

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique
Laboratoire de Génie Electrique de Guelma – LGEG

THÈSE

En Vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Troisième Cycle

Domaine : Sciences et Technologie Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques

Présentée par

Kahaleras Messaouda

Intitulée

**Contribution à l'application des procédés électrostatiques au traitement
des produits céréaliers**

Soutenue le : 13/11/2025

Devant le Jury composé de :

Mr. MENDACI Sofiane	Professeur	Univ. de Guelma	Président
Mr. REMADNIA Mokdad	M.C. Classe A	Univ. de Guelma	Encadreur
Mr. KACHI Miloud	Professeur	Univ. de Guelma	Co-encadreur
Mr. LABAR Hocine	Professeur	Univ. de Annaba	Examinateur
Mr. BOUDEFEL Amar	M.C. Classe A	Univ. de Guelma	Examinateur

Année Universitaire : 2025-2026

Remerciements

Tout d'abord, louanges et remerciements à Dieu pour m'avoir donné la volonté et le courage et la force de terminer ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse, **Dr. Remadnia Mokdad**, pour sa disponibilité constante, ses précieux conseils et son soutien indéfectible tout au long de ce projet de thèse. Je lui suis reconnaissante de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme et de son efficacité certaine que je n'oublierai jamais.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon co-directeur de thèse, **Pr. Kachi Miloud**, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien sans faille. Son accompagnement a été précieux pour la réussite de ce projet. Je le prie de trouver ici l'expression de mes sentiments et le témoignage de ma profonde gratitude.

Je suis très honorée de la présence à mon jury de thèse et je tiens à remercier:

Monsieur **Mendaci Sofiane**, Professeur à l'Université de Guelma d'avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je tiens à l'assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'il porte à ce travail.

Monsieur **Labar Hocine**, Professeur à l'Université d'Annaba, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être membre de mon jury de thèse en qualité d'examinateur.

Monsieur **Boudefel Amar**, Maître de Conférences à l'Université de Guelma, pour l'honneur qu'il m'a fait par sa participation à mon jury de thèse en qualité d'examinateur.

*Je dédie ce travail
À mon père*

Résumé

Cette étude vise à améliorer le processus d'extraction de la semoule de blé en appliquant la séparation électrostatique pré et post-mouture. Avant mouture, la séparation électrostatique sert à purifier le blé en éliminant les résidus de la récolte, mélangés avec les grains de blé. Après mouture, la séparation électrostatique est appliquée afin d'augmenter le taux d'extraction de semoule de blé dur par le recyclage du son de blé, qui jusqu'à ce jour constitue un sous-produit issu de la mouture et du tamisage traditionnels. Le prétraitement électrostatique d'un mélange de grains de blé dur et de résidus de récolte, a permis d'atteindre une pureté de blé supérieure à 98%. D'autre part, l'abrasion du son de blé, suivie de la séparation électrostatique du mélange obtenu, a permis de récupérer une quantité importante de semoule, atteignant 50 % de la masse traitée. A l'issue de cette opération, trois fractions ont été obtenues après séparation : la semoule, le son fin et le son relativement gros. La caractérisation électrostatique des produits séparés par la mesure de la charge électrique et le déclin de potentiel de surface, a montré un comportement conducteur des fractions avec une légère différence entre celles-ci en termes de préservation de la charge acquise. Ce comportement conducteur du son de blé a conduit au choix d'un séparateur électrostatique de type induction pour extraire la semoule résiduelle du processus de mouture classique. La méthodologie des plans d'expériences a été utilisée pour étudier l'influence des principaux paramètres : la haute tension appliquée, la vitesse du convoyeur et la vitesse du cylindre rotatif. Le procédé électrostatique a été optimisé en tenant compte à la fois de la quantité et de la qualité de la semoule récupérée, visant un taux de récupération élevé et la meilleure qualité possible. L'analyse physico-chimique a révélé que la semoule récupérée après traitement électrostatique était de qualité satisfaisante, contenant une teneur en cendres de 1,1 %.

Mots clés : Séparation électrostatique, Son du blé, Plans d'expériences, Charge électrique, Champ électrique.

Abstract

This study aims to improve the process of extracting wheat semolina by applying pre- and post-milling electrostatic separation. Before milling, electrostatic separation is used to purify wheat by removing straw residues mixed with wheat grains. After milling, electrostatic separation is applied to increase the extraction rate of durum wheat semolina by recycling wheat bran, as a by-product, issued from traditional milling and sieving. Electrostatic pretreatment of a mixture of durum wheat grains and harvest residues has achieved wheat purity of over 98%. On the other hand, the abrasion of the wheat bran and then electro-statically separating obtained components allowed a recovery of a significant amount of semolina, reaching 50% of the treated mass. The process resulted in three distinct fractions after separation, namely, semolina, fine bran, and relatively big bran. The electrostatic characterization, including surface potential decay and charge measurement, showed a clear conductive behavior with a slight difference between fractions in terms of charge conservation. This electric conductive behavior of the wheat bran leads to choose an induction-type electrostatic separator to extract residual semolina from the grinding process. The design of experiments methodology was used to study the influence of the main parameters: the applied high voltage, the conveyor speed, and the speed of the rotating part. The process was optimized taking into consideration both the quantity and quality of the recovered semolina, targeting a high recovery rate with the best possible quality. The physical and chemical analysis showed a good quality of the recovered semolina with 1.1% ash content.

Keywords: Electrostatic separation, Wheat bran, Design of experiments, Electric charge, Electric field.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى زيادة معدل استخلاص سميد القمح القاسي عن طريق تطبيق عملية الفصل الكهروستاتيكي قبل الطحن وبعده. قبل الطحن، يستخدم الفصل الكهروستاتيكي لتنقية حبوب القمح بإزالة مخلفات المحاصيل الزراعية التي قد تختلط بها أثناء عملية الحصاد. بعد الطحن، يستخدم الفصل الكهروستاتيكي لزيادة معدل استخلاص سميد القمح القاسي من خلال إعادة تدوير نخالة القمح والتي تعتبر إلى يومنا هذا منتج ثانوي لعملية الطحن والغربلة التقليدية. لقد أتاحت عملية المعالجة الكهروستاتيكية المسبيقة لمزيج متكون من حبوب القمح القاسي وبقايا الحصاد تحقيق نسبة لنقاء القمح تزيد عن 98 %. كما سمحت عملية كشط نخالة القمح، متبرعة بالفصل الكهروستاتيكي للخلط الناتج، باستعادة كمية معينة من السميد، بلغت نسبتها 50 % من الكتلة الابتدائية المعالجة. بعد نهاية عملية الفصل تم الحصول على ثلاثة نواتج مختلفة: السميد، النخالة الناعمة والنخالة الخشنة نسبياً. أظهرت عملية التوصيفات الكهروستاتيكية للنواتج المتحصل عليها عن طريق قياس الشحنة الكهربائية وتناقص الجهد السطحي سلوكاً موصلاً للنواتج مع وجود فرق طفيف بينها من حيث الحفاظ على الشحنة المكتسبة. أدى هذا السلوك الموصى لنخالة القمح إلى اختيار فاصل كهروستاتيكي من النوع الحثي لاسترجاع السميد المتبقى بعد عملية الطحن التقليدية. تم استخدام منهجية تصميم التجارب لدراسة تأثير العوامل الرئيسية المتمثلة في: الجهد العالي المطبق، سرعة الناقل وسرعة الأسطوانة الدوار. تم الوصول بالعملية الكهروستاتيكية إلى المستوى الأمثل مع الأخذ بعين الاعتبار كل من كمية ونوعية السميد المسترد، بهدف تحقيق معدل استرجاع مرتفع مع أفضل جودة ممكنة. أظهر التحليل الفيزيائي والكيميائي أن السميد المسترجع بعد المعالجة الكهروستاتيكية كان ذو جودة مرضية، ويحتوي على نسبة رماد تبلغ 1.1 %.

كلمات مفتاحية: فصل كهروستاتيكي، نخالة القمح، تصميم التجارب، شحنة كهربائية، مجال كهربائي

Sommaire

Introduction générale	13
------------------------------	----

Chapitre I: Etat de l'art

I.1. Introduction	16
I.2. Grain de blé	16
I.2.1. Structure du grain de blé	17
I.2.1.1. Enveloppes	17
I.2.1.2. Albumen	18
I.2.1.3. Germe	18
I.3. Préparation du son de blé	19
I.3.1. Opérations de transformation du blé en semoule	19
I.3.1.1. Réception des quantités de blé	19
I.3.1.2. Pré-nettoyage	19
I.3.1.3. Nettoyage	19
I.3.1.4. Conditionnement	20
I.3.1.5. Mouture	21
I.3.2. Produits de mouture	24
I.3.3. Semoule du blé	25
I.4. Installations de séparation en champ électrique	26
I.4.1. Séparation de matériaux conducteurs	26
I.4.2. Séparation d'un mélange conducteur - isolant	27
I.4.3. Séparation d'un mélange isolant - isolant	30
I.5. Procédés de fractionnement de la matière végétale	32
I.5.1. Technologies de séparation électrostatique	33
I.5.1.1. Séparateurs tribo-électrostatiques	33
I.5.1.2. Séparateurs à décharge couronne - induction électrostatique	35
I.5.2. Turbo-séparation	38
I.6. Positionnement de la problématique de la thèse	39

Chapitre II: Propriétés électriques de blé

II.1. Introduction	40
II.2. Propriétés électriques du son de blé	40
II.2.1. Conductivité et comportement électrique du son de blé	40
II.2.2. Etat de charge du son de blé	41
II.3. Propriétés diélectriques du son de blé	42
II.3.1. Permittivité complexe	43
II.3.2. Méthodes de détermination de la permittivité complexe	44
II.3.3. Propriétés diélectriques complexes du son de blé	46
II.3.4. Facteurs influençant la permittivité complexe du son de blé	46

II.3.4.1. La densité	47
II.3.4.2. La température	47
II.3.4.3. La fréquence	48
II.3.4.4. L'humidité	49
II.4. Effet de la teneur en humidité sur les tissus du son de blé	50
II.5. Effet de la teneur en humidité sur la conductivité du son de blé	50
II.6. Propriétés diélectriques de la farine du blé	53
II.7. Propriétés diélectriques de la paille de blé	54
II.8. Conclusion	56

Chapitre III: Installations et méthodes expérimentales

III.1. Introduction	57																		
III.2. Matériaux céréaliers	58																		
III.3. Séparateur à induction électrostatique <table> <tr> <td>III.3.1. Description du séparateur</td> <td>59</td> </tr> <tr> <td>III.3.2. Principe de fonctionnement du séparateur à induction électrostatique</td> <td>61</td> </tr> <tr> <td>III.3.3. Forces agissant sur une particule</td> <td>62</td> </tr> </table>	III.3.1. Description du séparateur	59	III.3.2. Principe de fonctionnement du séparateur à induction électrostatique	61	III.3.3. Forces agissant sur une particule	62	59												
III.3.1. Description du séparateur	59																		
III.3.2. Principe de fonctionnement du séparateur à induction électrostatique	61																		
III.3.3. Forces agissant sur une particule	62																		
III.4. Traitement du son de blé <table> <tr> <td>III.4.1. Description du système d'abrasion</td> <td>64</td> </tr> </table>	III.4.1. Description du système d'abrasion	64	63																
III.4.1. Description du système d'abrasion	64																		
III.5. Caractérisation électrique <table> <tr> <td>III.5.1. Charge électrique de matériaux céréaliers</td> <td>66</td> </tr> <tr> <td>III.5.2. Potentiel de surface de matériaux céréaliers</td> <td>67</td> </tr> </table>	III.5.1. Charge électrique de matériaux céréaliers	66	III.5.2. Potentiel de surface de matériaux céréaliers	67	66														
III.5.1. Charge électrique de matériaux céréaliers	66																		
III.5.2. Potentiel de surface de matériaux céréaliers	67																		
III.6. Caractérisation physico-chimique des produits <table> <tr> <td>III.6.1. Détermination de la teneur en cendres</td> <td>68</td> </tr> <tr> <td>III.6.2. Détermination de la teneur en eau</td> <td>69</td> </tr> <tr> <td>III.6.3. Détermination des indices de coloration</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>III.6.4. Détermination de la granulométrie</td> <td>71</td> </tr> </table>	III.6.1. Détermination de la teneur en cendres	68	III.6.2. Détermination de la teneur en eau	69	III.6.3. Détermination des indices de coloration	70	III.6.4. Détermination de la granulométrie	71	68										
III.6.1. Détermination de la teneur en cendres	68																		
III.6.2. Détermination de la teneur en eau	69																		
III.6.3. Détermination des indices de coloration	70																		
III.6.4. Détermination de la granulométrie	71																		
III.7. Optimisation du processus de séparation par les plans d'expériences <table> <tr> <td>III.7.1. Plans d'expériences factoriels complets</td> <td>73</td> </tr> <tr> <td>III.7.2. Plans d'expériences pour surfaces de réponse <table> <tr> <td>III.7.2.1. Modèle polynomial du second degré</td> <td>74</td> </tr> <tr> <td>III.7.2.2. Les plans composites centrés</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>III.7.2.3. Plan composite à faces centrées</td> <td>76</td> </tr> </table> </td> <td>74</td> </tr> <tr> <td>III.7.3. Evaluation de la qualité du modèle <table> <tr> <td>III.7.3.1. Qualité descriptive</td> <td>77</td> </tr> <tr> <td>III.7.3.2. Qualité prédictive</td> <td>78</td> </tr> </table> </td> <td>77</td> </tr> <tr> <td>III.7.4. Logiciels de plans d'expérience</td> <td>78</td> </tr> </table>	III.7.1. Plans d'expériences factoriels complets	73	III.7.2. Plans d'expériences pour surfaces de réponse <table> <tr> <td>III.7.2.1. Modèle polynomial du second degré</td> <td>74</td> </tr> <tr> <td>III.7.2.2. Les plans composites centrés</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>III.7.2.3. Plan composite à faces centrées</td> <td>76</td> </tr> </table>	III.7.2.1. Modèle polynomial du second degré	74	III.7.2.2. Les plans composites centrés	75	III.7.2.3. Plan composite à faces centrées	76	74	III.7.3. Evaluation de la qualité du modèle <table> <tr> <td>III.7.3.1. Qualité descriptive</td> <td>77</td> </tr> <tr> <td>III.7.3.2. Qualité prédictive</td> <td>78</td> </tr> </table>	III.7.3.1. Qualité descriptive	77	III.7.3.2. Qualité prédictive	78	77	III.7.4. Logiciels de plans d'expérience	78	72
III.7.1. Plans d'expériences factoriels complets	73																		
III.7.2. Plans d'expériences pour surfaces de réponse <table> <tr> <td>III.7.2.1. Modèle polynomial du second degré</td> <td>74</td> </tr> <tr> <td>III.7.2.2. Les plans composites centrés</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>III.7.2.3. Plan composite à faces centrées</td> <td>76</td> </tr> </table>	III.7.2.1. Modèle polynomial du second degré	74	III.7.2.2. Les plans composites centrés	75	III.7.2.3. Plan composite à faces centrées	76	74												
III.7.2.1. Modèle polynomial du second degré	74																		
III.7.2.2. Les plans composites centrés	75																		
III.7.2.3. Plan composite à faces centrées	76																		
III.7.3. Evaluation de la qualité du modèle <table> <tr> <td>III.7.3.1. Qualité descriptive</td> <td>77</td> </tr> <tr> <td>III.7.3.2. Qualité prédictive</td> <td>78</td> </tr> </table>	III.7.3.1. Qualité descriptive	77	III.7.3.2. Qualité prédictive	78	77														
III.7.3.1. Qualité descriptive	77																		
III.7.3.2. Qualité prédictive	78																		
III.7.4. Logiciels de plans d'expérience	78																		
III.7. Conclusion	79																		

Chapitre IV: Résultats de purification électrostatique de la semoule de blé

IV.1. Introduction	80
IV.2. Résultats de la purification du blé	80

IV.3. Résultats de traitement du son de blé par abrasion	82
IV.4. Résultats de la séparation électrostatique	83
IV.5. Caractérisation électrostatique des produits séparés	86
IV.5.1. Déclin de potentiel en surface	86
IV.5.2. Etat de charge des produits séparés	87
IV.6. Modélisation et optimisation du procédé d'électro-séparation	89
IV.7. Analyse physico-chimique des semoules extraites	95
IV.8. Conclusion	97
Conclusion générale	98
Bibliographie	100

Liste des figures

Figure I.1 : Anatomie descriptive du blé	16
Figure 1.2 : Couches cellulaires du grain de blé	17
Figure 1.3 : Vis Mouilleuse intensive utilisée dans le groupe Amor Benamor	21
Figure 1.4 : Processus de mouture du blé dur	22
Figure 1.5 : Principe de fonctionnement d'un broyeur à cylindre	23
Figure I.6 : Principe du tamisage	23
Figure I.7 : Principe du sassage	24
Figure I.8 : Séparateur électrostatique pour la séparation d'un mélange de conducteurs	27
Figure I.9 : Photographie du séparateur à plaque destiné pour la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolant-conducteur	28
Figure I.10 : Photographie du séparateur à tambour destiné pour la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolant-conducteur	29
Figure I.11 : Dispositif de séparation à chute libre	31
Figure I.12 : Procédé de séparation tribo-aéro-électrostatique	32
Figure I.13 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-électrostatique	33
Figure I.14 : Séparateur tribo-électrostatique (première installation)	35
Figure I.15 : Séparateur couronne électrostatique à bande transporteuse	36
Figure I.16 : Image photographique du séparateur à tambour	37
Figure I.17 : Schéma du processus de classification par turbo-séparation	38
Figure II.1 : Charge massique acquise par effet tribo-électrique dans les trois fractions (son de blé entier, fractions riches en aleurone et fraction riches en péricarpe), en fonction de la taille des particules et de la teneur en humidité	42
Figure II.2 : Représentation schématique de la structure des particules de: (A) fraction d'aleurone ; (B) fraction de péricarpe	43
Figure II.3 : Capacité à plaques parallèles	45
Figure II.4 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons du son de blé en fonction de la température aux teneurs d'humidité indiquées	48
Figure II.5 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons du son de blé en fonction de la fréquence aux teneurs d'humidité indiquées	49
Figure II.6 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons du son de blé en fonction de taux d'humidité aux températures indiquées	49

Figure II.7 : Temps de demi -déclin de potentiel de surface dans les trois échantillons (son de blé entier, fractions riches en aleurone et fraction riches en péricarpe), chargées par décharge couronne : temps nécessaire pour perdre 50 % du potentiel maximal, selon la taille des particules et la teneur en humidité de l'échantillon (A : échantillons standard ; B : échantillons secs)	51
Figure II.8: Effet du temps d'exposition à l'humidité ambiante sur le DPS dans les fractions : son de blé entier, fractions riches en aleurone et fractions riches en péricarpe	52
Figure II.9 : Constante diélectrique (ϵ') et facteur de perte (ϵ'') de la farine de blé pure en fonction de la fréquence (Teneur en humidité =12,56%, Fréquences : 10–3000 MHz, Température : 25-85°C)	53
Figure II.10 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons de paille de blé aux températures indiquées en fonction de la fréquence (teneur en humidité = 15,4 %, masse volumique = $90,0 \text{ kg.m}^{-3}$)	55
Figure II.11 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons de paille de blé en fonction de la température aux teneurs en humidité et aux densités indiquées (fréquence = 100 kHz)	55
Figure II.12 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons de paille de blé en fonction de la teneur en humidité aux fréquences indiquées (Température = 25°C, masse volumique = $89,5 \pm 1,1 \text{ kg.m}^{-3}$)	55
Figure II.13 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons de paille de blé en fonction de la masse volumique aux niveaux d'humidité indiqués (fréquence = 10 kHz, température 20°C)	56
Figure III.1 : Concept de la thèse : Prétraitement et post-traitement par voie électrostatique	57
Figure III.2 : Mélange utilisé pour les essais de prétraitement électrostatique (composition : pailles, chaumes et grains du blé dur)	58
Figure III.3. Image au microscope (grossissement : $60\times$) de son de blé récupéré après un processus de mouture conventionnelle	59
Figure III.4 : Séparateur électrostatique à induction : (a) Représentation schématique (b) Photographie du séparateur électrostatique	60
Figure III.5 : Processus de séparation basé sur l'induction électrostatique	61
Figure III.6 : Distribution du champ électrique et trajectoire de la particule pour une tension appliquée sur le cylindre de 10 kV	63
Figure III.7 : Forces agissant sur une particule conductrice sphérique	63
Figure III.8 : Dispositif d'abrasion du son de blé: (a) Représentation schématique (b) Photographie du dispositif d'abrasion	65
Figure III.9 : Equipement permettent de mesurer la charge électrique : (a) Schéma illustrant le principe de mesure, (b) Photographie du système de mesure (un électromètre Keithley Model 6514 et un Seau de faraday)	66
Figure III.10 : Stand expérimental de mesure du DPS	67

Figure III.11 : Équipement utilisé pour déterminer le taux de cendres : (a) Four électrique à moufle (Model : Nabertherm) ; (b) Dessiccateur ; (c) Balance électronique	69
Figure III.12 : Dessiccateur halogène utilisé pour l'analyse du taux d'humidité des échantillons (Model HG63, Mettler Toledo)	70
Figure III.13 : Colorimètre Type : Konica Minolta, Modèle : CR - 410	71
Figure III.14 : Photographie de tamiseuse utilisée pour l'analyse granulométrique de la semoule (ROTACHOC CHOPIN Technologies, Villeneuve la Garenne-France)	72
Figure III.15 : Représentation schématique d'un processus : cas de la séparation électrostatique	72
Figure III.16 : Plan composite pour 2 facteurs	76
Figure IV.1 : Schéma de séparateur électrostatique à induction conçu au laboratoire	80
Figure IV.2 : Pureté de blé récupéré en fonction de la distance entre le cylindre rotatif et le convoyeur métallique	82
Figure IV.3 : Images microscopiques du son de blé (a) avant et (b) après le processus d'abrasion (grossissement : 60 \times)	83
Figure IV.4 : Masse des produits récupérés en fonction de la tension appliquée sur le l'électrode cylindrique	84
Figure IV.5 : Fractions récupérées: (a) images réelles des fractions ; (b) images microscopiques (grossissement : 40 \times) obtenues avec un microscope optique (OPTIKA B-150)	85
Figure IV.6 : Déclin de potentiel de surface après (a) 60 secondes et (b) 10 secondes dans les fractions : son fin de blé (collecteur N1), son de blé (collecteur N2) et semoule (collecteurs N3). Les courbes de DPS représentent la moyenne d'au moins trois essais (écart-type < 50 V)	87
Figure IV.7 : Rapport charge/masse des fractions : son fin de blé, son de blé et semoule avant et après séparation (les résultats sont des moyennes de trois expériences)	88
Figure IV.8 : Diagramme d'un plan composite à faces centrées (CFC) des essais réalisés pour trois facteurs: tension appliquée sur le cylindre U : ($U_{min} = 8,5\text{kV}$ et $U_{max} = 12,5\text{kV}$); vitesse du convoyeur v : ($v_{min} = 0,2\text{cm/s}$ et $v_{max} = 0,8\text{cm/s}$); vitesse du cylindre n : ($n_{min} = 9 \text{ rpm}$ et $n_{max} = 47 \text{ rpm}$)	89
Figure IV.9 : Coefficients des modèles quadratiques calculés par le logiciel MODDE 8.0 pour la masse récupérée dans: (a) collecteur N1, (b) collecteur N2, (c) collecteur N3	92
Figure IV.10 : Masse prédictive dans: (a) collecteur N1, (b) collecteur N2 et (c) collecteur N3, en fonction de la tension appliquée U (kV), de la vitesse du cylindre n (tr/min) et de la vitesse du convoyeur v (cm/s). Dans chaque cas, l'autre variable est maintenue constante et égale à sa valeur centrale : $U = 10,5 \text{ kV}$, $n = 28 \text{ tr/min}$ et $v = 0,5 \text{ cm/s}$. Les calculs ont été effectués avec le logiciel MODDE 8.0, pour un niveau de confiance de 0,95	94
Figure IV.11 : Courbes de réponse de la masse récupérée dans le collecteur N3, calculées par le logiciel MODDE 8.0	95

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principaux équipements de nettoyage du blé dans les moulins	20
Tableau I.2 : Classement des semoules selon leur granulométrie	25
Tableau IV.1 : Résultats des expériences du plan composite à faces centrées	91
Tableau IV.2 : Analyses physico-chimiques de la fraction de semoule	96

Introduction générale

Récemment, le monde a constaté une accélération marquée de la croissance démographique, avec des études révélant que la population mondiale dépasse désormais les 8 milliards d'habitants. Cette augmentation suscite de profondes inquiétudes pour l'avenir de la planète et représente une menace pour l'humanité, notamment en matière d'approvisionnement alimentaire. La demande croissante de produits alimentaires entraîne une consommation accrue, exerçant une pression considérable sur les ressources naturelles, telles l'eau douce, les sols cultivables et les sources d'énergie. Les produits alimentaires de base, tels que le blé, constituent un élément fondamental de l'alimentation mondiale et deviennent de plus en plus précieux, car ils subissent à la fois l'augmentation de la demande et les pressions environnementales. Face à ces défis croissants, des inquiétudes émergent quant aux risques d'épuisement des ressources et à la capacité des systèmes agricoles actuels de soutenir durablement une population en constante augmentation. Il est donc essentiel de réduire ces impacts tout en développant de nouvelles ressources pour renforcer la sécurité alimentaire, car la technologie joue un rôle important dans nos vies.

Les applications électrostatiques, en particulier la séparation électrostatique, prennent une place croissante dans les études et recherches actuelles. Cette technologie novatrice attire de nombreux chercheurs en raison de ses avantages significatifs; elle se distingue par sa consommation d'énergie réduite. De plus, elle garantit une mise en œuvre sécurisée et économique, ce qui en fait une solution abordable pour de nombreux secteurs industriels. La séparation électrostatique offre des performances prometteuses et favorables, notamment dans le domaine de la fragmentation et du tri des végétaux, où elle se distingue par son efficacité et son potentiel innovant, encourageant et intéressant. Elle se révèle particulièrement efficace pour les grains de céréales possédant plusieurs enveloppes, ce qui constitue un défi pour les procédés de traitement traditionnels. En appliquant cette technique, il devient possible d'extraire et de traiter des éléments spécifiques tout en préservant les propriétés du matériau, assurant ainsi le maintien de la qualité et des caractéristiques intrinsèques des produits. Cette alliance entre efficacité, sécurité et rentabilité positionne la séparation électrostatique comme une technologie prometteuse pour le développement de procédés industriels durables.

L'objectif principal de cette thèse est d'augmenter le taux d'extraction de la semoule en réduisant les pertes d'amande farineuse. Cette dernière est souvent très attachée aux enveloppes et se retrouve dans le son du blé après la mouture. Dans ce cadre, deux installations innovantes ont été conçues et réalisées dans les laboratoires de Génie électrique de Guelma. La première installation est un séparateur électrostatique à cylindre tournant, conçu spécifiquement pour le tri du mélange de matériaux végétaux grâce au mécanisme d'induction électrostatique utilisé pour charger les particules à séparer. La deuxième installation est un dispositif d'abrasion utilisé pour le traitement du son de blé. La combinaison d'une abrasion mécanique appropriée du son de blé suivie d'une séparation électrostatique dans un champ électrique constitue un processus complémentaire à la mouture traditionnelle. La thèse est divisée en quatre chapitres, qui sont structurés comme suit :

Le premier chapitre est dédié à la présentation des concepts fondamentaux relatifs au blé dur et aux différentes techniques de séparation électrostatique des matériaux. En outre, les diverses techniques de fractionnement des matières végétales sont exposées. Ce chapitre définit également la problématique et les objectifs abordés dans le cadre de cette thèse.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des propriétés électriques du blé qui pourraient favoriser sa séparation électrostatique. Cela englobe particulièrement la capacité des différentes couches cellulaires à se charger, en examinant les facteurs influençant les propriétés diélectriques tels que la structure, les compositions chimiques et physiques, ainsi que le taux d'humidité.

Dans **le troisième chapitre**, nous avons présenté une description détaillée des dispositifs utilisés ainsi que du protocole expérimental adopté tout au long de ce travail de recherche. Dans le but d'évaluer l'efficacité globale du traitement électrostatique, nous avons exposé les techniques de caractérisation électrique des matériaux céréaliers ainsi que les méthodes de caractérisation physico-chimique des produits séparés. Nous avons présenté les fondements de la méthodologie des plans d'expériences en tant que technique d'organisation et de traitement des résultats expérimentaux, ainsi que l'état des logiciels basés sur cette méthode, comme le logiciel MODDE 8.0, utilisé dans le cadre de cette étude.

Le quatrième chapitre est tout d'abord consacré à la présentation des résultats expérimentaux de prétraitement du blé et de post-traitement du son de blé par voie électrostatique, ainsi qu'aux résultats de la modélisation et de l'optimisation du processus électrostatique. Cela nous

a permis, d'une part, de purifier le blé avant la mouture et d'augmenter le taux d'extraction de la semoule, d'autre part. Nous avons ensuite exposé les résultats de la caractérisation physico-chimique de la semoule obtenue dans le but d'évaluer l'efficacité globale du traitement électrostatique proposé dans le cadre de ce travail de thèse.

Chapitre I

Etat de l'art

I.1. Introduction

Ce premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur le blé dur et les différentes techniques de séparation électrostatique rencontrées dans la littérature relative aux matériaux végétaux. La deuxième section décrit les diverses parties du grain de blé. La section I.3 présente le processus qui permet de transformer la matière première, qui est du blé dur, en deux produits distincts : la semoule et le son de blé. La section I.4 présente une synthèse sur les différentes installations conçues pour la séparation électrostatique des mélanges isolant/conducteur, conducteur/conducteur et isolant/isolant. Dans la section I.5, nous passerons en revue les diverses techniques de fractionnement de la matière végétale et enfin, la problématique et les objectifs abordés dans le cadre de cette thèse seront définis dans la dernière partie de ce chapitre.

I.2. Grain de blé

L'espèce blé dur, aussi appelée *Triticum durum* Desf, est cultivée depuis la préhistoire jusqu'à présent et se distingue par son amande dure et vitreuse (Figure I.1). Le blé dur est l'une des principales céréales à l'échelle mondiale. En comparaison avec les autres céréales, le blé dur est largement utilisé dans l'alimentation humaine à cause de sa teneur élevée en nutriments et de sa facilité de production [1], [2].

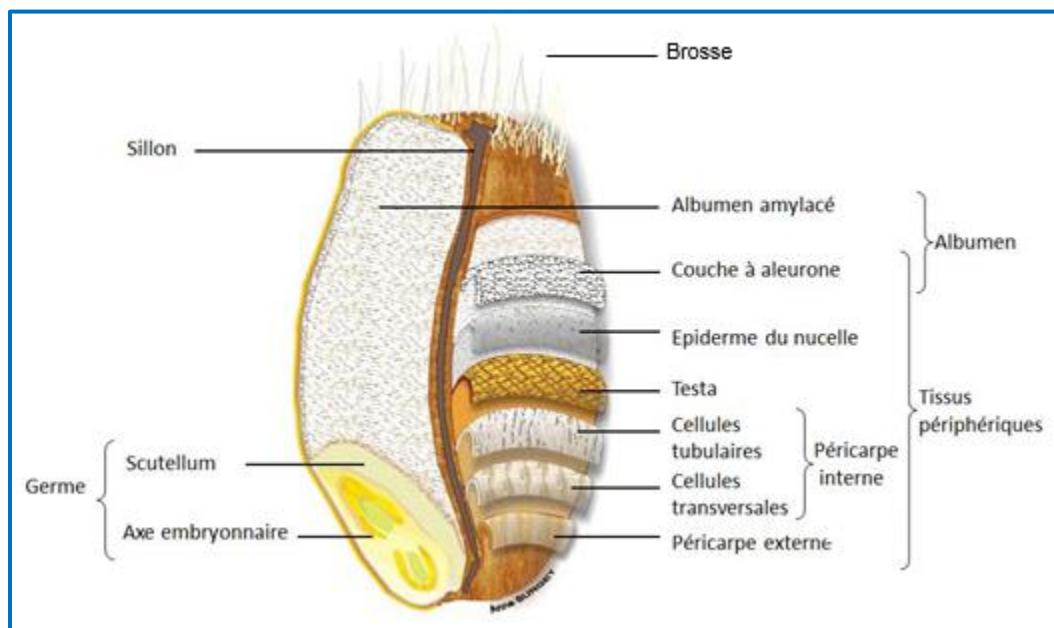


Figure I.1 : Anatomie descriptive du blé [3].

Le blé est une céréale qui appartient à un groupe de végétaux nommé des Poacées, il a une très bonne valeur alimentaire qui vient de sa teneur élevée en protéines. Quand on observe de près un grain de blé, on constate qu'elle possède une face dorsale au bout de laquelle se positionne une brosse qui constitue le système respiratoire de la plante et à l'autre bout se situe le germe du grain. Le grain présente en outre une face ventrale comportant le sillon qui s'étend sur toute la longueur.

I.2.1. Structure du grain de blé

Le blé possède une structure multicouche, principalement divisées en trois grandes parties montrées sur la figure I.2 : le germe, les enveloppes et l'albumen [4], dont la description détaillée est donnée dans les paragraphes suivants.

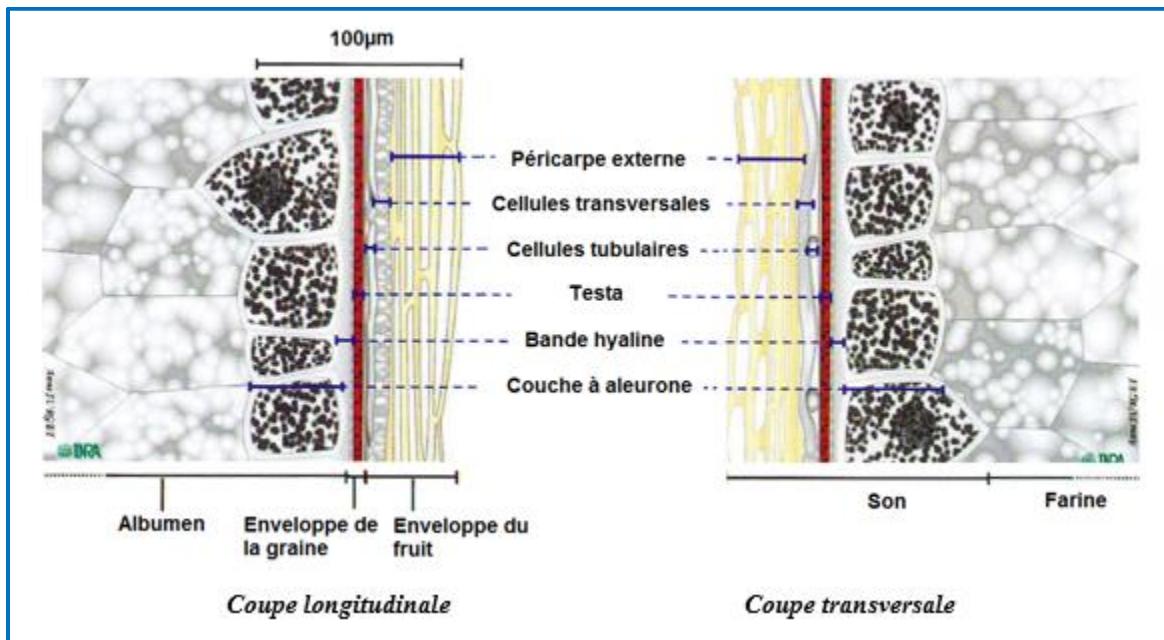


Figure 1.2: Couches cellulaires du grain de blé [3].

I.2.1.1. Enveloppes

C'est un ensemble de couches de cellules superposées qui protègent le grain et représentent 13 à 15 % du grain [5]. Les enveloppes se composent de quatre types de tissus distincts. Chaque tissu a sa propre épaisseur et sa propre nature. De la partie extérieure vers l'intérieur du grain de blé, on distingue la composition anatomique suivante :

- Le péricarpe externe est constitué de deux types de couches cellulaires, l'hypoderme et l'épiderme, très allongées et très intimement soudées. L'épaisseur totale du péricarpe externe varie de 15 à 30µm [3]. Celui-ci est extrêmement fibreux et sert à protéger la graine contre les agents pathogènes.
- Le péricarpe interne est composé de trois couches cellulaires [6]: Les cellules croisées, dont les parois sont lignifiées et alvéolées, les cellules tubulaires présentant des parois lignifiées et les cellules intermédiaires qui ne constituent pas une couche continue parce qu'ils ne sont pas présentes partout aux alentours du grain [3].
- La testa se compose d'une cuticule enveloppant deux couches cellulaires [7]. La présence de ces cellules allongées superposées lui confère l'apparence d'un maillage dense. La testa est très hydrophobe et extrêmement fine (seulement 5 à 8µm d'épaisseur).
- La bande hyaline correspond à l'épiderme du nucelle. L'embryon et l'albumen sont entourés de la bande hyaline qui s'attache à la couche aleurone par une cuticule extrêmement fine.

I.2.1.2. Albumen

Deux tissus différents sont présents dans l'albumen du grain de blé :

- La couche à aleurone est un tissu monocellulaire sans espace intercellulaire d'une épaisseur de 40 à 65µm. Entre l'albumen amylacé et les enveloppes du grain de blé, se situe cette couche à aleurone [8].
- L'albumen amylacé se présente sous la forme de grandes cellules possédant des parois très fines, ces cellules sont remplies de granules d'amidon encastrés au sein d'une matrice protéique viscoélastique, appelé gluten. Une fois broyé, l'albumen amylacé donnera les fractions de farine et de semoule. Ce tissu constitue environ 85% de la masse totale du grain [9].

I.2.1.3. Germe

Le germe est la partie qui renferme l'embryon, il s'agit de l'organe qui peut germer pour produire de nouvelles plantes [10]. Le germe ne constitue que 3% de la masse du grain de blé. Il comprend deux organes principaux : l'axe embryonnaire et le scutellum (cotylédon) qui représente une réserve nutritive pour germination et la croissance d'une nouvelle plantule.

I.3. Préparation du son de blé

I.3.1. Opérations de transformation du blé en semoule

La mouture vise à extraire l'albumen amylace des parties périphériques du blé. Elle varie en fonction des caractéristiques du blé utilisés et notamment sa dureté. En comparaison avec le blé tendre, la transformation du blé dur en semoule nécessite plus d'énergie. Ce processus comprend un enchaînement de plusieurs phases, que nous allons présenter ci-dessous.

I.3.1.1. Réception des quantités de blé

Des camions transportent les lots de blés achetés vers les moulins. Après l'arrivée des camions sur place, ils passent par un pont bascule pour déterminer le poids précis des quantités réceptionnées. Par la suite, la matière première sera déversée dans une trémie munie d'une grille métallique de 25mm de diamètre d'ouverture. Les déchets indésirables tels que les débris végétaux, les mottes de terre, les pierres de petite taille, etc. sont quant à elles retenues par la grille. Par la suite, le produit est transporté par le biais de bandes transporteuses ou des appareils élévateurs jusqu'aux silos de stockage.

I.3.1.2. Pré-nettoyage

Le pré-nettoyage est indispensable avec les lots réceptionnés. En général, cela est effectué afin de se débarrasser des déchets volumineux ainsi que les débris métalliques qui pourraient endommager les cylindres du moulin. On retrouve des équipements communs pour le nettoyage, tels que la bascule de réception qui permet examiner le passage des produits livrés, les séparateurs magnétiques, qui sont des gros aimants en forme d'anneaux ou de barreaux, qui éliminent les débris métalliques, ainsi que le séparateur qui permet d'effectuer un tri approfondi des différentes composantes du blé et enfin une aspiration par un courant d'air ascendant, permet d'éliminer les impuretés plus légères (poussières, grains cassés et échaudés, petites graines, etc.).

I.3.1.3. Nettoyage

Les lots de blé, dans un moulin, requièrent un nettoyage méticuleux avant d'être mis en mouture. Les impuretés et les corps étrangers minéraux ou végétaux sont éliminés selon les

propriétés physiques et aérodynamiques du blé [10]; le tableau I.1 récapitule les principaux équipements de nettoyage du blé. La procédure de nettoyage doit être réalisée avec efficacité, car elle a un impact direct sur la qualité du blé destiné à la transformation. Les quantités de blé nettoyé et sec peuvent être stockés en silos pendant plusieurs mois.

Tableau I.1 : Principaux équipements de nettoyage du blé dans les moulins [11].

Critère	Nature des impuretés	Nom de l'opération	Machines
Taille	<i>Grosse</i> : Pailles, maïs <i>Petite</i> : Sable, colza	Tamisage ou calibrage	- Nettoyeur - Séparateur
Forme	<i>Etirée</i> : Avoine <i>Ronde</i> : Vesce	Triage	- Trieur graine longue - Trieur graine ronde - Trieur hélicoïdal
Densité	<i>Dense</i> : Pierre <i>Moins dense</i> : Ergot	Classement densimétrique	- Epierreur-laveuse - Table densimétrique
Propriétés physicochimiques	<i>Magnétique</i> : Fer <i>Coeff. de frottement</i> : Grain vêtu <i>Couleur</i> : Ergot, nielle	Séparateur	- Aimant rotatif - Séparateur - Trieuse colorimétrique

I.3.1.4. Conditionnement

Une fois le blé nettoyé, il sera procédé à une succession d'opérations de conditionnement qui visent, d'une part, à augmenter les différences de friabilité entre les divers tissus du grain de blé, et d'autre part à modifier davantage l'élasticité des enveloppes externes. Lors du conditionnement, les grains subissent à deux reprises un traitement avec de l'eau. Chaque opération de mouillage est suivie d'un temps de repos dans les boisseaux pour que l'eau puisse pénétrer en profondeur dans les grains [12]. La formule qui calcule le débit d'eau à ajouter à la quantité de blé est la suivante [11]:

$$D_{eau} = D_{blé} * \frac{H_f - H_i}{100 - H_f}$$

Avec :

D_{eau} = Débit d'eau en L/h ;

$D_{\text{blé}}$ = Débit horaire de blé en kg/h ;

H_i = Humidité initiale du blé en % ;

H_f = Humidité finale du blé en %.

En premier lieu, la quantité du blé passe dans un mouilleur intensif où il sera traité avec deux tiers de la quantité totale d'eau destinée au mouillage, puis le blé est transmis vers une cellule de repos. En second lieu, Le blé provenant de la première cellule de repos subit un second mouillage où il reçoit le un tiers de la quantité d'eau restant, Ce processus sera complété par le repos des grains dans une deuxième cellule de repos. La figure I.3 montre une installation industrielle de préparation et conditionnement du blé.



Figure 1.3 : Vis Mouilleuse intensive utilisée dans le groupe Amor Benamor [11].

I.3.1.5. Mouture

La mouture revêt une importance capitale dans le processus de transformation de blé en semoule et farine. Au sein de moulins modernes, la mouture se déroule en plusieurs étapes, où de nombreux produits apparaissent et présentent des compositions chimiques variables. Il convient de souligner l'importance des deux phases suivantes [13]:

- Une phase de fragmentation-dissociation : Elle permet d'une part de fractionner les semoules vêtues par désagrégage, et d'autre part de dissocier l'amande et les enveloppes par broyage progressif et surveillé.
- Une phase de séparation des produits : Au cours de laquelle les sons et les enveloppes sont séparés en fonction de leur granulométrie grâce à une opération de tamisage, et en fonction de leurs propriétés aérodynamiques en épurant les semoules grâce à une autre opération de sassage.

La succession des étapes requises pour extraire la semoule est schématisée par la figure I.4.

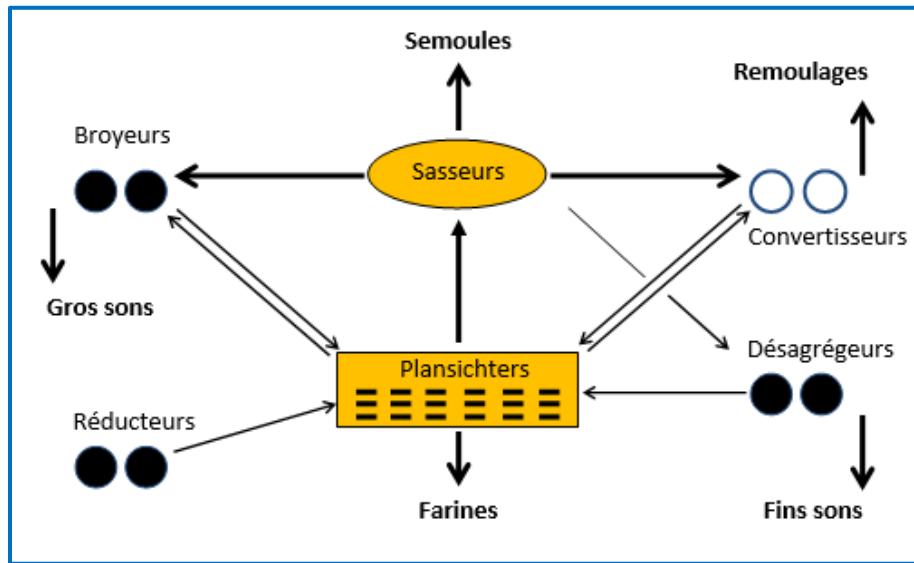


Figure 1.4: Processus de mouture du blé dur [13].

Le processus de mouture consiste à réaliser les quatre opérations suivantes :

a. Le broyage

Les grains de blé sont écrasés à l'aide d'appareils composés de deux paires de cylindres cannelés. Chaque cylindre tourne à une vitesse différente et dans le sens opposé de l'autre. La réduction du grain en particules s'effectue grâce à des réducteurs, désagrégateurs et convertisseurs. Au cours de cette opération, le broyage est conduit de manière très progressive, ce qui permet de détacher plus ou moins complètement les enveloppes de l'amande (Figure I.5).

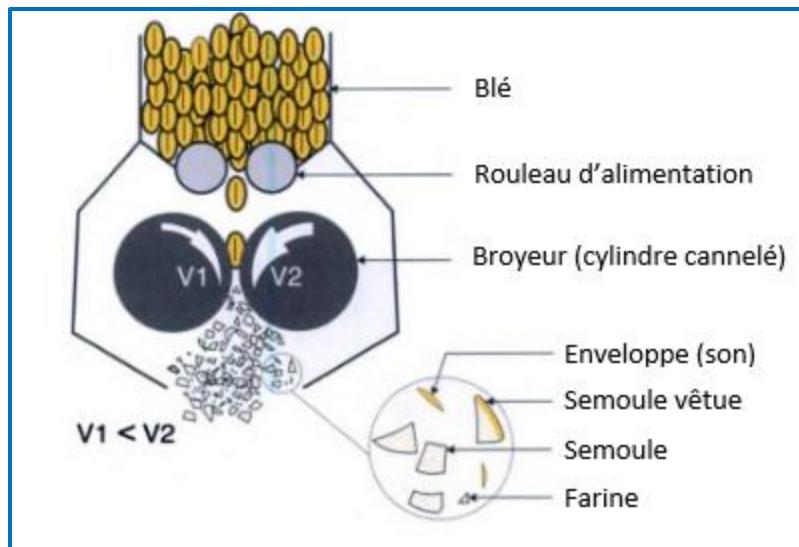


Figure 1.5: Principe de fonctionnement d'un broyeur à cylindre [13].

b. Le tamisage ou blutage

Les produits issus des cylindres sont triés selon de leurs granulométries grâce au tamisage. Ce classement est réalisé dans une série d'appareils appelés plansichters constitués d'un empilement de grands tamis vibrants animés par un mouvement giratoire (Figure I.6). Les plansichters permettent d'avoir des produits calibrés mais de différentes natures. On y trouve des particules de semoule, des fragments d'enveloppe et du son.

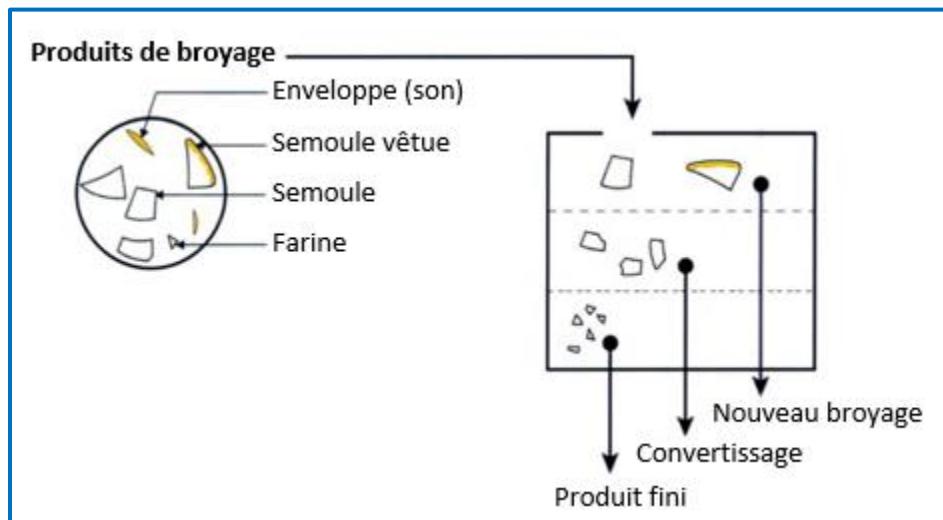


Figure I.6 : Principe du tamisage [13].

c. Le sassage

Le sassage joue un rôle essentiel dans la conversion du blé dur en semoule [14]. Grâce à une technique d'aspiration, il est possible de trier les produits de mouture selon leurs caractéristiques aérodynamiques et leur densité. L'utilisation des sasseurs permet l'épuration des semoules en utilisant un courant d'air ascendant au-dessus de tamis animé d'un mouvement vibratoire (Figure I.7). En effet, les particules de semoule pure de grande densité redescendent plus vite et traversent les mailles de tamis, tandis que les particules grossières et légères du son de blé sont dirigées vers le haut par le courant d'air qui souffle en direction verticale dans les sasseurs.

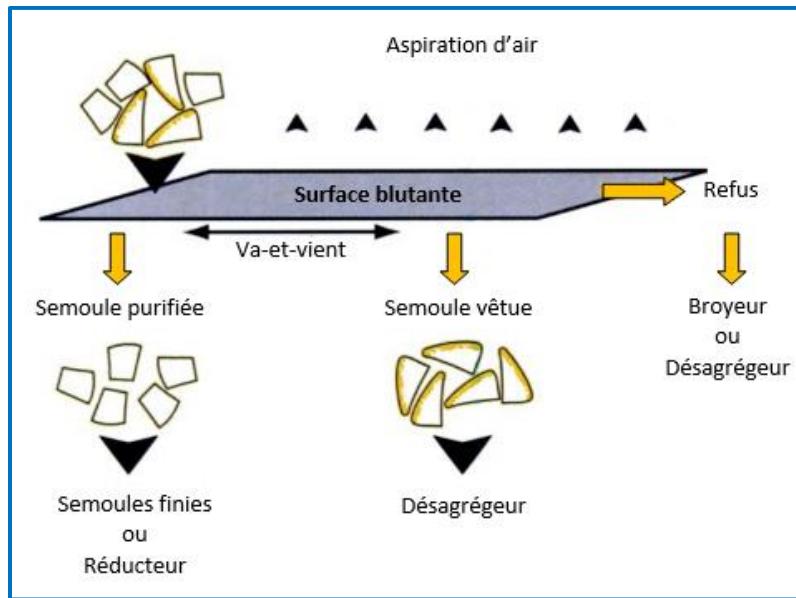


Figure I.7 : Principe du sassage [13].

I.3.2. Produits de mouture

Les opérations unitaires de transformation du blé dur en semoule sont combinées dans un diagramme de mouture. À l'issue de ces opérations, trois produits sont obtenus [15]:

- **Semoule pure** : Elle représente le produit noble de large usage, correspond aux fractions d'amande et constitue environ 75% de la masse initiale du blé.
- **Semoule spécifique** : La semoule spécifique, aussi appelée semoule super sassée fine, est un sous-produit de la mouture du blé dur du fait qu'elle provient des couches périphériques et représente environ 5 % de la masse initiale du blé.
- **Sons et remoulages** : Elles représentent près de 20% de la masse initiale du blé.

I.3.3. Semoule du blé

À la suite de la première transformation du blé dur, nous obtenons le produit principal, qui est la semoule. Elle se compose de fragments d'amande plus ou moins recouverts d'enveloppe dont la granulométrie dépasse 150 μm [16]. Parmi les diverses variétés de semoule commercialisées, les semoules les plus recherchées sont des semoules pures qui ne sont pas contaminées par le son du blé et qui sont caractérisées par une couleur dorée et une granulométrie homogène. D'après Jeantet et al. [10], les semoules du blé dur peuvent être classées selon la granulométrie, comme le montre le tableau suivant :

Tableau I.2 : Classement des semoules selon leur granulométrie [10].

Classes	Ouverture du tamis (μm)
Grosses semoules	> 530
Moyennes semoules	250 à 530
Fines semoules	140 à 250
Farines	< 140

En Algérie, d'après le journal officiel algérien, les semoules peuvent être classées selon deux critères : le degré de pureté et la granulation.

a. Degré de pureté: Selon les textes réglementaires du journal officiel algérien [17], les semoules consommables de blé dur sont répertoriées de la manière suivante :

1. Semoule courante de blé dur ;
2. Semoule extra de blé dur.

b. Granulation: Les semoules les plus couramment employées sont réparties de la manière suivante [18]:

- **Semoule Extra (SE)** : les particules de cette catégorie de semoule sont fines, elle présente une granulométrie dont le refus aux tamis 120 microns est de 90%. Elle est destinée à la fabrication des pâtes sèches ou pâtes alimentaires industrielles.

- **Semoule Moyenne (SM)** : elle présente un refus aux tamis 100 microns de 90%. Cette semoule est orientée vers l'utilisation ménagère (galette, couscous, biscuits, etc.).
- **Semoule Grosse (SG)** : elle doit avoir un refus de 50% aux tamis 30 et 40 microns. Cette semoule est destinée essentiellement à la fabrication des couscous types gros.

I.4. Installations de séparation en champ électrique

La séparation électrostatique est une méthode performante pour trier de manière sélective les différents éléments composant des mélanges granulaires. Il est indéniable que les procédés électrostatiques présentent un avantage majeur : ils sont plus économiques en termes d'exploitation et d'entretien et consomment moins d'énergie.

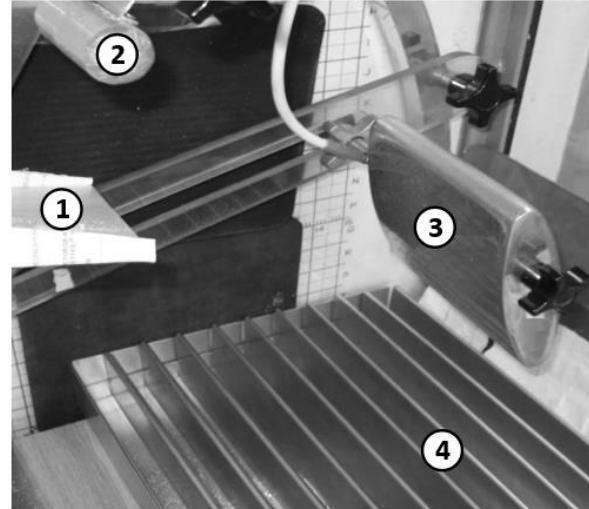
Le concept fondamental de la séparation électrostatique repose sur l'application d'un champ électrique intense sur des particules chargées ou polarisées qui sont en mouvement, tout en tirant profit de la différence de conductivité électrique entre les matériaux du mélange à séparer, qu'ils soient conducteur/conducteur, isolant/isolant ou conducteur/isolant. Selon les trois principaux mécanismes physiques, ces particules peuvent être chargées positivement ou négativement, que ce soit par effet couronne, effet tribo-électrique ou encore par induction électrostatique [19].

I.4.1. Séparation de matériaux conducteurs

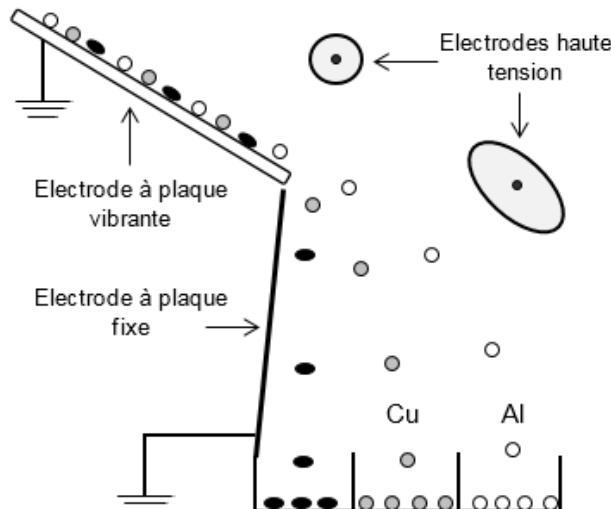
Il y a eu peu de travaux visant à séparer les mélanges de matériaux conducteurs. Sur le plan pratique, le tri électrostatique de deux conducteurs est relativement complexe en raison de leurs propriétés électriques très similaires. Toutefois, certaines études ont été menées afin de saisir le comportement des particules conductrices dans les procédés électrostatiques.

Notons particulièrement les travaux menés par Younes et al. [20] qui ont étudié la séparation d'un mélange de particules conductrices de cuivre et d'aluminium. Dans cette étude, qui utilise le séparateur à plaque présenté dans la figure I.8, le mélange granulaire est placé sur la surface d'une électrode plane vibrante reliée à la terre. Grâce au phénomène d'induction électrostatique, les deux sortes de particules conductrices se chargent et sont attirées par les deux électrodes reliées à la haute tension. Suivant la conductivité électrique et la masse, les particules d'aluminium et de cuivre sont dirigées vers les collecteurs correspondants. Grâce à cette installation, les auteurs ont réussi à récupérer 84,9% des particules d'aluminium présentes dans le

mélange initial avec une pureté presque totale. Les particules de cuivre étaient d'environ 97% pures, ce qui correspond à un taux de récupération de 91 %.



(a)



(b)

Figure I.8: Séparateur électrostatique pour la séparation d'un mélange de conducteurs [20]: (a) photographie du séparateur (b); schéma détaillé: (1) électrode plane vibrante, (2) électrode cylindrique, (3) électrode elliptique, (4) Collecteur.

I.4.2. Séparation d'un mélange conducteur - isolant

Le tri électrostatique des mélanges conducteur-isolant est devenu une technologie de plus en plus répandue dans plusieurs domaines industriels, tels que le recyclage des déchets

d'équipements électriques et électroniques, la purification des produits alimentaire, l'enrichissement des minéraux et l'épuration de l'air [21], [22], [23], [24], [25]. Deux sortes de séparateurs peuvent être employés dans cette optique : un séparateur à tambour ou à plaque.

a. Séparateur électrostatique à plaque

Dans cette configuration, le séparateur est principalement constitué de deux catégories d'électrodes, l'une est une plaque reliée à la terre et l'autre est de forme elliptique et reliée à la haute tension (Figure I.9) [26]. Le mélange granulaire est transporté par l'intermédiaire d'une goulotte vibrante et déposé sur l'électrode plaque. Les particules sont déviées vers des compartiments du collecteur de produit grâce au champ électrique créé entre les deux électrodes.

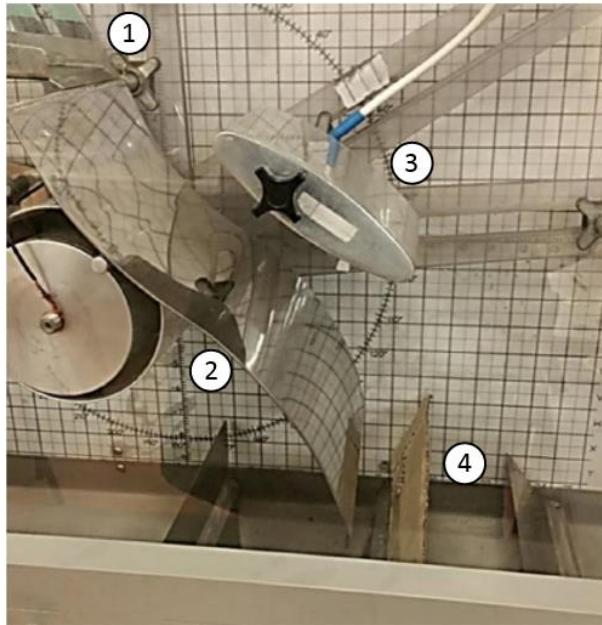


Figure I.9: Photographie du séparateur à plaque destiné pour la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolant-conducteur: (1) goulotte vibrante, (2) électrode plaque, (3) électrode elliptique, (4) compartiments [27].

Les particules conductrices se chargent par induction électrostatique dans la zone de champ électrique élevé et acquièrent une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension. Elles sont ensuite attirées par l'électrode elliptique et recueillies dans la partie droite du collecteur. Les particules non conductrices ne sont pas affectées par l'induction électrostatique, elles ne sont donc

pas attirées par l'électrode elliptique. Leur poids les fait glisser le long de l'électrode plaque et les faire tomber dans la partie gauche du compartiment.

b. Séparateur électrostatique à tambour

Le séparateur électrostatique à tambour, présenté sur la figure I.10, est utilisé dans différents domaines industriels pour le tri sélectif de plusieurs matériaux. Par le biais d'une goulotte vibrante, le mélange granulaire à séparer est d'abord dispersé sur la surface du tambour pour être introduit dans la zone soumise à un fort champ électrique. Deux mécanismes de charge sont appliqués simultanément : le bombardement ionique, qui affecte les particules isolantes, et l'induction électrostatique, qui concerne uniquement les particules conductrices en contact avec l'électrode tambour [28]. Les particules isolantes exposées à la décharge couronne générée par l'électrode active seront chargées avec la même polarité que celle de la tension appliquée. Grâce à la force d'image électrique, ces particules isolantes se fixent à la surface du tambour et chutent ensuite dans la partie gauche du collecteur de produit qui leur est dédiée.

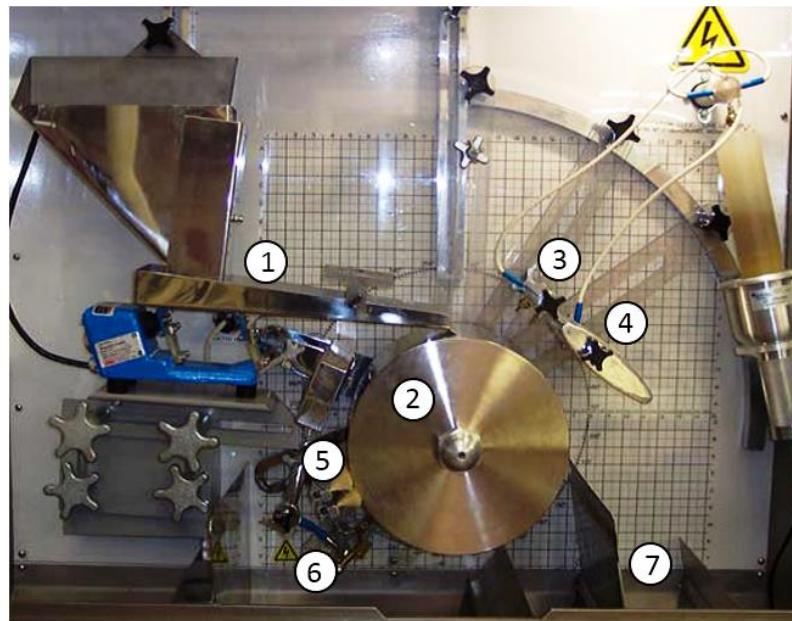


Figure I.10: Photographie du séparateur à tambour destiné pour la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolant-conducteur : (1) goulotte vibrante, (2) électrode tambour, (3) électrode couronne, (4) Electrode statique, (5) brosse, (6) Electrode de neutralisation, (7) compartiment [29].

Les particules conductrices ne subissent aucune influence du champ couronne ; lorsqu'elles arrivent dans la zone de l'électrode statique, elles reçoivent une charge de polarité opposé par un mécanisme d'induction électrostatique. Ces particules sont donc soumises à une attraction électrique qui les attire vers l'électrode statique et sont donc recueillies dans la partie droite du compartiment.

I.4.3. Séparation d'un mélange isolant - isolant

Le fonctionnement de ces séparateurs électrostatiques repose sur le fait que les composants du mélange granulaire isolant sont chargés par effet triboélectrique, puis soumis à un fort champ électrique, ce qui permet leur séparation. La littérature présente une variété d'installations destinées à la séparation des matériaux granulaires plastiques issus des déchets industriels, Parmi celles-ci, nous pouvons citer: séparateur tribo-électrostatique à chute libre [30], [31], Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques métalliques [23], [32], [33], Séparateur à électrodes cylindriques tournantes [34], [35], séparateur triboélectrique à tapis roulant [36], [37], séparateur tribo-électrostatique à tambour [38]. Nous présentons dans cette partie à titre d'exemple les deux séparateurs suivants :

a. Séparateur à chute libre

Actuellement, le séparateur électrostatique à chute libre est employé dans divers secteurs, comme le tri des plastiques provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques, ainsi que la purification et le tri des minéraux. Il est possible d'associer différents types de dispositifs de chargement triboélectrique au séparateur à chute libre, à savoir : le tribo-chARGEUR à cylindre tournant [31], le tribo-chARGEUR à vibration en zigzag [39], le tribo-chARGEUR à cyclone [40] ou le chargeur à lit fluidisé [41], [42]. La figure I.11 montre une représentation schématique du séparateur électrostatique à chute libre utilisé dans de nombreuses études sur la charge triboélectrique et la séparation électrostatique. Dans ce procédé, le mélange granulaire, qui a été chargé par effet triboélectrique, est introduit dans l'installation par le côté supérieur du séparateur. Après le chargement, certaines particules possèdent une charge négative tandis que d'autres ont une charge positive. Les deux sortes de particules tombent librement dans un champ électrique puissant créé par deux électrodes parallèles en position verticale, reliées à deux sources de haute

tension à double polarité. Dans leur chute, les granules chargés seront déviés vers l'électrode dont la polarité est inverse à leur charge acquise, où ils seront recueillis dans les compartiments positionnés en dessous de la chambre de séparation.

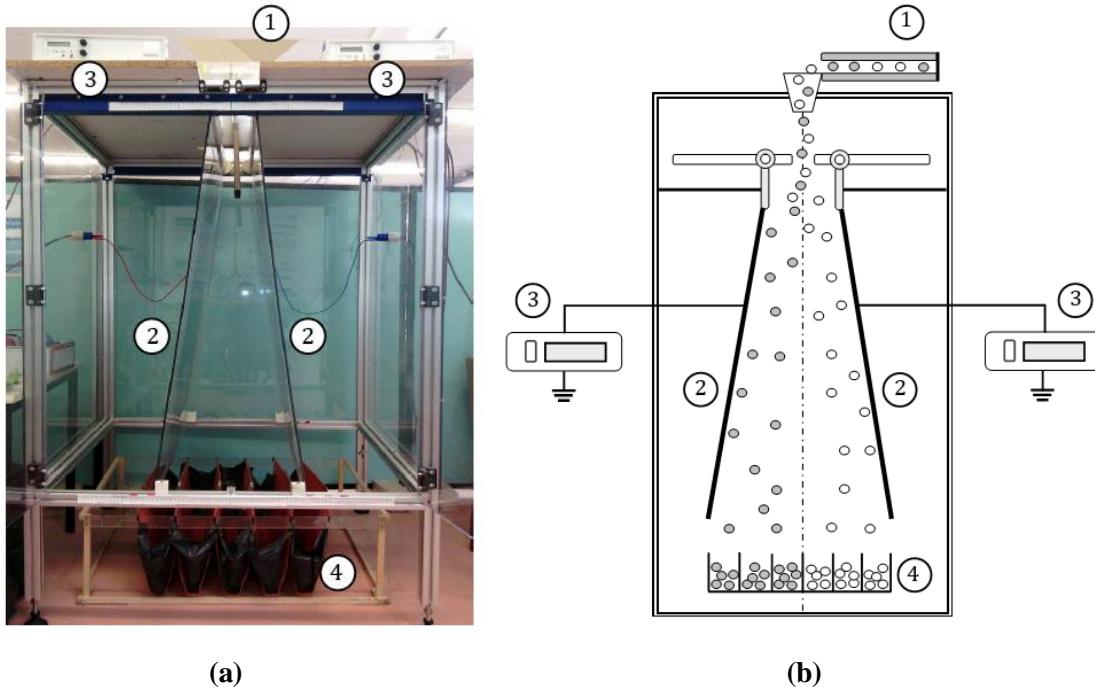


Figure I.11: Dispositif de séparation à chute libre : (a) Photographie du séparateur (b); Schéma détaillé
 (1) système de chargement triboélectrique, (2) électrodes planes, (3) source de haute tension,
 (4) compartiment [43].

b. Séparateur tribo-aéro-electrostatique

Toutes les méthodes de séparation à lit fluidisé des matériaux isolants partagent le fait qu'elles effectuent deux opérations à la fois : le chargement électrique des particules dans un lit fluidisé et leur séparation dans un champ électrique.

Prenons l'exemple du séparateur tribo-aéro-electrostatique à deux disques métalliques, comme illustré dans la figure I.12. Tout d'abord, le mélange granulaire est déposé dans l'enceinte de fluidisation, qui est également utilisée comme chambre de séparation. L'injection et l'évacuation de l'air comprimé sont effectuées en direction verticale grâce au souffleur et au filtre placées en dessous de la chambre de fluidisation. Le lit fluidisé créé par le mouvement du mélange granulaire présent dans l'enceinte entraîne l'apparition des collisions et des frottements entre les particules elles-mêmes et les parois de l'enceinte, ce qui favorise leur chargement par effet triboélectrique.

Deux disques métalliques tournants sont immergés dans le lit fluidisé et entraînés par deux moteurs électriques à vitesse variable. Deux sources de HT à double polarité sont raccordées avec ces deux disques, créant ainsi un champ électrique fort qui permet de séparer les composants du mélange. L'action de la force image électrique entraîne l'adhérence des particules chargées à la surface des disques métalliques de polarités différentes. Pour faire la récupération des produits, le séparateur est doté de deux balais qui permettent de détacher les deux produits séparés des surfaces des disques tournants pour les orienter vers les collecteurs. Des résultats très prometteurs ont récemment été obtenus en utilisant cette installation pour la séparation des mélanges de différents matériaux plastiques [23], [32], [44].

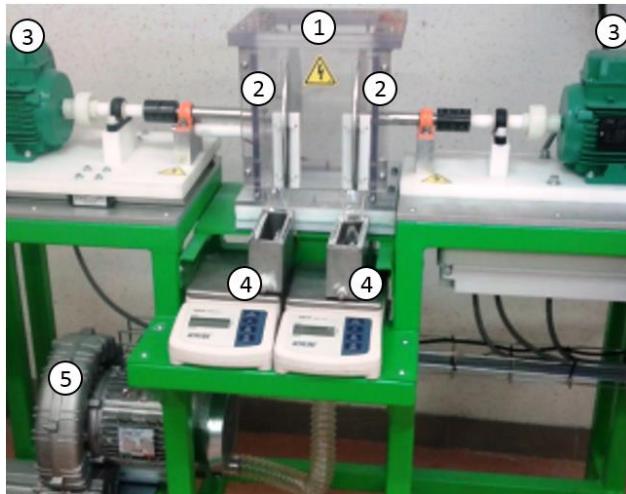


Figure I.12 : Procédé de séparation tribo-aéro-électrostatique [45]: (1) enceinte de séparation, (2) disque rotatif, (3) Moteur électrique, (4) compartiment, (5) Soufflante d'air.

I.5. Procédés de fractionnement de la matière végétale

L'opération de fractionnement consiste à séparer un mélange en plusieurs fractions présentant des caractéristiques distinctes. Le principe de base sur lequel repose le fractionnement réside dans les différences qui existent dans les propriétés des constituants du mélange initial. Récemment, le fractionnement a été utilisé pour séparer divers composants de matières provenant de l'industrie agroalimentaire, comme des céréales [46], [47], [48], [49], [50] et des tourteaux oléagineux [51], [52].

I.5.1. Technologies de séparation électrostatique

Les méthodes classiques de séparation des particules végétales sont basées sur leur taille ou leur densité (tamisage/sassage). Cependant, les particules de taille voisine ne peuvent pas être triées avec ces procédés. De plus, les particules très fines entre en collision souvent dans ces procédés, ce qui rend difficile le contrôle de leurs trajectoires à cause de l'effet des forces aérodynamiques. En exploitant les différences de conductivité électrique entre les particules, les technologies de séparation électrostatique sont basées sur l'application d'un champ électrique intense pour séparer les particules chargées ou polarisées.

I.5.1.1. Séparateurs tribo-électrostatiques

a. Première installation

Dans cette installation spécialement conçue pour tri des particules issues de tissus végétaux, les particules sont transportées par un flux d'air dans un tube de chargement (Figure I.13). Le tube de chargement joue un rôle important dans le chargement triboélectrique des particules, le mouvement des particules à l'intérieur du tube provoque des collisions entre les particules et sa paroi ou entre les particules elles-mêmes.

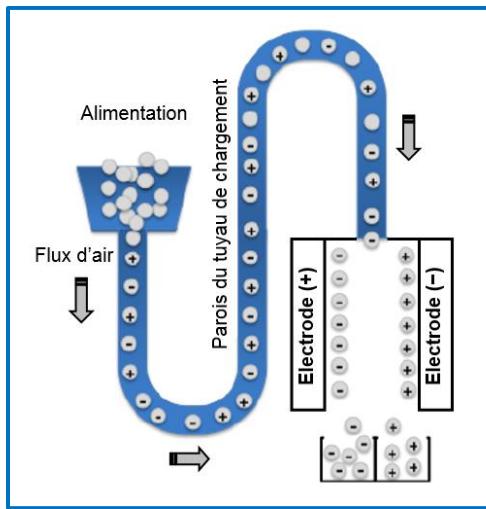


Figure I.13: Représentation schématique d'un séparateur tribo-électrostatique [53].

Une fois que les particules sont chargées dans le tube, elles entrent dans une chambre de séparation équipée de deux électrodes en position verticales connectées à deux sources de HT de polarité

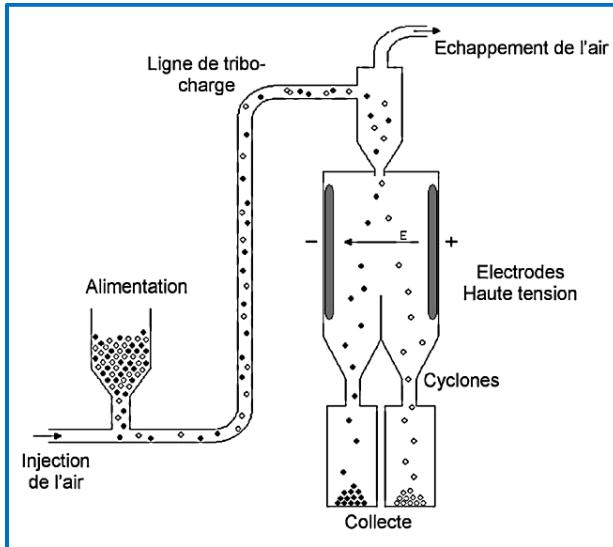
opposée, créant ainsi un champ électrique intense. Dans ce champ électrique, les particules se déplacent vers les électrodes ayant des polarités opposées à leur charge acquise. Selon les travaux de recherche réalisés par Barakat et al. et Basset et al. [51], [53], ce procédé a prouvé sa performance dans le tri électrostatique des tourteaux de colza et de tournesol après une opération de broyage ultrafin réalisé à l'aide d'un broyeur de type Impact Mill Retsch ZM-200. Grâce à cette installation, deux fractions ont été récupérées, l'une d'une couleur claire et riche en protéines, et l'autre d'une couleur foncée et riche en lignine [46], [54], [24].

b. Deuxième installation

Le système d'injection d'air comprimé par une soufflante dans une ligne de charge permet le chargement triboélectrique de matériaux pulvérulent, grâce aux collisions répétées entre les particules elles-mêmes et entre les particules et la paroi du tube isolant. Les particules sont dirigées par le flux d'air en sortie du tube de chargement vers un séparateur à chute libre composé de deux électrodes parallèles reliées à deux sources de HT de polarité opposée. Les particules chargées, chute librement dans la zone inter-électrodes où un champ électrique fort est créé entre ces deux électrodes. Dans cette région de champ intense, les particules sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge acquise. Les particules qui ont été déviées sont collectées dans deux collecteurs en deux fractions distinctes. Cette installation a été développée pour la préparation des fractions à partir des produits du broyage ultrafin (Figure I.14). Hemery et al. [46] ont utilisé cette technique pour séparer les constituants d'un mélange finement broyé du son de blé. En effet, Les auteurs ont montré qu'il était possible d'isoler deux fractions différentes l'une était enrichie en aleurone tandis que l'autre était enrichie en péricarpe [28], [33].



(a)



(b)

Figure I.14: Séparateur tribo-électrostatique (première installation): (a) Photographie du séparateur [55]; (b) Schéma descriptif [46], [54].

I.5.1.2. Séparateurs à décharge couronne - induction électrostatique

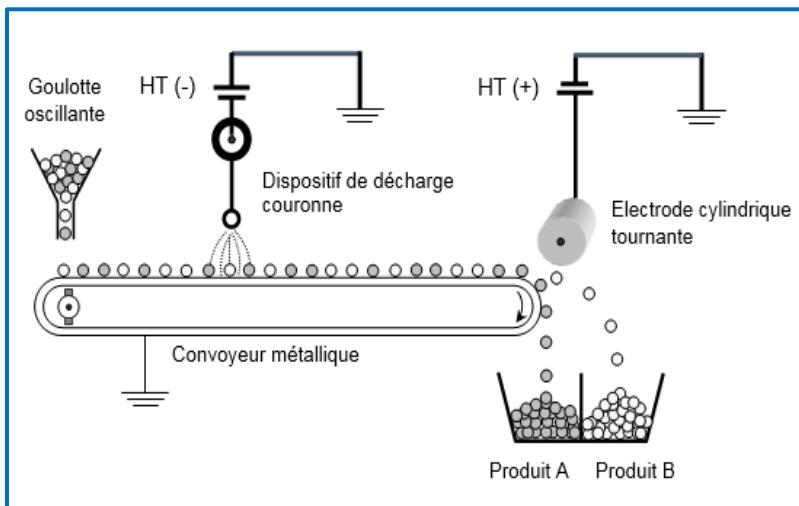
a. Séparateur couronne électrostatique à bande transporteuse

Initialement, le mélange de matériaux doit être déposé sous forme de monocouche à l'aide d'une goulotte oscillante sur la surface d'un convoyeur à bande métallique entraîné par un moteur électrique (Figure I.15). Le mécanisme de génération de charge électrique sur la surface des matériaux à traiter est fortement influencé par leurs caractéristiques électriques.

Dans cette installation de séparation, le chargement électrique peut être réalisé soit par décharge couronne, soit par induction électrostatique [56], [57]. Deux générateurs de haute tension de polarités opposées sont reliés aux électrodes couronne et cylindrique. Au contact de convoyeur métallique mis à la terre, les particules chargées vont avoir tendance à perdre la charge acquise plus ou moins rapidement. Les particules conductrices sont chargées électriquement par induction électrostatique et attirées par l'électrode tournante sous l'action du champ électrique produit par cette électrode tournante.



(a)



(b)

Figure I.15: Séparateur couronne électrostatique à bande transporteuse: (a) photographie du séparateur, (b) Schéma descriptif [56], [58].

b. Séparateur électrostatique à tambour

Dans le séparateur à tambour illustré dans la figure I.16, un transporteur vibrant est utilisé pour répandre avec un débit bien déterminé le mélange de matériaux à séparer sur la surface de l'électrode cylindrique tournante reliée à la terre. Un champ électrique intense est généré entre une électrode couronne connectée à la haute tension et l'électrode cylindrique. Dans la zone de décharge couronne, les particules non-conductrices sont chargées par bombardement d'ions, et se fixent à la surface du cylindre sous l'effet de la force image électrique. Ces particules non-conductrices quittent la surface du cylindre et tombent dans le côté gauche du collecteur dans le cas où la résultante des forces de pesanteur et centrifuge due au mouvement de rotation dépasse la force d'image électrique. Cependant, lorsque les particules sont très adhérentes, en raison de l'accumulation d'une charge élevée, elles sont détachées de la surface du cylindre par une électrode de neutralisation de charge ou une brosse. Le mécanisme d'induction électrostatique permet de charger les particules conductrices, puis elles sont attirées par l'électrode elliptique et recueillies dans le côté droit du collecteur.

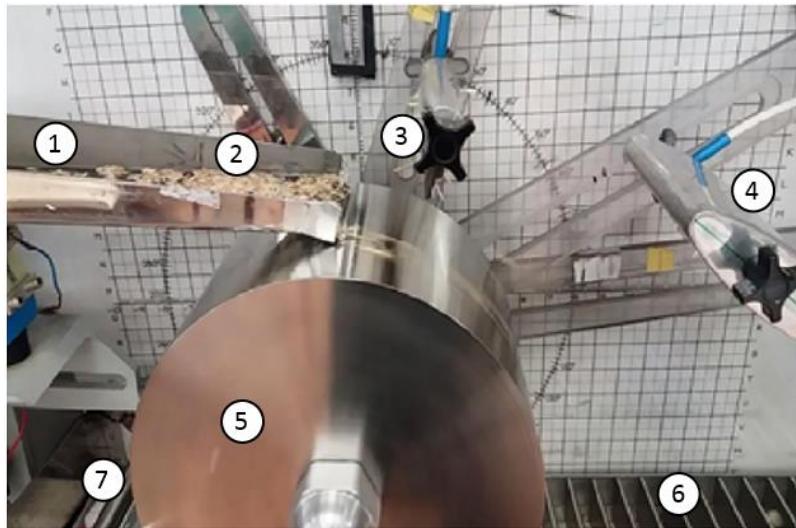


Figure I.16 : Image photographique du séparateur à tambour [59]: (1) transporteur vibrant, (2) mélange de grains de blé et de pailles, (3) électrode couronne, (4) électrode statique, (5) électrode cylindrique, (6) compartiment, (7) brosse.

Grâce à une étude expérimentale menée par Jafari et al. [59], la faisabilité de la séparation d'un mélange de matériaux végétaux comprenant des grains de blé et des résidus de récoltes a été étudiée à l'aide de cette installation de séparation. Les chercheurs ont montré que les grains de blé

sont éjectés par la force centrifuge et recueillis dans le côté droit du collecteur, alors que les particules de paille restent collées à la surface du cylindre tournante, puis détachées par une brosse dans le côté gauche du collecteur.

I.5.2. Turbo-séparation

La turbo-séparation consiste en un broyage ultrafin, suivi d'une classification par air. Elle est basée sur la différence qui existe entre les particules en matière de taille et de masse. Un rotor de classification est utilisé pour trier les particules, comme le montre le schéma de fonctionnement de la figure I.17. Un flux d'air entraîne les particules vers un rotor de classification équipé d'une grille qui tourne à haute vitesse. Au cours de ce processus, les particules lourdes et de grande taille sont séparées des particules de petite taille et de faible densité.

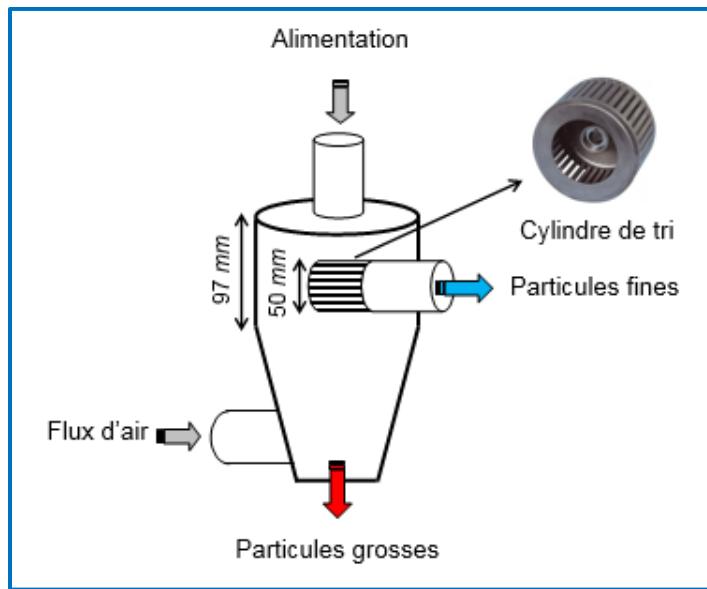


Figure I.17: Schéma du processus de classification par turbo-séparation [60].

À la fin de la séparation, on obtient deux fractions : une fine et une grossière. Dans le secteur agroalimentaire, cette méthode de séparation est très utilisée afin de produire des fractions enrichies en protéines [49], [50], [61], [62].

Plus récemment, dans une étude expérimentale, Hansen et al. ont utilisé la turbo-séparation afin de diminuer la concentration en fibres d'un tourteau de colza [61]. Les auteurs ont constaté que la plupart des pellicules ont été éliminées, et la fraction récupérée était riche en amandes.

I.6. Positionnement de la problématique de la thèse

Depuis le début du XXe siècle, la population mondiale connaît une très forte augmentation, ce qui a entraîné une forte augmentation de la demande alimentaire. Selon Oxfam, la demande alimentaire mondiale augmentera de 70% d'ici 2050 [63]. De nos jours, la sécheresse a été associée à des crises économiques et à une augmentation des prix des produits agro-alimentaires, ce qui a provoqué une insécurité alimentaire dans de nombreux, en particulier dans les pays à faible revenu. Les céréales représentent souvent une partie importante de l'alimentation de nombreux pays à revenu faible ou intermédiaire.

Les mesures prises pour réduire la faim et améliorer la situation alimentaire dans les pays en développement sont le développement de la production alimentaire et l'amélioration de la productivité agricole. L'étude et la recherche agronomique peut contribuer à la mise au point de nouvelles techniques améliorant l'efficacité de la production agricole, le rendement de culture et la rentabilité agricole, tout particulièrement en ce qui concerne les céréales et les légumes secs qui occupent une place privilégiée dans les habitudes alimentaires pour une grande partie de l'humanité.

Le blé est considéré comme l'une des cultures agricoles les plus importantes au monde et en Algérie particulièrement. Il constitue une part importante de ressources alimentaires destinées à la consommation humaine, animale et à l'industrie agroalimentaire, en raison de sa haute valeur nutritionnelle et de ses différentes caractéristiques technologiques (cohésion du gluten après cuisson, concentration élevée en protéines et pigments caroténoïdes, albumen vitreux, finesse des enveloppes). Avant d'être utilisé sous ses différentes formes, il est impératif de procéder à une mouture du blé dur, qui consiste à récupérer son amande sous forme de semoule purifiée, c'est-à-dire débarrassée du son présent dans les parties périphériques du grain, cependant le son du blé séparé mécaniquement contient une partie importante d'endosperme résiduel. À cet égard, nous proposons d'améliorer le processus d'extraction de la semoule de blé en appliquant la séparation électrostatique pré et post-mouture. Avant mouture, la séparation électrostatique sert à purifier le blé en éliminant les résidus de la récolte, mélangés avec les grains de blé. Après mouture, la séparation électrostatique est appliquée afin d'augmenter le taux d'extraction de semoule de blé dur par le recyclage du son de blé.

Chapitre II

Propriétés électriques de blé

II.1. Introduction

Les propriétés diélectriques font référence aux caractéristiques électriques d'un matériau en réponse à un champ électrique externe. Ces propriétés sont cruciales pour comprendre le comportement des matériaux dans diverses applications électriques, notamment la transformation et l'emballage des aliments, les dispositifs biomédicaux et la technologie agricole. Le son de blé, un sous-produit du processus de mouture du blé, a attiré beaucoup d'attention en raison de ses propriétés diélectriques et de ses applications potentielles dans ces domaines. Dans ce contexte, la séparation électrostatique se présente comme une méthode encourageante pour les processus de fractionnement, puisqu'elle permet de séparer les couches du son de blé en fonction de leurs propriétés électriques [1]. Pour atteindre cet objectif, nous consacrons ce chapitre à l'examen des propriétés électriques de blé qui pourraient favoriser sa séparation électrostatique. Cela inclut notamment l'aptitude des différentes couches à se charger, en examinant les facteurs influençant les propriétés diélectriques comme la structure, les compositions chimiques et physiques, ainsi que le niveau d'humidité.

II.2. Propriétés électriques du son de blé

Lorsqu'on considère les propriétés électriques du son de blé, il est important de prendre en compte sa conductivité ainsi que ses propriétés diélectriques, d'autant plus que les procédés électrostatiques actuels utilisés pour trier les matières végétales exploitent les différences de conductivité électrique qui existent entre les différents tissus. Ces propriétés peuvent être influencées par plusieurs facteurs, y compris la structure des tissus, le taux d'humidité du matériau et la composition chimique [2], [3], [4], [5].

II.2.1. Conductivité et comportement électrique du son de blé

En tant que tissu végétal typique composé de matériaux ordonnés et amorphes, le son de blé peut être considéré comme un matériau diélectrique contenant des charges d'espace lorsqu'il est soumis à une contrainte électrique externe [6]. Néanmoins, divers facteurs, tels que la température, le taux d'humidité et la composition chimique, peuvent influencer et altérer la conductivité du son de blé. Le son de blé est réputé pour sa faible conductivité électrique. En présence d'humidité, sa conductivité peut augmenter sous l'effet des ions présents, notamment les

ions minéraux et ceux issus de la dissolution de composés organiques. Ces ions facilitent la circulation du courant électrique à travers le matériau. La variation de la conductivité en fonction du taux d'humidité est très utile, d'autant plus qu'elle démontre que le comportement électrique du son de blé peut évoluer en fonction de son environnement. Il a été observé que la réaction du son de blé après un dépôt de charge par effet couronne est fortement influencée par sa teneur en humidité [7]. En effet, la fraction riche en péricarpe se comporte comme un conducteur, tandis que la fraction fine, riche en aleurone, se comporte comme un isolant. Il est probable que cela soit dû aux lipides présents à la surface des particules de matériau. Par conséquent, les variations dans la structure et la composition du péricarpe et de l'aleurone pourraient expliquer les différentes manières dont ces matériaux se chargent. Néanmoins, pour effectuer le fractionnement du son de blé par séparation électrostatique, il est essentiel que ses différentes couches acquièrent des charges opposées, permettant ainsi aux particules de se séparer lorsqu'elles sont soumises à un champ électrique.

II.2.2. Etat de charge du son de blé

L'acquisition de la charge électrique par les tissus végétaux ne se fait pas de la même façon, car chaque tissu possède des propriétés électriques et hygroscopiques distinctes [8], [9]. Stone et Bohm [10], [11] ont étudié l'extraction des cellules d'aleurone contenues dans le son de blé grâce à des méthodes de séparation axées sur les caractéristiques électrostatiques. Dans cette étude, il a été montré que les tissus du son de blé possèdent des propriétés électriques différentes, ce qui traduit leur aptitude à acquérir des charges de surface différentes. En effet, le comportement électrique du péricarpe est résistif grâce à sa structure pariétale aérée, tandis que la couche d'aleurone possède un comportement capacatif, correspondant à l'accumulation de charges électriques et à une aptitude à la polarisation. La couche intermédiaire présente des propriétés intermédiaires entre celles du péricarpe et de l'aleurone : elle est plus résistive que la couche d'aleurone et plus capacitive que le péricarpe [12]. Hemery et al. [7] ont constaté qu'après des expériences de chargement triboélectrique que le son de blé entier, les fractions riches en aleurone et en péricarpe, présentent des charges acquises différentes (Figure II.1), ce qui suggère que ces matériaux possèdent des propriétés de charge distinctes. Par conséquent, les différences de structure et de composition du péricarpe et de l'aleurone pourraient expliquer les divers comportements de tribo-chargement de ces matériaux. Les mêmes auteurs ont constaté, après un

dépôt de charge par une décharge couronne, que le matériau présentant la perte de charge la plus rapide (fraction riche en péricarpe) était composé à 71 % de péricarpe (la couche de son avec la permittivité la plus faible), et le matériau présentant la perte de charge la plus faible (fraction riche en aleurone) contenait 78 % d'aleurone (la couche avec la permittivité la plus élevée). Dans les secteurs industriels, les techniques de séparation appliquées pour extraire des minéraux, trier des végétaux et purifier des produits alimentaires reposent sur les différences de conductivité électrique entre les tissus des végétaux. [13], [14], [15], [16].

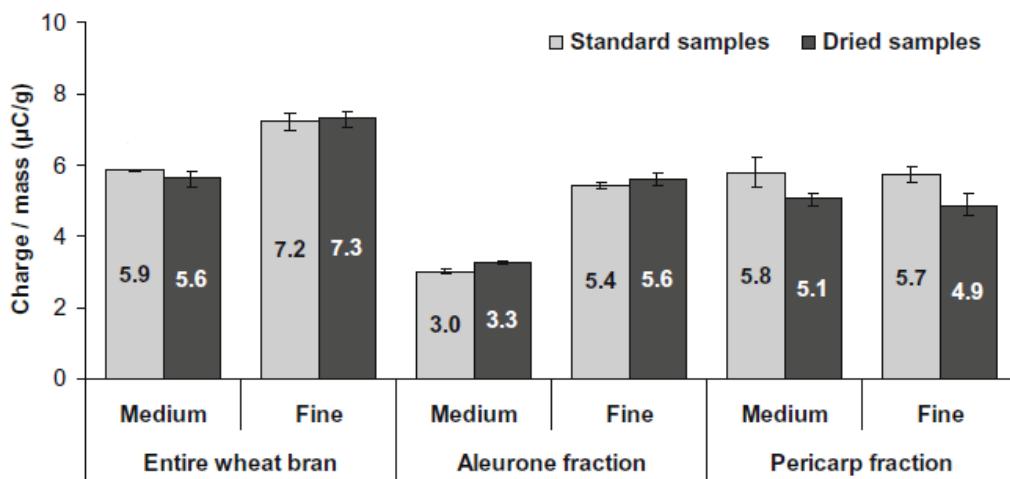


Figure II.1 : Charge massique acquise par effet tribo-électrique dans les trois fractions (son de blé entier, fractions riches en aleurone et fraction riches en péricarpe), en fonction de la taille des particules et de la teneur en humidité [7].

II.3. Propriétés diélectriques du son de blé

De nombreuses recherches ont été réalisées pour examiner les propriétés diélectriques de divers aliments, comme les céréales, la farine, le blé et le son de blé [17], [18], [19]. Les matières d'origine végétale, telles que le son de blé, suscitent un intérêt croissant en raison de leurs nombreuses applications potentielles, couvrant des secteurs aussi variés que l'alimentation, l'industrie des matériaux, la transformation et l'emballage des aliments, ainsi que les dispositifs biomédicaux. Une caractéristique notable de ces matériaux réside dans leurs propriétés diélectriques, qui affectent leur réponse électrique lorsqu'ils sont exposés à un champ électrique. Plus précisément, le son de blé est un dérivé du processus de transformation du blé, caractérisé par sa composition complexe, riche en nutriments et en composés bioactifs. Comme illustré sur la

figure II.2, la couche d'aleurone est constituée de cellules intactes regroupées, qui contiennent des graisses, des minéraux et des protéines, tandis que leurs parois sont composées de fibres. En revanche, la fraction riche en péricarpe se compose de particules fibreuses et poreuses contenant des cellules vides, et les cellules du péricarpe renferment une quantité de fibres deux fois supérieure à celle des cellules de l'aleurone. Comprendre les propriétés diélectriques du son de blé est crucial pour explorer ses applications potentielles dans divers domaines, notamment dans l'industrie agroalimentaire, le secteur pharmaceutique, les produits cosmétiques, ainsi que dans l'amélioration de la qualité nutritionnelle des produits céréaliers [20]. Le but de cette partie est d'explorer les propriétés diélectriques du son de blé, mettant en lumière leur importance et leurs implications dans divers contextes.

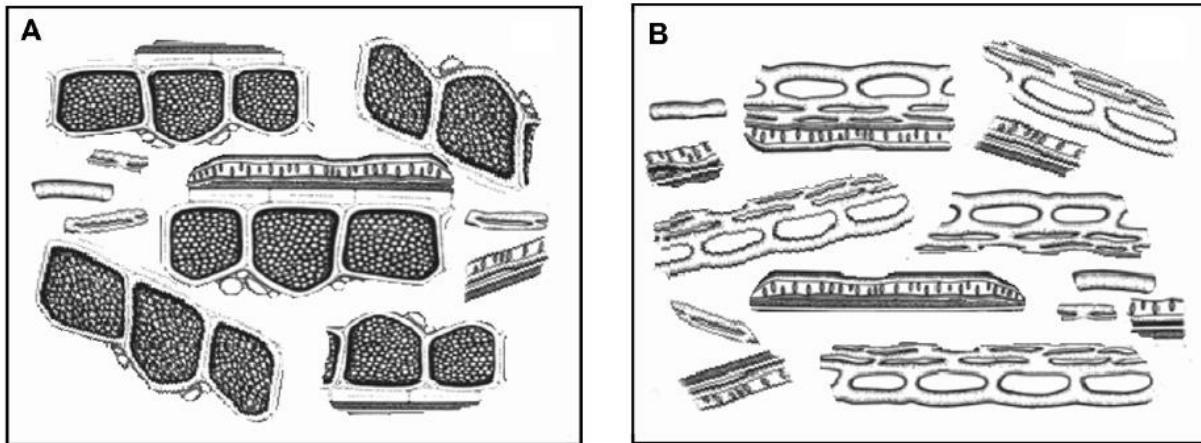


Figure II.2 : Représentation schématique de la structure des particules de: (A) fraction d'aleurone ; (B) fraction de péricarpe [7], [21].

II.3.1. Permittivité complexe

La permittivité complexe est très importante dans l'évaluation des matériaux diélectriques, car elle fournit des informations sur leur réponse lorsqu'ils sont exposés à un champ électrique. Elle est influencée par la composition et la structure du matériau. Les propriétés diélectriques du son de blé peuvent être décrites par sa permittivité complexe (ϵ), qui se divise en deux parties :

- ❖ **La permittivité réelle ϵ'** : représente la composante réelle de la permittivité complexe d'un matériau et permet d'évaluer sa capacité à stocker l'énergie électrique sous l'effet d'un champ électrique. Une permittivité réelle plus élevée traduit une meilleure aptitude du matériau à se polariser et à emmagasiner de l'énergie électrique.

- ❖ **La permittivité imaginaire ϵ''** : exprime la quantité d'énergie dissipée sous forme de chaleur ou d'autres formes d'énergie non récupérable lorsque le matériau est soumis à un champ électrique alternatif. C'est une mesure des pertes d'énergie dans le matériau et elle est associée aux phénomènes de relaxation moléculaire et aux pertes diélectriques.

La permittivité complexe est souvent représentée par la lettre epsilon (ϵ) et exprimée sous la forme $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$, où ϵ' désigne la permittivité relative et ϵ'' correspond à la conductivité diélectrique. La tangente de perte ($\tan \delta$) est également souvent utilisée pour quantifier la puissance dissipée dans un diélectrique et peut s'exprimer comme suit :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (\text{II.1})$$

II.3.2. Méthodes de détermination de la permittivité complexe

La détermination de la permittivité complexe du son de blé est une étape cruciale pour comprendre comment ce matériau hygroscopique, avec ses textures biologiques complexes, réagit aux champs électriques. Plusieurs méthodes sont couramment utilisées dans ce contexte pour mesurer la permittivité complexe des matériaux diélectriques ainsi que le son de blé. En effet, ces méthodes sont conçues pour tenir compte des propriétés uniques des matériaux diélectriques et pour minimiser les erreurs de mesure. Parmi les dispositifs et instruments les plus utilisés pour mesurer les propriétés diélectriques des matériaux agroalimentaires figurent le condensateur à plaques parallèles, la sonde coaxiale, le guide d'ondes, la cavité résonante, la méthode de transmission et de réflexion, les compteurs LCR (mesures d'inductance, de capacité et de résistance), l'analyseur d'impédance et l'analyseur de réseaux scalaires et vectoriels [22], [23], [24] :

1. Méthode des condensateurs parallèles :

Cette méthode est la plus utilisée pour mesurer la permittivité diélectrique à basse fréquence [25]. Elle consiste à placer le matériau entre deux électrodes pour former un condensateur (Figure II.3), puis à mesurer l'admittance équivalente ou l'impédance équivalente de la cellule contenant l'échantillon, laquelle est décrite par la relation suivante :

$$Y = \frac{1}{Z} = J2\pi fC \quad (\text{II.2})$$

En se basant sur la capacité complexe du condensateur contenant l'échantillon, nous pouvons déterminer la permittivité complexe du matériau entre les armatures à l'aide de l'équation suivante :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r^* \frac{S}{d} \quad (\text{II.3})$$

Dans cette expression, S représente l'aire des deux armatures, d est la hauteur de diélectrique, ε_0 la permittivité du vide ($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ en F/m) et ε_r^* correspond à la permittivité complexe du matériau diélectrique.

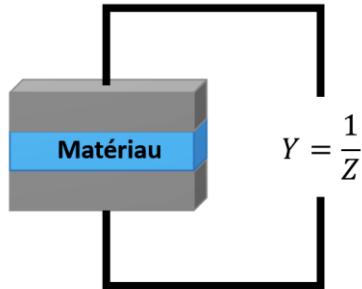


Figure II.3 : Capacité à plaques parallèles [25].

2. Technique de la sonde micro-ondes :

On peut recourir aux méthodes des micro-ondes pour mesurer les propriétés diélectriques des matériaux. Cela implique l'utilisation de sondes spécifiques permettant d'analyser la réflexion ou la transmission des micro-ondes à différentes fréquences à travers le matériau végétal.

3. Technique de spectroscopie diélectrique :

Cette méthode consiste à mesurer la réponse diélectrique du matériau sur une large gamme de fréquences électromagnétiques. Cela peut fournir des informations détaillées sur les propriétés diélectriques des matériaux végétaux dans diverses conditions.

4. Méthode de la ligne de transmission :

Cette méthode est utilisée pour mesurer les propriétés diélectriques de divers matériaux, notamment les matériaux végétaux, qu'ils soient solides, liquides ou pulvérulents, en analysant leur interaction avec une onde électromagnétique circulant dans une ligne de transmission. Le matériau est inséré dans une ligne de transmission, généralement composée de deux conducteurs parallèles, tels que des plaques séparées par un diélectrique. Le matériau à analyser est placé dans cet espace. Lorsqu'un signal électromagnétique est transmis à travers la ligne, la présence du matériau modifie certains paramètres, notamment l'impédance, la vitesse de propagation et la constante diélectrique. En mesurant ces variations, il est possible de déterminer la permittivité

électrique du matériau, ce qui permet d'évaluer ses propriétés diélectriques, telles que sa capacité à stocker et à dissiper l'énergie électrique.

5. Méthode de résonance :

La technique de résonance est une méthode expérimentale utilisée pour mesurer les caractéristiques diélectriques des matériaux en analysant les variations de la fréquence de résonance, du facteur de qualité (Q) et de la largeur de bande lors de leur insertion dans un circuit résonnant. Ces modifications permettent de déterminer la permittivité électrique complexe du matériau.

Habituellement, chacune de ces méthodes présente ses propres avantages et limites, et le choix dépend souvent des caractéristiques spécifiques du matériau végétal et des équipements disponibles en laboratoire.

II.3.3. Propriétés diélectriques complexes du son de blé

Le son de blé a une permittivité complexe assez élevée comparée à d'autres sous-produits agricoles. Les constantes diélectriques des différentes couches du son de blé ont été mesurées par Antoine et al. [19] et se sont avérées être ≈ 1 , 2.6 et 5.8 pour le péricarpe, les couches intermédiaires et la couche d'aleurone, respectivement, pour des échantillons ayant entre 9 et 12 % d'humidité. Ces chercheurs ont indiqué que les valeurs de permittivité étaient liées à la composition et à la structure des échantillons : la permittivité très faible du péricarpe était liée à sa porosité, tandis que la permittivité plus élevée de l'aleurone résultait de la plus grande quantité de composés polarisables dans ce matériau et de sa structure compartimentée. Il est important de souligner que la permittivité des matériaux affecte leur constante de temps de relaxation et, par conséquent, elle influence la perte de charge à la surface du matériau [26].

II.3.4. Facteurs influençant la permittivité complexe du son de blé

La permittivité et le coefficient de perte diélectrique des différentes céréales alimentaires, y compris le blé dur (son de blé), sont des caractéristiques électriques essentielles influencées par divers facteurs environnementaux et intrinsèques. Parmi ces facteurs, l'humidité joue un rôle déterminant en affectant la capacité du matériau à stocker et dissiper l'énergie électrique. La température influe également sur la conductivité électrique et la polarisation du matériau, tandis

que la fréquence détermine sa réponse aux champs électriques. Par ailleurs, la densité influence la répartition des charges électriques dans la structure du matériau [27], [28]. Il est essentiel de saisir l'impact de ces variables, non seulement pour avoir une meilleure vision du comportement électrique du son de blé, mais également pour améliorer son utilisation dans divers domaines, allant de l'agroalimentaire à l'ingénierie des matériaux. Sur la base des études précédemment mentionnées, nous avons jugé utile de passer en revue l'influence de l'humidité, de la densité et de la température sur la permittivité complexe du son de blé, en mettant en évidence les mécanismes sous-jacents ainsi que leurs implications pratiques.

II.3.4.1. La densité

Les chercheurs Trabelsi et Nelson [17] ont étudié l'influence de la densité apparente sur les propriétés diélectriques des matériaux alimentaires granulaires tels que le blé. Ils ont utilisé la méthode des micro-ondes pour analyser la teneur en humidité et son lien avec les caractéristiques diélectriques des matériaux ainsi que la densité apparente. Ils ont noté que la permittivité diélectrique et le facteur de perte varient considérablement selon la densité apparente. L'humidité entraîne une réduction simultanée de la densité apparente et de la densité réelle du blé. Contrairement à la porosité, l'humidité entraîne une hausse de cette dernière dans les graines de blé. Autrement dit, lorsque le blé absorbe l'humidité, les zones vides à l'intérieur des grains s'élargissent, ce qui provoque une diminution de la densité apparente et de la densité réelle du blé. En effet, la densité apparente est un facteur essentiel dans la réponse d'un matériau à un champ électrique, et ainsi, ces variations de la densité apparente induites par l'humidité peuvent entraîner des altérations proportionnelles dans les propriétés diélectriques du blé. En outre, la permittivité complexe du blé peut être influencée par la densité de son. Une augmentation de la densité peut entraîner une hausse de la permittivité relative, due à l'accroissement du nombre de molécules dans un volume donné. Néanmoins, l'influence de la densité sur la permittivité complexe peut changer selon la structure interne du matériau ainsi que des facteurs comme la dimension des particules et le taux d'humidité.

II.3.4.2. La température

Il existe un consensus de la part des chercheurs sur les effets significatifs de la température sur les composantes réelles et imaginaires de la permittivité des produits céréaliers et alimentaires

[29], [30]. Le son du blé, à l'instar d'autres biomatériaux, voit ses propriétés électriques influencées par la température. En 2024, Yang et al. [31] démontrent que l'augmentation de la température du son de blé entraîne une augmentation de la constante diélectrique (ϵ') ainsi que le facteur de perte (ϵ''), comme le montre la figure II.4.

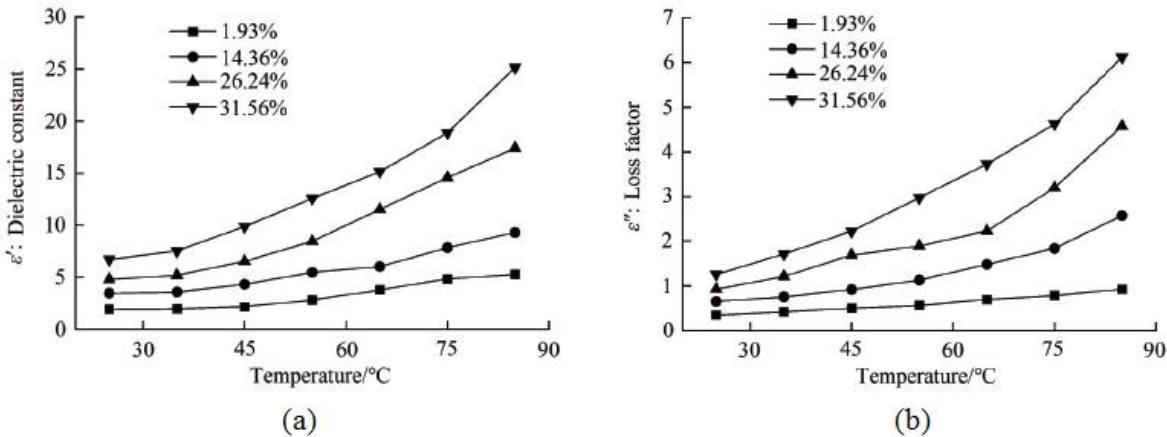


Figure II.4 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons du son de blé en fonction de la température aux teneurs d'humidité indiquées [31].

II.3.4.3. La fréquence

Wang et al. [31] ont étudié la variation de la constante diélectrique ϵ' et du facteur de perte ϵ'' du son de blé dans une bande de fréquences de 0,5 à 4,0 GHz, comme illustré par la figure II.5. Lorsque la fréquence de test est $\leq 2,5$ GHz, ϵ' et ϵ'' diminuent considérablement, mais à mesure que la fréquence augmente, la diminution de la constante diélectrique et du facteur de perte ralentit progressivement. La diminution de la permittivité réelle et du facteur de perte dans les végétaux avec un faible taux d'humidité, accompagnée d'une augmentation de la fréquence, réside dans les modifications de la conduction ionique et de la mobilité des ions à l'intérieur du matériau. À des fréquences inférieures, le son du blé présente une permittivité élevée en raison de sa teneur en humidité et de sa nature polaire [32].

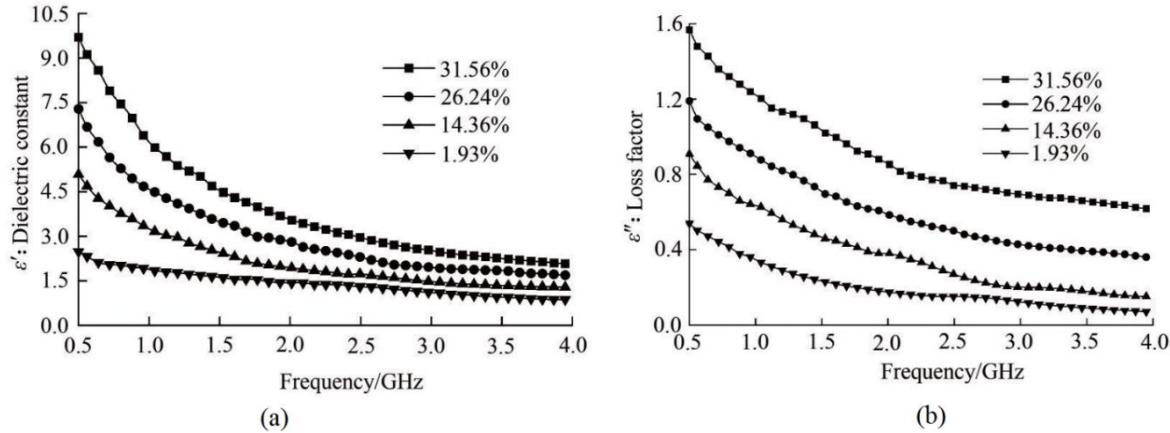


Figure II.5 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons du son de blé en fonction de la fréquence aux teneurs d'humidité indiquées [31].

II.3.4.4. L'humidité

Le son de blé est un matériau hygroscopique. Il est évident que la teneur en humidité influence fortement son comportement diélectrique. Dans ce contexte, de nombreuses études ont été réalisées pour confirmer cette hypothèse [17], [33], [34], [35]. Plusieurs auteurs se sont mis d'accord que la constante diélectrique et le facteur de perte du son de blé étudiés augmentent considérablement avec la teneur en humidité (Figure II.6). La variation des propriétés diélectriques en fonction de l'humidité est liée à la teneur en eau libre et à l'eau liée dans le son de blé. Selon Calay et al. [36], la teneur en eau libre d'un échantillon donné contribue bien plus à la polarisation diélectrique que l'eau liée lorsqu'il est placé dans un champ électrique alternatif.

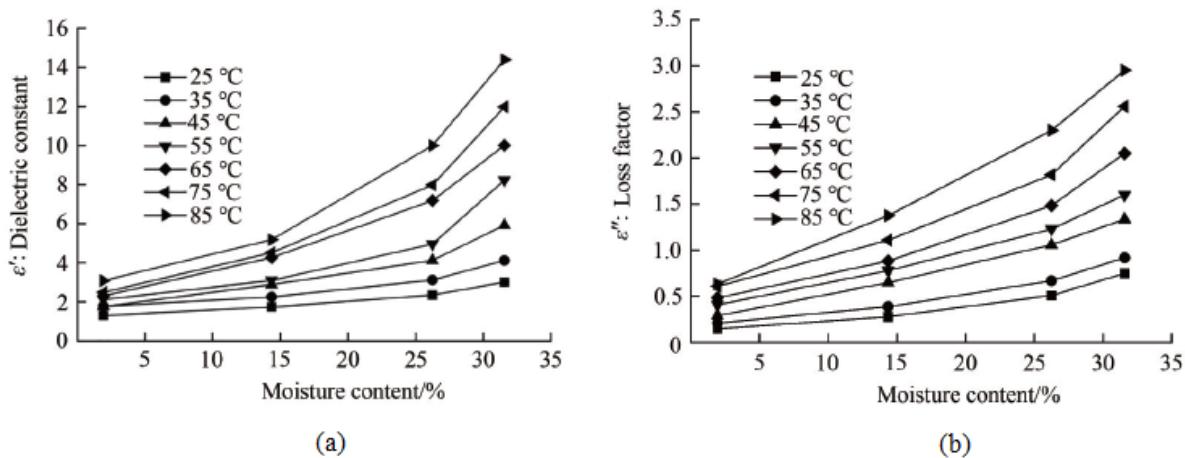


Figure II.6 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons du son de blé en fonction de taux d'humidité aux températures indiquées [31].

II.4. Effet de la teneur en humidité sur les tissus du son de blé

Dans les divers tissus du son de blé, la teneur en eau peut varier d'un tissu à l'autre en raison de différentes propriétés physiques et chimiques. Ces variations sont généralement dues à la structure des parois cellulaires et à la composition en fibres. Les parois cellulaires peuvent avoir des structures différentes selon les parties du son de blé, ce qui influence leur capacité à retenir l'eau. De même, la composition en fibres peut varier, ce qui peut aussi influer sur la capacité des divers tissus du son de blé à absorber et retenir l'eau [37], [38], [39]. En 2004, Antoine et al. [19] ont étudié par spectroscopie diélectrique l'influence de la teneur en eau sur les propriétés diélectriques du son entier isolé manuellement, ainsi que sur les différentes couches de son (péridicarpe externe, couche intermédiaire et couche d'aleurone). Ils ont observé que l'eau adsorbée favorisait le processus de diffusion au sein de toutes ces couches de son du blé, grâce à la diffusion ionique à travers les matériaux. En ce qui concerne le péridicarpe, la couche externe du blé, l'absorption de l'eau se produit principalement au niveau de la paroi cellulaire. Cependant, l'absorption de l'eau par d'autres parties du péridicarpe est limitée à cause de leur forte porosité. Cette porosité élevée restreint la capacité de ces parties du péridicarpe à conserver l'eau, ce qui empêche son infiltration dans ces zones. Quant à la couche intermédiaire du péridicarpe, le niveau d'humidité qu'elle contient est semblable à celui de la couche d'aleurone. En raison de la structure particulière de la couche intermédiaire et de la présence d'un tissu hydrophobe sur sa surface interne, l'infiltration d'eau dans les couches adjacentes à la couche intermédiaire est très limitée. Ainsi, la teneur en humidité influence de manière significative la texture du son de blé, sa composition chimique et sa valeur nutritionnelle. Il est donc essentiel de contrôler et de maintenir le niveau d'humidité adéquat afin de garantir la qualité globale du son de blé, depuis sa production jusqu'à sa transformation.

II.5. Effet de la teneur en humidité sur la conductivité du son de blé

Des études antérieures menées par Badry et al., ainsi que par Norimoto [40], [41], ont montré que les fractions de son de blé riches en péridicarpe sont composées de polymères végétaux tels que la cellulose et la lignine, qui sont des matériaux diélectriques. Hemery et al. [7] ont examiné les propriétés électriques du son de blé et de ses couches constitutives à travers une analyse du comportement du déclin de potentiel de surface après un dépôt de charges par effet couronne. Les auteurs ont démontré que les trois fractions étudiées (son de blé entier, fraction riche

en aleurone et fraction riche en péricarpe) perdent très rapidement leur charge acquise lorsqu'elles ne sont pas séchées. La figure II.7-A montre que le temps de demi-déclin du potentiel de surface des trois échantillons est également très rapide. Bien que ces échantillons soient composés de polymères diélectriques, ils se comportent comme des matériaux conducteurs lorsqu'ils contiennent 10 % d'eau. Au contraire, lorsque ces fractions riches en péricarpe sont séchées (à 2 % d'humidité), elles se révèlent être des isolants, capables de maintenir davantage de charges et de les conserver plus longtemps. La figure II.7-B montre en effet que le temps de demi-déclin du potentiel des fractions riches en péricarpe augmente de 15 à 45 secondes après séchage. Les fractions riches en son et en aleurone s'avèrent également plus chargées et perdent leur potentiel de surface de manière plus lente après le séchage. Cela prouve que la conductivité de ces différentes fractions de blé est influencée par leur teneur en humidité.

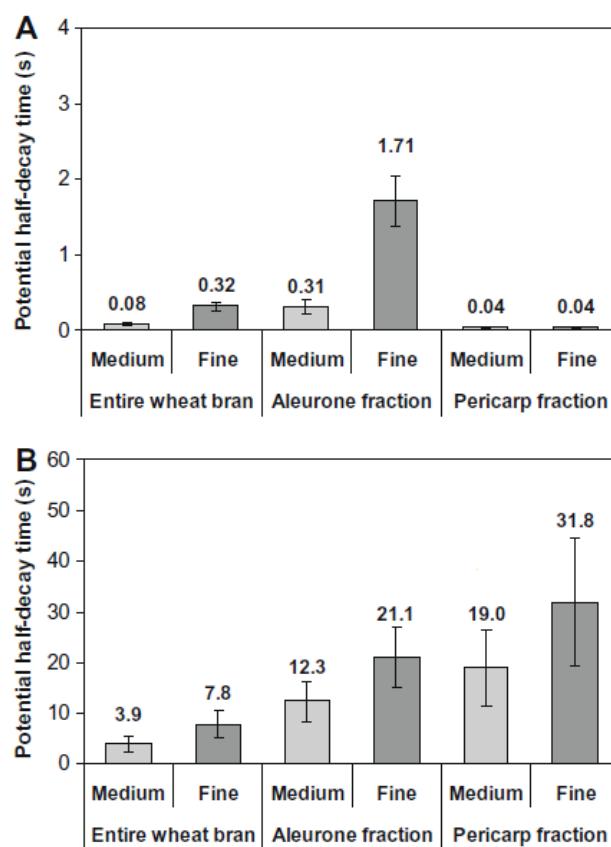


Figure II.7 : Temps de demi -déclin de potentiel de surface dans les trois échantillons (son de blé entier, fractions riches en aleurone et fraction riches en péricarpe), chargées par décharge couronne : temps nécessaire pour perdre 50 % du potentiel maximal, selon la taille des particules et la teneur en humidité de l'échantillon (A : échantillons standard ; B : échantillons secs).

Dans une autre étude réalisée par Nilsson et Stromme [42], les auteurs ont constaté une forte augmentation de la conductivité des matériaux cellulosiques lorsque leur teneur en eau augmente. Ils ont suggéré que les molécules d'eau adsorbées à la surface des matériaux génèrent une phase dans laquelle les molécules porteuses de charge (telles que les ions) peuvent se déplacer, créant ainsi une conduction électrique à la surface du matériau. Hemery et al. [7] ont constaté que plus le temps d'exposition des échantillons à l'humidité ambiante est long, plus le déclin du potentiel de surface est rapide (figure II.8). Parmi les trois fractions étudiées par les mêmes auteurs, le son de blé est le produit dont le temps de demi-déclin du potentiel de surface varie le moins lorsque sa teneur en eau diminue. Cet échantillon ne contient pas uniquement de l'aleurone et du péricarpe, mais également d'autres couches du grain, dont le tégument. Le tégument est un matériau hydrophobe contenant des composés non polaires. La présence de cette couche dans le son pourrait expliquer pourquoi le comportement de cet échantillon est moins influencé par la variation de la teneur en eau que celui des échantillons riches en péricarpe et en aleurone. En outre, après séchage, les fractions ont toutes acquis presque les mêmes valeurs de charge, bien que leurs temps de demi-déclin de potentiel aient varié [7].

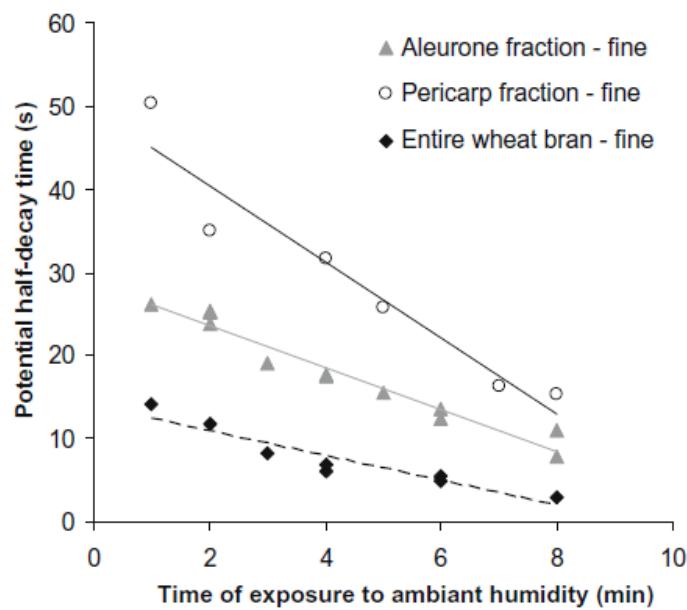


Figure II.8: Effet du temps d'exposition à l'humidité ambiante sur le DPS dans les fractions : son de blé entier, fractions riches en aleurone et fractions riches en péricarpe.

II.6. Propriétés diélectriques de la farine du blé

En 2020, Biying et Shaojin [29] ont réalisé une étude expérimentale sur les propriétés diélectriques de la farine de blé en fonction de la fréquence, de la teneur en eau, du contenu de son du blé et de la température à l'aide d'un analyseur d'impédance. Les auteurs ont montré qu'à toutes les températures étudiées, la permittivité réelle (ϵ') diminue avec l'augmentation de la fréquence. Cette diminution était plus marquée à basses fréquences et en particulier à températures plus élevées. La permittivité imaginaire (ϵ'') a été pratiquement stable sur les fréquences testées jusqu'à 65°C, puis commence à fluctuer à des températures plus élevées et pour des fréquences supérieures à 300 MHz (Figure II.9).

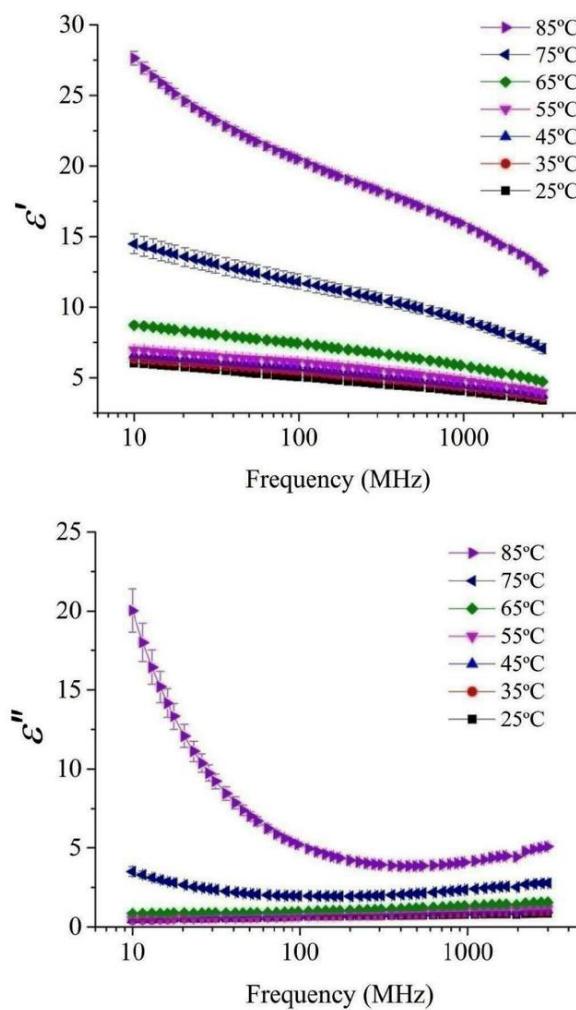


Figure II.9 : Constante diélectrique (ϵ') et facteur de perte (ϵ'') de la farine de blé pure en fonction de la fréquence (Teneur en humidité = 12,56%, Fréquences : 10–3000 MHz, Température : 25 -85°C) [29].

D'après Bansal et al. [43], la déstructuration des granules d'amidon du blé pourrait expliquer la variation soudaine des valeurs de ϵ' et ϵ'' en fonction de la fréquence, dès que la température de l'échantillon a dépassé 55°C. Pour des teneurs en eau trop élevées, l'interaction entre l'eau et l'amidon peut entraîner un gonflement des granules d'amidon dans la zone amorphe. Le phénomène de destruction de la cristallinité dans la zone amorphe, dû au gonflement, entraîne une augmentation brutale des propriétés diélectriques à différentes températures.

II.7. Propriétés diélectriques de la paille de blé

L'étude menée par Wenchuan Guo et al. [44] sur les propriétés diélectriques de la paille de blé a montré que la constante diélectrique (ϵ') et le facteur de perte diélectrique (ϵ'') varient en fonction de plusieurs paramètres suivants :

- ❖ La température (5 à 40°C),
- ❖ La teneur en humidité (10 à 20%),
- ❖ La fréquence du champ électrique (1 à 1000 kHz),
- ❖ La masse volumique de la paille de blé (47,3 à 108,1 kg/m³).

Comme illustré dans la figure II. 9, en dessous d'environ 500 kHz, la constante diélectrique logarithmique et le facteur de perte logarithmique présentaient des relations quasi linéaires et négatives avec la fréquence logarithmique. La constante diélectrique et le facteur de perte augmentaient avec la teneur en humidité, la température et la masse volumique apparente, et plus particulièrement de manière quasi linéaire avec la température (Figures : II.11, II.12 et II.13). À une fréquence donnée, la teneur en humidité, la température et la masse volumique étaient des facteurs significatifs influençant les propriétés diélectriques de la paille de blé.

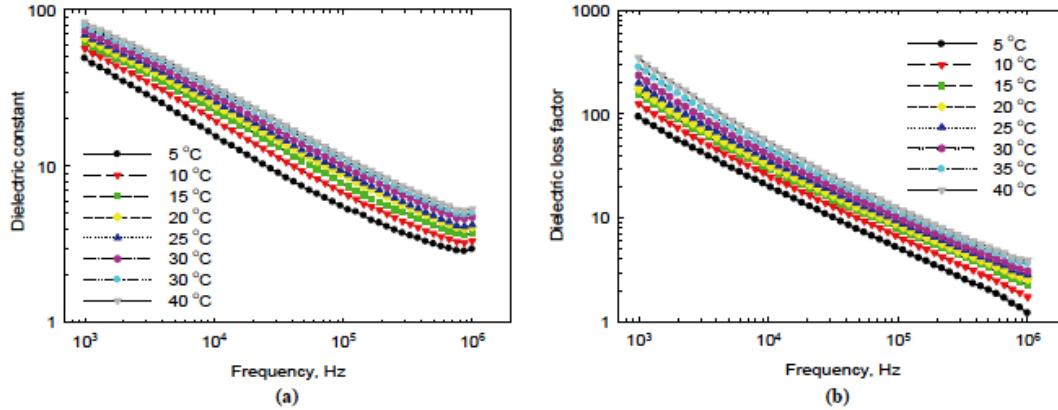


Figure II.10 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons de paille de blé aux températures indiquées en fonction de la fréquence (teneur en humidité = 15,4 %, masse volumique = 90,0 kg.m⁻³) [44].

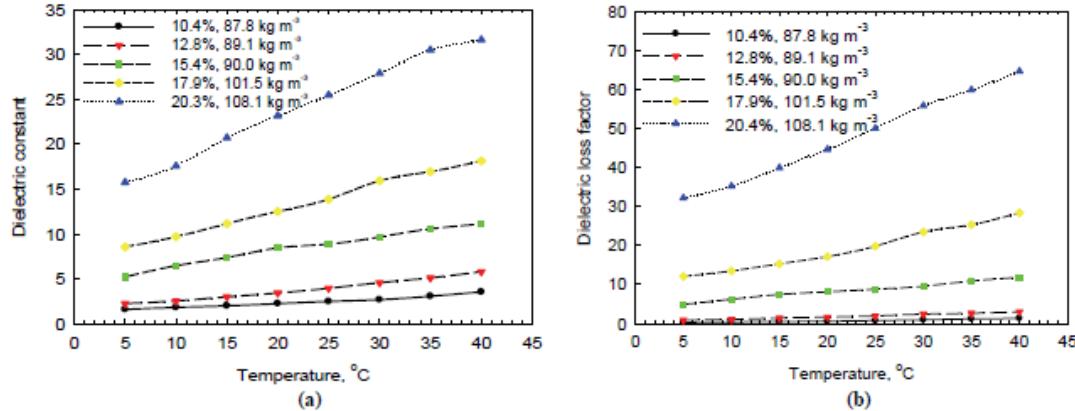


Figure II.11 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons de paille de blé en fonction de la température aux teneurs en humidité et aux densités indiquées (fréquence = 100 kHz) [44].

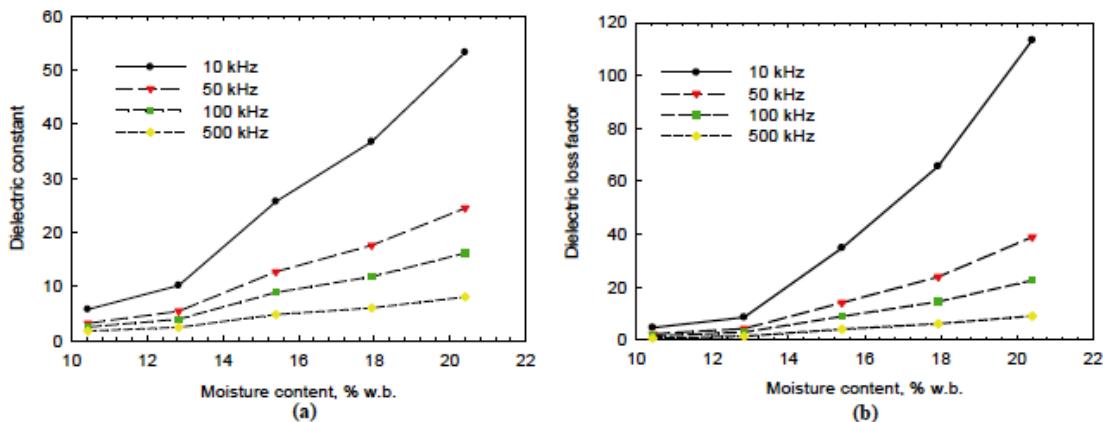


Figure II.12 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons de paille de blé en fonction de la teneur en humidité aux fréquences indiquées (Température = 25°C, masse volumique = 89,5 ± 1,1 kg.m⁻³) [44].

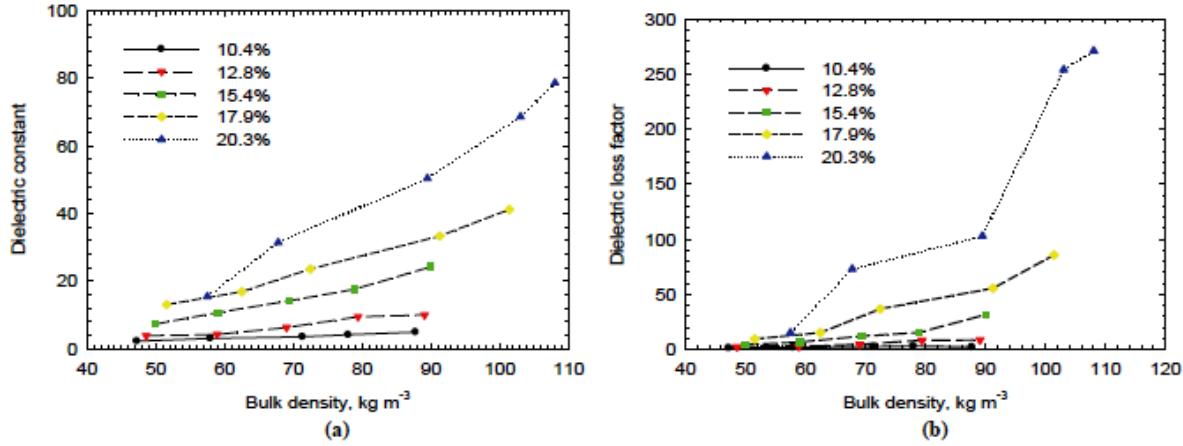


Figure II.13 : Constante diélectrique (a) et facteur de perte (b) d'échantillons de paille de blé en fonction de la masse volumique aux niveaux d'humidité indiqués (fréquence = 10 kHz, température 20°C) [44].

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les propriétés électriques du blé, en particulier celles du son de blé. Le concept de permittivité complexe nous a aidés à comprendre comment ce matériau hygroscopique répond à un champ électrique appliqué. De manière générale, le son de blé n'est pas un bon conducteur d'électricité à l'état naturel. Cependant, lorsqu'il est exposé à l'humidité, la conductivité du son de blé peut augmenter en raison de la présence d'ions qui facilitent la circulation du courant électrique. Les tissus du son de blé possèdent des propriétés diélectriques différentes : le péricarpe présente un comportement résistif, alors que la couche d'aleurone montre un comportement capacitif, lié à l'accumulation de charges électriques et à une aptitude à la polarisation. La couche intermédiaire présente des propriétés intermédiaires entre celles du péricarpe et de l'aleurone ; elle est plus résistive que la couche d'aleurone et plus capacitive que le péricarpe. Ces conclusions offrent des informations essentielles pour améliorer les méthodes de séparation électrostatique en exploitant les différences des caractéristiques électriques entre les diverses couches du grain de blé.

Chapitre III

Installations et méthodes expérimentales

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les équipements utilisés ainsi que les démarches de mesure et de traitement adoptées tout au long de ce travail de recherche. Comme illustré dans la figure ci-dessous, le concept global de la thèse est d'accroître le taux d'extraction de la semoule. Nous proposons ainsi d'introduire une technique complémentaire à la mouture conventionnelle. La technique consiste à appliquer un traitement électrostatique avant et après la mouture. Cela permet de purifier le blé avant la mouture et d'augmenter le taux d'extraction de la semoule grâce au traitement du son de blé.



Figure III.1 : Concept de la thèse : Prétraitement et post-traitement par voie électrostatique.

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés aux propriétés électrostatiques des produits céréaliers en vue de leur traitement par voie électrostatique. Pour ce faire, nous avons conçu deux installations expérimentales, qui sont détaillées dans les sections III.3 et III.4,

s'agissant essentiellement d'un système d'abrasion et un séparateur électrostatique à induction. Les techniques de caractérisation électrique des matériaux céréaliers sont exposées dans la section III.5. Les techniques de caractérisation physico-chimique qui ont permis d'évaluer l'efficacité globale du traitement électrostatique sont ainsi présentées. En outre, nous exposons la méthode de plans d'expériences que nous avons adoptés pour modéliser et optimiser le processus électrostatique étudié.

III.2. Matériaux céréaliers

Dans un premier temps, les essais du traitement du blé avant la mise en mouture ont été réalisés sur des mélanges de grains de blé dur et de résidus de récolte. Ces échantillons ont été prélevés de la région de Souk-Ahras lors de la campagne moisson-battage de l'été 2021. Les résidus de récolte utilisés contiennent un mélange de pailles et chaumes. Chaque échantillon était composé de quantités équivalentes au rapport réel de poids paille sur grain dans une grappe de blé. La masse totale de chaque échantillon utilisé dans les expériences de prétraitement électrostatique est 3,5 grammes, dont 2,5 grammes de blé et 1 gramme de pailles et chaumes [64]. La figure III.2 montre une image photographique d'un échantillon du mélange préparé pour les expériences du prétraitement.



Figure III.2 : Mélange utilisé pour les essais de prétraitement électrostatique (composition : pailles, chaumes et grains du blé dur) [64].

Les expériences de post-traitement ont été menées sur des échantillons de son de blé dur (Figure III.3) fournis par l'entreprise agroalimentaire Amor Benamor afin d'accroître le taux d'extraction

de la semoule en procédant un traitement électrostatique du son de blé obtenu après une opération de mouture conventionnelle dans les moulins Amor Benamor, au cours de laquelle les particules de son et de germe qui adhèrent à l'endosperme sont principalement éliminées.

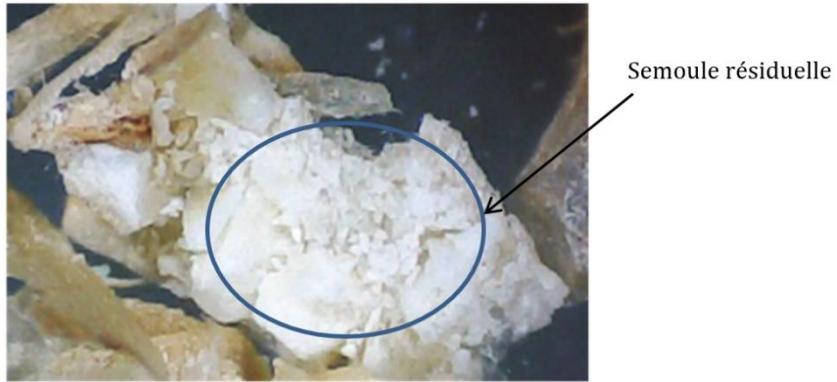
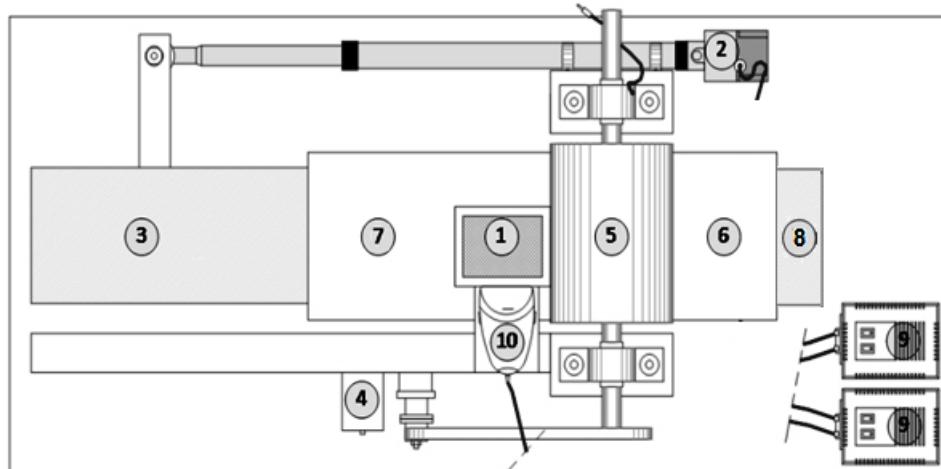


Figure III.3. Image au microscope (grossissement : 60×) de son de blé récupéré après un processus de mouture conventionnelle [65].

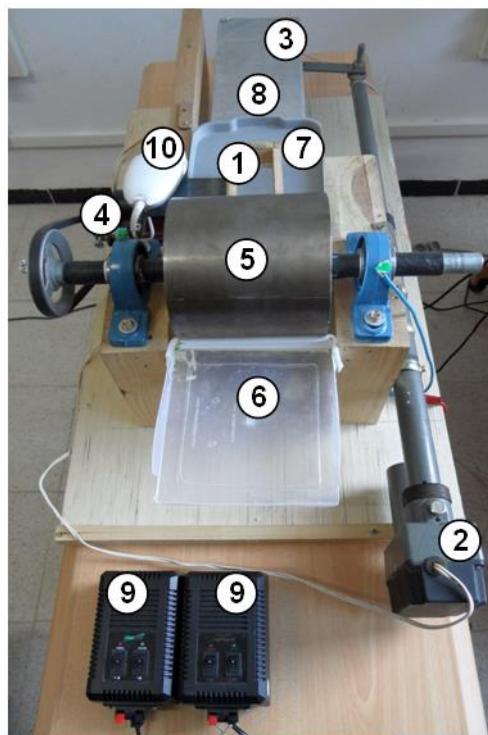
III.3. Séparateur à induction électrostatique

III.3.1. Description du séparateur

La figure III.4 présente le séparateur électrostatique à cylindre tournant réalisé au laboratoire. Il a été conçu pour l'étude de la séparation du mélange de matériaux végétaux. L'induction électrostatique est utilisée comme mécanisme physique pour la charge des particules. Une monocouche du mélange de matériaux a été répandue à la surface d'un convoyeur à bande métallique de longueur : 14 cm et de largeur : 60cm. Le convoyeur est entraîné par un moteur électrique et joue également le rôle d'une électrode connectée à la terre. Le dépôt des particules se fait à l'aide d'une goulotte oscillante dans un emplacement situé à 44 cm de la zone réservée à la séparation électrostatique. Le séparateur conçu se compose d'une électrode en forme de cylindre tournante en acier inoxydable (diamètre : 13cm, longueur : 14,5 mm), entraînée par un moteur électrique à vitesse variable. L'électrode cylindrique est suspendue par un support isolant à une hauteur réglable de 1,5cm à 3cm de convoyeur et connectée à une alimentation haute tension continue de polarité positive (Modèle : FuG Electronik GmbH 83024 Rosenheim/ Germany). Le matériau déposé est transporté ensuite vers le cylindre rotatif [65].



(a)



(b)

Figure III.4 : Séparateur électrostatique à induction : (a) Représentation schématique (b) Photographie du séparateur électrostatique: 1 : goulotte, 2 : actionneur linéaire, 3 : convoyeur métallique relié à la terre, 4 : moteur d'entraînement à courroie, 5 : électrode à cylindre rotatif, 6 : collecteur N1, 7 : collecteur N2, 8 : collecteur N3, 9 : commande électrique manuelle, 10: dispositif vibrant [65].

III.3.2. Principe de fonctionnement du séparateur à induction électrostatique

Dans ce séparateur, l'induction électrostatique est le seul moyen employé pour charger électriquement le matériau végétal. Les particules à trier doivent avoir des conductivités électriques suffisamment élevées pour qu'au moins un des constituants du mélange se charge par induction en contact avec l'électrode convoyeur relié à terre.

Le processus de séparation consiste à introduire le mélange en monocouche sur la surface du convoyeur. Un champ électrique intense est créé entre l'électrode cylindrique tournante connectée à une source de haute tension positive et le convoyeur métallique connecté à terre. Sous l'action ce champ électrique, les particules se chargent négativement, par induction électrostatique. Les particules qui ont une conductivité électrique plus élevée se chargent plus fortement que les autres et seront attirées par l'électrode cylindrique de polarité opposée. Un racleur est installé, en contact avec l'électrode cylindrique, pour récupérer le produit qui adhère sur sa surface dans le collecteur N1 comme étant un produit A. Une partie de ces particules rebondissent après leur contact avec l'électrode cylindrique. Dans le but d'empêcher leur retour vers l'électrode convoyeur, un deuxième collecteur N2 est installé exactement dans la position où ces particules retombent, ces particules sont récupérées comme étant un produit distinct.

La charge acquise par les particules faiblement conductrices n'est pas importante et la force de Coulomb n'est pas suffisante pour les soulever vers l'électrode cylindrique de polarité opposée. Par conséquent, elles finissent leur parcours sur le convoyeur et sont collectées dans le collecteur N3 comme étant le produit B.

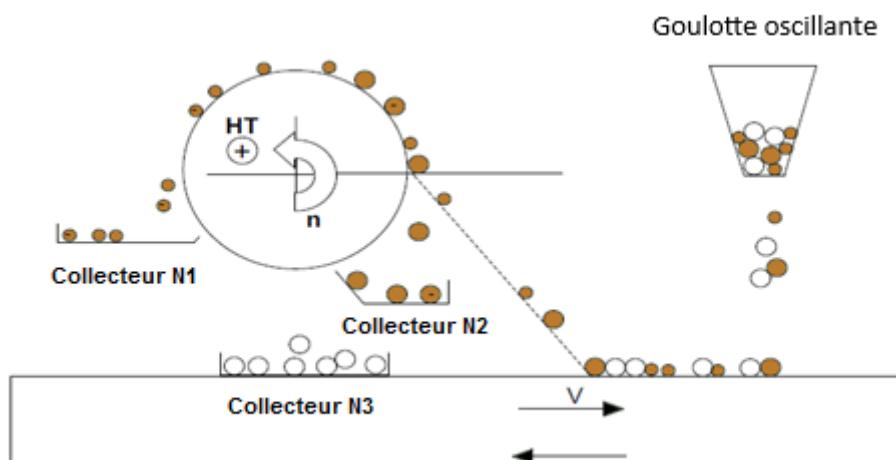


Figure III.5 : Processus de séparation basé sur l'induction électrostatique.

III.3.3. Forces agissant sur une particule

Pendant la séparation, les particules se retrouvent immergées dans le champ électrique produit entre le convoyeur métallique et le cylindre tournant. La répartition du champ électrique dans cette zone active du séparateur a été calculée par le logiciel FEMM pour une tension appliquée sur le cylindre de 10kV. Dans la zone correspondant à la plus courte distance entre les deux électrodes, le champ électrique est plus élevé, il atteint des valeurs maximales, allant de $1,6 \cdot 10^5$ à $2,8 \cdot 10^5$ V/m, comme indiqué sur la figure III.6. Grâce à ce calcul du champ électrique, il est possible d'identifier le point de décollement de la particule ainsi que sa trajectoire vers l'électrode cylindrique, après son détachement.

Sur la figure III.7 nous avons représenté les forces électrostatiques qui agissent sur une particule de forme sphérique, de rayon r , de masse m et possédant une charge électrique Q .

- Force de Coulomb :

$$F_e = Q \cdot E \quad \text{Où } E \text{ est le champ électrique en V/m}$$

- Force d'image électrique :

$$F_i = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(2r^2)} ; \quad \text{Où } \epsilon_0 \text{ est la permittivité du vide} = 8,854187 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

- Force de la pesanteur :

$$F_g = m \cdot g ; \quad \text{Où } g \text{ est gravitation universelle} = 9,806 \ 65 \text{ m/s}^2$$

Pour que cette particule décolle du convoyeur, il faut que la condition suivante soit satisfaite :

$$F_e > F_g + F_i$$

Dans certaines circonstances, la particule s'attache à surface de l'électrode pendant un certain temps et se détache ensuite, Ce cas se produit lorsque la force centrifuge qui a tendance à éloigner la particule du centre de rotation dépasse la force électrostatique. Par conséquent, la particule se détache dans la condition suivante :

$$F_i < F_c + F_g \cos(\alpha)$$

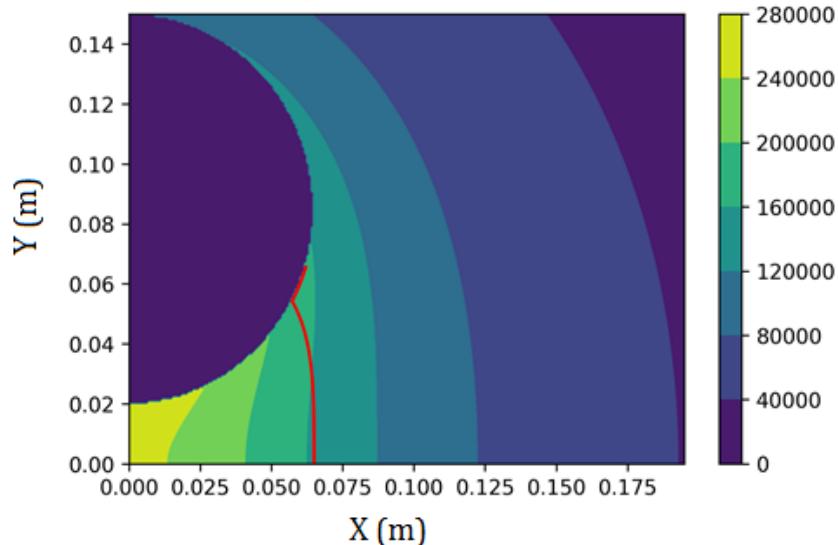


Figure III.6 : Distribution du champ électrique et trajectoire de la particule pour une tension appliquée sur le cylindre de 10 kV.

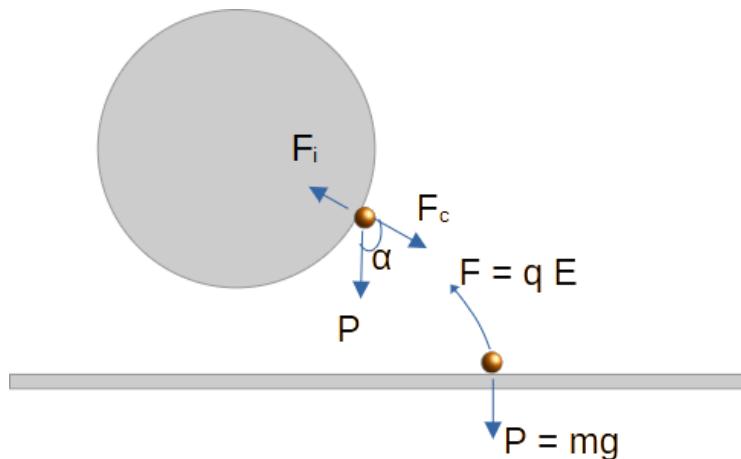


Figure III.7 : Forces agissant sur une particule conductrice sphérique.

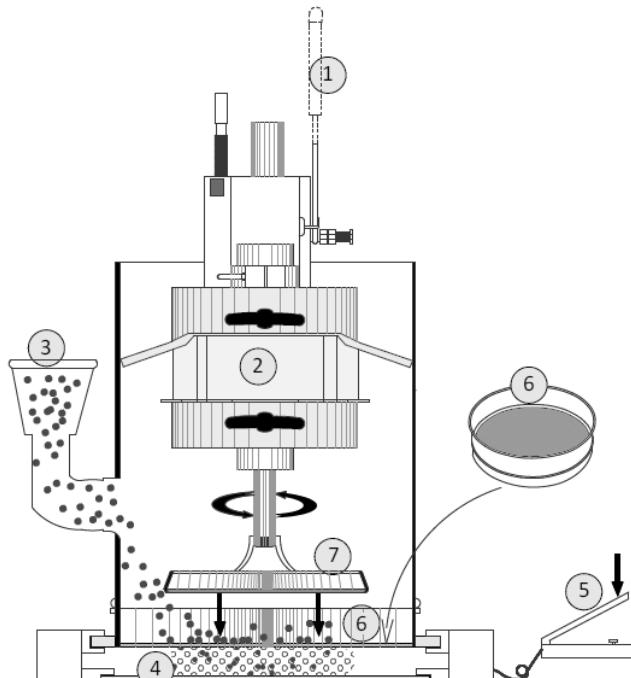
III.4. Traitement du son de blé

Le broyage est une opération de mise en forme des solides permettant la fragmentation d'un matériau pour lui donner une forme utilisable ou d'en séparer les constituants. Dans cette optique, On exerce des forces mécaniques sur le solide pour provoquer des déformations entraînant sa fragmentation. Plusieurs méthodes de fragmentation peuvent être employées selon la structure du matériau traité et du mécanisme de fragmentation, telles que l'abrasion, la désintégration et le clivage [66]. L'opération de traitement du son de blé est une phase cruciale dans la procédure de

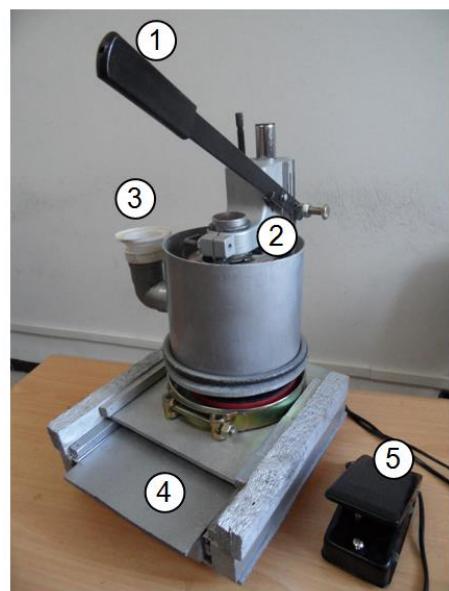
post-traitement par voie électrostatique, elle consiste à détacher mécaniquement les résidus blancs de la face interne du son de blé par un dispositif d'abrasion conçu et réalisé dans le cadre de cette thèse.

III.4.1. Description du système d'abrasion

Le dispositif d'abrasion utilisé pour le traitement du son de blé est représenté sur la figure III.8. Il est principalement composé de deux disques alignés horizontalement et séparés d'une distance de 20mm. Le disque inférieur est fixe et porte une grille métallique montée sur un support circulaire en aluminium. Le disque supérieur est entraîné par un moteur électrique à vitesse variable (Vitesse Max = 1300 tr/min). Le son de blé est introduit dans la chambre d'abrasion à travers une trémie d'alimentation. La distance entre la surface abrasive et la grille métallique peut être réglé manuellement grâce à un bras de réglage de distance. Une fois l'abrasion terminée, la nouvelle fraction du mélange est récupérée dans un collecteur en bois fixée au-dessous de la chambre d'abrasion, puis conditionnée dans un sac en polyéthylène avant de passer à l'étape suivante. Le son de blé préparé est ensuite transféré vers le séparateur électrostatique pour être trié [65].



(a)



(b)

Figure III.8 : Dispositif d'abrasion du son de blé [65]: (a) Représentation schématique (b) Photographie du dispositif d'abrasion: (1) Bras de réglage de la distance inter-disques, 2 : Moteur électrique, 3 : Trémie, 4 : Collecteur de produit, 5 : Contrôleur de vitesse du disque, 6 : Grille métallique, 7 : Disque rotatif.

III.5. Caractérisation électrique

III.5.1. Charge électrique de matériaux céréaliers

Nous avons utilisé le seau de Faraday illustré dans la figure III.9 pour évaluer la charge électrique des échantillons, il est composé essentiellement de deux enceintes métalliques, l'une à l'intérieur de l'autre. Les enceintes sont séparées par un matériau isolant adéquat. Pour diminuer les perturbations électriques provenant de l'environnement extérieur, nous avons relié l'enceinte extérieure à la terre, tandis qu'un électromètre (Keithley Model 6514) est relié à l'enceinte intérieure contenant le produit pour mesurer sa charge électrique [67]. Une balance électronique de résolution 0,01g a été utilisée pour mesurer la masse du produit, ce qui nous a permis d'évaluer le rapport charge/masse pour chaque échantillon végétal.

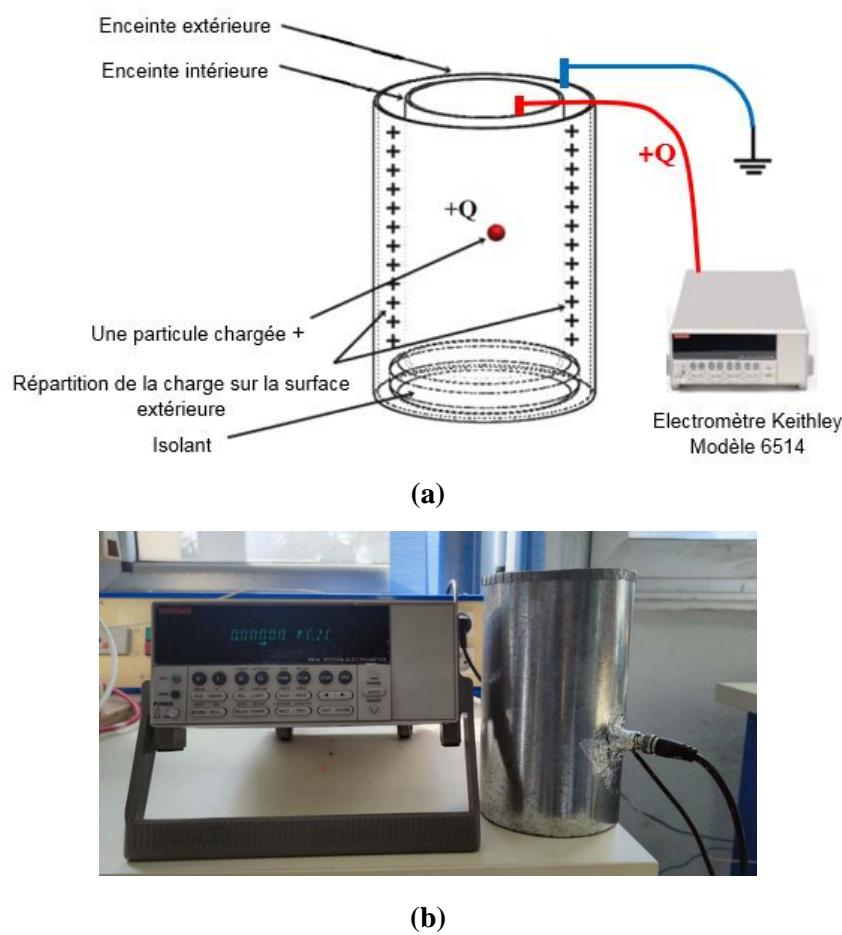


Figure III.9 : Equipement permettant de mesurer la charge électrique : (a) Schéma illustrant le principe de mesure, (b) Photographie du système de mesure (un électromètre Keithley Model 6514 et un Seau de faraday).

III.5.2. Potentiel de surface de matériaux céréaliers

L'examen du potentiel de surface a été réalisé essentiellement dans le but d'évaluer l'aptitude d'un matériau céréale à évacuer une charge électrique déposée sur sa surface lors de son contact avec une électrode connectée à la terre. En raison de sa simplicité et sa facilité d'implémentation, la méthode du déclin de potentiel de surface est très utile. L'acquisition des mesures ce fait d'une manière directe et les dépenses liées aux investissements matériels sont réduites [68], [69], [70]. Le principe de cette technique repose sur enregistrement de l'évolution temporelle du potentiel de surface d'un échantillon chargé par décharge couronne [71]. La figure III.10 présente le stand expérimental utilisé pour effectuer ces mesures de DPS.

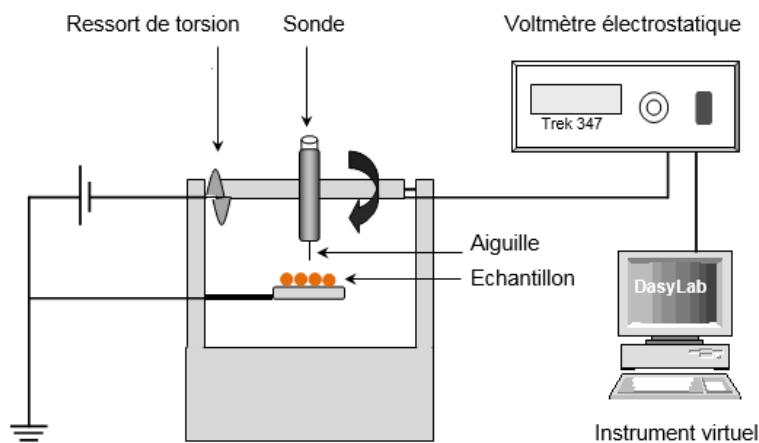


Figure III.10 : Stand expérimental de mesure du DPS [71].

Dans cette étude, le matériau végétal a été répandu en monocouche sur la surface d'une plaque métallique mise à la terre (longueur : 13 cm et largeur : 11 cm). Le fonctionnement de cette technique se divise en deux phases :

- La première phase consiste à déposer des charges électriques sur la surface de l'échantillon par décharge couronne, en utilisant une électrode couronne de type pointe dont le rayon de courbure est de $100\mu\text{m}$. Cette pointe est connectée à une source de haute tension réglable (Model Tecknix). Une distance de 20 mm a été fixée entre l'extrémité inférieure de la pointe et la surface de la plaque métallique pour permettre aux matériaux de se charger sans provoquer un vent électrique qui les met en mouvement, ce qui favorise leur dispersion sur la plaque. Le dépôt de charges s'effectue pendant 10s.

- Une fois que le dépôt de charge a été effectué, la base en bois, sur laquelle se trouvent la pointe et la sonde, est pivotée à 180° pour que la sonde soit localisée à environ 3mm au-dessus de la surface de l'échantillon. Le potentiel de surface a été mesuré à l'aide d'une sonde électrostatique à condensateur vibrant, connectée à un voltmètre électrostatique (Trek Modèle 347). L'acquisition et le traitement des données expérimentales sur ordinateur ont été réalisés à l'aide d'un système d'acquisition développé sous un environnement DASYLab.

III.6. Caractérisation physico-chimique des produits

Les échantillons de semoule obtenue après le traitement électrostatique ont été soumis à une série de tests pour déterminer leurs caractéristiques physiques et chimiques. Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au sein du laboratoire de contrôle de qualité des moulins Amor Benamor (LCQ). Chaque expérience a été répétée à trois fois et les valeurs mesurées qui seront exposées dans le chapitre suivant sont les valeurs moyennes de ces trois mesures. D'une manière générale, les valeurs estimées des écarts-type sont de faible importance ce qui signifie que ces valeurs sont regroupées autour de la moyenne et, par conséquent, elles ne seront pas fournies avec les résultats d'analyse.

III.6.1. Détermination de la teneur en cendres

La présence d'une portion d'un échantillon subsistant après combustion appelée "cendres" est un signe de la présence de matières minérales inorganiques. En réalité, la teneur en cendres témoigne de la pureté de semoules obtenues après le traitement électrostatique du son du blé. Le taux de cendres est calculé en incinérant une masse connue d'un échantillon dans un four à moufle jusqu'à ce que la matière organique soit complètement brûlée. On évalue la quantité de cendres en pesant le résidu obtenu et on exprime les résultats en pourcentage de matière sèche. Dans ce travail, ce paramètre est déterminé suivant les conditions décrites par la norme algérienne : NA. 733-1991, ISO 2171[72], [73].

Le mode opératoire consiste à chauffer les nacelles, avant leur utilisation, dans le four à moufle (Figure III.11a) réglé à une température de $900 \pm 25^\circ\text{C}$ pendant 10 minutes, ensuite ils ont été laissés refroidir à la température ambiante pendant une heure de temps dans un dessiccateur

(Figure III.11b) et pesés à 0,1mg près. Une quantité de 5 grammes de l'échantillon a été pesée et répartit dans les nacelles à incinération préparées sous forme d'une couche d'épaisseur uniforme sans la tasser. Cette prise d'essai a ensuite été humectée avec 1 à 2 ml d'éthanol afin d'avoir une incinération uniforme. Par la suite, la nacelle ainsi que son contenu ont été mis dans le four à moufle à une température de $900\pm25^{\circ}\text{C}$ pendant une durée de 2 heures. Une fois que le produit a été incinéré et refroidi dans le dessiccateur pendant une heure de temps, les nacelles contenant les cendres ont été pesées à l'aide d'une balance analytique de précision (Figure III.11c).

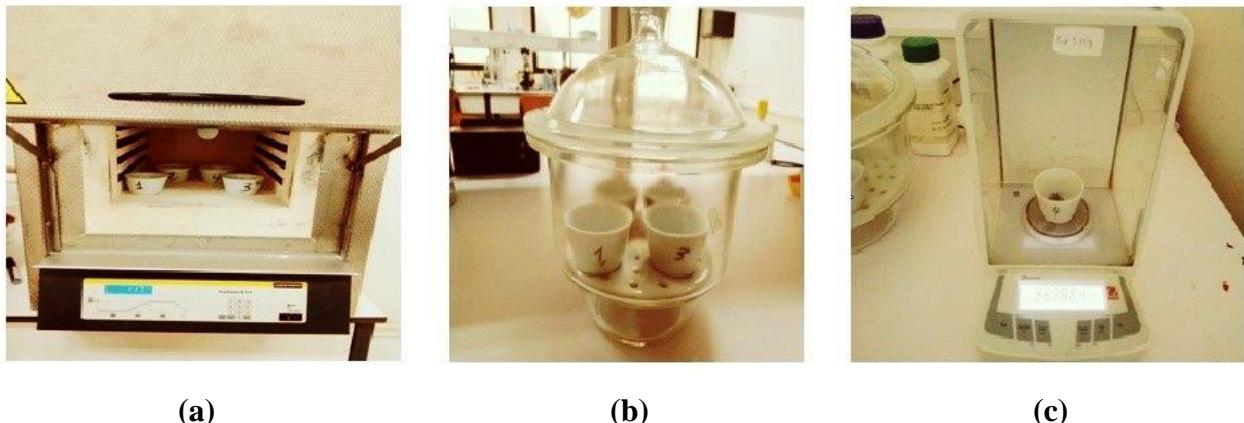


Figure III.11 : Équipement utilisé pour déterminer le taux de cendres : (a) Four électrique à moufle (Model : Nabertherm) ; (b) Dessiccateur ; (c) Balance électronique.

L'équation suivante donne la quantité de cendres présentes dans les échantillons en fraction massique par rapport à la matière sèche :

$$TC_{MS} = \frac{(P_2 - P_1) \times 100}{P_0} \times \frac{100}{100 - TE} \quad (\text{III.1})$$

TC_{MS} = Teneur en cendres par rapport à la matière sèche ;

P_0 = Masse (g) de l'échantillon ;

P_1 = Masse (g) de la nacelle ;

P_2 = Masse (g) du résidu et de la nacelle ;

TE = Teneur en eau de l'échantillon (%).

III.6.2. Détermination de la teneur en eau

La teneur en eau des céréales correspond à la diminution de masse, représentée en pourcentage, subit par le produit dans des conditions spécifiques. La détermination de la teneur en

eau des céréales et des différents produits dérivés est souvent effectuée pour se conformer aux normes et aux réglementations commerciales. La méthode consiste à sécher l'échantillon à une température comprise entre 130°C et 133°C à une pression atmosphérique constante. Dans ce travail, la quantité d'eau des produits a été évaluée en suivant les critères de la méthode de référence établis par la norme algérienne : NA 1132 -2007, ISO 712 [72], [74].



Figure III.12 : Dessiccateur halogène utilisé pour l'analyse du taux d'humidité des échantillons (Model HG63, Mettler Toledo).

La figure III.12 montre le dessiccateur utilisé pour l'analyse du taux d'humidité des échantillons. Le dispositif est équipé d'un système thermogravimétrique composé de deux appareils intégrés : une unité de chauffage halogène une balance électronique de précision. Au début de l'expérience, on mesure le poids de l'échantillon par le biais de dessiccateur, puis l'échantillon est chauffé et l'humidité s'évapore. Lorsque la dessiccation est terminée, le résultat final est affiché en grammes pour 100g. La formule suivante définit la méthode du calcul de la teneur en eau en pourcentage :

$$TE = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad (\text{III.2})$$

Où

TE étant la teneur en eau (en %) ;

M_0 et M_1 correspondent à la masse (en gramme) de l'échantillon avant séchage et après séchage.

III.6.3. Détermination des indices de coloration

La semoule est principalement colorée par des activités enzymatiques et par la présence de pigments caroténoïdes. Le principal intérêt de la mesure de l'indice de coloration de semoule réside

dans son aspect commercial, car les consommateurs ont souvent une préférence marquée pour les semoules de couleur dorée ; de ce fait, la couleur de la semoule revêt une grande importance pour les consommateurs. La coloration est caractérisée par les cordonnées trichromatiques : l'indice de clarté ($L+$), l'indice de brun ($a+$) et l'indice de jaune ($b+$). Nous avons calculé ces indices selon le norme ISO 11052 [75] en utilisant le colorimètre présenté sur la figure III.13 de type Konica Minolta Modèle: CR-410. L'écran de la console de mesure affiche les résultats de mesure, exprimés en fonction de système d'unité de mesure de la commission internationale de l'éclairage.



Figure III.13 : Colorimètre Type : Konica Minolta, Modèle : CR - 410.

III.6.4. Détermination de la granulométrie

L'étude de la granulométrie est l'analyse de la distribution de la granulométrie d'une semoule. La séparation par tamisage a été utilisée pour effectuer l'analyse granulométrique des semoules conformément à la norme NF 03-721. 1994 [76]. Pour ce faire, nous avons séparé et classé les échantillons de semoule selon leur diamètre à l'aide d'une tamiseuse vibrante (ROTACHOC CHOPIN Technologies, Villeneuve la Garenne-France). Cet appareil, représenté sur la figure III.14, est munie d'une colonne de tamis montées par ordre décroissant d'ouverture de maille : (150 μm , 200 μm , 250 μm , 355 μm , 450 μm , 500 μm , 600 μm).

Une prise d'essai de 100grammes à 0.1 grammes près de semoule a été déposée sur le tamis supérieur. Le tamisage s'opère par vibration des tamis verticalement et horizontalement pendant 10min. Ensuite, on a pesé les masses des refus cumulés sur chaque tamis.



Figure III.14 : Photographie de tamiseuse utilisée pour l'analyse granulométrique de la semoule (ROTACHOC CHOPIN Technologies, Villeneuve la Garenne-France).

III.7. Optimisation du processus de séparation par les plans d'expériences

L'emploi des plans d'expérience présente de nombreux avantages pour tous les expérimentateurs qui mènent des études scientifiques ou technologiques. En réalité, ils offrent la possibilité de mieux modéliser un processus observé, souvent complexe, en minimisant les expériences et en maximisant le degré de précision. Ils sont applicables à toutes les disciplines et à toutes les industries lorsqu'il s'agit de faire un lien entre une grandeur d'intérêt (y) et des variables (u_i) susceptibles d'affecter la valeur de y . On peut représenter un processus de séparation électrostatique par le schéma de la figure III.15.

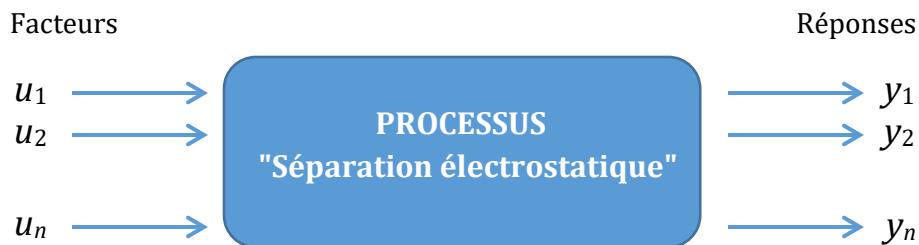


Figure III.15 : Représentation schématique d'un processus : cas de la séparation électrostatique.

L'étude d'un processus revient souvent à s'intéresser à une grandeur particulière, également connue sous le nom de réponse y . Cette grandeur dépend d'un nombre de variables, également appelés facteurs u_i . Mathématiquement, on peut dire que la réponse est une fonction de différents facteurs. Nous avons donc :

$$y = f(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n) \quad (\text{III. 3})$$

Un plan d'expériences permet d'analyser un processus en identifiant la fonction qui relie la réponse aux divers facteurs. La réponse se présente généralement sous la forme d'un polynôme d'ordre un ou deux :

$$y = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ij} u_i^2 \quad (\text{III. 4})$$

Pour chaque facteur étudié u_i , une valeur normalisée et centrée est définie de la manière suivante:

$$x_i = (u_i - u_{ic}) / \Delta u_i = u_i^* \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$u_{ic} = (u_{i\ max} + u_{i\ min}) / 2$$

$$\Delta u_i = (u_{i\ max} - u_{i\ min}) / 2$$

Avec : ($x_i = -1$) pour la valeur ($u_{i\ min}$) et ($x_i = +1$) pour la valeur ($u_{i\ max}$).

L'équation (III.4) devient alors :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (\text{III. 6})$$

Il est possible de modéliser et d'optimiser ce processus en utilisant soit un plan factoriel classique qui traduit la réponse y par un polynôme de premier degré, soit un plan factoriel composite qui conduit à un polynôme de degré deux et suit le premier plan factoriel dont les résultats sont mal expliqués par un modèle de premier degré [77].

III.7.1. Plans d'expériences factoriels complets

Les plans factoriels complets à deux niveaux sont basés sur les recherches menées par Ronald Aylmer de Fisher [78], [79]. Ces plans sont les plus pratiques et les plus faciles, car ils constituent le point de départ de l'étude. Il s'agit de plans où on analyse k facteurs à deux niveaux : un niveau bas représenté par le signe (-) et un niveau haut représenté par le signe (+), ils sont représentés par un modèle mathématique du premier degré qui prend en compte : la moyenne, les

effets de chaque facteur étudié et toutes les interactions entre les facteurs. Les effets des facteurs sont supposés additifs et il existe des interactions entre les facteurs. Dans le cas d'un plan factoriel qui implique l'étude de K facteurs, la représentation mathématique correspondante est la suivante :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ijk\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{III. 7})$$

On peut utiliser en partie ou entièrement les résultats d'un plan factoriel, soit pour explorer une autre région du domaine expérimental, soit pour développer un autre modèle de degré supérieur pour atteindre le degré de précision et d'information souhaité [80]. Ces plans à 2 niveaux sont décrits par 2^K combinaisons possibles évoquant le nombre d'expériences à effectuer, où 2 correspond aux deux niveaux (max et min) qui délimitent le domaine d'étude d'un facteur et K correspond au nombre de facteurs [81].

III.7.2. Plans d'expériences pour surfaces de réponse

En comparaison avec les plans factoriels, la méthodologie de surface de réponse permet d'aller plus loin dans la modélisation des phénomènes étudiés en offrant à l'expérimentateur des lois de variation plus précises en fonction des variables de l'étude. Un polynôme de degré deux est utilisé pour représenter le plan pour surfaces de réponse. En ajoutant des termes au carré, l'équation de ce modèle diffère de celle d'un plan factoriel. L'avantage des termes au carré réside dans leur aptitude à traduire une courbure dans la réponse étudiée. Les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert sont les trois catégories les plus importantes pour les surfaces de réponse.

III.7.2.1. Modèle polynomial du second degré

Un plan de surface de réponse est défini par un modèle mathématique du deuxième degré qui comprend les interactions de niveau deux et qui s'écrit sous cette forme :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + a_{i\dots k} x_{i\dots k} + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (\text{III. 8})$$

❖ Pour deux facteurs, le polynôme devient :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 \quad (\text{III. 9})$$

❖ Pour trois facteurs, le polynôme devient :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 \quad (\text{III. 10})$$

Pour bien interpréter un plan pour surfaces de réponse, il est indispensable de calculer les coefficients du modèle et de résoudre un système de n d'équations s'il existe n réponses et p inconnues s'il existe p coefficients.

III.7.2.2. Les plans composites centrés

Historiquement, les statisticiens Box G.E.P. et Wilson K.B. ont introduit les plans d'expérience nommés composites centrés en 1951 [82]. En pratique, ils sont largement employés et conviennent parfaitement au déroulement séquentiel d'une étude. Le plan composite centré est en fait un plan factoriel auquel s'ajoutent des expériences complémentaires représentées par un ensemble de points d'expériences repérés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points qui permettent d'estimer la courbure sont les points situés sur les axes de coordonnées et sont appelés points axiaux ou étoiles. Comme il est indiqué sur figure III.16, un plan composite centré est composé de trois parties principales

- la partie factorielle contenant l'ensemble des points expérimentaux qui se situent aux sommets du domaine d'étude ;
- la partie axiale qui rassemble tous les points en étoile situés à la même distance α du centre du domaine expérimental ;
- la partie centrale contenant au moins un point expérimental localisé au centre du domaine d'étude. Il est possible de répéter ce point une ou plusieurs fois.

Le nombre total d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel (2^K), des essais du plan en étoile ($2K$) et des essais au centre du domaine d'étude (N_0). Le nombre N des essais d'un plan composite est donné par la relation :

$$N = 2^K + 2K + N_0 \quad (\text{III. 11})$$

Où K représente le nombre de facteurs étudiés.

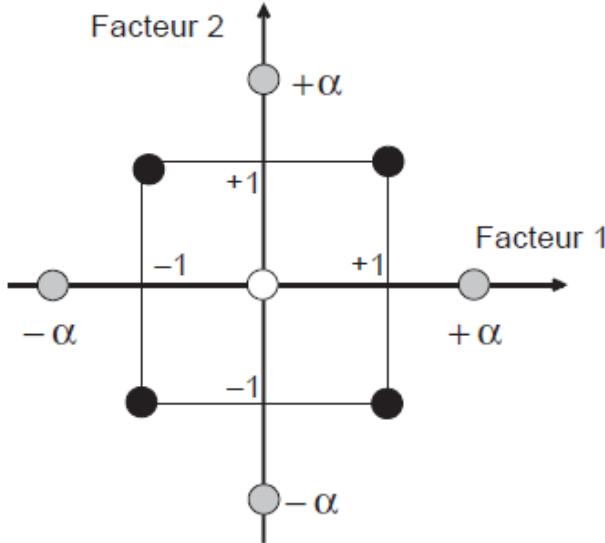


Figure III.16 : Plan composite pour 2 facteurs [83].

Il convient de noter que le terme composite exprime la séquentialité du plan, il est envisageable de réaliser d'abord les expériences de la partie factorielle, puis d'ajouter, si besoin, les expériences de la partie axiale. Le mot centré provient de l'emplacement de ce plan par rapport à l'origine du repère [84].

III.7.2.3. Plan composite à faces centrées

Dans cette catégorie du plan, qui est une autre forme du plan composite centré, le domaine expérimental est cubique et limité par un carré, ce qui donne la possibilité de trouver les optima qui se situent à côté des valeurs extrêmes des facteurs [85], [86]. Pour construire ce plan, chaque facteur doit être expérimenté à trois niveaux qui sont -1, 0, et 1 (en variable codée). Trois catégories de plans composites sont présentés par Box et Wilson [82], [87]:

- Le plan est désigné sous le nom Composite à Faces Centrées (CFC) dans le cas où les points en étoile sont sur les faces du cube c'est-à-dire $\alpha = \pm 1$.
- Le plan est désigné sous le nom Composite Centré Extérieur (CCE) dans le cas où les points en étoile sont à l'extérieur du domaine cubique c'est-à-dire $\alpha > 1$.
- Le plan est désigné sous le nom Composite Centré Intérieur (CCI) dans le cas où les points en étoile sont à l'intérieur du domaine cubique c'est-à-dire $\alpha < 1$.

Pour construire un plan pour surface de réponse, il recommandé de recourir à l'utilisation d'un plan composite. L'avantage de ce type de plan réside dans le fait que tous les facteurs étudiés ont seulement trois niveaux. Cela peut donc présenter un intérêt dans toutes les situations où il est compliqué, long ou coûteux de modifier le niveau du facteur en question [84].

III.7.3. Evaluation de la qualité du modèle

III.7.3.1. Qualité descriptive

Le coefficient de détermination est un indicateur statistique utilisé pour juger la qualité de l'ajustement linéaire du modèle, il est souvent appelé le R-carré ou R^2 . La formule permettant de calculer cet indicateur statistique est la suivante :

$$R^2 = \frac{SCEL}{STCE} = 1 - \frac{SCER}{STCE} \quad (\text{III. 12})$$

Où :

SCEL = Somme des Carrés des Ecarts dues à la Liaison,

STCE = Somme Totale des Carrés des Ecarts,

SCER = Somme des Carrés des Ecarts des Résidus.

Selon la formule III.12, les valeurs du coefficient de détermination varient de 0 à 1 : L'ajustement est plus efficace lorsque la valeur de R^2 est proche de 1 toutefois, le R^2 présente l'inconvénient de ne pas tenir compte du nombre de variables utilisées dans le modèle. En présence de plusieurs variables d'étude, il est recommandé d'éviter l'utilisation du coefficient R^2 de procéder au calcul du coefficient de détermination ajusté ($R^2_{ajusté}$). Ce coefficient statistique permet d'évaluer le pouvoir descriptive du modèle et prend en considération le nombre de coefficients qui y sont présents. Il est déterminé par la relation suivante :

$$R^2_{ajusté} = 1 - \frac{SCER/N - P}{STCE/(N - 1)} \quad (\text{III. 13})$$

Où :

N : Nombre d'essais réalisés

P : Nombre de coefficients du modèle.

Un modèle qui possède un pouvoir descriptif excellent est marqué par un coefficient $R^2_{\text{ajusté}}$ proche de 1.

III.7.3.2. Qualité prédictive

Le terme qualité prédictive d'un modèle fait référence à sa capacité à prédire la réponse non encore réalisé dans tous les points du domaine d'étude. Elle est calculée en utilisant le coefficient noté Q^2 . Ce coefficient est calculé à partir de cette formule :

$$Q^2 = 1 - \frac{\text{PRESS}}{\text{STCE}} \quad (\text{III. 14})$$

Où PRESS représente la somme prédictive des carrés des résidus ; c'est l'abréviation de "Prediction Residual Error Sum of Squares". Étant donné que N erreurs de prédiction existent, la statistique suivante définit la PRESS :

$$\text{PRESS} = \sum_{i=1}^N e_{(i)}^2 \quad (\text{III. 15})$$

Où $e_{(i)}$ est l'erreur de prédiction pour le $i^{\text{ème}}$ traitement du plan d'expériences.

Le coefficient de la qualité prédictive Q^2 se situe dans l'intervalle suivant : $-\infty \leq Q^2 \leq 1$. La qualité prédictive du modèle augmente à mesure que la valeur de Q^2 se rapproche de 1.

III.7.4. Logiciels de plans d'expérience

Les outils informatiques jouent un rôle très important pour effectuer une étude précise et rapide en se basant sur un plan d'expérience. Ceci se révèle pratique pour réaliser tous les calculs mathématiques complexes et longs, à savoir les tests d'hypothèses, le calcul des coefficients, le calcul de la qualité du modèle. Les logiciels dédiés à l'élaboration et au traitement des plans d'expériences sont marqués par leur origine statistique et constituent des outils très puissants dans la construction et l'analyse des plans d'expériences qui comprend différents types de plans (plans factoriels complets ou fractionnaires, plans en surface de réponse, plans de mélange, etc...). La bibliothèque de la plupart de ces logiciels regroupe l'ensemble de plans classiques qui facilitent la création du plan le plus approprié à chaque problématique et relativement complexe avec peu d'efforts. Ces logiciels sont aussi programmés pour l'analyse de la variance (ANOVA), tracer les graphiques d'isoréponses, calculer les réponses dans l'ensemble du domaine d'étude, élaborer des

surfaces de réponse et identifier les zones d'intérêt. Cependant, il est essentiel de bien comprendre la méthode des plans d'expériences pour utiliser ces logiciels. Parmi les logiciels de plans d'expériences les plus couramment utilisés figurent : Statistica, Minitab, JMP, Pirouette, Unscrambler, Statgraphics.

Pour modéliser et optimiser le procédé électrostatique proposé dans ce travail, nous avons jugé utile de se servir du logiciel MODDE 8.0 de la société Umetrics, qui est très recommandé pour la création et l'analyse des plans d'expériences. Les réponses sont estimées par le logiciel MODDE 8.0 qui fait appel à l'analyse de régression, que ce soit par la méthode des moindres carrés ordinaires ou par la méthode des moindres carrés partiels.

III.8. Conclusion

Afin de procéder aux opérations de prétraitement et de post-traitement des matériaux céréaliers par voie électrostatique, nous avons conçu et réalisé deux montages expérimentaux. Le premier banc est un séparateur électrostatique à cylindre tournante destiné aux études de la séparation du mélange de matériaux végétaux grâce à l'utilisation de l'induction électrostatique. Le deuxième banc est un dispositif d'abrasion utilisé pour le traitement du son de blé. Plusieurs techniques de mesure ont été décrites dans ce chapitre, telles que la caractérisation électrique et physico-chimique des produits céréaliers.

Nous avons exposé les principaux plans d'expérience et leur importance dans la recherche scientifique, ainsi que les logiciels commerciaux ou libres consacrés aux plans d'expériences tels que le logiciel MODDE, utilisé dans le cadre de ce travail de thèse.

Chapitre IV

Résultats de purification électrostatique de la semoule de blé

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les résultats expérimentaux de prétraitement de blé et de post-traitement du son de blé par voie électrostatique. Cela nous a permis de purifier le blé avant la mouture et d'augmenter le taux d'extraction de la semoule. Nous exposons ensuite les résultats de la modélisation et de l'optimisation de processus électrostatique. En outre, nous présentons les résultats de la caractérisation physico-chimique de la semoule obtenue dans le but d'évaluer l'efficacité globale du traitement électrostatique proposé dans le cadre de ce travail de thèse.

IV.2. Résultats de la purification du blé

Dans le but de purifier le blé avant la mise en mouture, nous avons appliqué un traitement électrostatique sur le mélange de grains de blé dur et de résidus de récolte décrit dans la section III.2, en utilisant le séparateur électrostatique à induction illustré à la figure ci-dessous et décrit dans la section III.3.1.

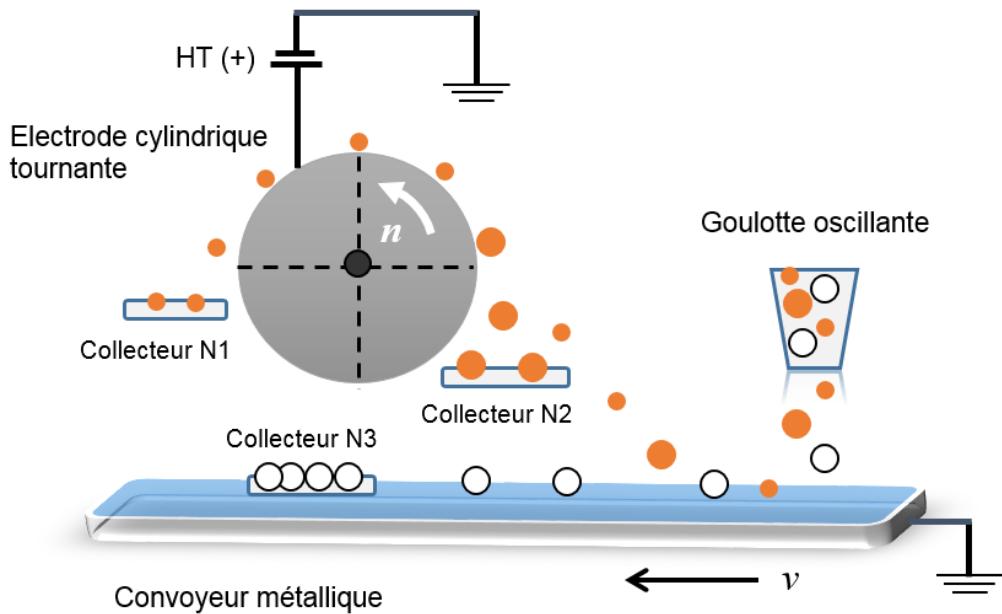


Figure IV.1 : Schéma de séparateur électrostatique à induction conçu au laboratoire.

Avant la séparation, la teneur en eau des échantillons a été déterminée selon la méthode approuvée (NA. 1132-2007/ISO 712). La teneur en eau des grains de blé a été mesurée à l'aide d'un analyseur

de céréales (Infratec : 1241, Foss), tandis que celle des résidus de récolte a été mesurée à l'aide de dessiccateurs (HG63, Mettler Toledo). Les échantillons de blé et de résidus agricoles avaient des teneurs en eau respectives de 10,90 % et 9,39 %. Les expériences ont été menées dans des conditions ambiantes (température : $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et humidité relative de $55\% \pm 1\%$). La masse totale de chaque échantillon utilisé dans les expériences de prétraitement électrostatique est de 3,5 g, comprenant 2,5 g de blé et 1 g de paille et de chaume.

Le mélange a été étalé à la surface du convoyeur métallique relié à la terre. Lorsque les particules traversent la zone de champ électrique généré entre le cylindre rotatif connecté à une source haute tension positive et le convoyeur métallique mis à la terre, une charge électrique négative est induite à leur surface en raison de leur conductivité. En raison de la différence de poids entre les produits constituant le mélange à séparer, certaines particules de résidus de récolte chargées négativement sont attirées et adhèrent à la surface de l'électrode cylindrique, puis sont récupérées dans le collecteur N1. Les particules relativement grosses et lourdes sont également attirées, mais projetées par le cylindre dans le collecteur N2 sous l'effet des forces centrifuges. En raison de la masse spécifique élevée des grains de blé, la force gravitationnelle surmonte la force électrostatique, si bien que les grains restent sur la surface du convoyeur et sont récupérés dans le collecteur N3. Le produit récupéré dans le collecteur N3 est pesé après chaque expérience. La performance du processus purification est évaluée sur la base de calcul des deux indices suivants :

1. Le taux de récupération:

$$Rec (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (\text{IV.1})$$

avec:

m_{ic} : La masse du produit i considéré collecté dans le bac qui lui est destiné.

m_{it} : La masse totale du même produit i introduit dans le séparateur.

2. Taux de pureté :

$$Pur (\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (\text{IV.2})$$

avec :

m_{ic} : La masse du produit i considéré collecté dans le bac qui lui est destiné.

m_{tc} : La masse totale (les deux produits) collectée dans le même bac de collection.

Il convient de noter que la totalité des grains de blé reste à la surface de l'électrode à plaque. De ce fait, le taux de récupération calculé est toujours égal à 100%, quelles que soient les conditions expérimentales.

La figure IV.2 présente la variation de la pureté des grains de blé collecté en fonction de la distance entre l'électrode cylindrique et le convoyeur relié à la terre. La vitesse de rotation du cylindre a été fixée à $n = 30$ tr/min et la tension appliquée $U = 12,5$ kV. La distance entre les électrodes varie entre 15mm et 30mm. On constate que l'augmentation de la distance entre le cylindre et le convoyeur métallique diminue la pureté du blé récupéré. Cela s'explique par la diminution de l'intensité du champ électrique et, par conséquent, des forces électriques agissant sur les particules de résidus de récolte. Dans la limite des distances étudiées, plus la distance entre l'électrode cylindrique et le convoyeur est faible, plus la purification est efficace. En effet, la pureté du grain de blé séparé dépasse 96% lorsque la distance est de 15mm [1].

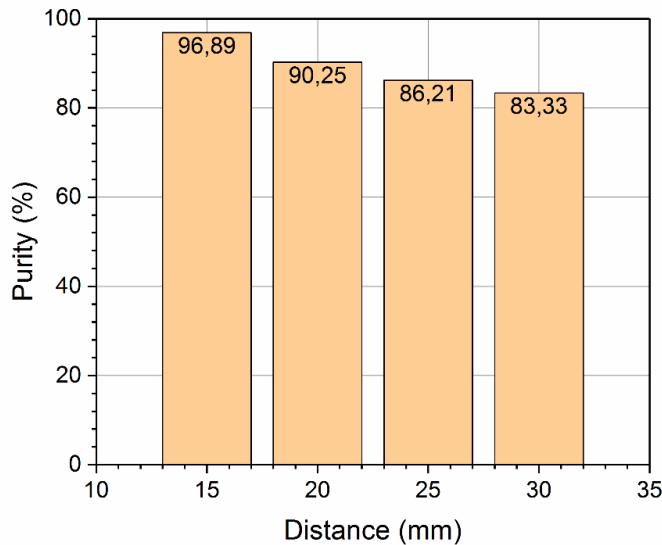


Figure IV.2 : Pureté de blé récupéré en fonction de la distance entre le cylindre rotatif et le convoyeur métallique.

IV.3. Résultats de traitement du son de blé par abrasion

La figure IV.3 montre des images microscopiques de particules de son de blé avant et après processus d'abrasion. Les particules de son de blé non traitées (Figure IV.3-a) contiennent de grands morceaux de son, avec une quantité considérable d'endosperme qui adhère encore aux couches de son avant le traitement. La figure IV.3-b présente une image microscopique du

matériau broyé avec le dispositif abrasif. On constate que les grands morceaux de son de blé ont été retirés avec succès, laissant apparaître le contour de leur attachement à la couche d'aleurone.

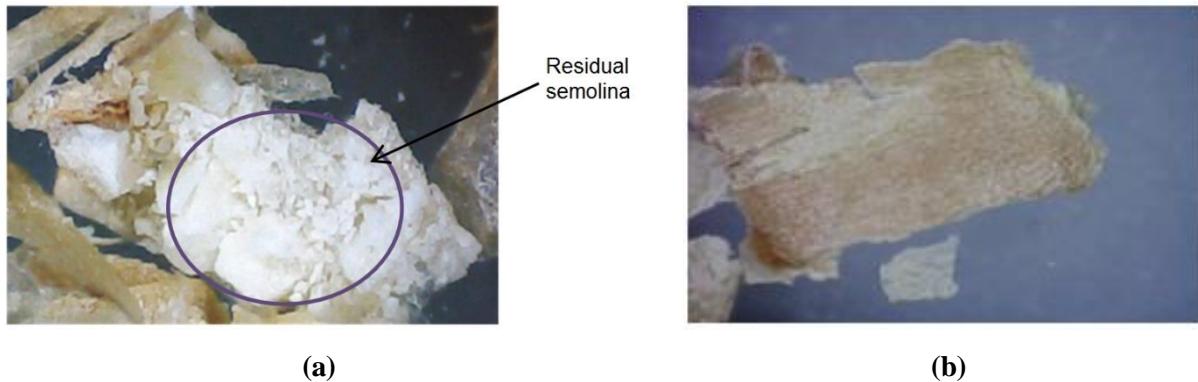


Figure IV.3 : Images microscopiques du son de blé (a) avant et (b) après le processus d'abrasion (grossissement : 60 \times).

IV.4. Résultats de la séparation électrostatique

Les expériences de séparation faites sur une mélange de 2g ont été réalisé à l'air ambiant (humidité relative: RH = 38% \pm 1, température: T = 22°C \pm 1%), la vitesse de convoyeur métallique a été fixée à $v = 0,5$ cm/s et la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique à $n = 28$ tr/min. Après chaque essai de séparation, les quantités des produits récupérés dans les trois collecteurs de produits sont pesées à l'aide d'une balance électronique. Pour déterminer la masse totale des produits attirés par l'électrode cylindrique, nous avons fait la somme des masses récupérées dans les deux collecteurs N2 et N3. Les pertes de matière lors de ces expériences sont minimes, représentant moins de 5 % du produit initial. Les variations de la somme des masses récupérées dans les deux collecteurs N1 et N2 ainsi que la masse récupérée dans le collecteur N3 en fonction de la tension appliquée à l'électrode cylindrique sont présentées sur la figure IV.4.

Les résultats présentés dans la figure IV.4 peuvent être divisés en trois zones :

1. En dessous de 8,5 kV, il n'y a pas de séparation significative, presque tout le mélange demeure sur la surface du convoyeur et est récupéré dans le collecteur N3.
2. Entre 8,5 kV et 11 kV, la séparation devient de plus en plus efficace, car les particules sont attirées par l'électrode cylindrique et récupérées dans le collecteur N1. Les particules qui rebondissent et celles qui sont détachées par la force centrifuge, après contact avec l'électrode

cylindrique, ont été récupérées dans le collecteur N2. Le reste du mélange demeure sur le convoyeur et est dirigé directement vers le collecteur N3.

3. De 11 à 12,5 kV, une sorte de stabilisation est constatée dans la récupération, résultant en une séparation en quantités égales des produits. Ainsi, la tension optimale doit être inspectée dans cet intervalle de tension appliquée sur le cylindre. Les particules des fractions récupérées dans les collecteurs de produits N1 et N2 ont une très faible densité et se caractérisent par une forme allongée et plate, ainsi que par une couleur marron. Les particules de la fraction récupérée dans le collecteur N3 sont plus denses que celles des collecteurs N1 et N2 et se distinguent par une forme sphérique de couleur crème. La différence observée entre les fractions N1 et N2 est que la fraction du collecteur N1 est très fine par rapport à la fraction du collecteur N2.

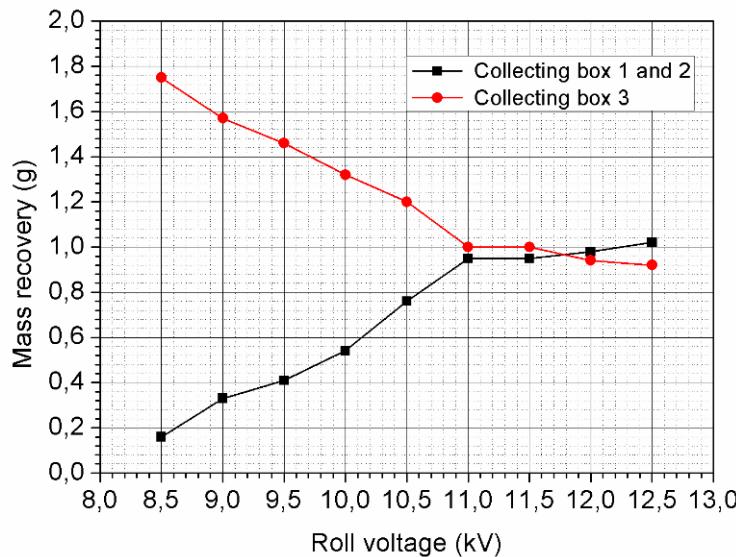


Figure IV.4 : Masse des produits récupérés en fonction de la tension appliquée sur l'électrode cylindrique.

On présente dans la figure IV.5 des images réelles et microscopiques des matériaux récupérés dans les trois collecteurs de produits. Les différences entre les trois matériaux sont claires, en termes de couleur et de forme. On constate dans la figure IV.5 que la fraction de semoule de blé récupérée dans le collecteur N3 présente des surfaces lisses et sans fissures. Les particules de la semoule montrent une grande hétérogénéité en termes de taille et de forme, et leur taille est bien supérieure à celle des autres fractions de son de blé récupérées dans les collecteurs N1 et N2. Une particule conductrice en contact avec le convoyeur métallique relié à la terre se charge par

induction électrostatique lorsqu'elle entre dans la zone de champ électrique. Elle peut être attirée par l'électrode à rouleau si la force d'attraction électrique F_e est supérieure à la force gravitationnelle F_g et à la force d'adhésion F_a :

$$F_e > F_a + F_g \quad (\text{IV.3})$$

Il est important d'optimiser les différents paramètres du procédé électrostatique afin d'améliorer son efficacité. Cela a été réalisé grâce à la méthode des plans d'expériences décrite dans le chapitre III.

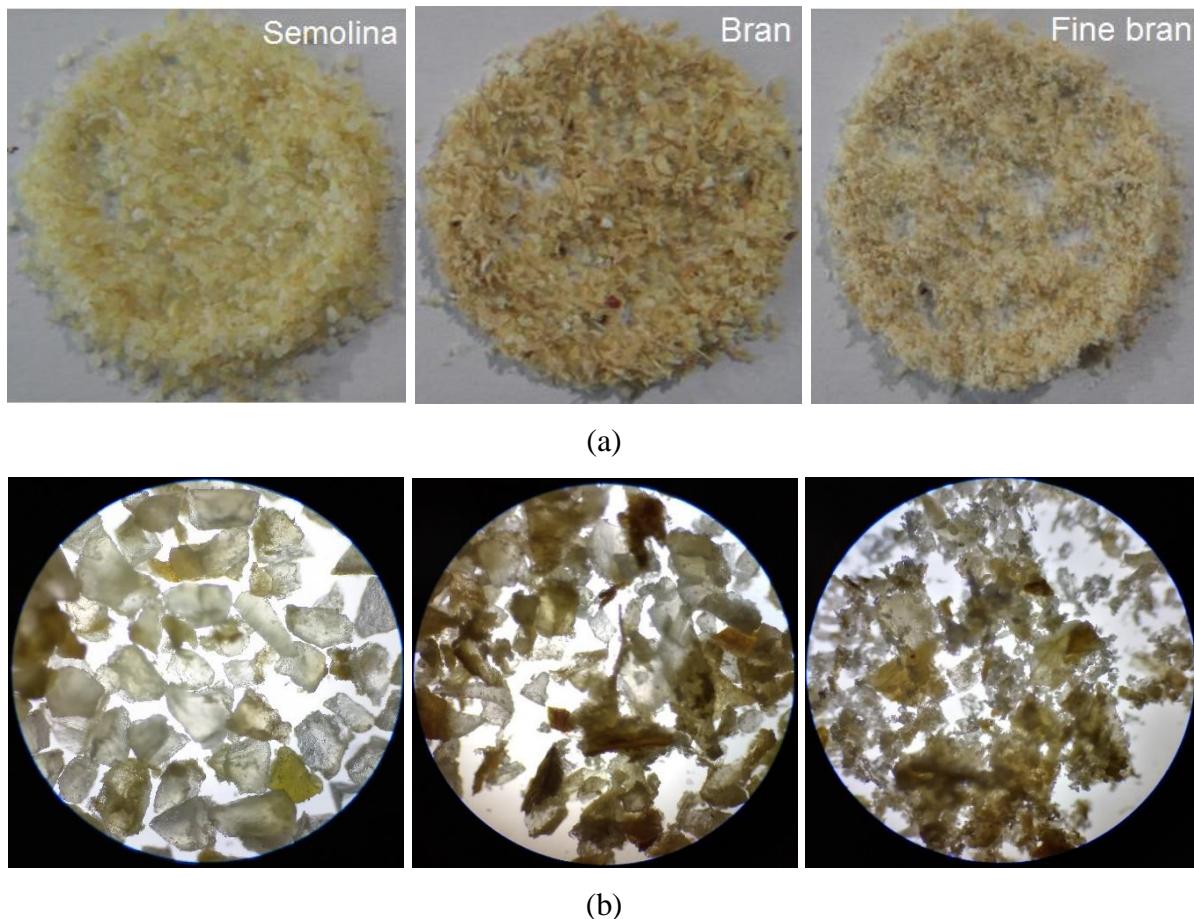


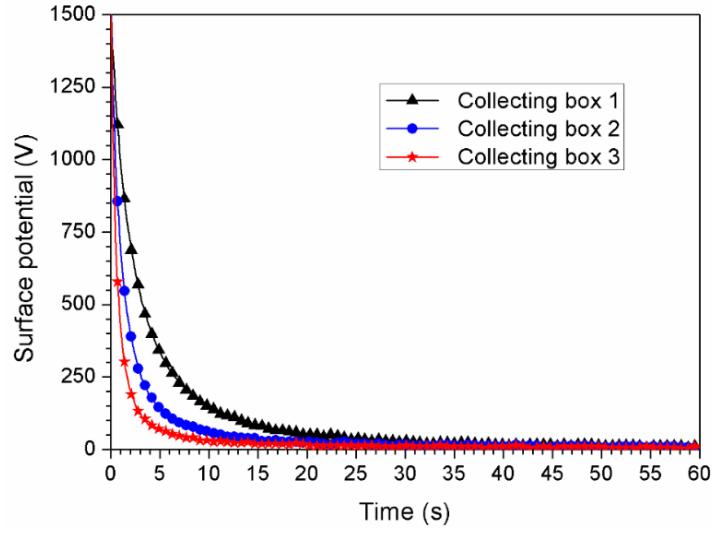
Figure IV.5 : Fractions récupérées: (a) images réelles des fractions ; (b) images microscopiques (grossissement : 40×) obtenues avec un microscope optique (OPTIKA B-150).

IV.5. Caractérisation électrostatique des produits séparés

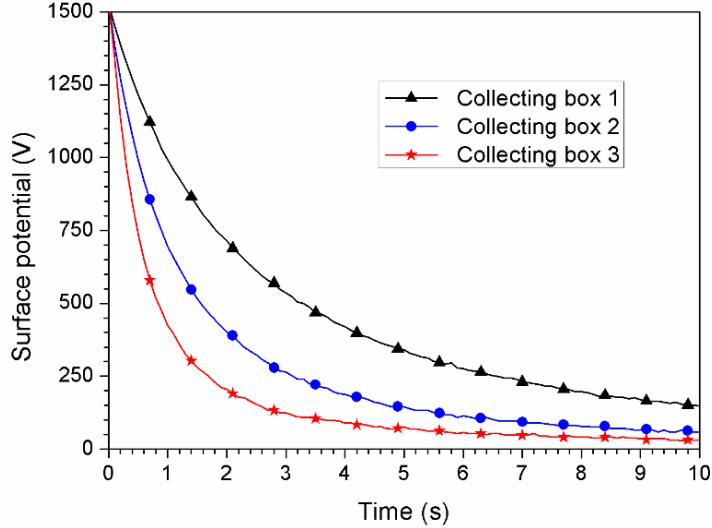
IV.5.1. Déclin de potentiel en surface

Les mesures du déclin de potentiel de surface ont été effectuées sur les trois fractions récupérées après l'opération de la séparation électrostatique. Les échantillons récupérés ont été répandus à la surface de l'électrode plane reliée à la terre (surface de la couche : 100mm×100mm, surface de l'électrode 130m×110mm). La décharge couronne est générée par une électrode pointe pendant 10 secondes. La tension initiale de charge est d'environ 1,50 kV. Toutes les mesures du déclin de potentiel de surface ont été réalisées à l'air ambiant (température : $22^{\circ}\text{C} \pm 1$, humidité relative de l'atmosphère : $38\% \pm 1$). Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence de la nature de chaque matériau récupéré sur la cinétique du déclin de potentiel en surface. Une comparaison des courbes obtenues montre une différence au niveau des allures obtenues (Figure IV.6-a). Comme nous pouvons le constater sur la figure IV.6-b, le déclin de potentiel enregistré pour les particules de la fraction de semoule récupérée dans le collecteur N3 est plus important que celui des fractions de son de blé récupérées dans les collecteurs N1 et N2. En effet, le taux de DPS dans la fraction de semoule après 10 s diminue de 97 %, passant de 1,52 à 0,032 kV.

Dans des conditions expérimentales similaires, le taux de DPS de l'échantillon de son de blé récupéré dans le collecteur N2 diminue de 90 %, passant de 1,52 kV à 0,148 kV en 10s. Une diminution similaire est constatée avec la fraction fine du son récupérée dans le collecteur N1. Au cours de 30 secondes, les trois fractions perdent entièrement leur charge électrique. Cela signifie que les particules étudiées agissent comme de mauvais isolants et ne conservent pas la charge électrique pendant une longue durée. Ce comportement conducteur justifie le choix du mécanisme d'induction pour réaliser une séparation électrostatique de ce type de matière végétale.



(a)



(a)

Figure IV.6 : Déclin de potentiel de surface après (a) 60 secondes et (b) 10 secondes dans les fractions : son fin de blé (collecteur N1), son de blé (collecteur N2) et semoule (collecteurs N3). Les courbes de DPS représentent la moyenne d'au moins trois essais (écart-type < 50 V).

IV.5.2. Etat de charge des produits séparés

Les mesures de charge ont été effectuées sur des échantillons vierges (avant séparation) et sur des échantillons chargés (après séparation). Les rapports charge/masse enregistrés pour les trois fractions (son fin de blé, son et semoule) sont illustrés à la figure IV.7. Les mesures de la charge acquise après séparation ont été réalisées dans les conditions suivantes :

- Masse initiale des échantillons : $m_0 = 2$ g,
- Tension appliquée sur le cylindre rotatif : $U = 10,5$ kV,
- Vitesse du convoyeur à bande métallique : $v = 0,5$ cm/s,
- Vitesse de rotation du cylindre $n = 28$ tr/min.

Avant l'opération de séparation électrostatique, la valeur moyenne de la charge résiduelle des trois échantillons vierges est de 0,04 $\eta\text{C/g}$. Après séparation électrostatique, le rapport charge/masse enregistré pour la fraction semoule est très faible (1,38 $\eta\text{C/g}$) ce qui confirme une fois de plus le comportement conducteur de la fraction semoule. Par conséquent, ces particules conductrices perdent leur charge acquise à travers le convoyeur mis à la terre. En revanche, la valeur de la charge acquise mesurée pour les deux fractions (son de blé et son fin) est relativement importante (6,47 $\eta\text{C/g}$ et 7,85 $\eta\text{C/g}$ respectivement). Les échantillons de son de blé sont légèrement plus résistifs que ceux de semoule, ce qui leur permet de conserver une partie de la charge acquise. De plus, la forme allongée et plate des particules de son de blé assure une surface de contact plus importante avec le convoyeur métallique, et favorise ainsi leur charge par induction électrostatique.

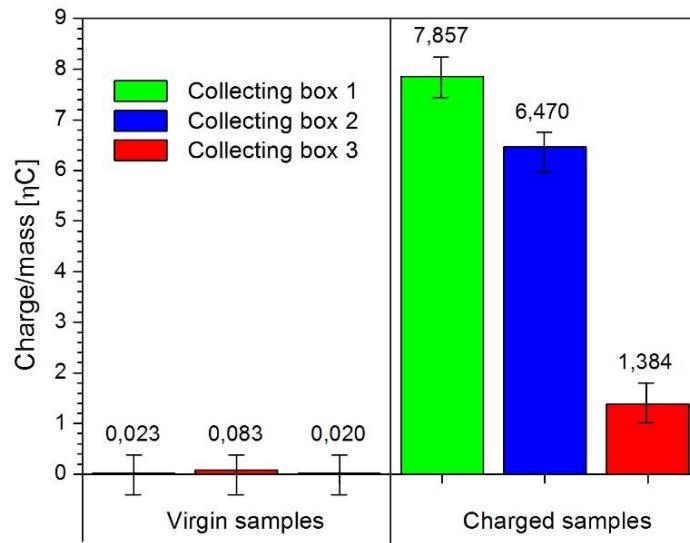


Figure IV.7 : Rapport charge/masse des fractions : son fin de blé, son de blé et semoule avant et après séparation (les résultats sont des moyennes de trois expériences).

IV.6. Modélisation et optimisation du procédé d'électro-séparation

Sur la base des résultats des tests de séparation préliminaires, trois facteurs ont été jugés les plus influents pour lesquels nous définissons des limites de variation :

- Tension appliquée sur le cylindre U : $U_{min} = 8,5\text{kV}$ et $U_{max} = 12,5\text{kV}$;
- Vitesse du convoyeur v : $v_{min} = 0,2\text{cm/s}$ et $v_{max} = 0,8\text{cm/s}$;
- Vitesse du cylindre n : $n_{min} = 9 \text{ rpm}$ et $n_{max} = 47 \text{ rpm}$.

Le plan d'expériences décrit ci-après a été conçu pour étudier l'influence de ces trois facteurs sur la réponse du processus de séparation électrostatique ainsi que pour optimiser son fonctionnement. Les variables de sortie du système sont les masses de matériaux récupérés dans les trois collecteurs de produits. La figure IV.8 présente des expériences d'un plan composite à faces centrées (CFC), permettant de modéliser des surfaces de réponse (RSM), c'est-à-dire des surfaces qui représentent la relation entre les facteurs et la réponse. Ce plan comprend huit expériences situées aux sommets du cube (points ronds a, b, \dots, h), six expériences situées au centre des faces du cube (points carrés i, j, \dots, n) et trois expériences identiques réalisées au point central M (point étoile).

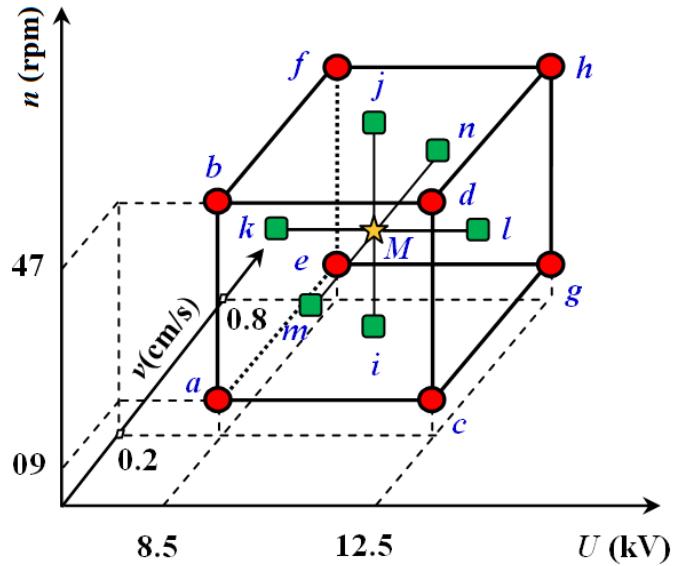


Figure IV.8 : Diagramme d'un plan composite à faces centrées (CFC) des essais réalisés pour trois facteurs: tension appliquée sur le cylindre U : ($U_{min} = 8,5\text{kV}$ et $U_{max} = 12,5\text{kV}$); vitesse du convoyeur v : ($v_{min} = 0,2\text{cm/s}$ et $v_{max} = 0,8\text{cm/s}$); vitesse du cylindre n : ($n_{min} = 9 \text{ rpm}$ et $n_{max} = 47 \text{ rpm}$).

Le modèle mathématique de la réponse du processus est un polynôme quadratique qui prend la forme suivante:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (\text{IV.4})$$

où a_i et a_{ij} sont les coefficients du modèle quadratique et x_i est la valeur centrée normalisée pour chaque facteur u_i^* :

$$x_i = (u_i - u_{ic})/\Delta u_i = u_i^* \quad (\text{IV.5})$$

avec :

$$u_{ic} = (u_{i\ max} + u_{i\ min})/2 \quad (\text{IV.6})$$

$$\Delta u_i = (u_{i\ max} - u_{i\ min})/2 \quad (\text{IV.7})$$

Avec ces notations, la réponse y (c'est-à-dire la masse récupérée dans chaque collecteur) sera déterminée en fonction des facteurs pris en compte dans cette étude: la tension appliquée sur le cylindre (U), la vitesse du convoyeur (v) et la vitesse du cylindre (n). Par conséquent, le modèle quadratique prendra la forme suivante:

$$y = a_0 + a_1U^* + a_2n^* + a_3v^* + a_{12}U^*n^* + a_{13}U^*v^* + a_{23}n^*v^* + a_{11}U^{*2} + a_{22}n^{*2} + a_{33}v^{*2} \quad (\text{IV.8})$$

Les résultats de 17 expériences du plan CFC sont reportés dans le tableau IV.1. Chaque expérience est effectuée sur une quantité de 2g de son du blé traité avec le dispositif conçu au laboratoire pour l'abrasion du son de blé. Sur la base des données expérimentales du Tableau IV.1, les modèles mathématiques proposés par le logiciel MODDE 8.0 sont :

$$Y_{\text{box1}} = 0.306 + 0.314U^* + 0.092n^* - 0.079v^* + 0.059U^2 + 0.078U^*n^* - 0.048U^*v^* - 0.023n^*v^* \quad (\text{IV.9})$$

$$Y_{\text{box2}} = 0.147 + 0.330U^* + 0.055n^* + 0.058v^* + 0.167U^{*2} - 0.067n^2 + 0.117v^{*2} + 0.057U^*n^* + 0.057U^*v^* \quad (\text{IV.10})$$

$$Y_{\text{box3}} = 1.514 - 0.642U^* - 0.145n^* + 0.016v^* - 0.234U^{*2} + 0.080n^{*2} - 0.109v^{*2} - 0.133U^*n^* + 0.026n^*v^* \quad (\text{IV.11})$$

Les qualités descriptives et prédictives des trois modèles sont exprimées respectivement par les coefficients statistiques R2 et Q2. Le coefficient d'ajustement R2 est proche de 1 pour les trois modèles, soit respectivement 0,997, 0,989 et 0,999, ce qui signifie que les masses récupérées sont bien décrites par les polynômes quadratiques (IV.9), (IV.10) et (IV.11). Le coefficient de la qualité prédictive Q2 des trois modèles est également élevé : 0,976, 0,963 et 0,996, respectivement. Les valeurs des coefficients associés aux facteurs dans les modèles mathématiques montrent le degré d'influence de chaque facteur. Les coefficients sont également représentés dans la figure

IV.9. L'analyse statistique des données, réalisée à l'aide du test de *Student*, a montré que les effets de tous les facteurs (c'est-à-dire les coefficients de U^* , v^* et n^*) sont significatifs. Les coefficients de n^{*2} et v^{*2} dans le premier modèle, n^*v^* dans le deuxième modèle et U^*v^* dans le troisième modèle ne sont pas statistiquement significatifs ; ils ont été supprimés des modèles mathématiques. Les modèles mathématiques montrent que le facteur le plus influent sur les masses récupérées est la tension appliquée sur l'électrode cylindrique (coefficients = 0,314 ; 0,330 et -0,642), suivie de la vitesse du cylindre (coefficients = 0,092 ; 0,055 et -0,145), puis de la vitesse du convoyeur (coefficients = -0,079 ; 0,058 et 0,016).

Tableau IV.1 : Résultats des expériences du plan composite à faces centrées.

No.	Facteurs			Réponses		
	U (kV)	n (rpm)	v (cm/s)	$Y_{Box\ 1}$ (g)	$Y_{Box\ 2}$ (g)	$Y_{Box\ 3}$ (g)
1	8,5	9	0,2	0,04	0,02	1,92
2	12,5	9	0,2	0,58	0,47	0,9
3	8,5	47	0,2	0,09	0,03	1,83
4	12,5	47	0,2	0,99	0,71	0,28
5	8,5	9	0,8	0,01	0,02	1,91
6	12,5	9	0,8	0,4	0,7	0,88
7	8,5	47	0,8	0,01	0,03	1,93
8	12,5	47	0,8	0,67	0,94	0,36
9	8,5	28	0,5	0,04	0,02	1,9
10	12,5	28	0,5	0,69	0,6	0,65
11	10,5	9	0,5	0,19	0,05	1,71
12	10,5	47	0,5	0,38	0,1	1,47
13	10,5	28	0,2	0,4	0,2	1,39
14	10,5	28	0,8	0,22	0,32	1,41
15	10,5	28	0,5	0,3	0,17	1,51
16	10,5	28	0,5	0,31	0,15	1,52
17	10,5	28	0,5	0,31	0,14	1,53

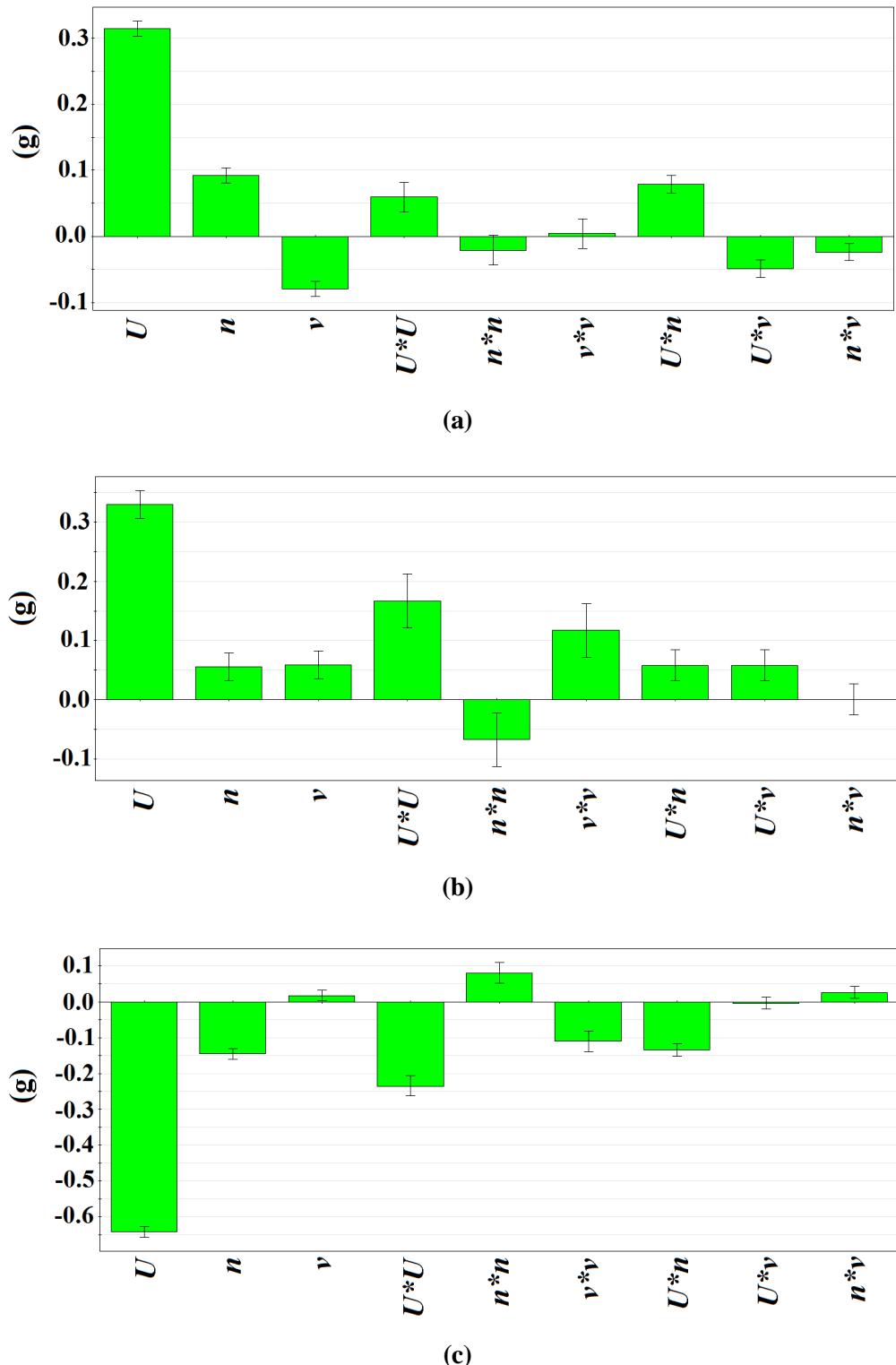


Figure IV.9 : Coefficients des modèles quadratiques calculés par le logiciel MODDE 8.0 pour la masse récupérée dans: (a) collecteur N1, (b) collecteur N2, (c) collecteur N3.

L'influence de chaque facteur sur les trois réponses est illustrée à la figure IV.10. La courbe d'iso-réponse calculée avec le modèle de la masse récupérée dans le collecteur N3 est représentée à la figure IV.11, dans le domaine de variation des trois facteurs. De manière surprenante, les effets des facteurs étudiés semblent être différents sur les trois types de matériaux récupérés. Sans aucun doute, la tension appliquée U a un effet plus fort sur les masses récupérées dans les trois boîtes collectrices. En effet, avec l'augmentation de la tension appliquée sur le cylindre rotatif, la masse récupérée dans les collecteurs N1 et N2 augmente, et celle dans le collecteur N3 diminue. Plus la tension U est élevée, plus le champ électrique agissant sur les particules est fort, ce qui conduit à des masses récupérées plus importantes. De même, la vitesse de rotation du cylindre n a également montré une influence prononcée sur les trois réponses. L'augmentation de la vitesse de rotation du cylindre entraîne une augmentation de la force centrifuge et une réduction du temps de séjour des particules adhérant à la surface du cylindre. Cela explique l'augmentation de la quantité du produit récupérée dans les collecteurs N1 et N2. La vitesse du convoyeur v semble avoir peu d'influence par rapport aux autres facteurs. Plus le convoyeur se déplace rapidement, plus le temps de séjour des particules dans le champ électrique est court et moins elles peuvent acquérir de charge. Par conséquent, les particules insuffisamment chargées ne seront pas attirées par l'électrode cylindrique en rotation et resteront sur la surface du convoyeur. L'analyse des données effectuées sur les trois modèles mathématiques, a montré un autre point intéressant : est qu'il existe une forte interaction entre la tension U appliquée sur le cylindre et sa vitesse de rotation n . Pour une tension appliquée plus faible, la modification de la vitesse du cylindre a un effet marginal sur les masses récupérées dans les trois collecteurs de produits, comme le montre clairement la figure IV.11. Pour garantir l'augmentation de la pureté et du taux de récupération de la semoule, il est essentiel de mener des expériences systématiques de séparation électrostatique, établies avec des valeurs optimales des variables de contrôle, et de procéder à des analyses de contrôle qualité des fractions de semoule obtenues après séparation. L'étape d'optimisation de ce procédé électrostatique devrait permettre de déterminer les valeurs des facteurs pour lesquels la masse récupérée dans le collecteur N3 se rapproche d'une cible. Pour une masse initiale de mélange $m_0 = 2$ g, le logiciel MODDE 8.0 indique que les résultats optimaux (c'est-à-dire la cible : $Y_{\text{Box3}} = 1$ g, la masse prédictive dans le collecteur N1 étant de 0,54g et la masse prédictive dans le collecteur N2 étant de 0,42g) correspondent à une tension du cylindre $U = 12,4$ kV, une vitesse du cylindre $v = 9,73$ tr/min et une vitesse du convoyeur $n = 0,34$ cm/s.

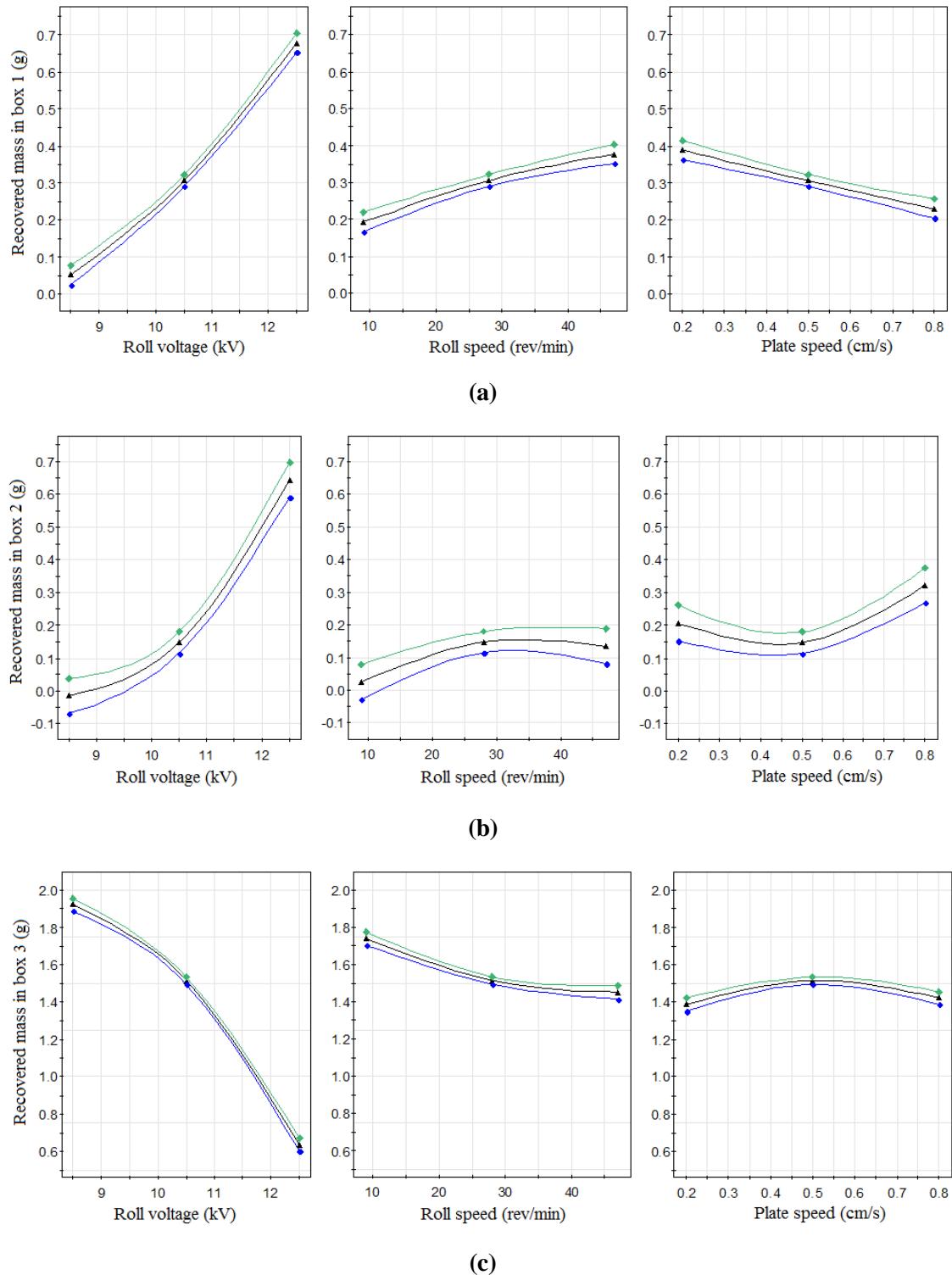


Figure IV.10 : Masse prédictive dans: (a) collecteur N1, (b) collecteur N2 et (c) collecteur N3, en fonction de la tension appliquée U (kV), de la vitesse du cylindre n (tr/min) et de la vitesse du convoyeur v (cm/s). Dans chaque cas, l'autre variable est maintenue constante et égale à sa valeur centrale : $U = 10,5$ kV, $n = 28$ tr/min et $v = 0,5$ cm/s. Les calculs ont été effectués avec le logiciel MODDE 8.0, pour un niveau de confiance de 0,95.

Une expérience de vérification menée par l'application des valeurs optimales obtenues conduit aux résultats suivants: 0,98g dans le collecteur N3 (semoule), 0,53g dans le collecteur N1 (son) et 0,41g dans le collecteur N2 (son fin), ce qui confirme les prédictions faites par MODDE 8.0 [2].

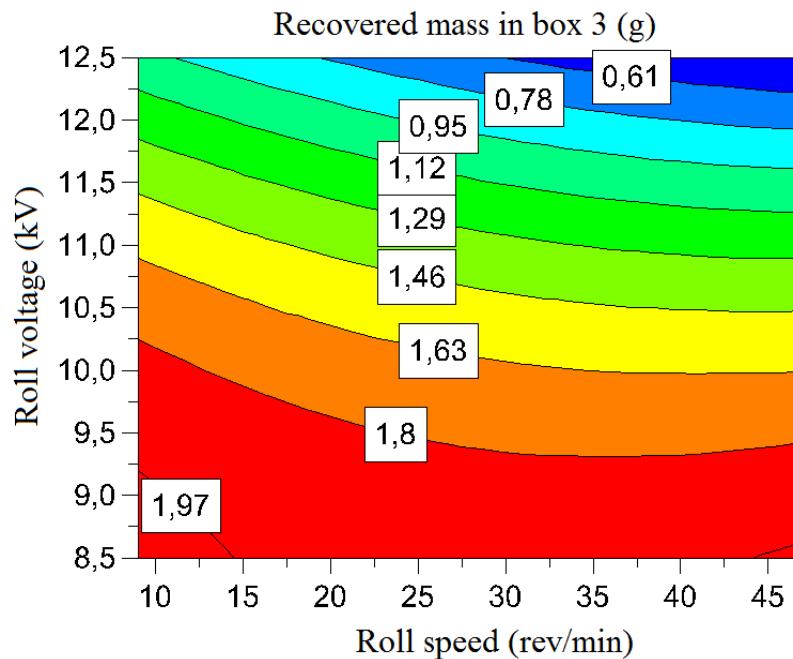


Figure IV.11 : Courbes de réponse de la masse récupérée dans le collecteur N3, calculées par le logiciel MODDE 8.0.

IV.7. Analyse physico-chimique des semoules extraites

Les résultats de l'analyse physico-chimique de la semoule obtenue sont résumés dans le tableau IV.2. La taille moyenne des grains de semoule se situe entre 500 et 600 µm. La teneur en humidité est de 11,40 %. Un aspect important à souligner est que l'humidité de la semoule est toujours dans les limites de sécurité ($\leq 14,5 \%$) [3]. Les particules de semoule présentent une couleur jaune vif, avec une valeur de luminosité (L+) de 75,71. Les valeurs (a+ : rouge-vert) et (b+ : jaune-bleu) étaient respectivement de -0,27 et 26,82, comme indiqué dans le tableau IV.2. La couleur de la semoule est un attribut de qualité important dans l'industrie agroalimentaire et influence les choix et les préférences des consommateurs.

Tableau IV.2 : Analyses physico-chimiques de la fraction de semoule.

Granulométrie (μm)	Teneur en humidité (%)	Teneur en cendres (%)	Couleur		
			Valeur de L ₊	Valeur de a ₊	Valeur de b ₊
500-600	11,40	1,13 ± 0,02	75,71	-0,27	26,82

La couleur finale résulte de l'équilibre entre les composantes jaune et brune de la semoule. Les pigments caroténoïdes, tels la lutéine, sont les principaux responsables de la couleur jaune de la semoule. L'enzyme lipoxygénase (LOX) n'est pas directement liée de la couleur jaune, mais elle peut jouer un rôle dans les changements de couleur lors du processus de mouture ou de stockage, tandis que la peroxydase (POD) et la teneur en cendres contribuent à la couleur brune de la semoule qui est une coloration non désirée pour les consommateurs [4]. Les valeurs (L₊) (luminosité) et b₊ (jaune/bleu) sont souvent considérées comme des attributs plus importants pour décrire la couleur de la semoule, car elles permettent d'apprécier mieux les nuances de couleur, en particulier la teinte jaune typique de la semoule [5]. Les valeurs enregistrées de L₊ et b₊ sont très élevées, ce qui a contribué à la brillance et au jaunissement de la semoule obtenus. En outre, la teneur en cendres des échantillons reflète la pureté de cette semoule. En général, la semoule à forte teneur en cendres a une apparence moins uniforme et peut présenter davantage de taches, ce qui est lié à la présence de fragments de la partie extérieure du grain de blé dur et de graines mauvaises herbes qui peuvent être présentes dans la récolte de blé. Ces éléments, riches en minéraux, donnent à la semoule une couleur plus sombre et un aspect moins homogène. En effet, la teneur en cendres est un indicateur important de la qualité de la semoule et de son niveau de contamination. Plus précisément, une faible teneur en cendres dans la semoule indique qu'elle a été moins contaminée par des éléments étrangers [6]. Les échantillons de semoule obtenus se caractérisent par une bonne proportion d'albumen amylocé, qui est une partie du grain riche en amidon, et une faible teneur en cendres (1,13 ± 0,02 %). Par conséquent, les échantillons présentent une pureté moyenne. D'après les analyses physico-chimiques et selon le Journal officiel algérien [3], la semoule obtenue est classée: semoule ordinaire de blé dur de deuxième qualité. Sur la base de ces résultats, on peut dire que la fraction de semoule extraite à partir des résidus de son de blé présente une qualité acceptable pour l'industrie alimentaire. Ainsi, le processus de séparation électrostatique peut être considéré comme étant optimal.

IV.8. Conclusion

Les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre démontrent le potentiel de la séparation électrostatique pour la purification des grains de blé des résidus issus de la récolte. Grâce à un prétraitement électrostatique, il a été possible d'atteindre une pureté de blé supérieure à 98%. En outre, Le post-traitement de son de blé, basé sur l'association d'une abrasion mécanique du son de blé et la séparation électrostatique, a permis de récupérer 50% de semoule à partir du poids initial du son de blé traité. Les particules de semoule obtenues après séparation électrostatique présentent des dimensions physiques identiques à celles obtenues après mouture traditionnelle.

Conclusion générale

Les travaux présentés s'inscrivent dans le cadre général de l'étude de la faisabilité d'améliorer le taux d'extraction de la semoule en récupérant les résidus d'endosperme attachés au son de blé après la mouture traditionnelle.

Les objectifs de ces travaux ont été focalisés sur l'introduction d'une technique complémentaire à la mouture conventionnelle. La technique consiste en un traitement électrostatique avant et après la mouture, combiné à une opération d'abrasion mécanique du son de blé. Cela vise à purifier le blé avant la mouture et d'augmenter le taux d'extraction de la semoule.

En résumé, cette étude a permis de dégager plusieurs conclusions principales, que nous allons rappeler brièvement ici.

- L'étude a mis en évidence que l'opération d'abrasion mécanique du son de blé, suivie de la séparation électrostatique du mélange obtenu, a permis de récupérer 50 % de semoule à partir de la masse initiale traitée, avec une teneur en cendres de 1,1 %.
- Les particules de semoule obtenues après séparation électrostatique présentent des dimensions physiques identiques à celles obtenues par la méthode traditionnelle de mouture.
- Grâce au dispositif d'abrasion réalisé au laboratoire, il a été possible de détacher d'importantes quantités d'endospermes encore adhérents aux couches de son après une mouture traditionnelle.
- D'après les analyses physico-chimiques et selon le Journal officiel algérien, la semoule obtenue après traitement électrostatique est classée: semoule ordinaire de blé dur de deuxième qualité.
- Le comportement conducteur du son de blé justifie le choix du mécanisme d'induction électrostatique pour réaliser une séparation électrostatique de ce type de matière végétale.
- Grâce à un prétraitement électrostatique d'un mélange de grains de blé dur et de résidus de récolte, il a été possible d'atteindre une pureté de blé supérieure à 98%.

- Trois fractions ont été récupérées après le traitement électrostatique du son de blé : la semoule, le son fin et le son de blé relativement gros.
- Nous avons démontré que l'application de la séparation électrostatique pour trier de manière sélective les différents éléments composant les mélanges granulaires reste efficace, même pour les matériaux céréaliers.
- Nous avons démontré l'intérêt de l'utilisation de la méthode des plans d'expériences pour quantifier les effets et les interactions entre les facteurs (tension appliquée sur le cylindre, vitesse du convoyeur et vitesse du cylindre), ainsi que pour optimiser le processus électrostatique.

Bibliographie

- [1] Hütkins Robert W., "Microbiology and Technology of Fermented Foods", 2nd Edition, Wiley-Blackwell. USA, 2018.
- [2] Karel Kulp, "Handbook of Cereal Science and Technology", CRC Press. Boca Raton, USA, 2000.
- [3] Surget Anne, Barro Cécile, "Histologie du grain de blé", Industrie des Céréales, n° 145, p. 3 - 7, 2005.
- [4] Debiton Clément, "Identification des critères du grain de blé (*Triticum aestivum L.*) favorables à la production de bioéthanol par l'étude d'un ensemble de cultivars et par l'analyse protéomique de lignées isogéniques waxy", Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, France, 2010.
- [5] Calvel Raymond, "La boulangerie moderne", Eyrolles. Paris, 1979.
- [6] Jacquemin Leslie, "Production d'hemicelluloses de pailles et de sons de blé à une échelle pilote. Etude des performances techniques et évaluation environnementale d'un agro-procédé", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2012.
- [7] Turner Michael, "Les semences", Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux. France, 2013.
- [8] Antoine Carole, Lullien-Pellerin Valérie, Abécassis Joël, Rouau Xavier, "Intérêt nutritionnel de la couche à aleurone du grain de blé", Sciences des aliments, vol. 5, n° 22, p. 545-556, 2002.
- [9] Y. Hemery, X. Rouau, V. Lullien-Pellerin, C. Barron, et J. Abecassis, "Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality", Journal of Cereal Science, vol. 46, n° 3, p. 327-347, 2007.
doi: 10.1016/j.jcs.2007.09.008.
- [10] Jeantet Romain, Croguennec Thomas, Schuck Pierre, Brulé Gérard, "Sciences des Aliments 2- Technologie des Produits Alimentaires". Tec & Doc Lavoisier, 2007.
- [11] "Moulins - BENAMOR: Processus de Fabrication".
<https://fr.scribd.com/document/538968407/Moulins-BENAMOR-fabrication>
- [12] Godon Bernard, "Biotransformation des produits céréaliers", Coll. Sciences et Techniques agroalimentaires. 1991.
- [13] Feillet Pierre, "Le grain de blé: Composition et utilisation". Editions Quae, 2000.
- [14] Godon Bernard, Willm Claude, "Les industries de première transformation des céréales". Lavoisier-Tec & Doc, 1998.
- [15] Franconie Hélène, Chastanet Monique et Sigaut François, "Couscous, boulgour et polenta: transformer et consommer les céréales dans le monde". Karthala Editions, 2010.
- [16] Abécassis Joel, "Les moutures sèches. B. La mouture du blé dur". Les industries de première transformation des céréales, Lavoisier, 1991.

- [17] "Journal Officiel De la République Algérienne" N°. 80, 2007.
<https://archive.gazettes.africa/archive/dz/2007/dz-government-gazette-dated-2007-12-26-no-80.pdf>
- [18] Benbelkacem Abdelkader, Sadli Fatiha, Brinis Louhichi, "La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie", Options Méditerranéennes. Zaragoza (Spain). A22, p. 61-65, 1995.
- [19] Gontran Richard, "Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2018.
- [20] Younes Abdallah, Sayah Houari, Younes Mohamed, Samuila Adrian, Dascalescu Lucian, "Behavior of Conducting Particles in a New Electrostatic Separator with Two High-Voltage Electrodes", Particulate Science and Technology, vol. 28, n° 3, p. 207-216, 2010.
doi: 10.1080/02726351.2010.481573.
- [21] Djillali Azzeddine, Bekkara Mohammed Fethi, Tilmantine Amar, "Electrostatic separation of particles used as complement to mechanical recycling plant of industrial waste", International Journal of Environmental Studies, vol. 79, n° 1, p. 61-71, 2022.
doi: 10.1080/00207233.2021.1875293.
- [22] Silveira André Vicente Malheiros, Cella Mateus, Tanabe Eduardo Hiromitsu, Bertuol Daniel Assumpção, "Application of tribo-electrostatic separation in the recycling of plastic wastes", Process Safety and Environmental Protection, vol. 114, p. 219-228, 2018.
doi: 10.1016/j.psep.2017.12.019.
- [23] Achouri Imed Eddine, Zeghloul Thami, Richard Gontran, Medles Karim, Nouri Hamou, Dascalescu Lucian, "Factors that Influence the Performance of a Two-Rotating Disks-Type Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Micronized WEEE", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, n° 1, p. 802-811, 2019.
doi: 10.1109/TIA.2018.2866546.
- [24] Kdidi Samia, Vaca-Medina Guadalupe, Peydecastaing Jérôme, Oukarroum Abdallah, Fayoud Nour Elhouda, Barakat Abdellatif, "Electrostatic separation for sustainable production of rapeseed oil cake protein concentrate: Effect of mechanical disruption on protein and lignocellulosic fiber separation", Powder Technology, vol. 344, p. 10-16, 2019.
doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.107.
- [25] Rajaonarivony Rova Karine, Rouau Xavier, Dascalescu Lucien, Mayer-Laigle Claire, "Electrostatic separation of mineral and vegetal powders with a custom built corona separator: application to biorefinery of rice husk", EPJ Web Conf., vol. 140, p. 13020, 2017.
doi: 10.1051/epjconf/201714013020.
- [26] Das Subhankar, Medles Karim, Younes Mohamed, Dragan Ciprian, Dascalescu Lucian, "Separation of Fine Granular Mixtures in S-Plate-Type Electrostatic Separators", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, n° 5, p. 1137-1143, 2007.

doi: 10.1109/TIA.2007.904359.

- [27] Richard Gontran, Touhami Seddik, Zeghloul Thami, Dascalescu Lucien, "*Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator*", *Waste Management*, vol. 60, p. 112-122, 2017.
doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.036.
- [28] Dascalescu Lucian, Morar Roman, Iuga Alexandru, Samuila Adrian, Neamtu Vasile, "*Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes*", *Particulate Science and Technology*, 1998.
doi: 10.1080/02726359808906782.
- [29] Mihalcioiu Adrian-Florin, "*Measurement Techniques and Virtual Instruments for the Study of Electrostatic Processes*", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2005.
- [30] Zelmat Mohammed El-Mouloud, Tilmantine Amar, Rizouga Mohamed, Gouri Rabah, Medles Karim, Dascalescu Lucien, "*Experimental analysis of a cyclone tribocharging device for free-fall triboelectric separation of plastic particles*", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, n° 5, p. 1584-1589, 2013.
doi: 10.1109/TDEI.2013.6633687.
- [31] Bendimerad Salah-Eddine, Tilmantine Amar, Ziane Mohammed, Dascalescu Lucien, "*Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator*", *International Journal of Environmental Studies*, vol. 66, n° 5, p. 529-538, 2009.
doi: 10.1080/00207230902722838.
- [32] Benabboun Adel, Brahmi Youssouf, Tilmantine Amar, Bendaoud Abdelber, Miloudi Mohamed, Dascalescu Lucien, "*Experimental investigation of a new tribo-electrostatic separation process for mixed fine granular plastics*", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, p. 1-5, 2013.
doi: 10.1109/IAS.2013.6682465.
- [33] Messal Sara, Mekhaleff Abdelkader, Medles Karim, Zeghloul Thami, Dascalescu Lucian, "*Factors that Influence the Efficiency of a Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Finely-Grinded Matter*", *Proc. Electrostatics Joint Conference, USA*, 2016.
- [34] Benhafssa Abdelkader Mekhalef, Medles Karim, Boukhounda Mohamed Fodil, Tilmantine Amar, Messal Sara, Dascalescu Lucian, "*Study of a Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Mixtures of Micronized Insulating Materials*", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, n° 5, p. 4166-4172, 2015.
doi: 10.1109/TIA.2015.2434794.
- [35] Boukhounda Mohamed Fodil, Miloudi Mohamed, Medles Karim, Rezoug Mohamed, Tilmantine Amar, Dascalescu Lucian, "*Experimental Modeling of a New Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers*", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, n° 6, p. 2375-2381, 2013.
doi: 10.1109/TIA.2013.2263113.

- [36] Miloudi Mohamed, Medles Karim, Tilmantine Amar, Bendaoud Abdelber, Dascalescu Lucian, "*Optimization of Belt-Type Electrostatic Separation of Triboaerodynamically Charged Granular Plastic Mixtures*", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, n° 4, p. 1781-1786, 2013.
doi: 10.1109/TIA.2013.2256767.
- [37] Benaouda Imen, Zelmat Mohamed El Mouloud, Ouiddir Rabah, Dascalescu Lucien, Tilmantine Amar, "*Analysis of a novel insulating conveyor-belt tribo-electrostatic separator for highly humid granular products*", Journal of Electrostatics, vol. 100, p. 103357, 2019.
doi: 10.1016/j.elstat.2019.103357.
- [38] Daiku Hiroyuki, Inoue Tetsuya, Masanori Tsukahara, Maehata Hidehiko, Kakeda Kenji, "*Electrostatic separation technology for waste plastics-development of a high-purity type separator for plastics*", in Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, p. 562-565, 2001.
doi: 10.1109/ECODIM.2001.992424.
- [39] Blajan Marius, Beleca Radu, Iuga Alexandru, Dascalescu Lucian, "*Triboelectrification of Granular Plastic Wastes in Vibrated Zigzag-Shaped Square Pipes in View of Electrostatic Separation*", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, n° 4, p. 1558-1563, 2010.
doi: 10.1109/TIA.2010.2049552.
- [40] Dodbiba Gjergj, Shibayama Atsushi, Miyazaki Tosiyuki, Fujita Toyohisa, "*Electrostatic Separation of the Shredded Plastic Mixtures Using A Tribo-Cyclone*", Physical Separation in Science and Engineering, vol. 11, p. 63-92. 2002.
doi: 10.1080/07313630290002626.
- [41] Iuga Alexandru, Calin Laur, Neamtu Vasile, Mihalcioiu Adrian, Dascalescu Lucian, "*Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device*", Journal of Electrostatics, vol. 63, n° 6-10, p. 937-942, 2005.
doi: 10.1016/j.elstat.2005.03.064.
- [42] Calin Laur, Mihalcioiu Adrian, Iuga Alexandru, Dascalescu Lucian, "*Fluidized Bed Device for Plastic Granules Triboelectrification*", Particulate Science and Technology, vol. 25, n° 2, p. 205-211, 2007.
doi: 10.1080/02726350701257782.
- [43] Dragan Ioan Ciprian, "*Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires*", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2010.
- [44] Mekhalef Benhafssa Abdelkader, Zeghloul Thami, Aksa Wessim, Medles Karim, Dascalescu Lucien, "*Continuous operation of a fluidized-bed disk-type electrostatic separator for micronized plastic waste*", Waste Management, vol. 79, p. 763-769, 2018.
doi: 10.1016/j.wasman.2018.08.044.

- [45] Dascalescu lician, Zeghloul Thami, Iuga Alexandru, "Electrostatic Separation of Metals and Plastics From Waste Electrical and Electronic Equipment", WEEE Recycling, Elsevier, p. 75-106, 2016.
doi: 10.1016/B978-0-12-803363-0.00004-3.
- [46] Hemery Youna, Holopainen Ulla, Lampi Anna-Maija, Lehtinen Pekka, Nurmi Tanja, Piironen Vieno, Edelmann Minnamari, Rouau Xavier, "Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: Electrostatic separation of particles", Journal of Cereal Science, vol. 53, n° 1, p. 9-18, 2011.
doi: 10.1016/j.jcs.2010.06.014.
- [47] Barakat Abdellatif et Rouau Xavier, "New dry technology of environmentally friendly biomass refinery: glucose yield and energy efficiency", Biotechnol Biofuels, vol. 7, n° 1, p. 138, 2014.
doi: 10.1186/s13068-014-0138-2.
- [48] Chuetor Santi, Luque Rafael, Barron Cécile, Solhy Abderrahim, Rouau Xavier, Barakat Abdellatif, "Innovative combined dry fractionation technologies for rice straw valorization to biofuels", Green Chem., vol. 17, n° 2, p. 926-936, 2015.
doi: 10.1039/C4GC01718H.
- [49] Pelgrom Pascale J.M., Berghout Jacqueline A.M., van der Goot Atze Jan, Boom Remko M., Schutyser Maarten A.I., "Preparation of functional lupine protein fractions by dry separation", LWT - Food Science and Technology, vol. 59, n° 2, p. 680-688, 2014.
doi: 10.1016/j.lwt.2014.06.007.
- [50] Schutyser Maarten A.I., Pelgrom Pascale J.M., van der Goot Atze Jan, Boom Remko M., "Dry fractionation for sustainable production of functional legume protein concentrates", Trends in Food Science & Technology, vol. 45, n° 2, p. 327-335, 2015.
doi: 10.1016/j.tifs.2015.04.013.
- [51] Basset Charlie, Kedidi Sourour, Barakat Abdellatif, "Chemical- and Solvent-Free Mechanophysical Fractionation of Biomass Induced by Tribo-Electrostatic Charging: Separation of Proteins and Lignin", ACS Sustainable Chem. Eng., vol. 4, n° 8, p. 4166-4173, 2016.
doi: 10.1021/acssuschemeng.6b00667.
- [52] Barakat Abdellatif, Jérôme François, Rouau Xavier, "A Dry Platform for Separation of Proteins from Biomass-Containing Polysaccharides, Lignin, and Polyphenols", ChemSusChem, vol. 8, n° 7, p. 1161-1166, 2015.
doi: 10.1002/cssc.201403473.
- [53] Barakat Abdellatif, Mayer-Laigle Claire, "Electrostatic Separation as an Entry into Environmentally Eco-Friendly Dry Biorefining of Plant Materials", Journal of Chemical Engineering & Process Technology, vol. 8, n° 4, p. 1-6, 2017.
doi: 10.4172/2157-7048.1000354.
- [54] Rouau Xavier, Mateo-Anson Nuria, Barron Cécile, Chaurand Marc, Lullien-Pellerin Valérie, Mabille Frédéric, Samson Marie-Françoise, Abecassis Joel, Hemery Youna, "Effet des procédés de

fractionnement sur la composition et quelques propriétés nutritionnelles des produits céréaliers", Cahiers de Nutrition et de Diététique, vol. 45, n° 5, p. 230-236, 2010.
doi: 10.1016/j.cnd.2010.04.005.

- [55] Barron Cécile, Abecassis Joëi, Chaurand Marc, Lullien-Pellerin Valerie, Mabille Frederic, Rouau Xavier, Abdelkrim Sadoudi, Samson Marie-Françoise, "*Accès à des molécules d'intérêt par fractionnement par voie sèche*", Innovations Agronomiques, vol. 19, p. 51-62, 2012.
- [56] Messal sara, "*Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire*", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2016.
- [57] Remadnia Mokdad, Kachi Miloud, Messal sara, Oprean Adrian, Rouau Xavier, Dascalescu Lucian, "*Electrostatic Separation of Peeling and Gluten from Finely Ground Wheat Grains*", Particulate Science and Technology, vol. 32, n° 6, p. 608-615, 2014.
doi: 10.1080/02726351.2014.943379.
- [58] Messal Sara, Zeghloul Thami, Benhafssa Abdelkader Mekhalef, Dascalescu Lucian, "*Belt-Type Corona-Electrostatic Separator for the Recovery of Conductive and Nonconductive Products From Micronized Wastes*", IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 53, n° 2, p. 1424-1430, 2017.
doi: 10.1109/TIA.2016.2622684.
- [59] Jafari Mohammad, Chegini Gholamreza, Shayegani Akmal Amir A., Rezaeealam Behrooz, "*A roll-type corona discharge-electrostatic separator for separating wheat grain and straw particles*", Journal of Food Process Engineering, vol. 42, n° 7, p. 1-11, 2019.
doi: 10.1111/jfpe.13281.
- [60] Oscar Laguna, "*Valorisation des composés phénoliques de colza et de tournesol : du fractionnement des matières premières à la synthèse de molécules multifonctionnelles*", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, 2019.
- [61] Hansen Jon Ovrum, Skrede Anders, Mydland Liv Torunn, Overland Margareth, "*Fractionation of rapeseed meal by milling, sieving and air classification - Effect on crude protein, amino acids and fiber content and digestibility*", Animal Feed Science and Technology, vol. 230, p. 143-153, 2017.
doi: 10.1016/j.anifeedsci.2017.05.007.
- [62] Pelgrom Pascalle J.M., Vissers Anne M., Boom Remko M., Schutyser Maarten A.I., "*Dry fractionation for production of functional pea protein concentrates*", Food Research International, vol. 53, n° 1, p. 232-239, 2013.
doi: 10.1016/j.foodres.2013.05.004.
- [63] Oxfam International, "*Cultiver un avenir meilleur*", in Oxfam House, John Smith Drive, Cowley, Oxford, OX4 2JY, Royaume-Uni. 2011.
<https://books.apple.com/cy/book/cultiver-un-avenir-meilleur/id480614608>
- [64] Rajaonarivony Rova Karine, Rouau Xavier, Dascalescu Lucian., Mayer-Laigle Claire, "*Electrostatic separation of mineral and vegetal powders with a custom built corona separator: application to biorefinery of rice husk*", EPJ Web Conf., vol. 140, p. 13020, 2017.

doi: 10.1051/epjconf/201714013020.

- [65] Zhu Hong-Guang, Tang Han-Qi, Cheng Yong-Qiang, Li Zai-Gui, Tong Li-Tao, "Electrostatic separation technology for obtaining plant protein concentrates: A review", Trends in Food Science & Technology, vol. 113, p. 66-76, 2021.
doi: 10.1016/j.tifs.2021.04.044.
- [66] "Application of tribo-electrostatic separation (T-ES) technique for fractionation of plant-based food ingredients", Science Direct.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877421004428>
- [67] Remadnia Mokdad, Kachi Miloud, Messal Sara, Adrian Oprean, Xavier Rouau, Dascalescu Lucian, "Electrostatic Separation of Peeling and Gluten from Finely Ground Wheat Grains", Particulate Science and Technology, vol. 32, n° 6, p. 608-615, 2014.
doi: 10.1080/02726351.2014.943379.
- [68] Chen Zhongwei, L. Mense Andrew, R. Brewer Lauren, Shi Yong-Cheng, "Wheat bran layers: composition, structure, fractionation, and potential uses in foods", Critical Reviews in Food Science and Nutrition: vol. 64, n° 19, 2023.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2023.2171962>
- [69] Hemery Youna, Rouau Xavier, Dragan Ciprian, Bilici Mihai, Beleca Radu, Dascalescu Lucian, "Electrostatic properties of wheat bran and its constitutive layers: Influence of particle size, composition, and moisture content", Journal of Food Engineering, vol. 93, n° 1, p. 114-124, 2009.
doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.01.003.
- [70] Claire Mayer-Laigle, "Au cœur de la raffinerie sèche du végétal : description mécanistique des procédés et conception de poudres fonctionnalisées pour la chimie, l'énergie et les matériaux", Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Montpellier, France, 2022.
- [71] Stone Bruce Arthur, Minifie James, "Recovery of aleurone cells from wheat bran", European Patent Office, EP0176572B1, 1992.
<https://patents.google.com/patent/EP0176572B1/en>
- [72] Bohm Arturo, Bogoni Carlo, Behrens Raimund, Otto Thomas, "Method for the extraction of aleurone from bran", European Patent Office, EP1311166B1, 2006.
<https://patents.google.com/patent/EP1311166B1/en>
- [73] Wang Jue, Smits Erik, Boom Remko M., Schutyser Maarten A.I., "Arabinoxylans concentrates from wheat bran by electrostatic separation", Journal of Food Engineering, vol. 155, p. 29-36, 2015.
doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.01.008.
- [74] Wang Jue, de Wit Martin, Schutyser Maarten A.I., Boom Remko M., "Analysis of electrostatic powder charging for fractionation of foods", Innovative Food Science and Emerging Technologies, vol. 26, p. 360-365, 2014.
doi: 10.1016/j.ifset.2014.06.011.

- [75] Nelson Stuart O., Trabelsi Samir, "Principles of grain and seed moisture sensing through radio-frequency and microwave dielectric properties", ASABE Annual International Meeting, Washington, USA, 2017.
doi: 10.13031/aim.201701422.
- [76] Jafari Mohammad, Chegini Gholamreza, Rezaeealam Rezaeealam, Shaygani Akmal Amir Abbas, "Experimental determination of the dielectric constant of wheat grain and cluster straw in different moisture contents", Food Science & Nutrition, vol. 8, n° 1, p. 629-635, 2020.
doi: 10.1002/fsn3.1350.
- [77] Antoine Carole, Castellon Jerome, Toureille Alain, Rouau Xavier, Dissado Len, "Comparison of constitutive wheat bran tissues by dielectric spectroscopy and effect of their moisture content", Polymer International, vol. 53, n° 12, p. 2169-2177, 2004.
doi: 10.1002/pi.1649.
- [78] Anthony Fardet, "New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: what is beyond fiber ", Nutrition Research Reviews, vol. 23, n° 1, p. 65-134, 2010.
doi: 10.1017/S0954422410000041.
- [79] Belitz Hans-Dieter, Grosch Werner, Schieberle Peter, "Cereals and Cereal Products", Food Chemistry, Berlin, Heidelberg, Springer, p. 673-746, 2004.
doi: 10.1007/978-3-662-07279-0_16.
- [80] Nelson Stuart. O., "Dielectric properties measurement techniques and applications", Transactions of the ASAE, vol. 42, n° 2, Art. n° 2, 1999.
- [81] İçier Filiz, Baysal Taner, "Dielectrical Properties of Food Materials—1: Factors Affecting and Industrial Uses", Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 44, n° 6, p. 465-471, 2004.
doi: 10.1080/10408690490886692.
- [82] İçier Filiz, Baysal Taner, "Dielectrical Properties of Food Materials—2: Measurement Techniques", Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 44, n° 6, p. 473-478, 2004.
doi: 10.1080/10408690490892361.
- [83] Mohamed Wajdi Ben Ayoub, "Dispositifs de mesure de constantes diélectriques dans les matériaux humides. Vers une meilleure traçabilité de la mesure de l'humidité des solides", Thèse de Doctorat, Université d'Aix Marseille, France, 2018.
- [84] Higashiyama Y. and Asano K., "Recent Progress in Electrostatic Separation Technology", Particulate Science and Technology, vol. 16, no 1, p. 77-90, 1998.
doi: 10.1080/02726359808906786.
- [85] Nelson Stuart. O., Datta Ashim, "Dielectric Properties of Food Materials and Electric Field Interactions", Handbook of Microwave Technology for Food Application, CRC Press, 2001.

- [86] Nelson Stuart. O., "Measurement and applications of dielectric properties of agricultural products", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, n° 1, p. 116-122, 1992.
doi: 10.1109/19.126644.
- [87] Lin Biying, Wang Shaojin, "Dielectric properties, heating rate, and heating uniformity of wheat flour with added bran associated with radio frequency treatments", *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 60, p. 102290, 2020.
doi: 10.1016/j.ifset.2020.102290.
- [88] Nelson Stuart. O., Bartley P. G., "Measuring frequency - and temperature - dependent dielectric properties of food materials", *American Society of Agricultural Engineers*, vol. 43, n° 6, p. 1733-1736, 2000.
- [89] Wang Hao, Fang Bing, Ye Dapeng, Xie Limin, "Measurement and Analysis of Dielectric Properties of Wheat Bran at Microwave Frequency", *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 26, n° 12, p. 115, 2024.
doi: 10.13304/j.nykjdb.2023.0653.
- [90] Ozturk Samet, Kong Fanbin, Trabelsi Samir, Singh R.K, "Dielectric properties of dried vegetable powders and their temperature profile during radio frequency heating", *Journal of Food Engineering*, vol. 169, p. 91-100, 2016.
doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.08.008.
- [91] Jafari Mohammad, Chegini Gholamreza, Rezaeealam Behrooz, Shaygani Akmal Amir Abbas, "Experimental determination of the dielectric constant of wheat grain and cluster straw in different moisture contents", *Food Science & Nutrition*, vol. 8, n° 1, p. 629-635, 2020.
doi: 10.1002/fsn3.1350.
- [92] Stuart O. Nelson, "Factors Affecting the Dielectric Properties of Grain", *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 25, n° 4, p. 1045-1049, 1982.
doi: 10.13031/2013.33665.
- [93] Torrealba-Meléndez R., Sosa-Morales M. E., Olvera-Cervantes J. L., Corona-Chávez A., "Dielectric properties of cereals at frequencies useful for processes with microwave heating", *J. Food Sci Technol*, vol. 52, n° 12, p. 8403-8409, 2015.
doi: 10.1007/s13197-015-1948-3.
- [94] Calay Rajnish K, Newborough Marcus, Probert Douglas, Calay Pargat S, "Predictive equations for the dielectric properties of foods", *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 29, n° 6, p. 699-713, 1994.
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb02111.x>.
- [95] Barbar Reine, Mayer-Laigle Claire, Beaugrand Johnny, Cuq Bernard, Barron Cécile, "Comparison of hydration water properties of common and durum wheat brans upon grinding with different loading modes", *Journal of Cereal Science*, vol. 114, p. 103786, 2023.
doi: 10.1016/j.jcs.2023.103786.

- [96] Shenoy H. Archana, Prakash Jamuna, "Wheat Bran (*triticum Aestivum*): Composition, Functionality and Incorporation in Unleavened Bread", Journal of Food Quality, vol. 25, n° 3, p. 197-211, 2002.
doi: 10.1111/j.1745-4557.2002.tb01019.x.
- [97] Jacobs Pieter J., Hemdane Sami, Dornez Emmie, Delcour Jan A, Courtin Christophe M., "Study of hydration properties of wheat bran as a function of particle size", Food Chemistry, vol. 179, p. 296-304, 2015.
doi: 10.1016/j.foodchem.2015.01.117.
- [98] Badry M. D., Yousef M. A., Nada A. M. A., "Dielectric characteristics of lignin and some cellulosic materials", Cellulose Chemistry and Technology, vol. 28, n° 6, p. 605-612, 1994.
- [99] Norimoto Misato, "Dielectric properties of wood", Wood research: bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University, vol. 59, p. 106-152, 1976.
- [100] Nilsson Martin, Stromme Maria, "Electrodynamic investigations of conduction processes in humid microcrystalline cellulose tablets", J. Phys. Chem. B, vol. 109, n° 12, p. 5450-5455, 2005.
doi: 10.1021/jp046991a.
- [101] Bansal Namita, Dhaliwal A. S., Mann K. S., "Dielectric properties of corn flour from 0.2 to 10 GHz", Journal of Food Engineering, vol. 166, p. 255-262, 2015.
doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.06.019.
- [102] Wenchuan Guo, Jun Yang, Xinhua Zhu, Shaojin Wang, Kangquan Guo, "Frequency, Moisture, Temperature, and Density-Dependent Dielectric Properties of Wheat Straw", American Society of Agricultural and Biological Engineers, vol. 56, n° 3, p. 1069-1075, 2013.
- [103] Remadnia Mokdad, Kahaleras Messaouda, Kachi Miloud, "Wheat Purification of Straw Residues Using an Induction Type Electrostatic Separation", 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), p. 1-5, 2022.
doi: 10.1109/ICAEE53772.2022.9962036.
- [104] Kahaleras Messaouda, Remadnia Mokdad, Kachi Miloud, Nadjem Abdelkader, "Semolina extraction from wheat bran using an electro-separation process", J. Food Process. Preserv., vol. 45, n° 4, 2021.
doi: 10.1111/jfpp.15352.
- [105] Chamayou Alain, Fages Jacques, "Broyage dans les industries agroalimentaires", in Technologie des pulvérulents dans les IAA, in Sciences & Techniques Agroalimentaires, Lavoisier, p. p.375-406, 2003.
- [106] Nadjem abdelkader, "Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques", Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2018.

- [107] Kachi Miloud, Dascalescu Lucian, "Mécanismes d'écoulement des charges à la surface des polymères granulaires", Mediterranean Journal of Modeling and Simulation, vol. 2, p. 001-007, 2014.
- [108] Remadnia Mokdad, Nemamcha Mohamed, Herous Lazhar, Dascalescu Lucian, "Decay of the electric potential at the surface of coronacharged uniform layers of HIPS granules", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, n° 2, p. 579-587, 2011.
doi: 10.1109/TDEI.2011.5739464.
- [109] Rouagdia Karim, Herous Lazhar, Nemamcha Mohamed, Fatihou ali, Tabti Belaid, Dascalescu Lucian, "Experimental modeling of the electric potential decay at the surface of polypropylene films (PP)", Journal of Electrostatics, vol. 76, p. 262-267, 2015.
doi: 10.1016/j.elstat.2015.06.005.
- [110] Remadnia Mokdad, Rouagdia Karim, Kachi Miloud, Nadjem Abdelkader, "Electrostatic characterization of cereal grains", 5th International Conference on Electrical Engineering, Boumerdes (ICEE-B), IEEE, p. 1-4, 2017.
doi: 10.1109/ICEE-B.2017.8192192.
- [111] "IANOR – Institut Algérien de Normalisation", <https://www.ianor.dz/>
- [112] "Céréales, légumineuses et produits dérivés — Détermination du taux de cendres par incinération", Norme : ISO 2171, 2023.
- [113] "Céréales et produits céréaliers — Détermination de la teneur en eau — Méthode de référence", Norme : ISO 712, 2009.
- [114] "Farines et semoules de blé dur — Détermination de la teneur en pigments jaunes", Norme : ISO 11052, 1994.
- [115] "Semoules de blé dur - Détermination du taux d'affleurement", Norme : NF V03-721, juin 1994.
- [116] Goupy Jacques, "Les plans d'expériences, Revue Modulad. 2006.
- [117] Fisher Ronald Aylmer, "Statistical Methods for Research Workers", in Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution, New York, p. 66-70, 1992.
doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9_6.
- [118] Fisher Ronald Aylmer, "The design of experiments", Oliver & Boyd, 1935.
- [119] Goupy Jacques, "Étude comparative de divers plans d'expériences", Revue de Statistique Appliquée, vol. 38, n° 4, p. 5-44, 1990.
- [120] Yahiaoui Idris, "Notes de Cours: Les plans d'expériences. Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré". Université A. MIRA - Bejaia, Algérie, 2014.
<https://elearning.univ-bejaia.dz/course/info.php?id=3906>

- [121] Box G. E. P., Wilson K. B., "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions", Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), vol. 13, n° 1, p. 1-38, 1951.
doi: 10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x.
- [122] Goupy Jacques, "Introduction aux plans d'expériences", Dunod: Technique et Ingénierie, 3^{ème} édition, Paris. 2006.
- [123] Tinsson Walter, "Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques", Mathématiques & applications, no. 67. Dordrecht ; New York, 2010.
- [124] Khoder Khaled, "Optimisation de composants hyperfréquences par la technique des plans à surfaces de réponses", Thèse de Doctorat, Institut de Recherche XLIM, Université de Limoges, 2011.
<http://aurore.unilim.fr/ori-oai-search/notice/view/unilim-ori-28713>
- [125] Ducauze Christian, "Chimie analytique, analyse chimique et chimiométrie. Concepts, démarche et méthodes. S.l.: Lavoisier, 2014.
- [126] Kimouche Karima, "Etude de quelques plans d'expériences associées aux surfaces de réponse", Mémoire de Magister en Mathématiques, Université Frères Mentouri - Constantine 1, 2008.
- [127] "Arrêté interministériel du 25 Mai 1997 relatif aux spécifications techniques des semoules de blé dur et aux conditions et modalités de leur étiquetage", Journal officiel algérien, n° 55, p. 15–16, 20 Août 1997.
<https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/1997/F1997055.PDF>
- [128] Borrelli G. M., De Leonardis A. M., Platani C., Troccoli A., "Distribution along durum wheat kernel of the components involved in semolina colour", Journal of Cereal Science, vol. 48, n° 2, p. 494-502, 2008.
doi: 10.1016/j.jcs.2007.11.007.
- [129] Boudalia Sofiane, Mezroua El Yamine, Bousbia Aissam, Khaldi M., Merabti Wissam, Namoune H., "Evaluation of the Stability of the Physico-chemical Properties and Sensory Qualities of Farfalle Pasta from the Region of Guelma, Algeria", Malaysian Journal of Nutrition, vol. 22, n° 3, p. 443-453, 2016.
- [130] Hui Y. H., Sherkat Frank., "Handbook of Food Science, Technology, and Engineering". Boca Raton: CRC Press, 2005.
doi: 10.1201/b15995.