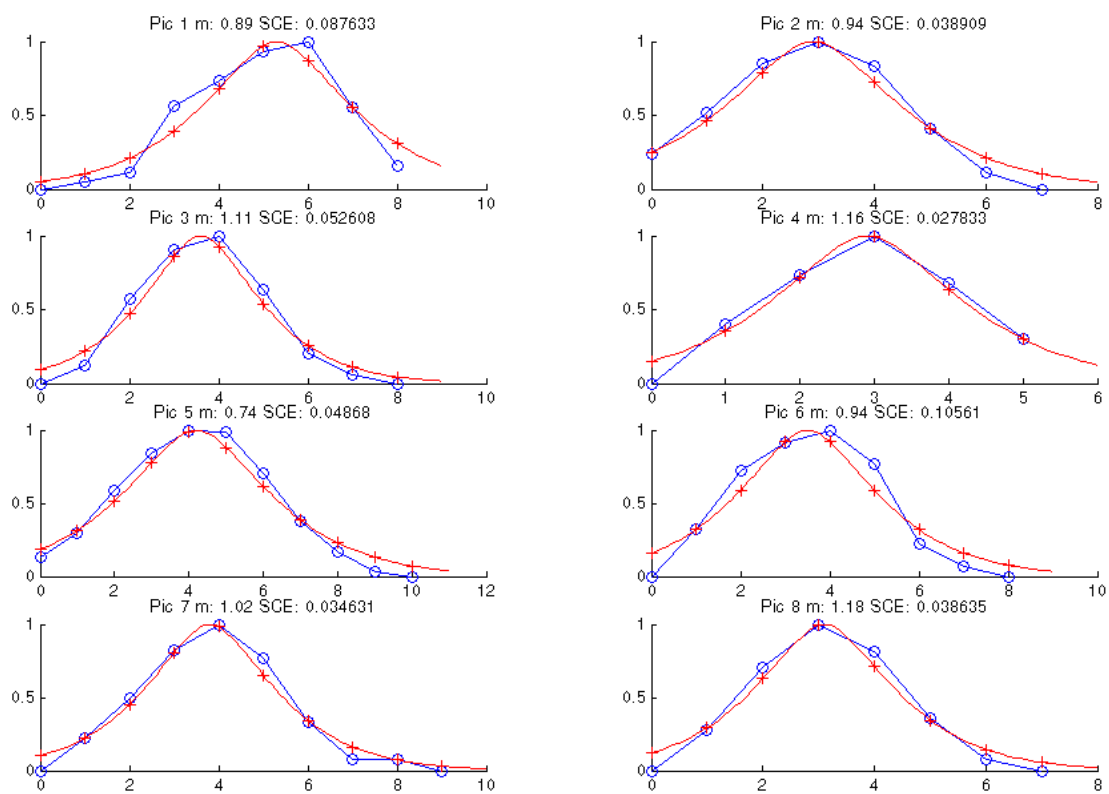


Pour l'ammonitrate :

Ajustement du modèle de Laggoune (s : paramètre ; SCE : Somme des carrés des écarts)

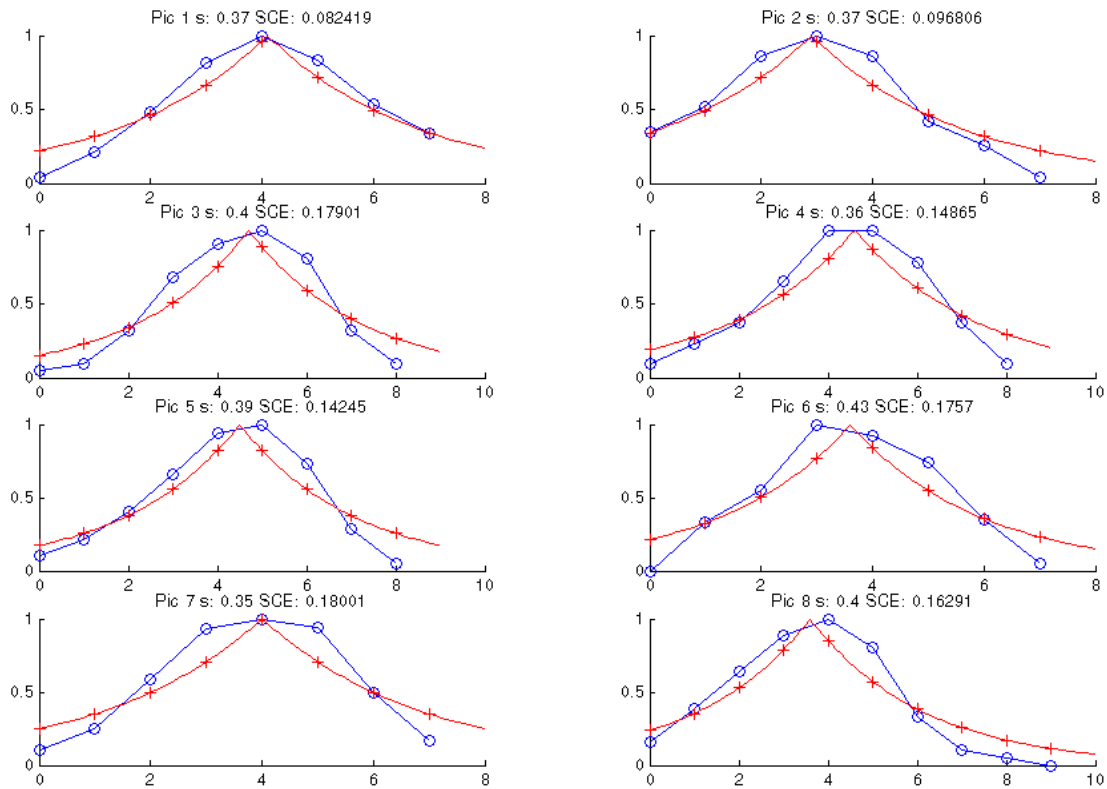


Ajustement du modèle proposé (m : paramètre ; SCE : Somme des carrés des écarts)

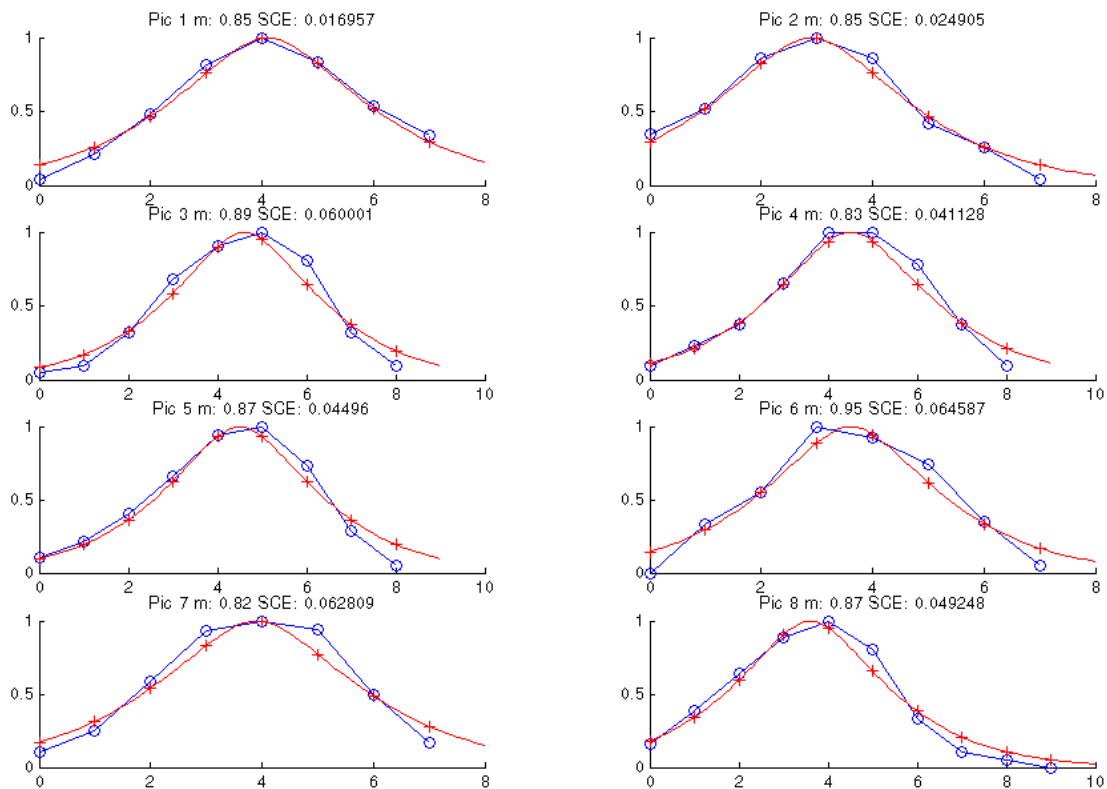


Pour les billes :

Ajustement du modèle de Laggoune (s : paramètre ; SCE : Somme des carrés des écarts)



Ajustement du modèle proposé (m : paramètre ; SCE : Somme des carrés des écarts)



6 ANNEXE RELATIVE A LA STABILITE DU FILTRE DE DERIVATION

L'objectif de cette annexe est de démontrer la stabilité du filtre $f(x)$ défini par :

$$f(x) = (a_3 \sin \omega |x| + a_4 \cos \omega |x|) e^{-\alpha |x|} + a_5 e^{-s |x|} + a_6 e^{-p |x|}$$

La stabilité de ce filtre est prouvée en montrant que $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |f(n)|$ converge.

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |f(n)| = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |(a_3 \sin \omega |x| + a_4 \cos \omega |x|) e^{-\alpha |x|} + a_5 e^{-s |x|} + a_6 e^{-p |x|}|$$

La somme peut donc être majorée de la manière suivante :

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |f(n)| \leq \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (|a_3 \sin \omega |x| + a_4 \cos \omega |x|| e^{-\alpha |x|} + |a_5| e^{-s |x|} + |a_6| e^{-p |x|})$$

Concernant le terme en sinus et cosinus, une majoration est :

$$|a_3 \sin \omega |x| + a_4 \cos \omega |x|| \leq \sqrt{a_3^2 + a_4^2}$$

En ce qui concerne les termes en exponentielles, de manière générale, $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{-k|n|}$ converge pour

tout $k > 0$ et on a : $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} e^{-k|n|} = \frac{1+e^{-k}}{1-e^{-k}}$

En conclusion, pour α , s et p strictement positifs la somme infinie $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |f(n)|$ converge puisqu'elle est majorée par une constante :

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |f(n)| \leq \sqrt{a^2 + b^2} \left(\frac{1+e^{-\alpha}}{1-e^{-\alpha}} \right) + |a_5| \left(\frac{1+e^{-s}}{1-e^{-s}} \right) + |a_6| \left(\frac{1+e^{-p}}{1-e^{-p}} \right)$$

7 ANNEXE RELATIVE A LA DETERMINATION DES COEFFICIENTS DES FILTRES DE DETECTION ET REGULARISATION

Cette annexe donne quelques compléments sur les calculs menés pour déterminer l'expression des coefficients des filtres de détection et de régularisation proposés dans ce document.

L'expression de ces coefficients est recherchée de manière à vérifier diverses contraintes :

- maximum de la fonction de détection en 0,
- réponse du filtre de détection nulle si l'entrée est une constante,
- conservation de la dynamique de l'image pour le filtre de lissage.

7.1 CONTRAINTE SUR f EN 0

La fonction de détection devant être maximale en 0, sa dérivée doit être nulle en ce point.

Pour calculer la dérivée, les cas $x \geq 0$ et $x \leq 0$ sont distingués.

L'expression de $f(x)$ est :

$$\begin{aligned} \text{pour } x \geq 0 \quad f(x) &= (a_3 \sin \omega x + a_4 \cos \omega x) e^{-\alpha x} + a_5 e^{-sx} + a_6 e^{-px} \\ \text{pour } x \leq 0 \quad f(x) &= (-a_3 \sin \omega x + a_4 \cos \omega x) e^{\alpha x} + a_5 e^{sx} + a_6 e^{px} \end{aligned}$$

La dérivée est :

$$\begin{aligned} \text{pour } x \geq 0 \quad f'(x) &= -(a_3 \alpha + a_4 \omega) \sin \omega x + (a_3 \omega - a_4 \alpha) \cos \omega x e^{-\alpha x} - a_5 s e^{-sx} - a_6 p e^{-px} \\ \text{pour } x \leq 0 \quad f'(x) &= -(a_3 \alpha + a_4 \omega) \sin \omega x + (-a_3 \omega + a_4 \alpha) \cos \omega x e^{-\alpha x} + a_5 s e^{sx} + a_6 p e^{px} \end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \text{pour } x \geq 0 \quad f'(0^+) &= a_3 \omega - a_4 \alpha - a_5 s - a_6 p \\ \text{pour } x \leq 0 \quad f'(0^-) &= -a_3 \omega + a_4 \alpha + a_5 s + a_6 p \end{aligned}$$

Imposer $f'(0^+) = f'(0^-) = 0$ revient donc à imposer :

$$a_3 \omega - a_4 \alpha - a_5 s - a_6 p = 0 \quad (\text{A7.1})$$

Cette condition implique la continuité de la dérivée du filtre en 0.

Cette condition sera vérifiée en imposant à la solution particulière de l'équation différentielle d'être maximum en zéro ce qui implique :

$$a_5 s + a_6 p = 0 \quad (\text{A7.2})$$

Cette écriture n'est pas en forte contradiction avec les expressions de a_5 et a_6 en fonction de λ_1 , λ_2 , λ_3 et λ_4 qui ont été établies lors de l'expression de la solution particulière à l'équation différentielle de définition du filtre.

En effet :

$$a_5 s + a_6 p = \frac{-(\lambda_3 + \lambda_4 s^2)}{2(1 - \lambda_1 s^2 + \lambda_2 s^4)} + \frac{(\lambda_3 + \lambda_4 p^2)}{2(1 - \lambda_1 p^2 + \lambda_2 p^4)}$$

En remplaçant respectivement les paramètres s et p par $(m-d)$ et $(m+d)$, l'expression précédente devient :

$$a_5 s + a_6 p = \frac{-\left(\lambda_3 + \lambda_4(m-d)^2\right)}{2\left(1 - \lambda_1(m-d)^2 + \lambda_2(m-d)^4\right)} + \frac{\left(\lambda_3 + \lambda_4(m+d)^2\right)}{2\left(1 - \lambda_1(m+d)^2 + \lambda_2(m+d)^4\right)}$$

Cette expression tend vers zéro lorsque d est petit devant m quelles que soient les valeurs de $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 .

On déduit alors de (A7.1) et (A7.2) que les conditions à respecter sont:

$$\begin{cases} a_3 \omega = a_4 \alpha \\ a_5 s = -a_6 p \end{cases}$$

Les coefficients du filtre de détection peuvent donc être écrits de la manière suivante :

$$a_5 = \frac{c_1}{s} ; a_6 = -\frac{c_1}{p} ; a_3 = \frac{c_2}{\omega} ; a_4 = \frac{c_2}{\alpha}$$

Les coefficients c_1 et c_2 seront déterminés de manière à respecter les autres contraintes imposées sur les filtres de détection et de lissage.

7.2 CONTRAINTES SUR LA REPONSE DE f A UNE ENTREE CONSTANTE

Les coefficients de la fonction de détection sont choisis de manière à ce que le filtre de détection réponde zéro à une entrée constante non nulle.

Le filtre développé étant destiné à une utilisation dans le domaine discret, la contrainte retenue est :

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k) = 0$$

Le calcul de cette somme est facilité par l'utilisation de la transformée en Z de f , notée F .

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(k) = F(1) = \frac{a_4(1 - e^{-2\alpha}) + 2a_3 e^{-\alpha} \sin \omega}{1 - 2e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-2\alpha}} + a_5 \frac{1 + e^{-s}}{1 - e^{-s}} + a_6 \frac{1 + e^{-p}}{1 - e^{-p}}$$

La contrainte à respecter est donc :

$$a_3 k_3 + a_4 k_4 + a_5 k_5 + a_6 k_6 = 0$$

avec :

$$\begin{aligned} k_3 &= \frac{2e^{-\alpha} \sin \omega}{1 - 2e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-2\alpha}} & k_5 &= \frac{1 + e^{-s}}{1 - e^{-s}} \\ k_4 &= \frac{1 - e^{-2\alpha}}{1 - 2e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-2\alpha}} & k_6 &= \frac{1 + e^{-p}}{1 - e^{-p}} \end{aligned}$$

7.3 CONSERVATION DE LA DYNAMIQUE DE L'IMAGE POUR LE FILTRE DE LISSAGE

La conservation de la dynamique de l'image lissée par l'opérateur de régularisation impose dans le domaine discret : $\sum_{k=-\infty}^{+\infty} g(k) = G(1) = 1$ où $G(z)$ est la transformée en Z de $g(x)$.

Cette condition a pour expression :

$$(-a_3 k_8 - a_4 k_7) k_4 - (a_3 k_7 - a_4 k_8) k_3 - \frac{a_5}{s^2} k_5 - \frac{a_6}{p^2} k_6 = 1$$

avec :

$$k_7 = \frac{\alpha^2 - \omega^2}{(\alpha^2 + \omega^2)^2} \quad k_8 = \frac{2\alpha\omega}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$$

7.4 EXPRESSION DES COEFFICIENTS

Les coefficients du filtre sont exprimés de manière à ce que la réponse du filtre discret à une entrée constante soit nulle et de manière à ce que le filtre de lissage conserve l'amplitude du signal d'entrée, ce qui revient à résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} a_3 k_3 + a_4 k_4 + a_5 k_5 + a_6 k_6 = 0 \\ (-a_3 k_8 - a_4 k_7) k_4 - (a_3 k_7 - a_4 k_8) k_3 - \frac{a_5}{s^2} k_5 - \frac{a_6}{p^2} k_6 = 1 \end{cases}$$

$$\text{avec } a_5 = \frac{c_1}{s} ; a_6 = -\frac{c_1}{p} ; a_3 = \frac{c_2}{\omega} ; a_4 = \frac{c_2}{\alpha}$$

L'expression des coefficients c_1 et c_2 est alors :

$$c_1 = \frac{1}{\left(\frac{k_5/s - k_6/p}{k_4/\alpha + k_3/\omega} \right) \left(\left(\frac{k_7}{\alpha} + \frac{k_8}{\omega} \right) k_4 + \left(\frac{k_7}{\omega} - \frac{k_8}{\alpha} \right) k_3 \right) - \left(\frac{k_5}{s^3} - \frac{k_6}{p^3} \right)}$$

$$c_2 = - \left(\frac{k_5/s - k_6/p}{k_4/\alpha + k_3/\omega} \right) c_1$$

7.4.1 IMPLEMENTATION RECURSIVE

L'expression des transformées en Z conduit à une implémentation récursive de quatrième ordre des filtres de détection et de lissage.

La partie causale $F_+(z)$ et la partie anti-causale $F_-(z)$ de la transformée en z du filtre $f(x)$ de dérivation peuvent être écrites sous la forme :

$$F_+(z) = \frac{a_4 + (a_3 \sin \omega - a_4 \cos \omega) e^{-\alpha} z^{-1}}{1 - 2e^{-\alpha} \cos \omega z^{-1} + e^{-2\alpha} z^{-2}} + \frac{a_5}{1 - e^{-s} z^{-1}} + \frac{a_6}{1 - e^{-p} z^{-1}}$$

$$F_-(z) = \frac{(a_3 \sin \omega + a_4 \cos \omega) e^{-\alpha} z - a_4 e^{-2\alpha} z^2}{1 - 2e^{-\alpha} \cos \omega z + e^{-2\alpha} z^2} + \frac{a_5 e^{-s} z}{1 - e^{-s} z} + \frac{a_6 e^{-p} z}{1 - e^{-p} z}$$

soit :

$$F_+(z) = \frac{a_{10} + a_{11}z^{-1} + a_{12}z^{-2} + a_{13}z^{-3}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}}$$

$$F_-(z) = \frac{a_{14}z + a_{15}z^2 + a_{16}z^3 + a_{17}z^4}{1 + b_1z^1 + b_2z^2 + b_3z^3 + b_4z^4}$$

Les équations aux différences de l'opérateur de détection sont déduites de ces expressions :

$$y_+(n) + b_1y_+(n-1) + b_2y_+(n-2) + b_3y_+(n-3) + b_4y_+(n-4)$$

$$= a_{10}x(n) + a_{11}x(n-1) + a_{12}x(n-2) + a_{13}x(n-3)$$

$$y_-(n) + b_1y_-(n-1) + b_2y_-(n-2) + b_3y_-(n-3) + b_4y_-(n-4)$$

$$= a_{14}x(n+1) + a_{15}x(n+2) + a_{16}x(n+3) + a_{17}x(n+4)$$

Une normalisation peut être réalisée par un coefficient N_f :

$$y(n) = N_f (y_+(n) + y_-(n))$$

en définissant par exemple N_f de manière à rendre unitaire la réponse du filtre au modèle de contour en 0 :

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} N_f f(x)C(-x) = 1$$

Les expressions des coefficients sont données en fin de paragraphe.

De manière analogue, pour le filtre de régularisation, la partie causale $G_+(z)$ et la partie anti-causale $G_-(z)$ de la transformée en z du filtre $g(x)$ sont :

$$G_+(z) = - \left(\frac{a_8 + (a_7 \sin \omega - a_8 \cos \omega) e^{-\alpha} z^{-1}}{1 - 2e^{-\alpha} \cos \omega z^{-1} + e^{-2\alpha} z^{-2}} + \frac{a_5}{s^2 (1 - e^{-s} z^{-1})} + \frac{a_6}{p^2 (1 - e^{-p} z^{-1})} \right)$$

$$G_-(z) = - \left(\frac{(a_7 \sin \omega + a_8 \cos \omega) e^{-\alpha} z - a_8 e^{-2\alpha} z^2}{1 - 2e^{-\alpha} \cos \omega z + e^{-2\alpha} z^2} + \frac{a_5 e^{-s} z}{s^2 (1 - e^{-s} z)} + \frac{a_6 e^{-p} z}{p^2 (1 - e^{-p} z)} \right)$$

soit :

$$G_+(z) = - \frac{a_{20} + a_{21}z^{-1} + a_{22}z^{-2} + a_{23}z^{-3}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}}$$

$$G_-(z) = - \frac{a_{24}z + a_{25}z^2 + a_{26}z^3 + a_{27}z^4}{1 + b_1z^1 + b_2z^2 + b_3z^3 + b_4z^4}$$

Les équations aux différences de l'opérateur de régularisation sont déduites de ces expressions :

$$y_+(n) + b_1y_+(n-1) + b_2y_+(n-2) + b_3y_+(n-3) + b_4y_+(n-4)$$

$$= -a_{20}x(n) - a_{21}x(n-1) - a_{22}x(n-2) - a_{23}x(n-3)$$

$$y_-(n) + b_1y_-(n-1) + b_2y_-(n-2) + b_3y_-(n-3) + b_4y_-(n-4)$$

$$= -a_{24}x(n+1) - a_{25}x(n+2) - a_{26}x(n+3) - a_{27}x(n+4)$$

Avec :

$$a_{10} = a_4 + a_5 + a_6$$

$$a_{11} = a_3 e^{-\alpha} \sin \omega - a_4 (e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-s} + e^{-p}) - a_5 (e^{-p} + 2e^{-\alpha} \cos \omega) - a_6 (e^{-s} + 2e^{-\alpha} \cos \omega)$$

$$a_{12} = -a_3 (e^{-s} + e^{-p}) e^{-\alpha} \sin \omega + a_4 ((e^{-s} + e^{-p}) e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-(s+p)}) \\ + a_5 (e^{-2\alpha} + 2e^{-(\alpha+p)} \cos \omega) + a_6 (e^{-2\alpha} + 2e^{-(s+\alpha)} \cos \omega)$$

$$a_{13} = (a_3 \sin \omega - a_4 \cos \omega) e^{-(\alpha+s+p)} - (a_5 e^{-p} + a_6 e^{-s}) e^{-2\alpha}$$

$$a_{14} = (a_3 \sin \omega + a_4 \cos \omega) e^{-\alpha} + a_5 e^{-s} + a_6 e^{-p}$$

$$a_{15} = -a_3 (e^{-s} + e^{-p}) e^{-\alpha} \sin \omega - a_4 ((e^{-s} + e^{-p}) e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-2\alpha}) \\ - a_5 (e^{-(s+p)} + 2e^{-(\alpha+s)} \cos \omega) - a_6 (e^{-(s+p)} + 2e^{-(\alpha+p)} \cos \omega)$$

$$a_{16} = a_3 e^{-(\alpha+s+p)} \sin \omega + a_4 (e^{-(\alpha+s+p)} \cos \omega + e^{-2\alpha} (e^{-s} + e^{-p})) \\ + a_5 (e^{-(s+2\alpha)} + 2e^{-(\alpha+s+p)} \cos \omega) + a_6 (e^{-(p+2\alpha)} + 2e^{-(\alpha+s+p)} \cos \omega)$$

$$a_{20} = a_8 + \frac{a_5}{s^2} + \frac{a_6}{p^2}$$

$$a_{21} = a_7 e^{-\alpha} \sin \omega - a_8 (e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-s} + e^{-p}) - \frac{a_5}{s^2} (e^{-p} + 2e^{-\alpha} \cos \omega) - \frac{a_6}{p^2} (e^{-s} + 2e^{-\alpha} \cos \omega)$$

$$a_{22} = -a_7 (e^{-s} + e^{-p}) e^{-\alpha} \sin \omega + a_8 ((e^{-s} + e^{-p}) e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-(s+p)}) \\ + \frac{a_5}{s^2} (e^{-2\alpha} + 2e^{-(\alpha+p)} \cos \omega) + \frac{a_6}{p^2} (e^{-2\alpha} + 2e^{-(s+\alpha)} \cos \omega)$$

$$a_{23} = (a_7 \sin \omega - a_8 \cos \omega) e^{-(\alpha+s+p)} - \left(\frac{a_5}{s^2} e^{-p} + \frac{a_6}{p^2} e^{-s} \right) e^{-2\alpha}$$

$$a_{24} = (a_7 \sin \omega + a_8 \cos \omega) e^{-\alpha} + \frac{a_5}{s^2} e^{-s} + \frac{a_6}{p^2} e^{-p}$$

$$a_{25} = -a_7 (e^{-s} + e^{-p}) e^{-\alpha} \sin \omega - a_8 ((e^{-s} + e^{-p}) e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-2\alpha}) \\ - \frac{a_5}{s^2} (e^{-(s+p)} + 2e^{-(\alpha+s)} \cos \omega) - \frac{a_6}{p^2} (e^{-(s+p)} + 2e^{-(\alpha+p)} \cos \omega)$$

$$a_{26} = a_7 e^{-(\alpha+s+p)} \sin \omega + a_8 (e^{-(\alpha+s+p)} \cos \omega + e^{-2\alpha} (e^{-s} + e^{-p})) \\ + \frac{a_5}{s^2} (e^{-(s+2\alpha)} + 2e^{-(\alpha+s+p)} \cos \omega) + \frac{a_6}{p^2} (e^{-(p+2\alpha)} + 2e^{-(\alpha+s+p)} \cos \omega)$$

$$a_{27} = - \left(a_8 + \frac{a_5}{s^2} + \frac{a_6}{p^2} \right) e^{-(2\alpha+s+p)}$$

$$b_1 = -(2e^{-\alpha} \cos \omega + e^{-s} + e^{-p})$$

$$b_2 = 2e^{-\alpha} \cos \omega (e^{-s} + e^{-p}) + e^{-2\alpha} + e^{-(s+p)}$$

$$b_3 = -e^{-2\alpha} (e^{-s} + e^{-p}) - 2e^{-\alpha} \cos \omega e^{-(s+p)}$$

$$b_4 = e^{-2\alpha-(s+p)}$$

$$\begin{aligned}
N_f = & 2 \frac{sp}{p-s} \left(\frac{1}{s} \frac{a_3 e^{-(\alpha+s)} \sin \omega + a_4 (1 - e^{-(\alpha+s)} \cos \omega)}{1 - 2e^{-(\alpha+s)} \cos \omega + e^{-2(\alpha+s)}} - \frac{1}{p} \frac{a_3 e^{-(\alpha+p)} \sin \omega + a_4 (1 - e^{-(\alpha+p)} \cos \omega)}{1 - 2e^{-(\alpha+p)} \cos \omega + e^{-2(\alpha+p)}} \right. \\
& \left. + \frac{a_5}{s} \frac{1}{1 - e^{-2s}} + \frac{1}{1 - e^{-(s+p)}} \left(\frac{a_6}{s} - \frac{a_5}{p} \right) - \frac{a_6}{p} \frac{1}{1 - e^{-2p}} \right) - (a_4 + a_5 + a_6)
\end{aligned}$$

8 ANNEXE RELATIVE A LA DEFINITION DES CRITERES DE CANNY DISCRETS

8.1 CRITERE DE DETECTION

Il s'agit du rapport du RSB de sortie sur le RSB d'entrée. L'expression de ce critère dans le cas discret ne pose pas de problème particulier. Elle se limite à la transformation des intégrales du critère continu de Canny en sommes discrètes :

$$\Sigma_d = \frac{1}{E} \frac{s(0)}{\sqrt{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} f^2(n)}}$$

où $s(0)$ est la réponse à l'origine du filtre discret au signal d'entrée non bruité $e(x)$.

8.2 CRITERE DE LOCALISATION

Dans le cas continu, ce critère fait appel à l'expression des dérivées du filtre.

$$\Lambda = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} e'(-x) f'(x) dx \right|}{\sigma_b \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} f'(x)^2 dx}}$$

avec σ_b l'écart-type du bruit.

Le passage au cas discret est alors plus complexe.

L'expression du critère de localisation dans le cas discret est obtenue en utilisant la démarche proposée par Demigny et Kamleh (1997).

De manière générale, la dérivée discrète d'une fonction échantillonnée $\varphi(k)$ au point n est définie par :

$$\varphi'(n) = \varphi(n) - \varphi(n-1)$$

On définit également :

$$\varphi''(n) = \varphi'(n) - \varphi'(n-1)$$

$$\varphi''(n) = \varphi(n) - 2\varphi(n-1) + \varphi(n-2)$$

Pour une fonction paire, on remarque que : $\varphi'(n) = -\varphi'(-n+1)$

8.2.1 PROBABILITE DE LOCALISATION DU MAXIMUM

Considérons le signal d'entrée bruité : $e_b(n) = e(n) + b(n)$

où $e(n)$ est le signal d'entrée « pur » et $b(n)$ est un bruit blanc gaussien centré de variance σ_b^2

On considèrera que quels que soient n_1 et n_2 , $b(n_1)$ et $b(n_2)$ sont indépendants.

Soit $s_b(n)$ la réponse du filtre au signal d'entrée bruité $e_b(n)$. La dérivée du signal de sortie est :

$$s_b'(n) = (e_b * f(n))' = e_b * f'(n)$$

$$s_b'(n) = s'(n) + b_f'(n)$$

avec :

$$s'(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} e(k) (f(n-k) - f(n-k-1)) \quad \text{signal « pur » filtré}$$

$$b_f'(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} b(k) (f(n-k) - f(n-k-1)) \quad \text{bruit filtré}$$

Supposons que $s_b(n)$ ait un pic en n_0 .

Pour qu'un maximum de $s_b(n)$ soit détecté en $n = n_0$, il faut que : $s_b'(n_0) > 0$ et $s_b'(n_0+1) < 0$

$b_f'(n_0)$ et $b_f'(n_0+1)$ sont deux variables aléatoires gaussiennes centrées (somme de produits de variables aléatoires gaussiennes centrées avec des coefficients dépendant du filtre).

8.2.2 VARIANCE DE $b_f'(n)$

La variable aléatoire $b_f'(n)$ a pour variance :

$$\sigma_{b_f'(n)}^2 = \text{var} \left(b_f'(n) \right) = \text{var} \left(\sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} b(k) (f(n-k) - f(n-k-1)) \right)$$

Les variables aléatoires $b(k)$ étant indépendantes,

$$\sigma_{b_f'(n)}^2 = \sigma_b^2 \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} (f(n-k) - f(n-k-1))^2 \quad (\text{A8.1})$$

En développant le carré, il apparaît que les sommes infinies sont indépendantes de n . La variance de $b_f'(n)$ est donc pour tout n :

$$\sigma^2 = 2\sigma_b^2 \left(\sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} f(k)^2 - \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} f(k)f(k-1) \right)$$

$$\sigma^2 = 2\sigma_b^2 \left(f * f(n) \Big|_{n=0} - f * f(n) \Big|_{n=1} \right)$$

La variance étant indépendante de n , elle peut notamment être calculée à partir de l'expression (A8.1) en prenant $n = 0$. On obtient alors :

$$\sigma^2 = \sigma_b^2 \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} (f(-k) - f(-k-1))^2$$

$$\sigma^2 = \sigma_b^2 \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} (f(k) - f(k+1))^2$$

D'où on déduit :
$$\sigma^2 = \sigma_b^2 \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} f'(k)^2$$

Il résulte que, pour tout n_0 , les variables aléatoires $b_f'(n_0)$ et $b_f'(n_0+1)$ ont même variance σ^2 .

8.2.3 COEFFICIENT DE CORRELATION ENTRE $b_f'(n_0)$ ET $b_f'(n_0+1)$

Les variables $b(n_0)$ et $b(n_0+1)$ sont indépendantes, mais l'application du filtrage rend $b_f'(n_0)$ et $b_f'(n_0+1)$ non indépendantes.

Les deux variables aléatoires étant centrées, le coefficient de corrélation entre $b_f'(n_0)$ et $b_f'(n_0+1)$ est défini par :

$$\gamma = \frac{E(b_f'(n_0)b_f'(n_0+1))}{\sigma_{b_f'(n_0)}\sigma_{b_f'(n_0+1)}} = \frac{E(b_f'(n_0)b_f'(n_0+1))}{\sigma^2}$$

En développant $(b_f'(n_0) - b_f'(n_0+1))^2$ on déduit que

$$\begin{aligned} b_f'(n_0)b_f'(n_0+1) &= \frac{1}{2}(b_f'(n_0)^2 + b_f'(n_0+1)^2 - (b_f'(n_0) - b_f'(n_0+1))^2) \\ E(b_f'(n_0)b_f'(n_0+1)) &= \frac{1}{2}(E(b_f'(n_0)^2) + E(b_f'(n_0+1)^2) - E((b_f'(n_0) - b_f'(n_0+1))^2)) \end{aligned}$$

Les deux premiers termes ont déjà été calculés : $E(b_f'(n_0)^2) = E(b_f'(n_0+1)^2) = \sigma^2$

Le dernier terme peut être exprimé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} E((b_f'(n_0) - b_f'(n_0+1))^2) &= \text{var}(b_f'(n_0) - b_f'(n_0+1)) \\ &= \text{var}\left(\sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} b(k)(f(n_0-k) - f(n_0-k-1)) - b(k)(f(n_0+1-k) - f(n_0-k))\right) \\ &= \text{var}\left(\sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} b(k)(f(n_0-k-1) - 2f(n_0-k) + f(n_0+1-k))\right) \end{aligned}$$

Les variables $b(k)$ étant indépendantes :

$$E((b_f'(n_0) - b_f'(n_0+1))^2) = \sigma_b^2 \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} (f(n_0-k-1) - 2f(n_0-k) + f(n_0+1-k))^2$$

La somme infinie ne dépendant pas de n_0 , on a :

$$E((b_f'(n_0) - b_f'(n_0+1))^2) = \sigma_b^2 \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} f''(k)^2$$

D'où :

$$\begin{aligned} E(b_f'(n_0)b_f'(n_0+1)) &= \sigma_b^2 \left(\sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} f'(k)^2 - \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} f''(k)^2 \right) \\ \gamma &= 1 - \frac{\sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} f''(k)^2}{2 \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} f'(k)^2} \end{aligned}$$

Dans le cas d'un filtre pair, on obtient :

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{2} \frac{f * f(n)|_{n=1} - f * f(n)|_{n=2}}{f * f(n)|_{n=0} - f * f(n)|_{n=1}} - \frac{1}{2} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Gamma_{ff}(1) - \Gamma_{ff}(2)}{\Gamma_{ff}(0) - \Gamma_{ff}(1)} - 1 \right) \end{aligned}$$

où Γ_{ff} est la fonction d'autocorrélation de f .

8.2.4 EXPRESSION DE LA PROBABILITE

En écrivant la loi normale à deux dimensions, la densité de probabilité d'un couple de variables aléatoires gaussiennes (x_0, x_1) est :

$$p(x_0, x_1) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\sqrt{1-\gamma^2}} \exp\left(-\frac{x_0^2 - 2\gamma x_0 x_1 + x_1^2}{2\sigma^2(1-\gamma^2)}\right)$$

La probabilité d'avoir un maximum localisé en n_0 est :

$$\begin{aligned} P(n_0) &= \text{Prob}(\text{maximum détecté en } n_0) \\ &= \text{Prob}(s_b'(n_0) > 0 \text{ et } s_b'(n_0+1) < 0) \\ &= \text{Prob}(b_f'(n_0) > -s'(n_0) \text{ et } -b_f'(n_0+1) > s'(n_0+1)) \\ P(n_0) &= \text{Prob}(b_f'(n_0) > -s'(n_0) \text{ et } b_f'(n_0+1) < s'(n_0+1)) \end{aligned}$$

Les variables aléatoires $b_f'(n_0)$ et $b_f'(n_0+1)$ ayant pour variance σ^2 et pour coefficient de corrélation γ , on déduit :

$$P(n_0) = \int_{-s'(n_0)}^{+\infty} \int_{-\infty}^{-s'(n_0+1)} p(x_1, x_2) dx_1 dx_2$$

8.2.5 EXPRESSION DU CRITERE DE LOCALISATION

Soit $(2N+1)$ la largeur de la zone dans laquelle on est sûr de détecter le contour. Cette zone est l'intervalle $[-N, N]$.

Soit $P(i)$ la probabilité de détecter le contour en i .

$$N = \arg \min_I \left(\sum_{i=-I}^{+I} P(i) \geq 1 \right)$$

Compte tenu de la symétrie du filtre

$$N = \arg \min_I \left(\frac{P(0)}{2} + \sum_{i=1}^I P(i) \geq 0.5 \right)$$

On définit la fonction $Q(i)$ de manière à ce qu'elle représente la probabilité de détecter le contour sur l'intervalle $[-N, N]$.

Cette fonction doit vérifier $\sum_{i=-N}^N Q(i) = 1$. On est donc conduit à la définir ainsi :

si $N \geq 2$

$$\begin{aligned} N > i \geq 0 & \quad Q(i) = P(i) \\ i = N & \quad Q(i) = 0.5 - \left(\frac{P(0)}{2} + \sum_{i=1}^{N-1} P(i) \right) \\ i > N & \quad Q(i) = 0 \end{aligned}$$

On en déduit la variance de la distance à laquelle on détecte le pic :

$$\sigma_{x0}^2 = 2 \sum_{i=0}^N i^2 Q(i)$$

Le critère de bonne localisation est alors :

$$\Lambda_d = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{x_0}^2}}$$

8.3 CRITERE DE FAIBLE MULTIPLICITE DES REPONSES

En absence de signal ($s(n) = 0$ et $s'(n) = 0$), la probabilité de détecter un maximum en 0 correspond à la probabilité d'avoir un maximum dû au bruit en un endroit quelconque (processus stationnaire). Cette probabilité est donc :

$$P(0) = \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^0 p(x_1, x_2) dx_1 dx_2$$

L'expression analytique de ce type d'intégrale est notamment donnée par Demigny et Kamlé (1997) :

$$P(0) = \frac{\arccos(\gamma)}{2\pi}$$

Le critère de faible multiplicité des réponses peut être pris égal à la distance moyenne x_m entre les maxima du bruit :

$$x_m = \frac{1}{P(0)} = \frac{2\pi}{\arccos(\gamma)}$$

Cette expression peut sembler différente de celle établie par Demigny et Kamlé (1997) au niveau du signe attribué à γ . En fait elle est identique, puisque nous avons considéré ici la corrélation entre $b_f'(n_0)$ et $b_f'(n_0+1)$ alors que Demigny et Kamlé considèrent la corrélation entre $b_f'(n_0)$ et $-b_f'(n_0+1)$.

9 ANNEXE RELATIVE A L'ADAPTATION DISCRETE DU FILTRE DE ZIOU

Ziou (1991) élabore son filtre en se basant sur une approximation de la dérivée seconde d'une gaussienne de la forme :

$$f(x) = (a \sin \omega |x| + b \cos \omega |x|) e^{-\alpha |x|} \quad (\text{A9.1})$$

où a , b , α et ω sont des constantes.

Afin d'obtenir dans le domaine continu une réponse nulle à une entrée nulle, l'auteur choisit de prendre :

$$f(x) = (-c\alpha \sin \omega |x| + c\omega \cos \omega |x|) e^{-\alpha |x|} \quad (\text{A9.2})$$

avec :

$$c = \frac{(1+b_1+b_2)(\alpha^2 + \omega^2)}{2\alpha e^{-\alpha} \sin(\omega) + \omega - \omega e^{-2\alpha}}, \quad b_1 = -2e^{-\alpha} \cos(\omega), \quad b_2 = e^{-2\alpha} \quad (\text{A9.3})$$

9.1 FONCTION DE DETECTION

Dans le domaine discret, le filtre numérique de détection tel qu'il a été défini par Ziou assure une réponse nulle à un signal d'entrée nul, mais il ne permet pas d'obtenir une réponse nulle à un signal d'entrée constant strictement positif. En effet, l'échantillonnage des fonctions continues transforme les intégrales en sommes discrètes. Or l'expression des paramètres a et b a été définie par Ziou à partir de la constante « c » de manière à ce que la fonction de détection vérifie dans le domaine continu : $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 0$.

Comme il est impossible d'obtenir $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) = 0$ à partir de l'expression (A9.2), l'étude est menée sur la forme échantillonnée issue de (A9.1):

$$f(n) = (a \sin \omega |n| + b \cos \omega |n|) e^{-\alpha |n|} \quad (\text{A9.4})$$

La transformée en Z de la fonction de détection est $F(z)$:

$$F(z) = F_+(z) + F_-(z) \quad \text{avec} \quad \text{pour la partie causale :} \quad F_+(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}$$

$$\text{pour la partie non-causale :} \quad F_-(z) = \frac{a_2 z + a_3 z^2}{1 + b_1 z + b_2 z^2}$$

Les coefficients s'expriment en fonction des deux constantes : a et b .

$$\begin{aligned} a_0 &= b & a_3 &= -b \cdot e^{-2\alpha} \\ a_1 &= (a \cdot \sin(\omega) - b \cdot \cos(\omega)) \cdot e^{-\alpha} & b_1 &= -2e^{-\alpha} \cos(\omega) \\ a_2 &= (a \cdot \sin(\omega) + b \cdot \cos(\omega)) \cdot e^{-\alpha} & b_2 &= e^{-2\alpha} \end{aligned}$$

La couronne de convergence est : $e^{-\alpha} < |z| < e^{\alpha}$.

La stabilité du filtre est assurée pour tout $\alpha > 0$ et on a alors : $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |f(n)| \leq \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \left(\frac{1 + e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha}} \right)$

9.2 FONCTION DE REGULARISATION

La fonction de régularisation est établie de manière à ce que : $f(x) = -g''(x)$.

On obtient ainsi : $g(n) = (A \sin \omega |n| + B \cos \omega |n|) e^{-\alpha |n|}$

avec : $A = -\frac{a(\alpha^2 - \omega^2) - 2\alpha\omega b}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$ et $B = -\frac{b(\alpha^2 - \omega^2) + 2\alpha\omega a}{(\alpha^2 + \omega^2)^2}$

La transformée en Z de la fonction de régularisation est G(z) :

$G(z) = G_+(z) + G_-(z)$ avec pour la partie causale : $G_+(Z) = \frac{a_4 + a_5 Z^{-1}}{1 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2}}$
pour la partie non-causale : $G_-(Z) = \frac{a_6 Z + a_7 Z^2}{1 + b_1 Z + b_2 Z^2}$

avec :

$$a_4 = B$$

$$a_5 = (A \sin(\omega) - B \cos(\omega)) e^{-\alpha}$$

$$a_6 = (A \sin(\omega) + B \cos(\omega)) e^{-\alpha}$$

$$a_7 = -B e^{-2\alpha}$$

9.3 CHOIX DES COEFFICIENTS a ET b

En prenant le filtre de détection sous la forme générale (A9.1), il devient possible d'assurer :

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) = 0. \text{ Il faut pour cela que : } a = b \frac{e^{-2\alpha} - 1}{2e^{-\alpha} \sin \omega}.$$

En posant :

$$a = c_d (e^{-2\alpha} - 1) \text{ et } b = c_d 2e^{-\alpha} \sin \omega,$$

la forme du filtre permettant d'obtenir une réponse nulle à une entrée constante dans le domaine discret est :

$$f(n) = c_d ((e^{-2\alpha} - 1) \sin(\omega |n|) + 2e^{-\alpha} \sin \omega \cos(\omega |n|)) e^{-\alpha |n|}$$

La valeur du paramètre c_d peut être choisie de manière à ce que $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n) = 1$:

$$c_d = \frac{(1 - 2e^{-\alpha} \cos(\omega) + e^{-2\alpha})(\alpha^2 + \omega^2)^2}{8\alpha\omega e^{-2\alpha} \sin^2(\omega) + 2\alpha\omega(e^{-2\alpha} - 1)^2} \quad (\text{A9.5})$$

Remarquons que si α se doit d'être strictement positif pour assurer la stabilité du filtre de détection, le signe du paramètre ω n'a, quant à lui, pas d'incidence (seule la valeur absolue de ω modifie la forme de la réponse impulsionnelle).

9.4 REPONSE FREQUENTIELLE

Bien que Ziou (1991) ne donne pas la transformée de Fourier de son filtre de détection, il est possible de la calculer. A partir de l'expression générale du filtre en fonction des coefficients

$$a \text{ et } b \text{ il vient : } \mathcal{F}(f) = \frac{-2a\omega(4\pi^2 f^2 - \omega^2 - \alpha^2) + 2b\alpha(4\pi^2 f^2 + \omega^2 + \alpha^2)}{(4\pi^2 f^2 - \omega^2)^2 + \alpha^2(8\pi^2 f^2 + 2\omega^2) + \alpha^4}$$

Pour caractériser le comportement en fréquence du filtre dans le domaine discret, il est cependant préférable de calculer $|F(e^{j2\pi f})|$ avec $F(z)$ la transformée en Z de la fonction $f(n)$.

$$|F(e^{j2\pi f})| = \frac{|A_0 + 2A_1 \cos 2\pi f|}{1 + b_1^2 + b_2^2 + 2b_1(1 + b_2) \cos 2\pi f + 2b_2 \cos 4\pi f}$$

$$\begin{aligned} \text{Avec } A_0 &= b - 2a.e^{-2\alpha}\sin(2\omega) - b.e^{-4\alpha} \\ A_1 &= (a.\sin(\omega) - b.\cos(\omega))e^{-\alpha} + (a.\sin(\omega) + b.\cos(\omega))e^{-3\alpha} \end{aligned}$$

Pour le filtre de Ziou on a : $a = -c.\alpha$ et $b = c.\omega$ avec c défini en (A9.3).

Pour le filtre modifié on a : $a = c_d.(e^{-2\alpha}-1)$ et $b = c_d.2e^{-\alpha}\sin\omega$ avec c_d défini en (A9.5).

Pour ces filtres, les réponses fréquentielles sont des fonctions réelles et paires.

L'allure de ces réponses (cf. figure A9-1) justifie l'utilisation du filtre modifié dans le domaine discret.

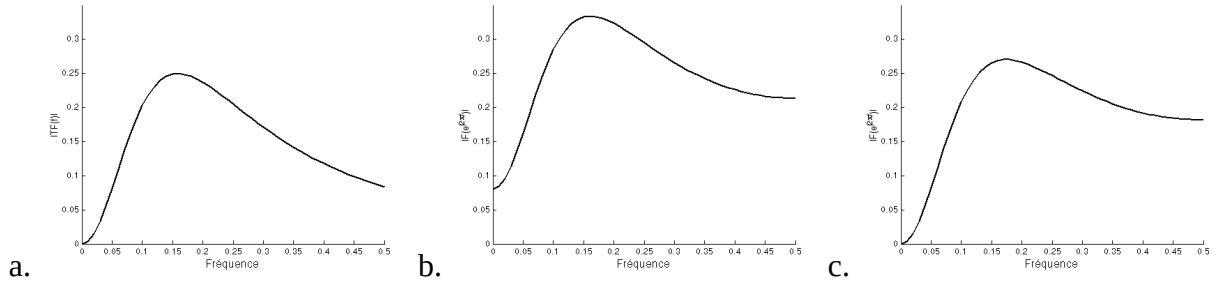


Figure A9-1 : Réponses fréquentielles du filtre de Ziou et du filtre de Ziou modifié ($\alpha=1$ et $\omega=0.01$). a – Réponse dans le domaine continu du filtre de Ziou ($\mathcal{F}(f)$) ; b – Réponse du filtre de Ziou dans le domaine discret ($|F(e^{j2\pi f})|$) ; c – Réponse du filtre de Ziou modifié dans le domaine discret ($|F(e^{j2\pi f})|$)

La fréquence correspondant à la valeur maximale de $|F(e^{j2\pi f})|$ est :

$$f = \frac{1}{2\pi} \arccos\left(\frac{-2b_2A_0 + \sqrt{D}}{4A_1b_2}\right)$$

$$\text{avec } D = (2b_2A_0)^2 - 4A_1b_2(b_1(1+b_2)A_0 - A_1(1+b_1^2+b_2^2-2b_2))$$

La réponse fréquentielle du filtre de régularisation $|G(e^{j2\pi f})|$ a également été établie.

$$|G(e^{j2\pi f})| = \frac{|D_0 + 2D_1 \cos 2\pi f|}{1 + b_1^2 + b_2^2 + 2b_1(1 + b_2) \cos 2\pi f + 2b_2 \cos 4\pi f}$$

$$\begin{aligned} \text{Avec } D_0 &= B.(1-e^{-4\alpha}) - 2A.\sin(2\omega)e^{-2\alpha} \\ D_1 &= (A.\sin(\omega).(1+e^{-2\alpha}) + B.\cos(\omega).(e^{-2\alpha}-1)).e^{-\alpha} \end{aligned}$$

9.5 CHOIX DES PARAMETRES α ET ω

Il est intéressant de guider le choix des paramètres du filtre en fonction des critères de performance.

Pour le filtre de Ziou modifié, le critère de détection dans le domaine discret peut être défini

$$\text{par : } \Sigma = \frac{1}{E} \frac{s(0)}{\sqrt{\sum_{-\infty}^{+\infty} f^2(n)}} = \frac{2 \frac{ae^{-(\alpha+1)} \sin \omega + b(1-e^{-(\alpha+1)} \cos \omega)}{1-2e^{-(\alpha+1)} \cos \omega + e^{-2(\alpha+1)}} - b}{\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{1-e^{-2\alpha}} + \frac{(b^2 - a^2)(1-e^{-2\alpha} \cos(2\omega)) + 2abe^{-2\alpha} \sin(2\omega)}{1-2e^{-2\alpha} \cos(2\omega) + e^{-4\alpha}} - b^2}}$$

où $s(0)$ est la réponse à l'origine du filtre discret au modèle de contour choisi : $C(x) = A.e^{-|x|}$.

Le paramètre de localisation et la distance moyenne entre deux maxima sont calculés numériquement dans le cas discret (voir annexe 8).

Pour un rapport signal sur bruit de 20 dB, l'allure des critères en fonction des paramètres α et ω est donnée en figure A9-2

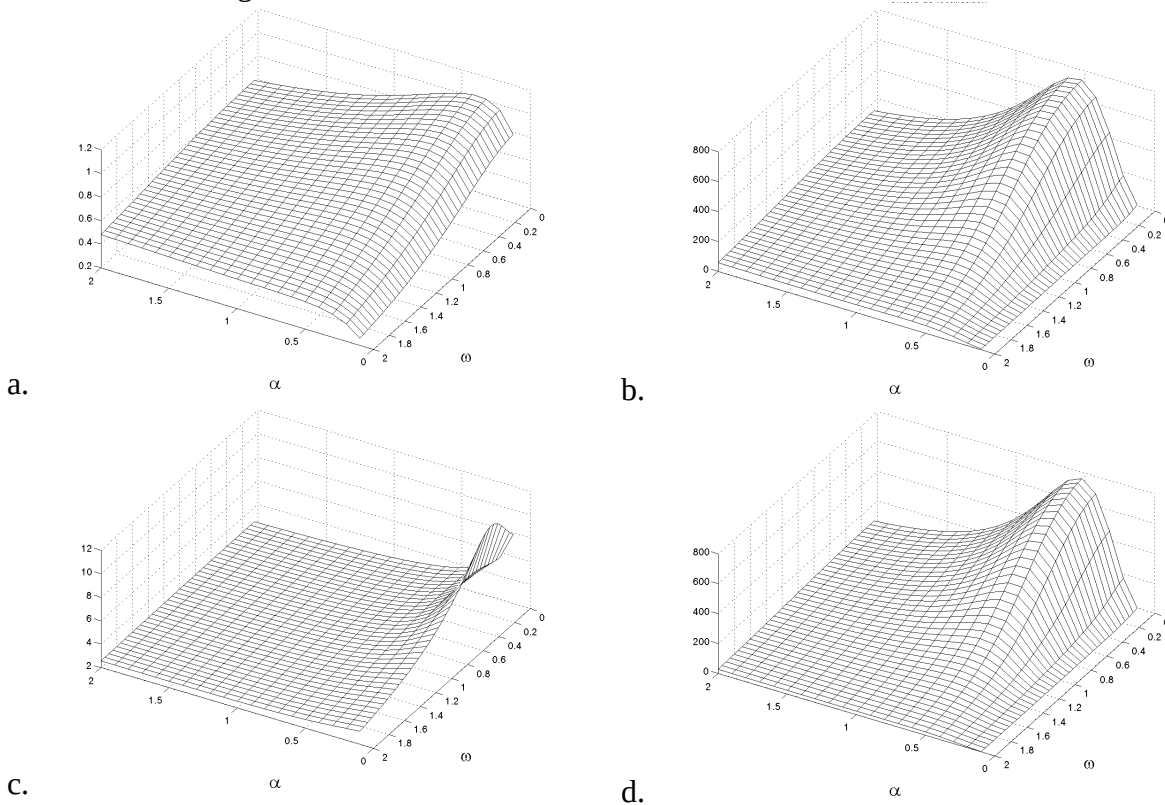


Figure 9-2 : Allure des critères de performance discrets pour un signal dont le RSB est de 20 dB : a – Détection ; b – Localisation ; c – Distance moyenne entre deux maxima ; d – Produit des critères de localisation et de détection.

La réponse en fréquence des filtres de détection et de régularisation pour $\omega = 0,01$ est représentée ci-après (figure 9-3) pour différentes valeurs du paramètre α .

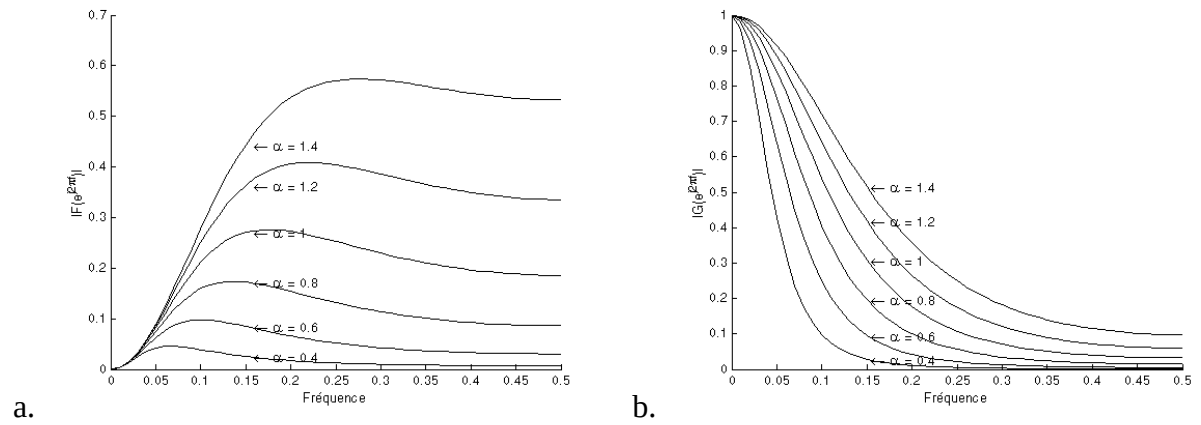


Figure 9-3 : Réponse en fréquence du filtre de dérivation $|F(e^{j2\pi f})|$ (a) et du filtre de lissage $|G(e^{j2\pi f})|$ (b) pour différentes valeurs de α et pour $\omega = 0.01$.

Compte tenu de l'allure des critères de performance, des réponses fréquentielles des filtres et des essais réalisés sur les images d'épandage, les valeurs choisies pour les paramètres sont :

$$\omega = 0.01 \quad \text{et} \quad \alpha = 1$$

10 ANNEXE RELATIVE AU CHOIX DE LA TAILLE DES ACCUMULATEURS ET DE LA LONGUEUR DU SEGMENT ANALYSE

Rappel des notations

$\mathcal{D}\theta_H$	droite d'inclinaison θ_H passant par l'origine du repère de calcul de la transformée de Hough.
(ρ_H, θ_H)	paramètres polaires de l'espace de Hough discrétisé
(ρ_{hD}, θ_{hD})	caractéristiques polaires de la droite constituant le support du segment étudié.
(ρ_{HD}, θ_{HD})	paramètres de l'accumulateur qui contient le couple (ρ_{hD}, θ_{hD})
$\Delta_q \rho$	pas de quantification de ρ_H .
$\Delta_q \theta$	pas d'échantillonnage de θ_H .
r_{ext}	rayon extérieur de la couronne d'investigation.
λ_{ext}	angle entre la droite d'inclinaison θ_H et le rayon de l'extrémité extérieure du segment.
ρ_{Sext}	position de la projection sur la droite d'inclinaison θ_H de l'extrémité du segment située sur l'extérieur de la couronne.
ρ_{Sint}	position de la projection sur la droite d'inclinaison θ_H de l'extrémité du segment située sur l'intérieur de la couronne.
$\varepsilon_\rho = \rho_{hD} - \rho_{HD}$	avec $\varepsilon_\rho \in [-\Delta_q \rho / 2, +\Delta_q \rho / 2]$
$\varepsilon_\theta = \theta_{HD} - \theta_{hD}$	avec $\varepsilon_\theta \in [0, \Delta_q \theta]$

10.1 RELATION ENTRE PAS DE QUANTIFICATION ET PAS D'ÉCHANTILLONNAGE

Le choix du pas d'échantillonnage de l'angle θ_h de la transformée est lié aux choix du pas de quantification du rayon ρ_h .

Considérons un segment S, de longueur L_s et dont le support est une droite de coordonnées polaires (ρ_{hD}, θ_{hD}) .

Soit (ρ_{HD}, θ_{HD}) les paramètres (valeurs discrètes) de l'accumulateur qui contient le couple (ρ_{hD}, θ_{hD}) tel que :

$$|\rho_{HD} - \rho_{hD}| \leq \Delta_q \rho / 2 \text{ et } |\theta_{HD} - \theta_{hD}| \leq \Delta_q \theta / 2$$

L'angle d'éjection d'une particule qui quitte le disque d'épandage étant calculé au moyen du paramètre ρ_{hD} caractérisant la droite support de la trajectoire empruntée par la particule, le pas de quantification de ce paramètre est étudié en priorité.

Le pas de quantification $\Delta_q \rho$ est recherché de manière à accueillir l'ensemble des votes correspondant aux pixels du segment S dans l'accumulateur de paramètres (ρ_{HD}, θ_{HD}) .

La relation entre $\Delta_q \rho$ et $\Delta_q \theta$ est établie sur la base d'un raisonnement géométrique illustré par la figure A10-1 en rappelant que pour un point P(x, y) le calcul de ρ_h revient à déterminer la position de la projection du point P sur la droite $\mathcal{D}\theta_{hD}$ passant par l'origine et d'inclinaison θ_{hD} .

Soit ρ_{Sext} la position de la projection sur la droite d'inclinaison θ_{HD} de l'extrémité du segment situé sur l'extérieur de la couronne.

L'expression de la valeur maximale de $|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$ est tout d'abord recherchée.

Géométriquement la figure A10-1 permet d'écrire :

$$\rho_{Sext} = r_{ext} \cos \lambda_{ext} \quad (A10.1)$$

où λ_{ext} est l'angle du rayon passant par l'extrémité du segment situé sur l'extérieur de la couronne par rapport à la droite $\mathcal{D}_{\theta_{hD}}$.

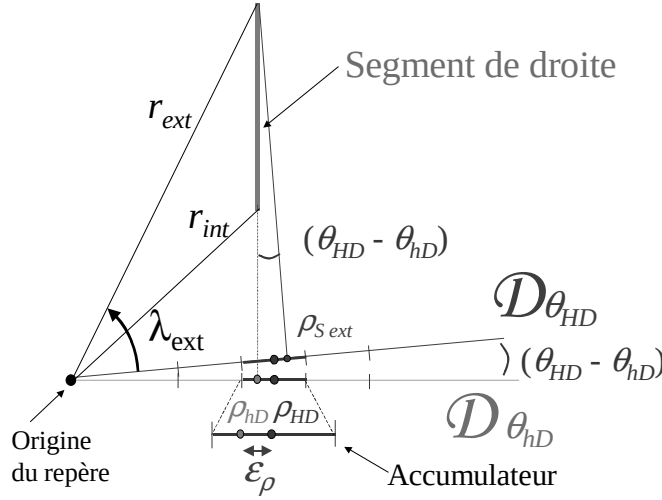


Figure A10-1 : Projection d'un segment sur les droites d'inclinaison θ_{HD} et θ_{hD} .

En différenciant l'expression (A10.1) par rapport à λ_{ext} , la variation sur ρ_{Sext} est :

$$\Delta \rho_{Sext} = -r_{ext} \sin \lambda_{ext} \cdot \Delta \lambda_{ext}$$

d'où :

$$\rho_{Sext} = \rho_{HD} + \epsilon_\rho + (r_{ext} \cdot \sin \lambda_{ext}) \cdot (\theta_{HD} - \theta_{hD})$$

avec $\epsilon_\rho = \rho_{hD} - \rho_{HD}$

En valeur absolue, l'écart entre le centre de l'accumulateur et la projection du point le plus éloigné du segment est :

$$|\rho_{Sext} - \rho_{HD}| = |\epsilon_\rho + (r_{ext} \cdot \sin \lambda_{ext}) \cdot (\theta_{HD} - \theta_{hD})|$$

Or les valeurs échantillonnées de l'angle θ_H autour de la valeur θ_{hD} sont :

$$(\theta_{hD} + \epsilon_\theta) \text{ et } (\theta_{hD} + (\epsilon_\theta - \Delta_q \theta))$$

avec $\epsilon_\theta = \theta_{HD} - \theta_{hD}$ variant de 0 à $\Delta_q \theta$.

L'écart entre le centre de l'accumulateur et la projection de l'extrémité du segment est donc :

$$|\rho_{Sext} - \rho_{HD}| = \text{Min} \{ |\epsilon_\rho + (r_{ext} \cdot \sin \lambda_{ext}) \cdot \epsilon_\theta|, |\epsilon_\rho + (r_{ext} \cdot \sin \lambda_{ext}) \cdot (\epsilon_\theta - \Delta_q \theta)| \} \quad (A10.2)$$

avec $\epsilon_\rho \in [-\Delta_q \rho / 2, +\Delta_q \rho / 2]$ et $\epsilon_\theta \in [0, \Delta_q \theta]$

Déterminons Max ($|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$) en examinant les différentes situations.

- **Cas 1** : Si $\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot \varepsilon_\theta < 0$

$$\begin{aligned} |\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot \varepsilon_\theta| &< |\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot (\varepsilon_\theta - \Delta_q \theta)| \\ |\rho_{Sext} - \rho_{HD}| &= |\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot \varepsilon_\theta| \\ |\rho_{Sext} - \rho_{HD}| &= -\varepsilon\rho - (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot \varepsilon_\theta \end{aligned}$$

La valeur maximale de $|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$ est obtenue pour $\varepsilon\rho = -\Delta_q \rho / 2$ et $\varepsilon_\theta = 0$.

On a alors Max ($|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$) = $\Delta_q \rho / 2$

- **Cas 2** : Si $\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot (\varepsilon_\theta - \Delta_q \theta) > 0$

$$\begin{aligned} |\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot \varepsilon_\theta| &> |\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot (\varepsilon_\theta - \Delta_q \theta)| \\ |\rho_{Sext} - \rho_{HD}| &= |\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot (\varepsilon_\theta - \Delta_q \theta)| \\ |\rho_{Sext} - \rho_{HD}| &= \varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot (\varepsilon_\theta - \Delta_q \theta) \end{aligned}$$

La valeur maximale de $|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$ est obtenue pour $\varepsilon\rho = \Delta_q \rho / 2$ et $\varepsilon_\theta = \Delta_q \theta$.

On a alors Max ($|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$) = $\Delta_q \rho / 2$

- **Cas 3** : Si $\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot \varepsilon_\theta > 0$ et $\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot (\varepsilon_\theta - \Delta_q \theta) < 0$

$$|\rho_{Sext} - \rho_H| = \text{Min} \{ (\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot \varepsilon_\theta) , (-\varepsilon\rho - (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot (\varepsilon_\theta - \Delta_q \theta)) \}$$

Le terme $(\varepsilon\rho + (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot \varepsilon_\theta)$ croît en fonction de $\varepsilon\rho$ et ε_θ .

Le terme $(-\varepsilon\rho - (r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext}) \cdot (\varepsilon_\theta - \Delta_q \theta))$ décroît en fonction de $\varepsilon\rho$ et ε_θ .

La valeur maximale de $|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$ est obtenue lorsque les deux termes sont égaux d'où :

$$\text{Max} (|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|) = r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext} \cdot \Delta_q \theta / 2$$

Pour que l'accumulateur contenant la valeur ρ_{HD} recueille l'ensemble des votes du segment, il faut que :

$$|\rho_{Sext} - \rho_{HD}| \leq \Delta_q \rho / 2$$

Seul le cas 3 peut ne pas respecter cette condition. On est donc conduit à imposer :

$$\begin{aligned} r_{ext} \cdot \sin\lambda_{ext} \cdot \Delta_q \theta &\leq \Delta_q \rho \\ \sqrt{r_{ext}^2 - \rho_{HD}^2} \cdot \Delta_q \theta &\leq \Delta_q \rho \end{aligned}$$

Pour le cas le plus défavorable, on prend :

$$\sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pixMin}^2} \cdot \Delta_q \theta \leq \Delta_q \rho \quad (\text{A10.3})$$

La figure A10-2 illustre l'évolution de $|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$ en fonction des valeurs de $\varepsilon\rho$ et ε_θ pour les données suivantes :

$$\begin{aligned} \Delta_q \rho &= 2 \text{ pixels} \\ \Delta_q \theta &= 0.15^\circ \\ r_{ext} &= 700 \text{ pixels} \\ r_{eq_pixMin} &= 230 \text{ pixels} \end{aligned}$$

Ces données vérifient la condition (A10.3).

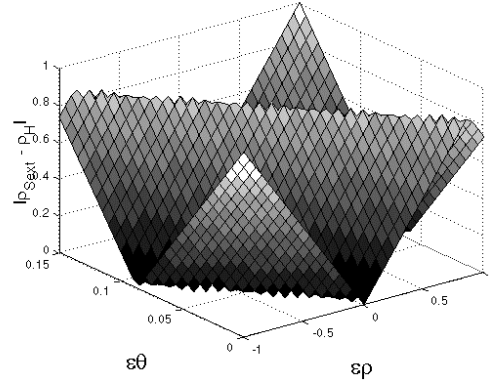


Figure A10-2 : Représentation graphique de $|\rho_{Sext} - \rho_{HD}|$ en fonction de ε_ρ et ε_θ

La condition (A10.3) assure que la taille de l'accumulateur comportant ρ_{HD} permet de retenir l'ensemble des votes mais elle n'empêche pas un autre accumulateur de contenir également l'ensemble des votes.

10.2 CHOIX DE LA LONGUEUR DU SEGMENT

En considérant que le rayon r_{ext} est fixé, on recherche maintenant une condition sur la longueur L_s du segment analysé qui permet d'éviter que la projection de l'ensemble du segment s'inscrive dans un accumulateur dont le paramètre ρ_H est éloigné de ρ_{HD} .

Considérons les accumulateurs situés à $2\Delta_q\rho$ de ρ_{HD} . Pour que la projection du segment analysé déborde d'un tel accumulateur il faut vérifier l'une des conditions suivantes :

- si $5\Delta_q\rho / 2 > |\rho_{Sint} - \rho_{HD}| > 3\Delta_q\rho / 2$ alors $|\rho_{Sext} - \rho_{HD}| > 5\Delta_q\rho / 2$
- si $5\Delta_q\rho / 2 > |\rho_{Sext} - \rho_{HD}| > 3\Delta_q\rho / 2$ alors $|\rho_{Sint} - \rho_{HD}| < 3\Delta_q\rho / 2$

Chacune de ces propositions aboutit à la même contrainte sur L_s .

Plaçons nous par exemple dans la première situation et dans le cas où $\rho_{Sint} - \rho_{HD} > 0$.

$$\begin{aligned} \text{On a : } \rho_{Sext} - \rho_{Sint} &= L_s \sin(\theta_{HD} - \theta_{HD} + 2\Delta_q\theta) = L_s \sin(\varepsilon_\theta + 2\Delta_q\theta) \\ \rho_{Sext} - \rho_{HD} &= \rho_{Sint} - \rho_{HD} + L_s \sin(\varepsilon_\theta + 2\Delta_q\theta) \end{aligned}$$

comme $\rho_{Sint} - \rho_{HD} > 3\Delta_q\rho / 2$ il faut donc que $L_s \sin(\varepsilon_\theta + 2\Delta_q\theta) > \Delta_q\rho$

En se plaçant dans le cas le plus défavorable ($\varepsilon_\theta = 0$) et en considérant que : $\sin(\varepsilon_\theta + 2\Delta_q\theta) \sim (\varepsilon_\theta + 2\Delta_q\theta)$,

on aboutit à :

$$L_s > \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta_q\rho}{\Delta_q\theta}$$

Soit d'après la relation (A10.3):

$$L_s > \frac{1}{2} \sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pixMin}^2} \quad (\text{A10.4})$$

Si on se fixe un rayon extérieur r_{ext} pour la couronne d'étude, le rayon intérieur r_{int} est déduit de l'introduction de (A10.4) dans la relation (6.8) établie en dans le chapitre 6 :

$$r_{int} = \sqrt{\frac{1}{4}r_{ext}^2 + \frac{3}{4}r_{eq_pixMin}^2}$$

10.3 CONTINUITE DU SUPPORT DES SINUSOÏDES ENGENDREES DANS L'ESPACE DE HOUGH.

En analysant le support de la sinusoïde engendrée dans l'espace de Hough par un point $M(x, y)$ de l'image, Hansen et Andersen (1997) ainsi que Yuen et Ma (1997) ont montré que pour assurer la continuité du support (adjacence des accumulateurs recevant les votes de $M(x, y)$) la condition suivante devait être vérifiée :

$$\sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{\Delta_q \rho}{\Delta_q \theta}$$

L'objet de ce paragraphe est d'affiner la condition imposée dans le cadre de la situation proposée au chapitre 6 pour l'analyse des images d'épandage.

Pour assurer cette continuité du support de la sinusoïde, il faut que la pente de celle-ci dans l'espace de Hough reste inférieure à $\frac{\Delta_q \rho}{\Delta_q \theta}$.

Dans l'espace de Hough, l'équation de la sinusoïde engendrée par le point $M(x, y)$ est :

$$\rho_h = x \cos \theta_h + y \sin \theta_h$$

La pente est donnée par la dérivée :

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_h}{d\theta_h} &= -x \sin \theta_h + y \cos \theta_h \\ \frac{d\rho_h}{d\theta_h} &= \sqrt{x^2 + y^2} \times \cos(\theta_h - \varphi_1(x, y)) \end{aligned} \quad (A10.5)$$

avec $\varphi_1(x, y)$ défini par $\cos(\varphi_1(x, y)) = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ et $\sin(\varphi_1(x, y)) = \frac{-x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$.

Dans le cas général, $\cos(\theta_h - \varphi_1(x, y))$ ne peut être borné que par -1 et 1 , ce qui conduit à écrire : $\left| \frac{d\rho_h}{d\theta_h} \right| \leq \sqrt{x^2 + y^2}$ et donc $\sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{\Delta_q \rho}{\Delta_q \theta}$ pour assurer la continuité du support de la sinusoïde (relation obtenue par Hansen et Andersen (1997) ou Yuen et Ma (1997)).

En revanche, cette approche peut être affinée dans le cas de l'analyse proposée pour les images d'épandage compte tenu des connaissances a priori qui caractérisent le système étudié. Il est en effet possible de préciser la signification de la fonction trigonométrique $\cos(\theta_h - \varphi_1(x, y))$ dans l'expression de la pente.

En effet, l'analyse de la figure A10-3 permet de déduire géométriquement que :

$$\cos(\theta_h - \varphi_1(x, y)) = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 - \rho_h^2}}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

d'où :

$$\sqrt{x^2 + y^2} \cos(\theta_h - \varphi_1(x, y)) = \sqrt{x^2 + y^2 - \rho_h^2}$$

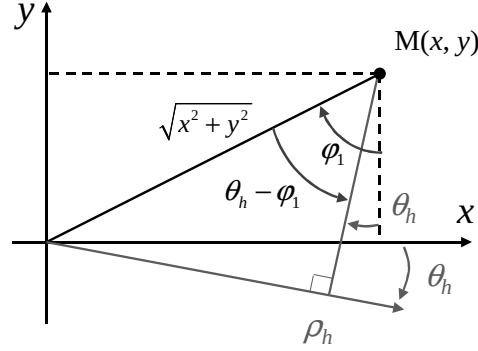


Figure A10-3 : Représentation géométrique de l'angle $(\theta_h - \varphi_1(x, y))$.

En remplaçant dans (A10.5), l'expression de la pente est donc :

$$\frac{d\rho_h}{d\theta_h} = \sqrt{x^2 + y^2 - \rho_h^2} \quad (\text{A10.6})$$

Comme dans la méthode proposée dans le chapitre 6 pour calculer la transformée de Hough, le paramètre ρ_h est borné, et que les points considérés sont sur une couronne de rayon extérieur r_{ext} , l'expression (A10.6) est maximale lorsque $\sqrt{x^2 + y^2} = r_{ext}$ et $\rho_h = r_{eq_pixMin}$.

La condition pour assurer la continuité du support des sinusoides dans l'espace de Hough est donc :

$$\sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pixMin}^2} \cdot \Delta_q \theta \leq \Delta_q \rho$$

Cette condition est la même que celle établie de manière à assurer le stockage de l'ensemble des votes relatifs à un segment dans l'accumulateur qui contient ces caractéristiques exactes.

11 ANNEXE PRESENTANT DES EXEMPLES DE VALEURS CARACTERISANT LE CALCUL DE LA TRANSFORMEE DE HOUGH

Pour diverses configurations de disques choisies parmi les plus représentatives de celles mises en oeuvre dans le cadre des essais expérimentaux liés à ce travail, le tableau ci-dessous donne les valeurs des paramètres relatifs au calcul de la transformée de Hough en prenant :

$$\Delta_q \rho = 2 \text{ pixels}, \Delta_q \theta = 0,15^\circ \text{ et } r_{ext} = 700 \text{ pixels}$$

Configuration								
$r_{pale} \text{ (mm)}$	325	325	400	400	400	400	325	400
$r_p \text{ (mm)}$	0	50	0	50	-24	-24	0	-24
$\Omega \text{ (}^\circ\text{)}$	0	0	0	0	0	10.7	0	0
$f_{conv} \text{ (mm/pix)}$	1	1	1	1	1	1	1.25	1.25
$\dot{\theta} \text{ (tr/min)}$	800	800	800	800	800	800	800	800
Paramètres relatifs au calcul de la transformée de Hough								
$r_{ext} \text{ (pix)}$	700	700	700	700	700	700	700	700
$r_{eq_pix\ Min} \text{ (pix)}$	230	213	283	266	291	294	183	233
$r_{eq_pix\ Max} \text{ (pix)}$	300	290	369	360	374	382	240	299
$r_{int\ Max} \text{ (pix)}$	403	395	427	419	431	432	384	404
$Ls_{Min} \text{ (pix)}$	330	333	320	324	318	317	337	330
$\Delta\theta_{Ls} \text{ (}^\circ\text{)}$	0.52	0.5	0.53	0.53	0.54	0.54	0.5	0.52
$\sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pix\ Min}^2} \cdot \Delta_q \theta$	1.73	1.74	1.67	1.7	1.66	1.66	1.77	1.7
$\Delta\theta_{ej_pHD} \text{ (}^\circ\text{)}$	0.92	0.8	0.75	0.66	0.8	0.98	1.15	1.01

Toutes les situations présentées permettent de vérifier la contrainte :

$$\sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pix\ Min}^2} \cdot \Delta_q \theta \leq \Delta_q \rho$$

En revanche, dans le cas où le facteur de conversion f_{conv} vaut 1.25, le rayon intérieur maximal imposé à la couronne d'investigation sur l'image binaire, n'est pas réaliste compte tenu du rayon de la pale lorsqu'il est exprimé en pixels dans l'image.

Cette situation ne permettrait pas de vérifier :

$$r_{int} \leq \sqrt{\frac{1}{4} r_{ext}^2 + \frac{3}{4} r_{eq_pix\ Min}^2}$$

Les situations où le facteur de conversion vaut 1.25, peuvent être traitées en modifiant le rayon extérieur de la couronne et le pas d'échantillonnage angulaire pour le calcul de la transformée en utilisant par exemple, les valeurs données dans le tableau ci-après.

Configuration		
r_{pale} (mm)	325	400
r_p (mm)	0	-24
Ω (°)	0	0
f_{conv} (mm/pix)	1.25	1.25
$\dot{\theta}$ (tr/min)	800	800
Paramètres relatifs au calcul		
$\Delta_q \rho$ (pix)	2	2
$\Delta_q \theta$ (°)	0.15	0.12
r_{ext} (pix)	750	920
$r_{eq_pix\ Min}$ (pix)	183	233
$r_{eq_pix\ Max}$ (pix)	240	299
$r_{int\ Max}$ (pix)	407	502
$LS\ Min$ (pix)	363	445
$\Delta\theta_{LS}$ (°)	0.47	0.39
$\sqrt{r_{ext}^2 - r_{eq_pixMin}^2} \cdot \Delta_q \theta$	1.9	1.86
$\Delta\theta_{ej_ \rho HD}$ (°)	1.16	1.01

Les contraintes sur $\Delta_q \rho$, $\Delta_q \theta$ et r_{int} sont alors vérifiées.

12 ANNEXE RELATIVE A LA DETERMINATION DE L'AXE D'INERTIE DU NUAGE DE POINTS IDENTIFIE PAR UN ACCUMULATEUR

Le repérage de la position d'un maximum local dans l'espace de Hough ne fournit qu'une valeur discrète (ρ_{HD}, θ_{HD}) correspondant à la référence centrale de l'accumulateur identifié. Cette annexe décrit la méthode utilisée pour caractériser de manière plus précise le nuage de points ayant permis d'obtenir un maximum dans cet accumulateur.

Un pic ayant été détecté dans l'espace des paramètres en (ρ_{HD}, θ_{HD}) , la zone de la couronne dont les coordonnées polaires des pixels vérifient : $\rho \in [\rho_{HD}-0,5.\Delta_q\rho, \rho_{HD}+0,5.\Delta_q\rho]$ et $\theta \in [\theta_{HD}-0,5.\Delta_q\theta, \theta_{HD}+0,5.\Delta_q\theta]$ est déterminée.

Cette zone ABCD, représentée sur la figure A12-1 est définie en coordonnées polaires de la manière suivante :

A (r_A, α_A)	$r_A = r_{int}$	$\alpha_A = \theta_{HD} + 0,5.\Delta_q\theta + \arccos((\rho_{HD}-0,5.\Delta_q\rho)/r_{int})$
B (r_B, α_B)	$r_B = r_{ext}$	$\alpha_B = \theta_{HD} + 0,5.\Delta_q\theta + \arccos((\rho_{HD}-0,5.\Delta_q\rho)/r_{ext})$
C (r_C, α_C)	$r_C = r_{ext}$	$\alpha_C = \theta_{HD} - 0,5.\Delta_q\theta + \arccos((\rho_{HD}+0,5.\Delta_q\rho)/r_{ext})$
D (r_D, α_D)	$r_D = r_{int}$	$\alpha_D = \theta_{HD} - 0,5.\Delta_q\theta + \arccos((\rho_{HD}+0,5.\Delta_q\rho)/r_{int})$

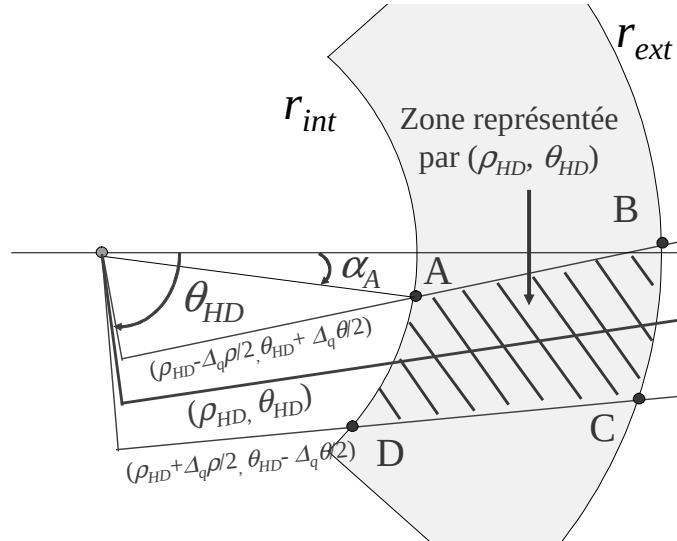


Figure A12-1: Zone utile au calcul pour une valeur θ_{HD} donnée.

L'axe d'inertie du nuage de points présents dans la zone retenue est obtenu au moyen des moments géométriques.

Considérons les moments géométriques suivants :

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{1}{n} \sum_1^n x_i & V_y &= \frac{1}{n} \sum_1^n y_i \\ V_{xx} &= \frac{1}{n} \sum_1^n (x_i - V_x)^2 & V_{yy} &= \frac{1}{n} \sum_1^n (y_i - V_y)^2 \\ V_{xy} &= \frac{1}{n} \sum_1^n (x_i - V_x)(y_i - V_y) \end{aligned}$$

L'inclinaison du nuage de points est donnée modulo π par :

$$\theta_{HDi} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{V_{yy} - V_{xx}}{2V_{xy}}\right) + \frac{\pi}{4} \text{sign}(V_{xx})$$

La distance de la droite à l'origine du repère utilisé est :

$$\rho_{HDi} = V_x \cdot \sin \theta_{HDi} + V_y \cdot \cos \theta_{HDi}$$

Les paramètres $(\rho_{HDi}, \theta_{HDi})$ ont l'avantage de caractériser l'axe du nuage de points identifié au sens des moindres carrés.

13 ANNEXE RELATIVE AU TEST DE L'ALGORITHME D'IDENTIFICATION ET DE CARACTERISATION DES TRAJECTOIRES SUR UNE IMAGE SYNTHETIQUE

Cette annexe présente les résultats obtenus par application de l'algorithme d'identification et de caractérisation des trajectoires sur une image synthétique construite en simulant une éjection avec un angle de sortie de pale de 30°.

Deux méthodes d'extraction itératives des maxima locaux de l'espace de Hough et de caractérisation des trajectoires présentes dans l'image binaire ont été mises en oeuvre (intitulées *méthode 1* et *méthode 2* dans le chapitre 6).

Les résultats obtenus avec la première approche dans le cas de l'image non bruitée et dans le cas de l'image bruitée (bruit de type « poivre et sel » avec une probabilité de 50%) sont présentés figure A13-1 et A13-2.

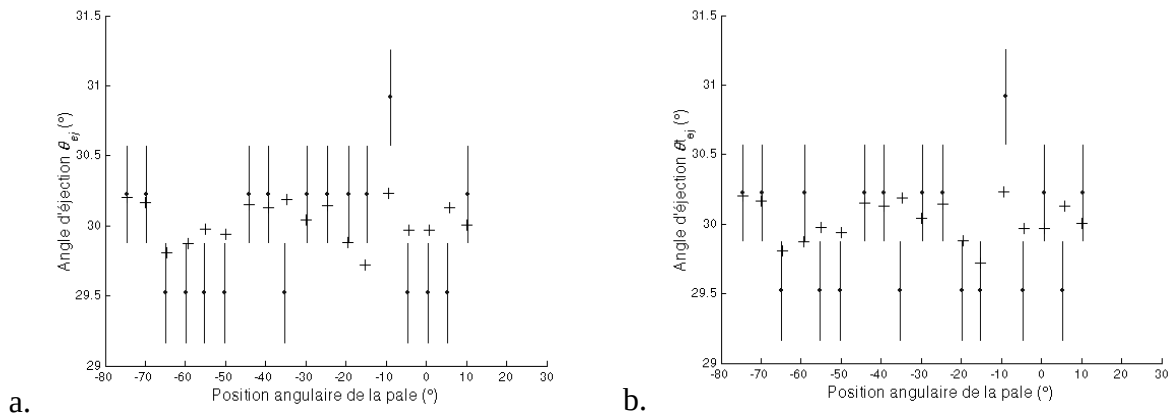


Figure A13-1 : Résultats obtenus en caractérisant chaque trajectoire par les valeurs discrètes (ρ_{HD} , θ_{HD}) déterminées directement à partir de la position des maxima locaux dans l'espace de Hough. a – Sur l'image de synthèse non bruitée. b - Sur l'image de synthèse bruitée (probabilité de 50%). + valeur de référence ; • valeur correspondant au centre de l'accumulateur identifié comme maximum dans l'espace de Hough. Les barres verticales représentent la largeur des accumulateurs exprimée en angle d'éjection.

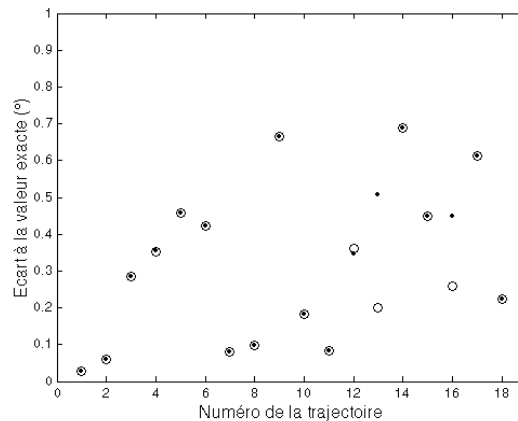


Figure A13-2 : Erreur commise sur l'estimation de l'angle d'éjection lorsqu'il est estimé à partir des valeurs discrètes issues directement de la recherche des maxima dans l'espace de

Hough dans le cas de l'image non bruitée (●) et dans le cas de l'image bruitée (○) avec une probabilité de 50%.

Les résultats obtenus avec la seconde approche en recherchant l'axe d'inertie des nuages de points correspondants aux accumulateurs retenus dans l'espace de Hough sont présentés sur la figure A13-3. Lorsque l'image n'est pas bruitée, les valeurs déterminées de manière automatique par l'algorithme sont rigoureusement identiques aux valeurs de références.

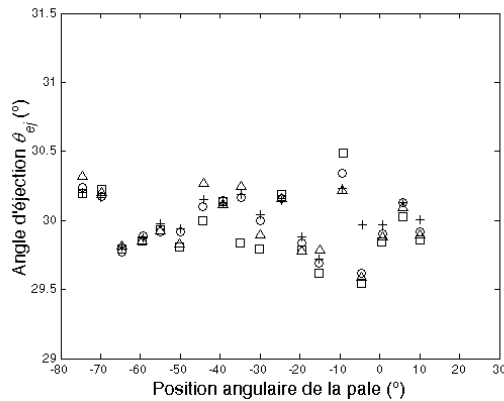


Figure A13-3 : Valeurs des angles d'éjection estimés en utilisant la seconde méthode. + valeur de référence identique à celle obtenue par l'algorithme sur l'image non bruitée ; ○ cas de l'image bruitée à 10% ; △ cas de l'image bruitée à 30% ; □ cas de l'image bruitée à 50% .

La figure A13-4 présente, pour les différents niveaux de bruit appliqués sur l'image de synthèse « pure », les écarts entre les estimations de l'angle d'éjection obtenus par l'algorithme (seconde méthode) et les valeurs de références pour chacune des 18 trajectoires simulées. Les erreurs commises augmentent avec le niveau de bruit de l'image. Néanmoins, sur les tests réalisés, les erreurs restent inférieures à 0.45° pour l'image dont la valeur de chaque pixel a été changée aléatoirement avec une probabilité 50 % ce qui correspond à une situation fortement bruitée (figure 6-10).

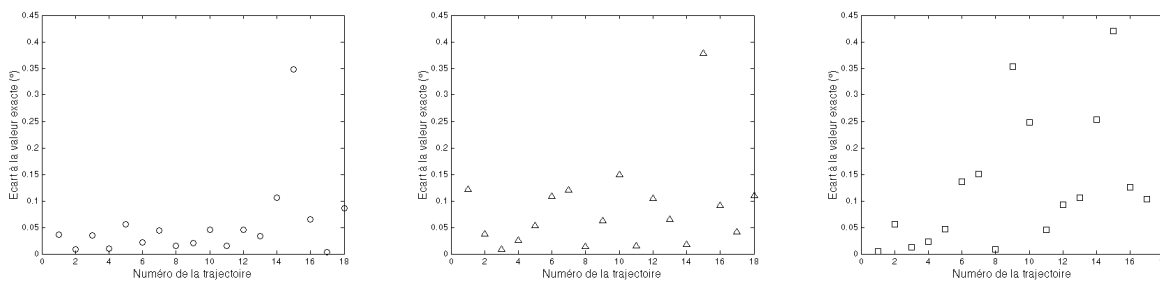


Figure A13-4 : Ecart entre les estimations de l'angle d'éjection obtenus par l'algorithme (seconde méthode) et les valeurs de références pour chacune des 18 trajectoires simulées.
a – Image bruitée à 10% ; b– Image bruitée à 30% ; c – Image bruitée à 50% .

14 ANNEXE RELATIVE A LA DETERMINATION DE L'ECART ANGULAIRE ENTRE L'IMAGE D'UNE TRAJECTOIRE ET L'IMAGE DE SA PROJECTION HORIZONTALE DANS LE PLAN DE REFERENCE

Pour l'acquisition des images d'épandage, l'axe optique de la caméra est réglé verticalement de manière à être parallèle à l'axe de rotation du disque de distribution centrifuge.

Lorsque les trajectoires des granulés ne sont pas horizontales, la projection de celles-ci dans l'image ne correspond pas à l'axe de la composante horizontale de la vitesse d'éjection. Il en résulte un biais dans l'estimation de l'angle d'éjection si celui-ci est déterminé directement à partir des coordonnées polaires de la droite identifiée dans l'image.

L'objet de la présente annexe est de présenter la démarche permettant de déterminer ce biais.

La situation géométrique de la scène et de sa projection dans l'image est illustrée par la figure A14-1.

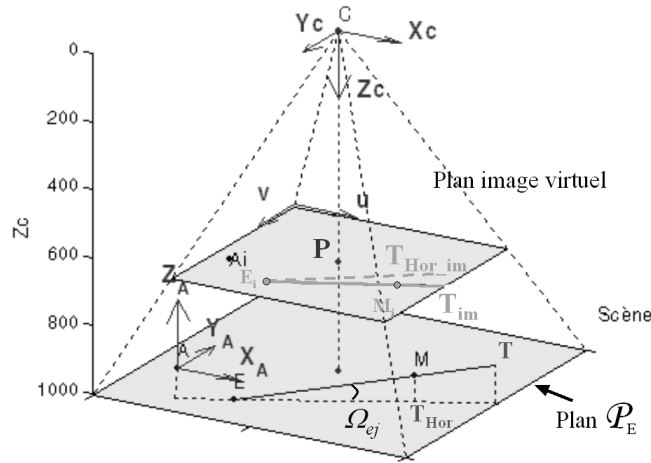


Figure A14-1 : Illustration de la situation géométrique étudiée

Pour analyser la géométrie de la scène et de sa projection, on note :

E le point d'éjection d'une particule (point où la particule quitte l'extrémité de la pale)

$\mathcal{P}_E$ le plan horizontal défini par les différentes positions du point E

T une trajectoire inclinée d'un angle Ω_{ej} par rapport à l'horizontale

T_{Hor} la projection orthogonale de la trajectoire dans le plan horizontal $\mathcal{P}_E$

T_{im} l'image de T dans le plan du CCD

T_{Hor_im} l'image de T_{Hor} dans le plan du CCD

M un point de la trajectoire T inclinée par rapport au plan de référence $\mathcal{P}_E$

A le point de passage de l'axe de rotation du disque dans le plan de référence

A_i , E_i et M_i sont les images dans le plan du CCD des points A, E et M

P est le point principal de l'image

Pour une trajectoire inclinée, le point E est par définition le point d'intersection de la trajectoire réelle et de sa projection horizontale dans le plan de référence $\mathcal{P}_E$.

Plusieurs repères sont également définis de manière à décomposer les calculs :

Soit $(E, \mathbf{i}_{ETH}, \mathbf{j}_{ETH}, \mathbf{k}_{ETH})$ un repère orthonormé direct avec $\mathbf{i}_{ETH}$ porté par T_{Hor} la projection de la trajectoire dans $\mathcal{P}_E$ et orienté dans le sens de l'éjection de la particule. On prend $\mathbf{k}_{ETH} = -\mathbf{k}_C$. Dans ce repère, les coordonnées d'un point M de la scène $(x_{ETH}(M), y_{ETH}(M), z_{ETH}(M))$ sont exprimées en mètres.

Soit $(C, \mathbf{i}_{CTH}, \mathbf{j}_{CTH}, \mathbf{k}_{CTH})$, repère orthonormé direct défini avec $\mathbf{i}_{CTH}$ parallèle à T_{Hor} et orienté dans le sens de parcours de la trajectoire pour une particule éjectée. On prend $\mathbf{k}_{CTH} = \mathbf{k}_C$. Dans ce repère, les coordonnées d'un point M de la scène $(x_{CTH}(M), y_{CTH}(M), z_{CTH}(M))$ sont exprimées en mètres.

Soit $(E_i, \mathbf{i}_{ETHi}, \mathbf{j}_{ETHi})$ un repère du plan image tel que $\mathbf{i}_{ETHi}$ soit colinéaire à T_{Hor_im} et $\mathbf{j}_{ETHi}$ de même sens que $\mathbf{j}_{ETH}$.

Dans ce repère, les coordonnées d'un point M de la scène $(x_{ETHi}(M), y_{ETHi}(M), z_{ETHi}(M))$ sont exprimées en pixels.

Soit $(E_i, \mathbf{i}_{ETi}, \mathbf{j}_{ETi})$ un repère direct du plan image tel que $\mathbf{i}_{ETi}$ soit colinéaire à T_{im} et orienté dans le sens de déplacement du granulé.

La définition de ces repères est illustrée par la figure A14-2.

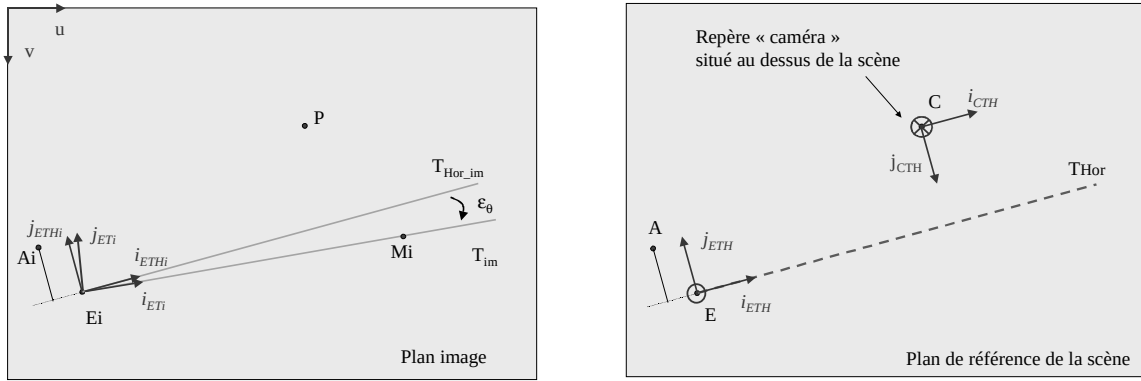


Figure A14-2 : Illustration, dans le plan image et dans le plan de référence de la scène, des repères utilisés pour décomposer l'analyse géométrique.

Dans $(C, \mathbf{i}_{CTH}, \mathbf{j}_{CTH}, \mathbf{k}_{CTH})$ les coordonnées d'un point M appartenant à une trajectoire inclinée d'un angle Ω_{ej} par rapport à l'horizontale sont :

$$\begin{pmatrix} x_{CTH}(M) \\ y_{CTH}(M) \\ z_{CTH}(E) - x_{ETH}(M) \times \tan \Omega_{ej} \end{pmatrix} \quad (A14.1)$$

On considère ici un pavage carré pour le plan image d'où $\Delta p_x = \Delta p_y = \Delta p$. Cette situation est celle rencontrée avec le CCD utilisé.

D'après le modèle du sténopé les coordonnées dans $(E_i, \mathbf{i}_{ETHi}, \mathbf{j}_{ETHi})$ de M_i (image de M), vérifient :

$$\begin{cases} x_{ETHi}(M_i) = \frac{f}{\Delta p} \frac{x_{CTH}(M)}{z_{CTH}(M)} + x_{ETHi}(P) \\ y_{ETHi}(M_i) = \frac{f}{\Delta p} \frac{-y_{CTH}(M)}{z_{CTH}(M)} + y_{ETHi}(P) \end{cases} \quad (A14.2)$$

avec $(x_{ETHi}(P), y_{ETHi}(P))$ les coordonnées du point principal P dans $(E_i, \mathbf{i}_{ETHi}, \mathbf{j}_{ETHi})$

L'expression des coordonnées du point M_i dans le repère $(E_i, \mathbf{i}_{ETHi}, \mathbf{j}_{ETHi})$ permet d'obtenir directement l'expression de l'inclinaison de T_{im} par rapport à T_{Hor_im} :

$$\tan \varepsilon_\theta = \frac{y_{ETHi}(M_i)}{x_{ETHi}(M_i)} \quad (A14.3)$$

L'angle ε_θ est l'orientation de T_{im} par rapport à T_{Hor_im} (mesuré positivement dans le sens trigonométrique). Il s'agit de l'écart angulaire entre l'image de la trajectoire inclinée T_{im} et l'image de sa projection horizontale dans le plan de référence T_{Hor_im} mesuré dans le repère direct défini par $(E_i, \mathbf{i}_{ETHi}, \mathbf{j}_{ETHi})$, croissant dans le sens trigonométrique.

En appliquant la relation (A14.2) au point E qui a pour image E_i origine du repère $(E_i, \mathbf{i}_{ETHi}, \mathbf{j}_{ETHi})$, il vient :

$$\begin{cases} x_{ETHi}(P) = -\frac{f}{\Delta p} \frac{x_{CTH}(E)}{z_{CTH}(E)} \\ y_{ETHi}(P) = \frac{f}{\Delta p} \frac{y_{CTH}(E)}{z_{CTH}(E)} \end{cases} \quad (A14.4)$$

En combinant (A14.2) et (A14.4) on obtient :

$$\begin{cases} x_{ETHi}(M_i) = \frac{f}{\Delta p} \frac{z_{CTH}(E)x_{CTH}(M) - z_{CTH}(M)x_{CTH}(E)}{z_{CTH}(M)z_{CTH}(E)} \\ y_{ETHi}(M_i) = \frac{f}{\Delta p} \frac{-z_{CTH}(E)y_{CTH}(M) + z_{CTH}(M)y_{CTH}(E)}{z_{CTH}(M)z_{CTH}(E)} \end{cases} \quad (A14.5)$$

En remarquant que :

$$x_{CTH}(M) = x_{ETH}(M) + x_{CTH}(E)$$

$$y_{CTH}(M) = -y_{ETH}(M) + y_{CTH}(E) \text{ d'où : } y_{CTH}(M) = y_{CTH}(E) \text{ puisque } y_{ETH}(M) = 0$$

$$z_{CTH}(M) = -x_{ETH}(M) \tan \Omega_{ej} + z_{CTH}(E)$$

puis en substituant dans (A14.5), on obtient :

$$\begin{cases} x_{ETHi}(M_i) = \frac{f}{\Delta p} \frac{x_{ETH}(M)(z_{CTH}(E) + x_{CTH}(E) \tan \Omega_{ej})}{z_{CTH}(M)z_{CTH}(E)} \\ y_{ETHi}(M_i) = \frac{f}{\Delta p} \frac{-y_{CTH}(E)x_{ETH}(M) \tan \Omega_{ej}}{z_{CTH}(M)z_{CTH}(E)} \end{cases} \quad (A14.6)$$

En combinant (A14.3) et (A14.6), on obtient :

$$\tan \varepsilon_\theta = \frac{-y_{CTH}(E) \tan \Omega_{ej}}{z_{CTH}(E) + x_{CTH}(E) \tan \Omega_{ej}} \quad (A14.7)$$

L'expression de l'écart angulaire ε_θ est maintenant recherchée en fonction des caractéristiques polaires (ρ_{im}, θ_{im}) de la droite présente dans l'image.

L'équation (A14.7) utilise les coordonnées d'un point de la scène (point E) dans un repère qui prend son origine au point C et qui est orienté en fonction de la position de la projection horizontale de la trajectoire.

Or la position de l'image de la projection horizontale de la trajectoire n'est pas connue. D'autre part, le repère (C, $\mathbf{i}_{CTH}$, $\mathbf{j}_{CTH}$, $\mathbf{k}_{CTH}$) est extérieur à l'image (son origine est au niveau de la caméra)

Il est donc nécessaire de transformer cette relation de manière à exprimer ε_θ en fonction de données qui sont mesurables dans l'image.

Soit P le point principal de l'image. On a :

$$\begin{cases} y_{CTH}(E) = z_{CTH}(E) \frac{\Delta p}{f} y_{ETHi}(P) \\ x_{CTH}(E) = -z_{CTH}(E) \frac{\Delta p}{f} x_{ETHi}(P) \end{cases} \quad (A14.8)$$

En remplaçant (A14.8) dans (A14.7) l'expression de ε_θ est obtenue en fonction de coordonnées relatives à un repère situé dans l'image :

$$\tan \varepsilon_\theta = \frac{-y_{ETHi}(P) \tan \Omega_{ej}}{\frac{f}{\Delta p} - x_{ETHi}(P) \tan \Omega_{ej}} \quad (A14.9)$$

D'autre part, les coordonnées de P établies dans (Ei, $\mathbf{i}_{ETHi}$, $\mathbf{j}_{ETHi}$) s'expriment en fonction de celles déterminées dans (Ei, $\mathbf{i}_{ETi}$, $\mathbf{j}_{ETi}$) :

$$\begin{cases} x_{ETHi}(P) = x_{ETi}(P) \cos(\varepsilon_\theta) - y_{ETi}(P) \sin(\varepsilon_\theta) \\ y_{ETHi}(P) = x_{ETi}(P) \sin(\varepsilon_\theta) + y_{ETi}(P) \cos(\varepsilon_\theta) \end{cases} \quad (A14.10)$$

La position de T_{Hor_im} n'étant pas connue dans l'image on remplace (A14.10) dans (A14.9). Après simplification, l'expression se réduit à :

$$\sin \varepsilon_\theta = -y_{ETi}(P) \tan(\Omega_{ej}) \frac{\Delta p}{f} \quad (A14.11)$$

Comme $y_{ETi}(P)$ peut être exprimé en fonction des caractéristiques polaires (ρ_{im} , θ_{im}) des lignes qui sont extraites de l'image, cette relation permet de déterminer ε_θ à partir des données extraites de l'image sous réserve de la connaissance de l'inclinaison verticale de la trajectoire. Cette connaissance peut provenir de la relation établie, lors de l'analyse mécanique du processus d'épandage, entre l'angle vertical d'éjection et l'angle horizontal d'éjection.

15 ANNEXE RELATIVE AUX MESURES MANUELLES REALISEES SUR LA MAQUETTE SIMULANT UNE TRAJECTOIRE

15.1 REALISATION DES MESURES MANUELLES

Les mesures manuelles des dimensions des objets utilisés pour la simulation sont toutes réalisées avec le même réglet métallique d'un mètre de longueur.

Les mesures d'horizontalité sont réalisées au moyen de la nivelle longitudinale d'un niveau de chantier de 600 mm de longueur.

L'erreur d'horizontalité est estimée à 2 mm pour 600 mm en se basant sur la limite de perception du décalage de la bulle. Cette erreur correspond à environ 0.2° . Le parallélisme de la nivelle avec son support a été vérifié par des retournements du niveau. Les mesures en élévation sont réalisées avec un réglet de 300 mm et une équerre à chapeau.

15.2 PRECISION CONCERNANT L'ANGLE HORIZONTAL D'EJECTION

A l'origine, la maquette est dimensionnée pour simuler un angle horizontal d'éjection d'environ 35° . La position des points caractéristiques de la construction est ensuite mesurée a posteriori afin de déterminer plus précisément l'angle d'éjection simulé et le rayon de la pale fictive correspondante.

Soit a_t , b_t , c_t les longueurs des côtés d'un triangle et α_t l'angle opposé au côté a_t (cf. figure A15-1) ; on a :

$$\cos \alpha_t = \frac{b_t^2 + c_t^2 - a_t^2}{2b_t c_t} \quad (\text{A15.1})$$

Chacun des côtés du triangle est mesuré avec une précision estimée à 0.5 mm près.

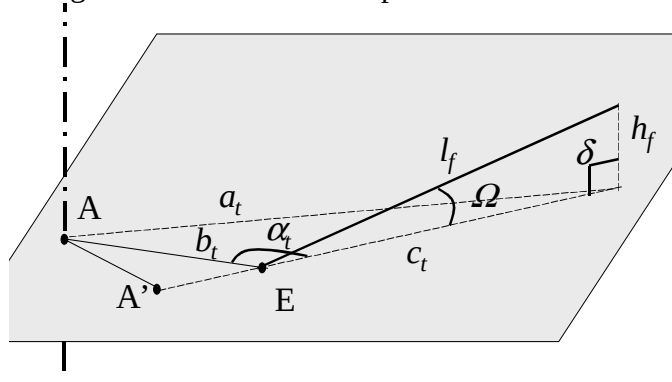


Figure A15-1 : Principaux points, angles et longueurs caractéristiques de la maquette.

A partir des valeurs mesurées, l'angle d'éjection simulé est déduit : $\theta_{ej_sim} = 34.93^\circ$

Par dérivation de la formule précédente, l'expression de l'erreur maximale est :

$$|\Delta\alpha_t| = \left| \frac{1}{\sin\alpha_t} \left(\left| \frac{b_t^2 + a_t^2 - c_t^2}{2b_t^2 c_t} \right| |\Delta b| + \left| \frac{c_t^2 + a_t^2 - b_t^2}{2c_t^2 b_t} \right| |\Delta c_t| + \left| \frac{a_t}{b_t c_t} \right| |\Delta a_t| \right) \right| \quad (\text{A15.2})$$

L'erreur maximale sur la mesure manuelle de l'angle est ainsi évaluée à 0.40°

Dans le cas des essais menés avec un angle d'inclinaison vertical, une erreur supplémentaire est engendrée par l'imprécision de la position de la cordelette au dessus de la ligne tracée sur la planchette mobile.

Le déplacement latéral au niveau du point fixé en élévation est au maximum de 1 mm. Comme la longueur est estimée à 725.5 mm, l'erreur angulaire de la projection horizontale est de l'ordre de 0.07°.

Cette erreur est faible par rapport à celle faite dans le plan horizontal.

L'erreur commise sur la mesure manuelle de l'angle horizontal d'éjection peut ainsi être considérée comme inférieure à 0.5°.

15.3 PRECISION CONCERNANT L'ANGLE VERTICAL D'EJECTION

En considérant que la mesure réalisée en élévation n'est pas rigoureusement orthogonale à la planchette servant de support (δ voisin de 90°), on peut écrire :

$$\sin(\Omega) = \frac{h_f}{l_f} \sin(\delta) \quad (\text{A15.3})$$

et

$$l_f^2 = c_t^2 + h_f^2 - 2c_t h_f \cos(\delta) \quad (\text{A15.4})$$

On déduit de ces deux équations l'expression de l'erreur maximale commise sur Ω en valeur absolue :

$$\Delta\Omega = \frac{1}{\cos(\Omega)} \left(\frac{h_f}{l_f} \cos(\delta) \Delta\delta + \frac{\sin(\delta)}{l_f} \Delta h_f + \frac{h_f}{l_f^2} \sin(\delta) \Delta l_f \right) \quad (\text{A15.5})$$

$$\text{avec : } \Delta l_f = \frac{1}{l_f} \left(|c_t - h_f \cos(\delta)| \Delta c_t + |h_f - c_t \cos(\delta)| \Delta h_f + |c_t h_f \sin(\delta)| \Delta\delta \right) \quad (\text{A15.6})$$

Pour δ voisin de 90°, les expressions précédentes se simplifient :

$$\Delta\Omega = \frac{1}{\cos(\Omega)} \left(\frac{1}{l_f} \Delta h_f + \frac{h_f}{l_f^2} \Delta l_f \right) \quad (\text{A15.7})$$

$$\text{avec : } \Delta l_f = \frac{1}{l_f} (c_t \Delta c_t + h_f \Delta h_f + c_t h_f \Delta\delta) \quad (\text{A15.8})$$

$$\text{d'où : } \Delta\Omega = \frac{1}{\cos(\Omega)} \left(\frac{h_f}{l_f^3} c_t \Delta c_t + \left(\frac{h_f^2}{l_f^3} + \frac{1}{l_f} \right) \Delta h_f + \frac{h_f^2}{l_f^3} c_t \Delta\delta \right) \quad (\text{A15.9})$$

$$\text{avec : } l_f = \sqrt{c_t^2 + h_f^2}$$

On considère $\Delta\delta=0.5^\circ$. Cette estimation est délicate. Les contrôles réalisés au moyen d'une équerre à chapeau montre que cette incertitude est faible. Les termes liées à cette imprécision ont peu d'incidence sur la détermination de l'erreur maximale commise sur Ω .

En prenant $\Delta c_t = 0.5$ mm et $\Delta h_f = 1$ mm, les mesures manuelles conduisent à estimer les valeurs suivantes :

$$\Omega = 4.79^\circ \text{ avec } \Delta\Omega = 0.08^\circ$$

$$\Omega = 12.35^\circ \text{ avec } \Delta\Omega = 0.11^\circ$$

Ces valeurs sont légèrement supérieures à celles obtenues en considérant qu'il n'y a pas d'erreur sur δ et en menant plus simplement la démarche suivante :

$$\tan(\Omega) = \frac{h_f}{c_t} \quad (\text{A15.10})$$

En prenant la dérivée logarithmique de cette équation, on obtient l'expression de l'incertitude :

$$\Delta\Omega = \frac{1}{2} \sin(2\Omega) \left(\frac{\Delta h_f}{h_f} + \frac{\Delta c_t}{c_t} \right) \quad (\text{A15.11})$$

L'erreur d'horizontalité de la planchette est estimée à 0.2° soit la précision envisageable pour le niveau de chantier.

La limite de précision est donc en grande partie liée à l'approximation concernant l'horizontalité du support.

Globalement, on peut considérer que l'inclinaison de la cordelette par rapport à l'horizontale est connue avec une précision de 0.3° .

Le tableau ci-dessous synthétise les mesures réalisées manuellement sur la maquette et les erreurs maximales estimées.

Paramètre simulé	Mesure manuelle	Erreur maximale
Angle horizontal d'éjection	34.9°	0.5°
Angle vertical d'éjection		
cas 1	0°	0.2°
cas 2	4.8°	0.3°
cas 3	12.35°	0.3°

Tableau A15-1: Valeurs des angles qui caractérisent la simulation réalisée par la maquette.

16 ANNEXE RELATIVE A L'ESTIMATION DE LA VITESSE INSTANTANEE A PARTIR DE LA VITESSE MOYENNE MESUREE PAR APPROCHE STROBOSCOPIQUE

Dans un repère $(O, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ avec $\mathbf{k}$ orienté verticalement vers le haut, l'équation du vol balistique selon le modèle envisagé dans le chapitre 3 est :

$$\begin{cases} \ddot{x} = -K_a \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \\ \ddot{y} = -K_a \dot{y} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \\ \ddot{z} = -g - K_a \dot{z} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \end{cases}$$

Pour simplifier l'étude, considérons une trajectoire située dans le plan vertical $(O, \mathbf{i}, \mathbf{k})$. Dans ce plan, l'équation du mouvement est :

$$\begin{cases} \ddot{x} = -K_a \dot{x} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2} \\ \ddot{z} = -g - K_a \dot{z} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2} \end{cases}$$

Dans le cas d'un disque plat, au voisinage du disque, on peut considérer que :

$$\dot{z} \ll \dot{x}$$

Dans cette hypothèse, et comme $\dot{x} > 0$, les positions de la particule selon l'axe $[O x)$ sont décrites par :

$$\ddot{x} = -K_a \dot{x}^2$$

En notant v la vitesse selon l'axe $[O x)$, la relation s'écrit :

$$\dot{v} = -K_a v^2$$

Soit v_0 la vitesse à l'instant t_0 et v la vitesse à l'instant t . Par intégration de la relation précédente, on obtient :

$$v_t = \frac{v_0}{1 + K_a v_0 (t - t_0)}$$

Exprimons maintenant la distance D parcourue pendant la durée Δt :

$$D = \int_0^{\Delta t} v_t dt = \int_0^{\Delta t} \frac{v_0}{1 + K_a v_0 (t - t_0)} dt$$

d'où :

$$D = \frac{1}{K_a} \ln(1 + K_a v_0 \Delta t)$$

L'expression de la vitesse initiale en fonction de la distance parcourue est :

$$v_0 = \frac{e^{K_a D} - 1}{K_a \Delta t}$$

Or la distance parcourue s'exprime en fonction de la vitesse moyenne v_m :

$$D = v_m \Delta t$$

La vitesse instantanée v_i correspondant à la première position d'un couple de positions stroboscopiques peut donc être déduite de la vitesse moyenne par la relation suivante :

$$v_i = \frac{e^{K_a v_m \Delta t} - 1}{K_a \Delta t}$$

17 ANNEXE RELATIVE AUX ALGORITHMES DE TRAITEMENT DES RELEVÉS D'IMPACTS

17.1 CAS DES IMPACTS DE BILLES

Pour les essais réalisés avec des billes, les traces d'impacts forment de petites taches relativement circulaires. Un algorithme de traitement, basé sur des opérations de morphologie mathématique et la transformée en distance euclidienne, a été développé pour déterminer la position centrale de chaque impact. Les positions identifiées sont ensuite référencées par rapport à l'altitude des points d'éjections et par rapport à la projection orthogonale de l'axe de rotation du disque sur l'écran.

La figure A17-1 présente un exemple de feuille d'impacts de billes (format A4) ainsi que le résultat de la détermination du centre des impacts sur un extrait de l'image. Pour des impacts de billes (qui ont tous des formes similaires), l'algorithme a l'avantage de déterminer les positions des impacts même lorsque ceux-ci sont adjacents ou se chevauchent en partie, tout en évitant la détection multiple d'un même impact.

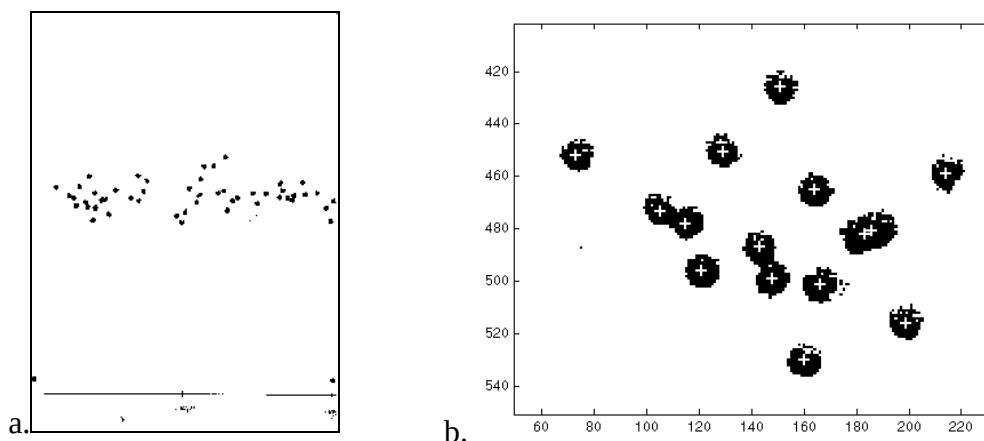


Figure A17-1 : a - Exemple d'une feuille d'impacts scannée (après seuillage). b - Résultat du traitement de l'image de la feuille d'impacts (extrait). Les points retenus par l'algorithme pour caractériser les positions des impacts sont superposés (croix blanches) à l'image seuillée.

Pour une situation d'épandage fixée, les données issues de plusieurs feuilles d'impacts sont mémorisées puis cumulées en un même nuage de points (*cf.* figure A17-2). Le cumul de plusieurs séries de données a pour objectif d'améliorer la représentativité de l'échantillon vis-à-vis de la distribution réelle.

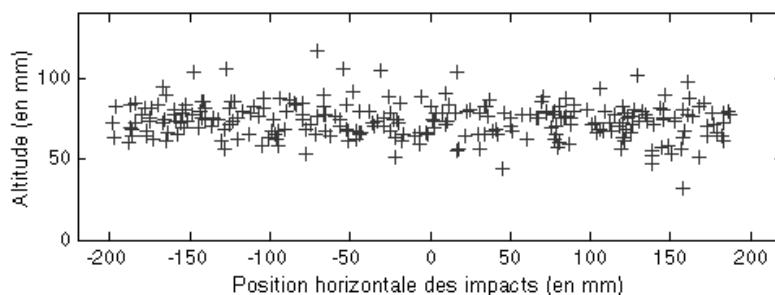


Figure A17-2 : Exemple d'un nuage de points correspondant à des impacts de billes relevés sur 2 feuilles (format A3). Les positions sont référencées par rapport à l'altitude de sortie de la pale. Ici la configuration correspond à des pales inclinées d'un angle de 10.7° , le régime de rotation du disque est de 800 tr/min et l'écran est placé à 1102 mm de l'axe de rotation.

La distribution des impacts permet de déterminer leur altitude moyenne. L'histogramme des altitudes est d'allure gaussienne.

17.2 CAS DES IMPACTS DE GRANULES D'ENGRAIS

Dans le cas d'un épandage réalisé avec de l'engrais (ici chlorure de potassium), la diversité de forme des grains et l'étalement de la granulométrie ne procurent aux traces d'impacts ni une forme particulière, ni une taille déterminée (figure A17-3).

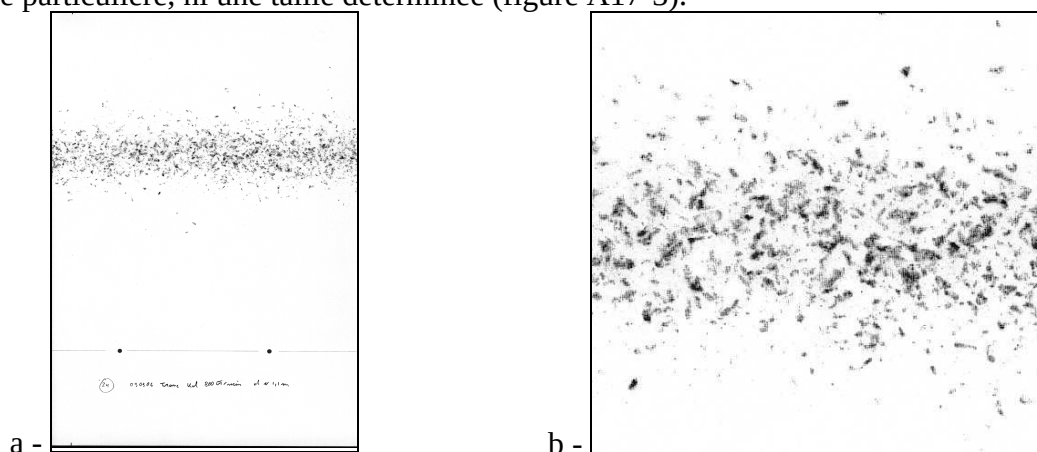


Figure 17-3 : a - Exemple d'une feuille d'impacts d'engrais scannée (format A4). b - Détail d'une zone du nuage des points d'impacts.

L'algorithme élaboré pour exploiter les impacts de billes n'est donc pas utilisable dans le cas des impacts d'engrais. La distribution des impacts est alors obtenue en considérant le nombre de pixels sur chaque ligne horizontale du relevé d'impacts dont le niveau de gris dépasse un certain seuil. En pratique le seuil a été fixé à 10% de la valeur maximale des niveaux de gris de la zone d'impacts. L'altitude moyenne des impacts et l'écart-type sont déduits de cette distribution d'allure gaussienne.

On déduit de (A18.1) :

$$\begin{aligned}\theta_{eq} - \varphi &= \pm \arccos \left(\frac{\rho_{eq}}{\sqrt{d_{AO_E}^2 + x_E^2}} \right) \\ \theta_{eq} &= \pm \arccos \left(\frac{\rho_{eq}}{\sqrt{d_{AO_E}^2 + x_E^2}} \right) + \arctan \left(\frac{-x_E}{d_{AO_E}} \right)\end{aligned}\quad (A18.2)$$

Comme dans notre situation, la relation $\theta_{eq} < \varphi$ doit être vérifiée, l'indétermination sur le signe du premier terme de l'équation (A18.2) est levée.

La distance horizontale séparant le point d'éjection du point d'impact sur l'écran est ensuite obtenue par :

$$d_{EI} = \sqrt{\left(r_{pale} \sin(\theta_{eq} + \theta_{ej}) + x_E\right)^2 + \left(d_{AO_E} - r_{pale} \cos(\theta_{eq} + \theta_{ej})\right)^2}$$

avec

r_{pale}	Rayon de la pale (mesuré dans le plan horizontal)
θ_{eq}	Angle équivalent de la pale
θ_{ej}	Angle d'éjection
x_E	Abcisse de l'impact sur la feuille (mesurée positivement dans le sens opposé à l'axe [AY) du repère (A,X,Y))
d_{AO_E}	Distance entre le centre du disque et l'écran

19 ANNEXE RELATIVE A L'ESTIMATION DE K_a ET A L'INCIDENCE D'UNE ERREUR SUR L'ESTIMATION DES PARAMETRES ENTRANT EN JEU DANS LA PREDICTION DE L'ALTITUDE DE LA TRAJECTOIRE AU VOISINAGE DU DISQUE.

19.1 ESTIMATION DU COEFFICIENT DE RESISTANCE AERODYNAMIQUE SPECIFIQUE POUR LES GRANULES DE CHLORURE DE POTASSIUM.

Dans le cas d'un disque plat ou tronconique, le modèle de vol balistique (*cf.* chapitre 4) permet de déterminer numériquement le profil de la trajectoire à condition de connaître les propriétés aérodynamiques de la particule

La valeur du coefficient de traînée C_D a été établie en fonction du nombre de Reynolds pour une sphère, mais est assez délicate à évaluer pour des granules d'engrais.

Pour faciliter la modélisation du comportement aérodynamique de grains d'engrais Grift et al. (1997) définissent un facteur d'équivalence appelé « q-factor » permettant de prendre en compte le comportement aérodynamique d'une particule réelle par rapport à celui d'une sphère. Ce facteur de correction est égal au rapport du « diamètre équivalent » sur le « diamètre correspondant » de la particule. La densité vraie d'un engrais étant connue, le diamètre « correspondant » d'un grain est défini comme le diamètre de la sphère qui aurait la même masse. Le diamètre « équivalent » est, quant à lui, déterminé à partir de la mesure du temps de chute libre du grain. Le diamètre de la sphère présentant le même temps de chute (calculé sur la base d'un modèle de chute libre préétabli) définit le « diamètre équivalent » de la particule.

Une estimation de la valeur moyenne du coefficient de résistance aérodynamique K_a pour le chlorure de potassium peut être obtenue à partir des mesures expérimentales réalisées par Grift et al. (1997) et Walker et al. (1997). Pour cet engrais, les auteurs ont estimé le q-factor à 0.62 et le cercle qui ajuste au mieux les granulés en moyenne a un diamètre de 3.5 mm.

En se basant sur ces valeurs, le diamètre équivalent moyen serait de 2.17 mm, ce qui conduit à estimer le coefficient de résistance aérodynamique spécifique à 0.09 m^{-1} .

Pour la modélisation du vol des granulés de chlorure de potassium, K_a sera donc pris égal à 0.09 m^{-1} , mais il est permis de s'interroger sur la pertinence de ce choix. En effet la modélisation du vol balistique nécessite l'utilisation d'un paramètre K_a qui, en pratique, ne s'avère pas connu avec précision. Trois valeurs de K_a sont donc considérées dans un premier temps : 0.045 , 0.09 et 0.18 m^{-1} .

Remarquons que pour un matériau donné et une forme sphérique, multiplier la valeur de K_a par deux revient à diviser le diamètre par 2, la surface projetée par 4 et la masse par 8.

Pour différents engrais et différentes situations d'épandage, Piron (2006) a mesuré la portée moyenne du vol des granulés. De manière à vérifier la cohérence de la valeur estimée pour K_a , les valeurs expérimentales obtenues par Piron ont été comparées aux portées théoriques calculées par le modèle de vol balistique en considérant les valeurs 0.045 , 0.09 et 0.18 m^{-1} pour K_a .

La hauteur de l'éjection par rapport au sol utilisé dans le modèle est celle correspondant à l'expérimentation de Piron soit 70 cm. Le tableau A19-1 donne les portées expérimentales et théoriques du vol balistique de l'engrais.

Engrais	Mesures expérimentales (Piron, 2006)			Portées calculées		
	Angle vertical d'éjection	Vitesse d'éjection	Portée moyenne	$K_a = 0.045$	$K_a = 0.09$	$K_a = 0.18$
KCl	4.09°	29.5 m.s ⁻¹	10 m	13.7 m	11.0 m	8.1 m
	4.15°	37.5 m.s ⁻¹	12,5 m	17.5 m	13.4 m	9.4 m
	4.14°	34.7 m.s ⁻¹	11,6 m	16.2 m	12.6 m	9.0 m

Tableau A19-1 : Mesures expérimentales obtenues pour un épandage de KCl par Piron (2006) et portées théoriques calculées pour plusieurs valeurs de K_a (en m⁻¹).

Les valeurs de portées calculées montrent que prendre $K_a = 0.09 \text{ m}^{-1}$ pour modéliser la trajectoire moyenne des granulés n'est pas aberrant.

19.2 INCIDENCE DU COEFFICIENT K_a SUR L'ALTITUDE DES TRAJECTOIRES AU VOISINAGE DU DISQUE

Il est permis de s'interroger sur l'incidence d'une erreur sur l'estimation de K_a vis à vis du calcul de la forme de la trajectoire au voisinage du disque. En effet, dans le chapitre 7 la modélisation du vol balistique est utilisée pour valider l'estimation de l'angle vertical d'éjection.

L'influence de l'incertitude sur l'estimation de K_a autour de 0.09 m^{-1} est évaluée en calculant les trajectoires avec cette valeur ainsi que pour $K_a = 0.045 \text{ m}^{-1}$ et $K_a = 0.18 \text{ m}^{-1}$. La figure A19-1 donne le profil des trajectoires ainsi calculées.

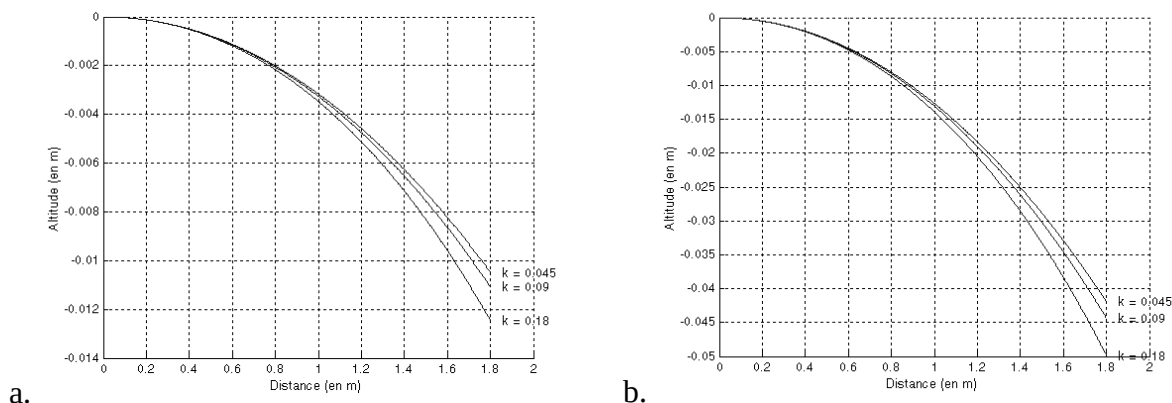


Figure A19-1 : Evolution de l'altitude en fonction de la distance parcourue. Modélisation pour trois valeurs du coefficient K_a (0.045, 0.09 et 0.18 m^{-1}) ainsi que pour deux vitesses d'éjection : a – $v = 40 \text{ m/s}$; b – $v = 20 \text{ m/s}$.

Le passage de $K_a = 0.09 \text{ m}^{-1}$ à $K_a = 0.18 \text{ m}^{-1}$ a l'incidence la plus forte. Pour une vitesse d'éjection de 40 m.s^{-1} , des variations de 0.13 mm et 1.4 mm sont respectivement obtenues à 0.85 m et 1.8 m.

Lorsque la vitesse d'éjection est plus faible, les écarts calculés sont plus importants : pour une vitesse d'éjection de 20 m.s^{-1} , des variations de 0.5 mm et 5.6 mm sont respectivement obtenues à 0.85 m et 1.8 m. Ces distances correspondent approximativement aux distances de vol des granulés avant leur choc sur les écrans.

Il apparaît donc que même si la valeur de K_a (de l'ordre de 0.09 m^{-1}) n'est pas connue avec précision les conséquences de cette incertitude sont faibles sur la modélisation de l'altitude du granulé dans sa phase de vol au voisinage du disque.

A priori, ne pas connaître avec précision la valeur de K_a n'est donc pas un obstacle à la modélisation du profil des trajectoires au voisinage du disque.

En revanche la valeur de K_a a bien entendu une incidence forte sur la portée finale (cf. figure A19-2). La variation de portée est d'autant plus forte que la vitesse initiale est importante. Pour une vitesse d'éjection de 40 m.s^{-1} et une hauteur en sortie de pale à 70 cm au dessus du sol, les portées sont respectivement de 12.3, 10.5 et 8.1 m, pour les valeurs du coefficient K_a de 0.045, 0.09 et 0.18 m^{-1} .

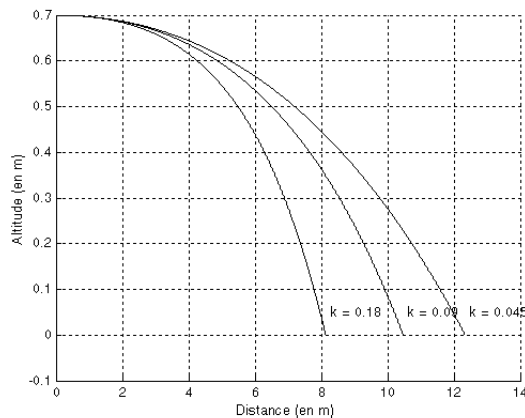


Figure A19-2 : Modélisation des trajectoires pour une vitesse d'éjection de 40 m/s et différentes valeurs de K_a : 0.045, 0.09, 0.18 m^{-1} .

19.3 INFLUENCE DE LA VITESSE D'EJECTION SUR L'ALTITUDE DES TRAJECTOIRES AU VOISINAGE DU DISQUE

La vitesse d'éjection est également un des paramètres qui influence l'évolution de l'altitude des granulés pendant leur phase de vol au voisinage du disque.

La figure A19-3 donne les profils des trajectoires modélisées pour différentes vitesses d'éjection en considérant $K_a = 0.09 \text{ m}^{-1}$. Le passage de 40 m.s^{-1} à 35 m.s^{-1} se traduit par des variations de 0.7 mm et 3.4 mm respectivement pour des distances parcourues de 0.85 et 1.80 m.

Les écarts sont plus marqués lorsque les vitesses sont plus faibles : le passage de 25 m.s^{-1} à 20 m.s^{-1} se traduit par des variations de 3.3 mm et 15.9 mm respectivement pour des distances parcourues de 0.85 et 1.80 m.

En proportion, il apparaît donc clairement qu'une erreur sur l'estimation de la vitesse a une incidence beaucoup plus importante qu'une erreur sur le coefficient K_a en ce qui concerne la modélisation de l'altitude de la trajectoire du vol des granulés au voisinage du disque.

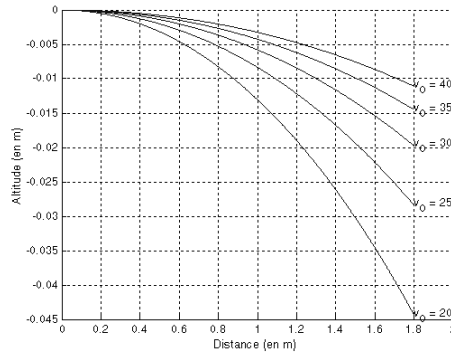


Figure A19-3 : Evolution de l'altitude en fonction de la distance parcourue par un granulé en phase de vol balistique. Modélisation pour $K_a = 0.09 \text{ m}^{-1}$ et pour différentes vitesses d'éjection : 20, 25, 30, 35 et 40 m.s^{-1} .

La mesure de l'altitude de la trajectoire au voisinage du disque est donc sensible à la vitesse d'éjection.

19.4 INFLUENCE DE L'ANGLE D'EJECTION SUR L'ALTITUDE DES TRAJECTOIRES AU VOISINAGE DU DISQUE

Pour apprécier l'incidence d'une variation de l'angle d'éjection sur l'altitude de la trajectoire des granules au voisinage du disque, les profils des trajectoires ont été calculés numériquement pour deux vitesses d'éjection (20 et 40 m.s^{-1}) lorsque l'angle vertical d'éjection est voisin de 0° et de 5° . La valeur de K_a est prise égale à 0.09 m^{-1} pour la modélisation.

Dans les quatre situations présentées en figure A19-4, lorsque l'angle vertical d'éjection est voisin de 0° ou voisin de $+5^\circ$, une variation de 0.5° se traduit par un écart sur l'altitude de l'ordre de 7.5 mm et 15.8 mm respectivement à une distance de 0.85 m et 1.8 m, ce qui revient à une variation de 0.1° pour un écart de l'ordre de 1.5 mm et 3.2 mm pour les deux distances considérées.

Une comparaison des altitudes obtenues par modélisation montre que pour une vitesse d'éjection de 40 m.s^{-1} les écarts obtenus pour une variation de 0.1° de l'angle vertical d'éjection sont plus importants que ceux obtenus lorsque la valeur de K_a passe de 0.09 à 0.18 m^{-1} (doublement de la valeur).

Lorsque la vitesse est de 20 m.s^{-1} , une variation de 0.1° engendre encore un écart trois fois supérieur à celui induit par le doublement de la valeur de K_a pour une distance de vol de 0.85 m. En revanche, pour une distance de 1.8 m, l'écart engendré par le doublement de la valeur de K_a devient plus important.

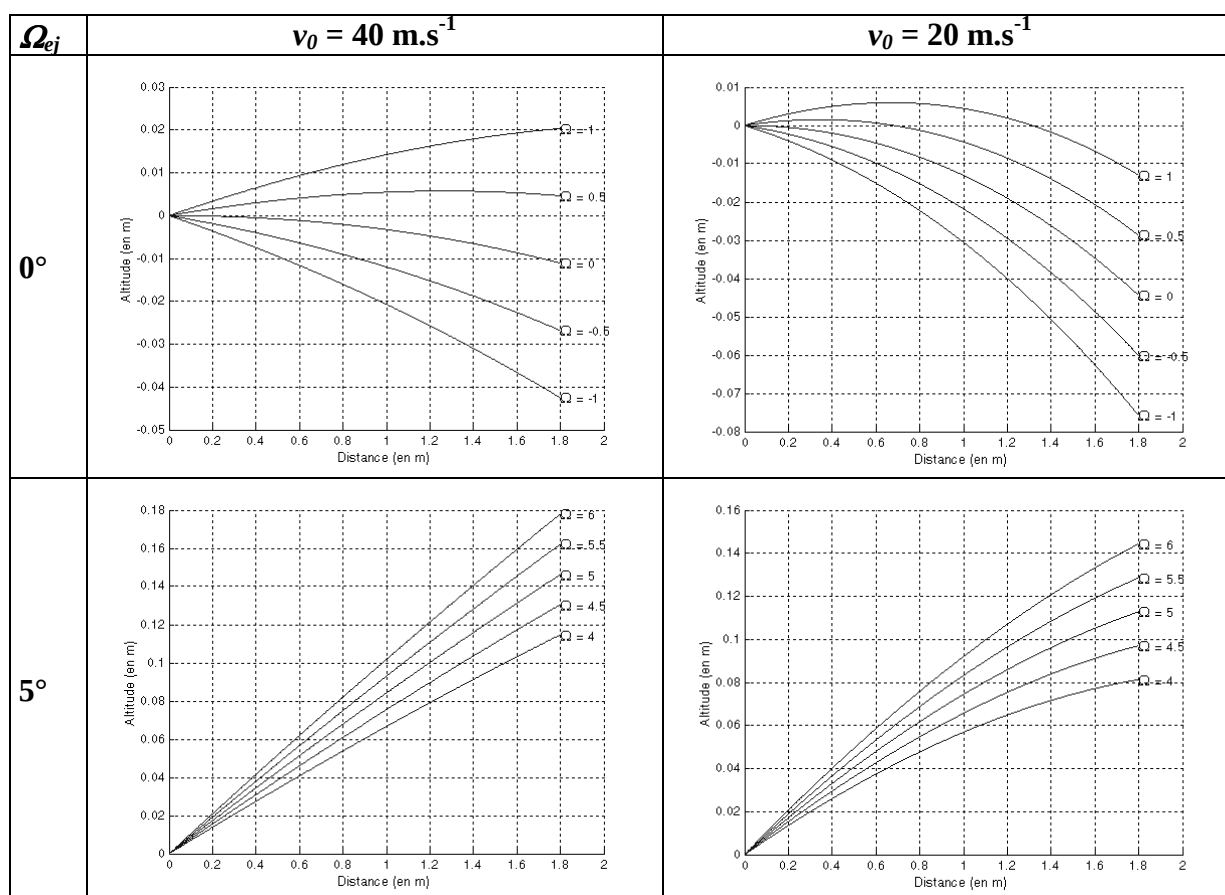


Figure A19-4 : Evolution de l'altitude en fonction de la distance parcourue par un granulé en phase de vol balistique. Modélisation pour des vitesses d'éjection v_0 de 40 m.s^{-1} et 20 m.s^{-1} et des angles verticaux d'éjection voisins de 0° et 5° .

20 ANNEXE RELATIVE AUX CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES ENGRAIS UTILISES.

Les densités précisées dans les analyses physiques fournies ci-dessous sont les densités du produit en vrac et non les densités des particules.



Gt de Clermont-Ferrand
Site de Montoldre - Unité TSCF

Analyses physiques des engrais minéraux

Demandeur des essais : ENESAD

Rapport n°: TSCF/MR/ChB/

ENGRAIS

Marque :

Emb :

Date : 21/08/2006

Type : Ammonitrate

Origine : ENESAD

Echantillon :

DENSITE

0.922	0.918	0.92	Densité moyenne	0.920
-------	-------	------	-----------------	--------------

GRANULOMETRIE

φ supérieur à 5 mm	4.2	gr	1.46	%
φ compris entre 5 et 4 mm	58.6	gr	20.44	%
φ compris entre 4 et 3.15 mm	153.7	gr	53.61	%
φ compris entre 3.15 et 2.5 mm	68.2	gr	23.79	%
φ compris entre 2.5 et 2 mm	1.6	gr	0.56	%
φ compris entre 2 et 1.6 mm	0.3	gr	0.10	%
φ compris entre 1.6 et 1 mm	0.1	gr	0.03	%
φ compris entre 1 et 0.5 mm	0	gr	0.00	%
φ inférieur à 0.5 mm	0	gr	0.00	%

Diamètre moyen (D50) : **3.55 mm** Etalement granulométrique (E=D90-D10) : **1.83 mm**

DURETE

2.75	2.85	2.85	2.95	3.16	3.56	4.17
4.48	4.99	5.81	5.91	6.21	6.82	7.03
Dureté moyenne		4.41	daN	Moyenne sur 10 valeurs (sans les extrêmes)		

ECOULEMENT

Temps (seconde)	8.14	8.25	Ecoulement moy. F (kg/min)	Répétabilité (r)	
				Tolérée	mesurée
Poids (kg)	1.123	1.135	5.01	0.08	0.04

Analyses physiques des engrais minéraux

Demandeur des essais : ENESAD

Rapport n°: TSCF/MR/ChB/

ENGRAIS

Marque :

Emb :

Date : 21/08/2006

Type : N-P-K

Origine : ENESAD

Echantillon :

DENSITE

1.082	1.082	1.081	Densité moyenne	1.082
-------	-------	-------	-----------------	--------------

GRANULOMETRIE

φ supérieur à 5 mm	1.1	gr	0.31	%
φ compris entre 5 et 4 mm	44.8	gr	12.66	%
φ compris entre 4 et 3.15 mm	221.9	gr	62.68	%
φ compris entre 3.15 et 2.5 mm	81.9	gr	23.14	%
φ compris entre 2.5 et 2 mm	4	gr	1.13	%
φ compris entre 2 et 1.6 mm	0.2	gr	0.06	%
φ compris entre 1.6 et 1 mm	0	gr	0.00	%
φ compris entre 1 et 0.5 mm	0	gr	0.00	%
φ inférieur à 0.5 mm	0.1	gr	0.03	%

Diamètre moyen (D50) : **3.50 mm**

Etalement granulométrique (E=D90-D10) : **1.49 mm**

DURETE

4.58	6.01	6.32	6.72	7.23	7.23	7.23
7.54	7.84	8.25	8.35	8.66	8.76	9.78
Dureté moyenne		7.54	daN	Moyenne sur 10 valeurs (sans les extrêmes)		

ECOULEMENT

Temps (seconde)	6.51	6.44	Écoulement moy. F (kg/min)	Répétabilité (r)	
				Tolérée	mesurée
Poids (kg)	1.178	1.164	6.58	0.10	0.01

Analyses physiques des engrais minéraux

Demandeur des essais : ENESAD

Rapport n°: TSCF/MR/ChB/

ENGRAIS

Marque :

Emb :

Date : 21/08/2006

Type : Kcl 60%

Origine : ENESAD

Echantillon :

DENSITE

1.075	1.073	1.073	Densité moyenne	1.074
-------	-------	-------	-----------------	--------------

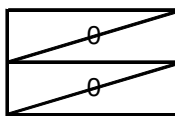
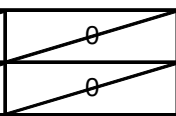
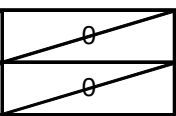
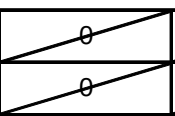
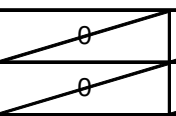
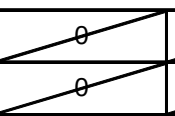
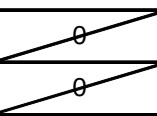
GRANULOMETRIE

φ supérieur à 5 mm	3.7	gr	0.94	%
φ compris entre 5 et 4 mm	34.4	gr	8.75	%
φ compris entre 4 et 3.15 mm	112.4	gr	28.58	%
φ compris entre 3.15 et 2.5 mm	128.6	gr	32.70	%
φ compris entre 2.5 et 2 mm	65	gr	16.53	%
φ compris entre 2 et 1.6 mm	18.4	gr	4.68	%
φ compris entre 1.6 et 1 mm	12.5	gr	3.18	%
φ compris entre 1 et 0.5 mm	9.8	gr	2.49	%
φ inférieur à 0.5 mm	8.5	gr	2.16	%

Diamètre moyen (D50) : **2.92 mm**

Etalement granulométrique (E=D90-D10) : **2.21 mm**

DURETE

						
Dureté moyenne	0.00 daN			Moyenne sur 10 valeurs (sans les extrêmes)		

ECOULEMENT

Temps (seconde)	6.96	6.79	Ecoulement moy. F (kg/min)	Répétabilité (r)	
				Tolérée	mesurée
Poids (kg)	1.172	1.151	6.14	0.09	0.08

CONTRIBUTIONS DE L'AUTEUR

Revues

- Villette S, Piron E, Cointault F, Sarrazin P, 2003. Relation entre débit massique et couple d'entraînement d'un disque de distributeur d'engrais : modélisation et confrontations expérimentales. Ingénieries N° Spécial 2003 - Technologies pour les agrosystèmes durables, 73-84.
- Villette S, Cointault F, Piron E, Chopinet B, 2005. Centrifugal spreading : an analytical model for the motion of fertiliser particles on a spinning disc. Biosystems Engineering, 92(2), 157-164.
- Villette S, Cointault F, Chopinet B, Paindavoine M, 2006. Optimizing Hough transform for fertilizer spreading optical control. Optical Engineering, 45(2), Article n° 027006, 11 pages.

Conférences

- Villette S, Cointault F. Fertiliser centrifugal spreading : Imaging systems in the vicinity of the disc for motion measurements of particles. Proceedings of AgEng 2004. 12-16 September 2004, Leuven, Belgium. 398-399.
- Villette S, Cointault F, Chopinet B, Paindavoine M. Centrifugal fertiliser spreading : determination of the outlet velocity using motion blurred image. 1st international symposium on centrifugal fertiliser spreading, 15-16 September 2005, Leuven, Belgium.
- Villette S, Cointault F, Chopinet B, Zwaenepoel P, Paindavoine M. Centrifugal spreading : Motion blurred images to determine the three components of fertiliser outlet velocity. Proceedings of AgEng 2006. 03-07 September 2006, Bonn, Germany. Archive n° 440119580135.
- Villette S, Cointault F, Zwaenepoel P, Martin R, Chopinet B, Paindavoine M. Centrifugal spreading : Extracting 3D outlet velocity and flow distribution from motion blurred images. 2nd International symposium on centrifugal fertiliser spreading, 24-25 October 2006, Montoldre/Clermont-Ferrand, France. *Accepté*