

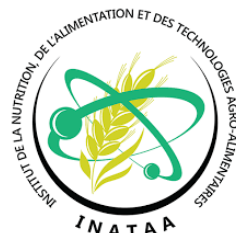
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Frères Mentouri Constantine 1

Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et
des Technologies Agroalimentaires
(INATAA)



N°d'ordre : 01/D3C/2024

N° de série : 01/INAT/2024

Thèse **en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat** **de 3^{ème} cycle (LMD) en Sciences Alimentaires**

Spécialité : Technologies Agro-Alimentaires

Impact des conditions de séchage par atomisation sur la qualité des poudres de lactosérum et leur comportement dans une matrice alimentaire

présentée par : **MOUZAI Abdelghani**

Soutenue le 15 /01/ 2024

Devant le jury :

Président :	ZIDOUNE M.N.	Professeur	Université Frères Mentouri Constantine 1
Rapporteur :	BOUGHELLOUT H.	Professeur	Université Frères Mentouri Constantine 1
Examineurs	BENCHABANE A	Professeur	Ecole nationale supérieur d'Agronomie (ENSA) El Harrach Alger
	BENAHMED DJILALI A.	Professeur	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
	LOUAER W.	Professeur	Université Salah Boubnider Constantine 3
	ADOUI F.	MCA	Université Frères Mentouri Constantine 1

Remerciements

De prime abord je remercie Dieu de m'avoir accordé la santé, le courage et les moyens afin de réaliser ce travail.

Ce travail a été concrétisé sous la direction du professeur **Boughellout Halima**. Je lui exprime ma profonde gratitude pour son soutien scientifique, ses qualités humaines et sa gentillesse. J'ai appris d'elle la persévérance dans la recherche et la façon de mener une réflexion pour résoudre les problèmes scientifiques.

Je tiens également à remercier vivement le Professeur **ZIDOUNE Mohammed Nasreddine** d'avoir bien voulu présider le jury de soutenance de cette thèse et pour tous ses conseils donnés durant ma formation doctorale.

Mes sincères remerciements sont adressés à Monsieur **BENCHABANE Ahmed**, Professeur au département Technologie Alimentaire à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA), El Harrach Alger, à Madame **LOUAER Wahida** Professeur au Laboratoire d'Ingénierie des Procédés de l'Environnement, Université Salah Boubnider Constantine 3, à Madame **BENAHMED DJILALI Adiba**, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, ainsi à Madame **ADOUI Faiza**, maître de conférences au Laboratoire de Génie Agro-Alimentaire (GENIAAL), INATAA Université frères Mentouri Constantine 1, d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit.

Je remercie également, chacun en son nom, tous les enseignants et le personnel de l'INATAA notamment du Laboratoire de Génie Agro-Alimentaire (GENIAAL), pour les conditions familiales et fraternelles au sein du laboratoire.

Je suis aussi très reconnaissant envers tout le personnel du département de génie des procédés, Université Salah Boubnider Constantine 3, pour le bon accueil pendant mon travail au niveau du hall pilote.

Un grand merci adressé à toute l'équipe du laboratoire Dosage, Analyse et caractérisation en haute résolution (L.D.A.C) à l'université Ferhat Abbas Sétif et l'équipe de CRPC de Bejaia.

Mes remerciements sont destinés à mes collègues et à mes ami (e)s avec qui j'ai passé de bons moments durant ces années de thèse.

Mes remerciements sont également adressés au personnel de la laiterie GIPLAIT-Numidia notamment, Ismahen et Boubakeur.

Dédicace

Je dédie ce travail à ;

*Ma mère qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit
non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux ;*

La mémoire de mon père ;

Mes frères ;

Mes sœurs ;

*Mes ami (e) s notamment, Djamila S., Afef KH., Hocine S., Alea D.,
Taha S., Houria B et tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin pour cette
réussite ;*

*Mes camarades de la promotion de Master Technologie Alimentaire,
2017.*

Table des matières

Liste des abréviations
Liste des figures
Liste des tableaux
Production scientifique

	Page
Introduction générale	01
Revue bibliographique	
I. Généralité sur le lactosérum	04
I.1. Définition	04
I.2. Caractéristiques des principaux constituants du lactosérum	06
I.2.1 Lactose	06
I.2.2 Protéines	07
I.2.3 Eléments minéraux	08
I.2.4 Lipides	09
I.2.5 Vitamines	09
I.3. Modes de valorisation du lactosérum	09
I.3.1 Utilisation directe	10
I.3.2 Stabilisation directe	10
I.3.3 Biotransformation du lactosérum	11
I.4. Procédés de séchage des produits laitiers	12
I.4.1 Séchage sur tambour	12
I.4.1.1 Séchoir à tambour simple	13
I.4.1.2 Séchoir à double tambour	13
I.4.2 Lyophilisation	14
I.4.3 Séchage par atomisation des produits laitiers	15
I.5. Utilisation de poudre du lactosérum	17
I.6. Problématique du lactosérum en Algérie	17
II. Séchage par atomisation	19
II.1 Généralité sur le séchage par atomisation	19
II.2 Principe du séchage par atomisation	20
II.2.1 Chambre de séchage	21
II.2.1.1 Chambre de séchage à Co-courant	22

II.2.1.2	Chambre de séchage à contre-courant et flux mixte	23
II.2.2	Système d'alimentation de la matière première	23
II.2.3	Système de récupération des poudres	27
II.3	Influence des paramètres opératoires du séchoir sur la qualité des poudres	27
II.3.1	Température de l'air d'entrée	28
II.3.2	Température de l'air de sortie	28
II.3.3	Débit et concentration de l'aliment à sécher	29
II.3.4	Agents de séchage	30
II.4	Propriétés des poudres alimentaires	30
II.4.1	Propriétés d'hydratation des poudres	31
II.4.1.1	Dispersibilité	31
II.4.1.2	Solubilité	31
II.4.1.3	Mouillabilité	32
II.4.1.4	Instantaneisation	33
II.4.2	Propriétés physiques des poudres alimentaires	33
II.4.2.1	Coulabilité	33
II.4.2.2	Densité apparente et tassée	34
II.4.2.3	Couleur	34
II.4.2.4	Hygroscopicité	34
II.4.2.5	Degré d'agglomération	35
II.4.2.6	Température de transition vitreuse (Tg)	35
II.4.2.7	Morphologie d'une poudre	36
II.4.2.8	Cristallinité d'une poudre	36
II.5	Séchage du lactosérum	37
II.6	Avantages et inconvénients du séchage par atomisation.	37

Partie expérimentale

I/Matériel et méthodes

I	Matières premières	40
II	Caractérisation physico-chimique de lactosérum doux	42
II.1	Mesure du pH et de l'acidité titrable	42
II.2	Détermination de l'extrait sec total (EST)	42
II.3	Détermination de la teneur en matière grasse (méthode de Gerber)	43
II.4	Dosage des cendres	43

II.5 Dosage des protéines	43
III. Processus du séchage	44
III.1 Effets des conditions du séchage	44
III.1.1 Détermination du rendement	46
III.1.2 Caractérisation des poudres de lactosérum	47
III.1.2.1 Détermination de l'humidité	47
III.1.2.2 Densité apparente et tassée	47
III.1.2.3 Propriétés d'écoulements	47
III.1.3 Propriétés de réhydratation	47
III.1.3.1 Mouillabilité	47
III.1.3.2 Solubilité	48
III.1.3.3 Disperssibilité	48
III.1.4 Détermination des paramètres opératoires de l'atomiseur	48
III.1.4.1 Temperature de l'air de sortie	48
III.1.4.2 Efficacité thermique de sécheur	49
III.2 Optimisation des conditions du séchage	49
III.2.1 Hygroscopicité	50
III.2.2 Degré d'agglomération	50
III.2.3 Détermination de la couleur	51
III.2.4 Caractéristiques microstructurales	51
III.2.4.1 X-Ray Diffraction	51
III.2.4.2 Microscopie électronique à balayage	51
III.2.5 Caractérisation microbiologique de la poudre de lactosérum	51
III.3 Effet de l'ajout des agents de séchage sur la qualité des poudres de lactosérum	52
III.3.1 Caractérisation des poudres de lactosérum après ajout des agents de séchage	52
IV. Effet de la substitution de la poudre du lait écrémé par la poudre du lactosérum sur la qualité texturale et sensorielle du cake	53
IV.1 Préparation du cake	53
IV.2 Caractérisation de la pâte à cake	54
IV.2.1 Densité de la pâte	54
IV.2.2 Microstructure de la pâte	54
IV.3 Caractérisation des cakes	54

IV.3.1 Détermination de la perte de poids après cuisson	54
IV.3.2 Détermination de la teneur en eau	54
IV.3.3 Détermination de l'indice volumique du cake	55
IV.3.4 Détermination du volume spécifique et de la hauteur du cake	55
IV.3.5 Détermination de la couleur du cake	55
IV.3.6 Propriétés texturales de la mie du cake	56
IV.4. Caractérisation sensorielle	56
V. Traitements statistiques	56

II/ Résultats et discussion

I. Séchage par atomisation du lactosérum	57
I.1 Caractéristiques physicochimiques du lactosérum doux de la laiterie Numidia	57
I.2 Impact des conditions de séchage sur la qualité des poudres	58
I.2.1 Rendement	60
I.2.2 Teneur en eau des poudres	62
I.3 Impact sur les propriétés fonctionnelles	63
I.3.1 Densité apparente et densité tassée	63
I.3.2 Coulabilité	65
I.4 Effet sur les propriétés de réhydratation	67
I.4.1 Dispersibilité	67
I.4.2 Solubilité	69
I.4.3 Mouillabilité	71
I.5 Effet sur les paramètres opératoires de l'atomiseur	71
I.5.1 Température de l'air à la sortie	71
I.5.2 Efficacité thermique de sécheur	73
II. Optimisation des conditions de séchage	74
II.1 Caractéristiques physicochimiques et microbiologique de poudre optimisée	74
II.2 Caractéristiques technofonctionnelles de poudre optimisée	75
III. Effet des agents de séchage sur la qualité des poudres du lactosérum	79
III.1 Impact sur les propriétés physiques des poudres du lactosérum	81
III.1.1 Teneur en eau et rendement	81
III.1.2 Densité apparente et densité tassée	83
III.1.3 Coulabilité	84

III.1.4 Hygroscopicité	85
III.1.5 Degré d'agglomération	86
III.1.6 Couleur des poudres	86
III.2 Propriétés d'hydratation	87
III.2.1 Solubilité	87
III.2.2 Dispersibilité	88
III.3 Température de l'air à la sortie et efficacité thermique du sécheur	88
III.4 Cristallinité des poudres de lactosérum	91
IV Impact de la substitution de la poudre de lait écrémé par la poudre de lactosérum	92
IV.1 Densité et microstructure de la pâte	93
IV.2 Caractéristiques physiques du cake	94
IV.2.1 Teneur en eau et pertes de poids à la cuisson	94
IV.2.2 Poids, index volumique et taille du cake	95
IV.2.3 Volume spécifique du cake	96
IV.2.4 Couleur des cakes	98
IV.2.5 Structure de la mie des cakes	99
IV.3 Propriétés sensorielles des formules du cake	100
IV.4 Corrélation des paramètres de qualité de cake	100
Conclusion générale et recommandations	103
Références bibliographiques	
Annexes	
Résumés	

Liste des abréviations

Abs : Absorbance

α -LA : l' α -lactalbumine

β -LG : β -lactoglobuline

BSA : l'albumine sérique bovine (Bovin serum albumin)

BLF: Lactoferrine bovine

CI : L'indice de Carre

CNS : Centre national des statistiques

CPL : Concentré de protéine du lactosérum

D : Dispersibilité

DAG : Degré d'agglomération

DA : Densité apparente

DT : Densité tassée

DBO : Demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

EST : Extrait Sec Total

ET : Efficacité thermique

FAO : Food and agriculture organisation

GMP : Glycomacropeptide

H (%) : Humidité

HR : Hausner ratio

IG : Immunoglobulines

IB : Indice de brunissement

LP : Lactoperoxydase bovine

MSR : Méthodologie des Surfaces de Réponse

P : Poids

PC : Perte à la cuisson

PCC : Plan composite centré

PLE : Poudre de lait écrémé

PL : Poudre de lactosérum

RDT : Rendement

TAE : Température de l'air à l'entrée de l'air

TAS : Température de l'air à la sortie

VI : L'indice volumique

V_s : Volume spécifique

u,a : Unité arbitraire

UFC : Unité formant colonie

W₀ : Lactosérum séché sans agent de séchage

WMD : Lactosérum séché avec maltodextrine

WCS : Lactosérum séché avec l'amidon de maïs

Liste des figures

	Page
Figure 01 Voies de valorisation du lactosérum	16
Figure 02 Séchoir à tambour simple	13
Figure 03 Séchoir à tambour (double)	14
Figure 04 Principaux composants d'un lyophilisateur	15
Figure 05 Importations de poudre de lactosérum par l'Algérie	18
Figure 06 Illustration générale du processus de séchage par atomisation	20
Figure 07 Sécheur par atomisation	21
Figure 08 Chambre de séchage à co-courant	23
Figure 09 Chambre de séchage ; (a) à contre-courant, (b) à flux mixte	24
Figure 10 Différents atomiseurs utilisés dans le séchage par pulvérisation	26
Figure 11 Paramètres affectant le processus de séchage par atomisation	28
Figure 12 Etapes de réhydratation de la poudre de lactosérum agglomérée	30
Figure 13 Morphologie de poudres industrielles séchées	36
Figure 14 Fond de la tour de séchage après la production de poudre de lactosérum lactique	37
Figure 15 Schéma récapitulatif du protocole de recherche de la thèse	39
Figure 16 Sécheur par atomisation utilisé doté par une chambre à flux mixte	45
Figure 17 Détermination de l'indice volumique du cake	55
Figure 18 Effet de la température d'entrée et du débit d'alimentation sur le rendement de sécheur	60
Figure 19 Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur le rendement de sécheur	60
Figure 20 Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur l'humidité des poudres	62
Figure 21 Effet de la température d'entrée et du débit d'alimentation sur le taux d'humidité des poudres	63
Figure 22 Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur la densité apparente des poudres	64
Figure 23 Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur la densité apparente (a) et tassée (b) des poudres	65
Figure 24 Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur la fluidité des poudres	66
Figure 25 Effet de la température d'entrée et du débit d'alimentation sur la coulabilité des poudres	67
Figure 26 Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur la dispersibilité des poudres	68

Figure 27	Effet de la température d'entrée et du débit d'alimentation sur la dispersibilité des poudres	69
Figure 28	Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur la solubilité des poudres	69
Figure 29	Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur la solubilité	70
Figure 30	Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur la mouillabilité des poudres	71
Figure 31	Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur la température de l'air à la sortie	72
Figure 32	Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur l'efficacité thermique de l'atomiseur	73
Figure 33	Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur l'efficacité thermique de l'atomiseur	74
Figure 34	Impact de la température de reconstitution sur la mouillabilité de la poudre du lactosérum	76
Figure 35	Courbe d'analyse thermogravimétrique (ATG/DSC) de la poudre de lactosérum optimisée	77
Figure 36	Diagrammes de diffraction des rayons X de la poudre de lactosérum	78
Figure 37	Photographie de MEB des poudres de lactosérum séchées par atomisation	79
Figure 38	Effets de la concentration en agents de séchage sur la teneur en eau des poudres de lactosérum	81
Figure 39	Effets de la concentration en agents de séchage sur le rendement de poudre de lactosérum	82
Figure 40	Effets de la concentration en agents de séchage sur la densité apparente des poudres de lactosérum	83
Figure 41	Effets de la concentration en agents de séchage sur hygroscopicité des poudres de lactosérum	85
Figure 42	Effets de la concentration en agents de séchage sur la température de l'air à sortie de l'atomiseur	90
Figure 43	Effets de la concentration en agents de séchage sur l'efficacité thermique de l'atomiseur	90
Figure 44	Diffractogrammes des rayons X de la poudre de lactosérum produite en fonction de la teneur en Maltodextrine	91
Figure 45	Diffractogrammes des rayons X de la poudre de lactosérum produite en fonction de la teneur en amidon de maïs	91
Figure 46	Diffractogrammes des rayons X de la poudre de lactosérum produite en fonction de la teneur en gélatine	92
Figure 47	Effet de la substitution de lait écrémé par la poudre du lactosérum sur la densité et le taux d'aération de la pâte à cake	93
Figure 48	Microphotographie de la pâte	94

Figure 49	Effet de la substitution sur l'indice volumique et la taille du cake	96
Figure 50	Effet du taux de substitution de PLE par W_0 sur le V_s du cake	97
Figure 51	Volume spécifique du cake en fonction de la densité de la pâte	98
Figure 52	Corrélation entre le taux de substitution et des paramètres physiques et organoleptiques du cake	101

Liste des tableaux

	Page
Tableau 01	Composition du lactosérum doux et du lactosérum acide 05
Tableau 02	Demandes biologiques et chimiques du lactosérum doux et acide 05
Tableau 03	Dérivés du lactose 06
Tableau 04	Composition des protéines mineures de lactosérum 07
Tableau 05	DBO, DCO et nutriments du lactosérum produit en Algérie 18
Tableau 06	Classification des poudres selon leurs indices d'écoulement 33
Tableau 07	Plan d'expérience de la méthode RSM 45
Tableau 08	Conditions de séchage par atomisation 46
Tableau 09	Formules des cakes après substitution du lait écrémé par la poudre du lactosérum 49
Tableau 10	Caractéristiques physico-chimiques du lactosérum doux 57
Tableau 11	Impact de la température de l'air d'entrée et du débit de l'alimentation sur les propriétés des poudres 58
Tableau 12	Effets des termes linéaires, quadratiques et d'interaction pour chaque variable de réponse traitée par ANOVA 59
Tableau 13	Caractéristiques physicochimiques et microbiologiques des poudres optimisées 75
Tableau 14	Valeurs expérimentales et prédites de la poudre de lactosérum 75
Tableau 15	Caractéristiques de la poudre optimale 77
Tableau 16	Effet des agents de séchage à différentes concentrations sur les propriétés physiques de la poudre de lactosérum. 80
Tableau 17	Indice de Carr (IC) et ratio de Hausner (HR) des poudres de lactosérum 84
Tableau 18	Couleur des poudres de lactosérum séchées avec différentes concentrations des agents de séchage 86
Tableau 19	Propriétés de reconstitution des poudres de lactosérum séchées avec différentes agents de séchage 88
Tableau 20	Effet des agents de séchage à différentes concentrations sur la température de l'air de sortie et l'efficacité thermique de l'atomiseur 89
Tableau 21	Teneur en eau et perte de poids à la cuisson du cake 94
Tableau 22	Caractéristiques physiques des cakes 95

Tableau 23	Couleur des cakes en fonction de taux de substitution par la poudre de lactosérum	98
Tableau 24	Caractéristiques de la mie des cakes	99
Tableau 25	Propriétés organoleptiques des cakes	100
Tableau 26	Corrélation entre les caractéristiques rhéologiques et la qualité des cakes	102

Production scientifique

1-Publications internationales

- Mouzai A., Kheroufi A., Afoutni L., Louaer W., Zidoune M.N. & Boughellout H. **(2023)** ‘Optimisation of spray drying parameters using mixed flow in whey powder production using response surface methodology (RSM)’, *Acta Alimentaria*, Akadémiai Kiadó, 52, 220–234. <https://doi.org/10.1556/066.2022.00258>. (Catégorie A)

2- Communications internationales

Communication orale

- Mouzai A., Kheroufi A., Louaer W., Zidoune M.N. & Boughellout H. **(2022)** ‘Effet de la pression de l’air sur la température de sortie et des propriétés physique du lactosérum séchée par pulvérisation’. **Internationnal** congress of Energies and Engineering of industrial processes CEGPI22, Algiers, Algeria 23-25 May 2022.

Communication affichée

- Mouzai A., Kheroufi A., Louaer W., Zidoune M.N. & Boughellout H. **(2023)** ‘Séchage du lactosérum par atomisation en utilisant l’amidon comme agent de séchage’. **International** Seminar on Valorization of Agronomic, Ecological and Food Resources. October 18, 19 and 20, 2022, Université 20 aout, 1955 SKIKDA.

3. Communications nationales

- Mouzai A., Kheroufi A., Zidoune M.N. & Boughellout H. **(2019)** ‘Caractérisations physico-chimiques du lactosérum, NUMIDIA Constantine. 1^{ère} Journée **Nationale** CANCER, Environnement et Alimentation 04 Février 2019, Boumerdès, Algérie.
- Mouzai A., Kheroufi A., Cheikh zaoui CH., Zidoune M.N. & Boughellout H. **(2020)** ‘Séchage du lactosérum par atomisation et étude des propriétés fonctionnelles et de reconstitution de la poudre de lactosérum’. 1^{ère} Journée **Nationale** « Analyse de cycle de vie, Ecoconception, Eco-éducation, Eco innovation au service du développement durable » 11 Février 2020, Boumerdès, Algérie. **(Elue meilleur présentation affichée session ACVE)**.
- Mouzai A., Kheroufi A., Louaer W., Zidoune M.N. & Boughellout H. **(2023)** Effet de la concentration de l’amidon sur certaines propriétés du lactosérum séché par pulvérisation. Egalité des genres dans la préservation de l’environnement, économie verte et développement durable, 18 et 19 janvier 2022, Université de Boumerdès, Algérie.

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction

Le lactosérum est le co-produit le plus abondant dans l'industrie laitière. Il représente 85 à 90 % du volume du lait utilisé pour la fabrication du fromage (Vajda *et al.*, 2013; Iltchenko *et al.*, 2018). Le lactosérum contient environ 50 % des constituants du lait. Il est constitué d'environ 93 % d'eau et de 6 à 7 % de solides. La fraction de matière sèche se compose principalement de lactose, de protéines solubles, de lipides et des sels minéraux (Chatzipaschali and Stamatis, 2012; Fernández-Gutiérrez *et al.*, 2017; Barukcic, 2018).

Le lactosérum est considéré comme un polluant environnemental très fort s'il est rejeté dans la nature, ceci est dû à sa forte demande biologique en oxygène (DBO) et sa demande chimique en oxygène (DCO) qui sont de l'ordre de 27 à 60 g/L et 50 à 102 g/L, respectivement (Chatzipaschali and Stamatis, 2012; Yadav *et al.*, 2015).

Récemment, l'insécurité alimentaire mondiale s'est considérablement accrue en raison de la croissance démographique, des défis socio-économiques, des conséquences du changement climatique, plus récemment, de la pandémie du COVID-19 (Zhu *et al.*, 2022), et du conflit russo-ukrainien. Devant cet état, la transition vers un système alimentaire circulaire, où la production alimentaire régénérative est indispensable.

Selon Fischer and Kleinschmidt (2021), environ 23579 kilotonnes de fromage ont été produites annuellement, ce qui génère environ 212211 kilotonnes de lactosérum par année dans le monde. Sur la base d'une augmentation annuelle de 1 à 2 %, ce chiffre s'établirait à 203-241 millions de tonnes en 2030 si la croissance prévue se poursuit (Buchanan *et al.*, 2023). La moitié du lactosérum total produit dans le monde est traité ou transformé et le reste est soit dirigé vers l'alimentation animale ou rejeté (Yadav *et al.*, 2015; Panghal *et al.*, 2018; Zandona *et al.*, 2021).

Les poudres de lactosérum sont produites depuis de nombreuses années avec des applications industrielles alimentaires diverses. La valeur des poudres du lactosérum peut être augmentée et leur gamme d'applications étendue par une ou plusieurs transformations (Fox *et al.*, 2017; Trivino Arevalo, 2017). La poudre du lactosérum est une matière première intéressante à valeur ajoutée élevée. Elle est largement utilisée dans les industries alimentaires à savoir en produits laitiers, en boulangerie, en produits de charcuterie, en boissons et en chocolaterie comme ingrédient ou additif alimentaire pour ses propriétés techno-fonctionnelles importantes (Secchi *et al.*, 2011; Selvamuthukumar, 2019; Miano *et al.*, 2021; Shin *et al.*, 2021 ; Lapčiková *et al.*, 2022).

Introduction Générale

La poudre de lactosérum n'est pas utilisée seulement comme ingrédient dans l'industrie alimentaire, mais aussi elle a été exploitée comme un support de séchage afin d'améliorer les propriétés des poudres alimentaires (Erbay *et al.*, 2015; Felix da Silva *et al.*, 2018; Mahdi Jafari *et al.*, 2019). Elle a été utilisée comme agent de séchage par atomisation des probiotiques fragiles (Lavari *et al.*, 2014, 2017; Huang *et al.*, 2016, 2017), de l'extrait de sumac (Caliskan and Nur Dirim, 2013) et comme emballage biodégradable (Sert *et al.*, 2021).

Le séchage par atomisation vise à transformer le lactosérum en un produit stable pour une utilisation ultérieure ; ce qui en fait un produit à haute valeur ajoutée (Mahdi Jafari *et al.*, 2019). Les poudres séchées par pulvérisation peuvent être stockées à température ambiante pendant une longue période (jusqu'à 2 ans) sans changement de leurs caractéristiques. Elles sont également moins coûteuses à transporter et plus faciles à manipuler lors de la fabrication (Domingos *et al.*, 2018). En outre, le séchage par atomisation est huit fois plus économique que la lyophilisation et quatre fois plus économique que le séchage sous vide (Samsu and Mohamad Zahir, 2020).

La qualité de la poudre est influencée par plusieurs paramètres de fonctionnement du sécheur, notamment les températures de l'air d'entrée, et de sortie, le débit d'alimentation, la concentration du produits..etc, et le type de sécheur à co-courant ou à contre courant (Mestry *et al.*, 2011; Chegini *et al.*, 2014; Erbay *et al.*, 2015; Nishad *et al.*, 2017; Sarabandi *et al.*, 2018; Mahdi Jafari *et al.*, 2019; Saha *et al.*, 2019; Felfoul *et al.*, 2020; Samsu and Mohamad Zahir, 2020).

L'Algérie est le premier consommateur du lait et produits laitiers du Maghreb, avec une consommation de l'ordre de 140 l/habitant/an, et une consommation de fromage près de 100000t/an, dont 80 % de fromage fondus (Recham, 2015). La production du fromage a été estimée à 2708 tonne/an en 2019 équivalent à un rejet de 25 000 tonne/an du lactosérum (OECD and FAO, 2020). Ce dernier est rejeté sans traitement vers les oueds, ce qui va engendrer des pertes énormes des constituants nobles du lactosérum et un impact négatif sur l'environnement.

La recherche scientifique sur la valorisation de ce co-produit en Algérie, a connu plusieurs travaux universitaires de fin d'étude à travers le territoire national notamment l'INATAA, les universités de Boumerdès, Bejaia, Bouira, mais sans implication industrielle réelle. Des études ont été réalisées sur la valorisation du lactosérum en utilisant la technique membranaire (ultrafiltration) pour la récupération des protéines sériques (Lachebi and Yelles, 2018), d'autres pour la déminéralisation du lactosérum doux pour modifier ses propriétés interfaciales (Acem *et al.*, 2018). D'autres études ont également concerné l'utilisation du lactosérum comme milieu

Introduction Générale

de culture pour la culture des bactéries lactiques (Gana and Touzi, 2001; Miloud *et al.*, 2017) ou l'incorporation du lactosérum comme ingrédient pour la fabrication de mousse en chocolat (Bouizar *et al.* 2021), de pain et des crèmes glacés à base de lactosérum en poudre (Abdelkader *et al.*, 2018; Amina *et al.*, 2018).

Les données de la direction générale des douanes (statistique de commerce extérieur), montrent que l'Algérie a importé, suite à une demande industrielle, plus de 160 000 tonne de poudre de lactosérum en 2020 en devises étrangères, équivalent à 436 millions de dollars. Il est à noter qu'il n'existe aucune entreprise en Algérie qui transforme le lactosérum en poudre malgré l'importante demande de ce produit par les différentes industries agroalimentaires. Cela peut être justifié par l'absence d'une stratégie de valorisation au niveau nationale, ainsi que la non maîtrise des techniques du séchage par atomisation chez l'industrie.

Compte tenu de tout ce qui précède, l'objectif de notre travail vise à étudier les conditions de séchage du lactosérum par atomisation, et l'optimisation des conditions de séchage dans un sécheur doté d'une chambre de séchage à flux mixte (contre-courant à phase inversé) et l'impact de ces conditions sur la qualité et les propriétés techno-fonctionnelles des poudres obtenues. Nous étudierons également l'impact de l'incorporation de la poudre ainsi obtenue lors de la substitution du lait écrémé dans un produit de pâtisserie à savoir le cake. Nous visons à donner aux industries de transformation un outil de valorisation par un procédé économique efficace, qui permet de récupérer une grande quantité de lactosérum afin de réduire la facture d'importation et de réduire ainsi le caractère polluant de ce coproduit. Il permettra également la création de startup de séchage et de transformation.

Ce manuscrit est divisé en trois grands chapitres, le premier chapitre est focalisé sur une étude bibliographique où nous aborderons les connaissances générales sur le lactosérum, les méthodes de transformation, le séchage et les propriétés des poudres. Le second chapitre est consacré au matériel et à la méthodologie mis en œuvre pour répondre aux objectifs de ce travail de thèse à savoir la caractérisation physicochimique et l'optimisation des conditions de séchage par atomisation selon un plan d'expérience composite centré à deux facteurs et l'effet des agents de séchage sur les paramètres du séchage et les propriétés des poudres. Nous étudierons également l'impact de l'incorporation de la poudre obtenue dans les gâteaux (cake) en remplaçant la poudre du lait écrème.

Le dernier chapitre, sera consacré à la présentation et la discussion des principaux résultats obtenus.

Revue Bibliographique

I.1. Définition de lactosérum

Le lactosérum provient de la fabrication du fromage ou des produits laitiers à base de caséine par séparation du caillé après la coagulation du lait (Pescuma *et al.*, 2015; Barukcic, 2018; Panghal *et al.*, 2018), il est considéré comme le co-produit le plus abondant de l'industrie laitière.

la quantité produite du lactosérum lors de la fabrication de fromage est de l'ordre de 85 à 90 % du volume du lait utilisé (Vajda *et al.*, 2013; Itchenco *et al.*, 2018). En général 96 % de la quantité de lactosérum produite provient de la fabrication du fromage et le reste provient du processus de fabrication de la caséine (Pescuma *et al.*, 2015; Ganju and Gogate, 2017).

Selon le type de fromage et l'agent coagulant de la caséine utilisé, le lactosérum obtenu peut être doux ou acide (Ganju and Gogate, 2017; Itchenco *et al.*, 2018). Le lactosérum doux est obtenu lors de la fabrication de fromage à pâte dure type présure ayant un pH d'environ 6.5. Le lactosérum acide est issu de la fabrication de certains produits laitiers acide tels que le fromage frais, le fromage blanc ou le yaourt grec, grâce à l'utilisation des acides organiques, de fermentation spontanée ou de ferments lactiques (Spălățelu, 2012; Ganju and Gogate, 2017; Kim, 2018; Rocha-Mendoza *et al.*, 2021).

Le lactosérum contient environ 50 % des constituants du lait. Il est constitué d'environ 93 % d'eau et 6 à 7 % de solides. La matière sèche se compose principalement par le lactose, les protéines solubles, les lipides et les sels minéraux (Chatzipaschali and Stamatis, 2012; Fernández-Gutiérrez *et al.*, 2017; Barukcic, 2018). La composition du lactosérum varie en fonction de plusieurs facteurs, d'abord, le type de lactosérum, la source du lait et l'alimentation utilisée pour la production laitière, puis le stade de lactation et la saison (Pescuma *et al.*, 2015; Fernández-Gutiérrez *et al.*, 2017). La composition du lactosérum est résumée dans le tableau (01). La principale différence entre les deux types de lactosérum est le taux des éléments minéraux, l'acidité et la composition de la fraction protéique du lactosérum (Chatzipaschali and Stamatis, 2012).

Le lactosérum est considéré comme un polluant environnemental, ceci est dû à une forte demande biologique et chimique de ce dernier (Yadav *et al.*, 2015; Lappa *et al.*, 2019).

Tableau 01 : Composition du lactosérum doux et du lactosérum acide (Anirudh, 2022; Buchanan *et al.*, 2023)

Constituants	Lactosérum doux (LD)	Lactosérum acide (LA) (g/l)
Solides totaux (g/l)	63 – 70	63 - 70
Lactose (g/l)	46 – 52	44 - 46
Protéines (g/l)	6 – 10	6 - 8
Minéraux (g/l)	2.5 - 4.7	4.3 - 7.2
pH	5.6 – 7	4.3 - 5.6

La demande biologique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO) du lactosérum sont généralement de l'ordre de 27-60 g/L et 50-102 g/L, respectivement (Chatzipaschali and Stamatis, 2012; Prazeres *et al.*, 2012; Djouab and Aïder, 2018). De plus, ces valeurs varient en fonction du type de lactosérum produit (Pires *et al.*, 2021; Buchanan *et al.*, 2023). Le tableau 2 présente les valeurs de la DBO et DCO en fonction de type du lactosérum.

Tableau 2 : Demandes biologiques et chimiques du lactosérum doux et acide (Zotta *et al.*, 2020; Pires *et al.*, 2021; Buchanan *et al.*, 2023).

Type du lactosérum	Demande biologique en oxygène (DBO) (g/L)	Demande chimique en oxygène (g/L)
Lactosérum doux	26-60	40-102
Lactosérum acide	35-51	52-62

Selon Kasmi *et al.* (2017), les DCO de 1 kg de matière grasse, de lactose et de protéines du lait sont de 3 kg, 1,13 kg et 1 kg respectivement. Le lactose représente 70 % des solides totaux du lactosérum (Macwan *et al.*, 2016), devant cet état, le lactose est responsable d'environ 90% de la DCO et de la DBO du lactosérum doux. En comparaison, la teneur en lactose dans le lactosérum acide est plus faible (44-46 g/L) que dans le lactosérum doux (46-52 g/L), ce qui peut expliquer les valeurs de la DCO et de la DBO généralement plus faibles dans lactosérum acide par rapport au lactosérum doux (Pires *et al.*, 2021; Buchanan *et al.*, 2023).

I.2. Caractéristiques des principaux constituants du lactosérum

1.2.1. Lactose

Le lactose est un disaccharide, qui ne se trouve que dans le lait des mammifères, il est synthétisé dans la glande mammaire, composé de deux monosaccharides (glucose et galactose), et chimiquement défini comme (O- β -d-galactopyranosyl-(1-4)- β -d-glucopyranose) (Guimarães *et al.*, 2010; Illanes, 2016).

Le lactose représente environ 70 % de la matière sèche totale du lactosérum (Macwan *et al.*, 2016). Il est difficile à cristalliser, si le lactose n'est pas correctement cristallisé la poudre de lactosérum est devenir hygroscopique, ce qui la rend instable pendant le stockage. La poudre de lactosérum non hygroscopique est produite en concentrant le lactosérum à 50-60 % de solides totaux avant l'atomisation (Fox *et al.*, 2017; Khramtsov *et al.*, 2022).

Le lactosérum est la principale source de récupération du lactose par les techniques de cristallisation et de purification. Il fait partie de différents produits, notamment, le pain, les produits pour nourrissons, les confiseries, les milieux de culture et comme excipient dans les médicaments (Seki and Saito, 2012).

Selon Djouab (2019) l'utilisation du lactose est limitée dans de nombreuses applications, en raison de son faible pouvoir sucrant, sa faible solubilité et son intolérance par une partie de la population.

Le lactose est le principal glucide utilise dans lait infantile (Carpin *et al.*, 2017; Masum *et al.*, 2019). Le lactose est une matière première qui peut être transformée en divers dérivés par des procédés de laboratoire ou industriels. Certains des dérivés du lactose qui sont fabriqués industriellement sont largement utilisés (Tableau 3) dans des domaines alimentaires et pharmaceutiques en raison de ses caractéristiques particulières (Seki and Saito, 2012; Carpin *et al.*, 2017).

Tableau 3 : Dérivés du lactose (Seki and Saito, 2012).

Produit	La réaction	Dérivés du lactose
Lactose	Hydrolyse-Isomérisation	Glucose+Galactose-Tagatose
	Isomérisation	Lactulose
	Polymérisation enzymatique	Galacto-oligosaccharide
	Polymérisation enzymatique avec sucrose	Lactosucrose
	Epimérisation	Epilactose
	Oxydation	Acide lactobionique
	Réduction	Lactilol
	Fermentation – hydratation - polymérisation	Acide lactique – lactide – la résine polylactique
	Fermentation	Ethanol

I.2.2. Protéines

Après le lactose, les protéines du lactosérum occupent une place très importante dans la fraction solide du lactosérum et présente environ 20 % de toutes les protéines du lait (Sousa *et al.*, 2012; Arevalo, 2017). Il existe deux protéines majeures du lactosérum, à savoir la β -lactoglobuline qui représente 50% en masse de protéines de lactosérum et l' α -lactalbumine constituant 20% de la masse de protéines de lactosérum (Božanić *et al.*, 2014). D'autres protéines mineures se trouvent également dans le lactosérum tels le glycomacropeptide, les immunoglobulines, la lactoferrine, la lactoperoxydase, la sérum albumin bovine (Tableau 4) (Yadav *et al.*, 2015; Anirudh, 2022).

Tableau 4 : Composition des protéines mineures du lactosérum (Anirudh, 2022)

Composition	Concentration (%)
Lactoperoxydase	0.50
Lactoferrine	1-2
Glycomacropeptide	10-15
Immunoglobulines	10-15
Bovine sérum albumine	5-10

Les protéines du lactosérum sont un ingrédient idéal pour diverses applications alimentaires, car elles présentent de nombreuses caractéristiques nutritionnelles, biologiques et fonctionnelles bénéfiques.

Les protéines du lactosérum ont la valeur nutritionnelle la plus élevée de toutes les protéines alimentaires. Elles contiennent tous les acides aminés dont le corps humain a besoin dans des proportions appropriées (Arab *et al.*, 2023). Elles se constituent par une teneur élevée en acides aminés essentiels (Baldasso *et al.*, 2011; Barukcic, 2018), à savoir ,la leucine, la valine, l'isoleucine et la cystéine (Athira *et al.*, 2015; Patel, 2015). La valeur nutritionnelle des protéines du lactosérum est d'environ 15 % supérieure à celle des protéines d'œuf (Barukcic, 2018).

Plusieurs travaux scientifiques ont démontré la bioactivité des peptides générés par hydrolyse enzymatique des protéines de lactosérum (Athira *et al.*, 2015; Kheroufi *et al.*, 2022) . Parmi les effets bénéfiques les plus confirmés, nous pouvons noter la réduction de la tension artérielle, les propriétés anti-cancérogènes, antimicrobiennes, antioxydantes, les effets

immunomodulateurs, la régulation de la satiété et la gestion du poids, la protection de la santé osseuse et les activités dermoprotectrices (Barukcic, 2018; Carmo *et al.*, 2019).

Les protéines du lactosérum se caractérisent également par des propriétés technofonctionnelles particulières lorsqu'elles sont utilisées comme ingrédients dans les aliments, principalement, la solubilité, la capacité d'absorption et de rétention d'eau, la gélatinisation et le pouvoir émulsifiant et moussant (Baldasso *et al.*, 2011; Brandelli *et al.*, 2015; Hanafy *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2018; Huppertz *et al.*, 2019). De plus, le CPL se caractérise par une performance similaires à celles de la graisse, qui peut être utilisé comme de substitution de matière grasse qui contribue aux propriétés sensorielles, fonctionnelles et texturales de fromage et desserts laitiers (Vidigal *et al.*, 2012; Hanafy *et al.*, 2016).

Les protéines de lactosérum peuvent être transformées en produits à forte valeur ajoutée, et sont de plus en plus utilisées dans divers produits alimentaires grâce à leur statut GRAS (General Recognized as Safe) (Sinha *et al.*, 2007; de Castro *et al.*, 2017). Les protéines de lactosérum ont été utilisées dans différents produits, pharmaceutiques, nutraceutiques et alimentaires pour des raisons nutritionnelles et fonctionnelles (Anandharamakrishnan *et al.*, 2008; Favaro-Trindade *et al.*, 2010; Hundre *et al.*, 2015; Hanafy *et al.*, 2016; Barukcic, 2018; Carmo *et al.*, 2019). Aussi, les formules à base d'hydrolysats de protéines de lactosérum sont largement utilisés pour les laits infantiles pour nourrissons allergiques aux protéines du lait de vache (Sinha *et al.*, 2007).

Industriellement, les protéines du lactosérum se trouvent sous deux formes, les concentrés de protéines du lactosérum (WPC), comprenant 34 à 80% de protéines et l'isolat de protéines de lactosérum (WPI) avec plus de 90 % de protéines (Carter *et al.*, 2018; Ghanimah and Ibrahim, 2018).

I.2.3. Eléments minéraux

Le lactosérum est une bonne source d'électrolytes, y compris le sodium et le potassium, qui sont nécessaires à la réhydratation infantile ou chez les personnes âgées. Des minéraux tels que le calcium, le magnésium et le phosphore sont présents en solution et partiellement liés aux protéines avec de faible concentration de zinc (Zadow, 1992; Macwan *et al.*, 2016).

La teneur en minéraux est plus élevée dans le lactosérum acide que dans le lactosérum doux, ceci est dû à une déminéralisation du caillé lors de la coagulation acide (Park and Haenlein, 2013).

I.2.4 Lipides

Le lactosérum contient très peu de matières grasses, en pratique, il est considéré comme non gras. Cela, entre autres raisons, est un aliment idéal pour les personnes qui ont un régime à perdre du poids (Vasey, 2006).

I.2.5. Vitamines

Outre les minéraux, les vitamines hydrosolubles sont présentes dans le lactosérum sec à des taux variés, à savoir 0.9-3.7 µg/100g de vitamine B12, 8.56-15.77 mg/100g de vitamine B6 et d'acide pantothénique, 1.70-2.92 mg/100g, 28-112 µg/100g de riboflavine et de biotine respectivement, 1.14-11.73 mg/100g de thiamine, acide nicotinique, acide folique et acide ascorbique (Vasey, 2006; Macwan *et al.*, 2016; Anirudh, 2022).

Dans le cas de la vitamine B12, une plus grande quantité est transférée dans le lactosérum lors d'une coagulation présure que d'une coagulation acide (Macwan *et al.*, 2016). Selon De Wit (2001) la couleur jaunâtre de lactosérum est dû à la présence de riboflavine (vitB1).

I.3. Modes de valorisation du lactosérum

Dans le passé, la plupart des fromageries rejetaient leurs effluents sur le sol ou les déversaient dans les rivières, les lacs et/ou les océans sans aucun prétraitement. Cependant, en raison des préoccupations environnementales et des réglementations plus strictes, la gestion des effluents des fromageries est devenue une question importante (Remón *et al.*, 2016).

Environ 50% du lactosérum total produit dans le monde est traité et transformé en différents produits alimentaires (Spălăţelu, 2012; Yadav *et al.*, 2015). Dont environ 45% sont utilisés directement sous forme liquide, 30% sous forme du lactosérum en poudre, 15% comme lactose et divers sous-produits, et le reste sous forme de concentrés de protéines du lactosérum (Yadav *et al.*, 2015; Kosseva, 2020).

Il est intéressant de noter qu'au cours des dernières années, divers procédés de transformations du lactosérum ont été appliqués par les industries laitières afin de créer une valeur ajoutée (Panghal *et al.*, 2017). Dans ce contexte trois grandes catégories sont envisagées (fig.1). En premier lieu une utilisation directe, lorsque le lactosérum utilisé avec très peu ou pas de traitement ultérieur. En deuxième lieu, la stabilisation directe, où il est traité par des moyens physiques ou chimiques afin de rendre le lactosérum plus résistant à la dégradation microbienne, et en fin l'application des procédés de conversion, dans lesquels les composants du lactosérum sont transformés en d'autres composés par l'activité de micro-organismes

(biotransformation) ou par réactions chimiques ou enzymatiques pour obtenir des produits à hautes valeurs ajoutées (Chatzipaschali and Stamatis, 2012).

I.3.1. Utilisation directe

Le lactosérum liquide peut être fourni aux agriculteurs pour être utilisé comme un biofertilisant ou pour nourrir les animaux de ferme (Smithers, 2008; Macwan *et al.*, 2016). Néanmoins, son utilisation comme engrais agricole présente un inconvénient en raison de la grande quantité de sel qu'il laisse derrière cette pratique agricole (Chatzipaschali and Stamatis, 2012).

La meilleure façon d'utiliser le lactosérum directe pour la consommation humaine est de le transformer en boissons avec ou sans fermentation (Shraddha RC and Nalawade T, 2015; Panghal *et al.*, 2018; Hernandez Miranda *et al.*, 2021).

Selon Macwan *et al.* (2016) le lactosérum est une très bonne source pour la production des boissons alcoolisées, dans la fabrication des boissons fermentées telles que le kéfir (Sabokbar and Khodaiyan, 2016; Gao, 2018) , dans la formulation des jus des fruits non fermentés (Kumar and Bangaraiah, 2014; Prashanth *et al.*, 2018) ainsi que des boissons fermentées riches en protéines de lactosérum contenant des quantités élevées en probiotiques (Forkwa, 2017).

I.3.2 Stabilisation directe

Les procédés physiques de valorisation du lactosérum reposent sur l'application de technologies permettant de récupérer des composés précieux comme les protéines et le lactose (Mollea *et al.*, 2013). Le lactosérum contient peu de graisse et de la caséine en suspension qui peuvent être éliminées par un procédé de microfiltration pour éviter l'obstruction des membranes d'ultrafiltration (Fernández-Gutiérrez *et al.*, 2017).

La valorisation du lactosérum est généralement initiée par la diafiltration ou l'ultrafiltration pour récupérer les concentrés de protéines de lactosérum (WPC), ayant des nombreuses applications dans l'industrie alimentaire (Becerra *et al.*, 2015). Une déminéralisation peut être nécessaire pour le lactosérum salé afin d'éliminer les sels, tandis qu'une nano filtration peut être utilisée pour éliminer une partie des ions monovalent ou des acides lactiques dans le lactosérum acide (Bédas *et al.*, 2017; Nishanthi *et al.*, 2017; Acem *et al.*, 2018), ou par électrodialyse (Chen *et al.*, 2016).

Le lactose du lactosérum peut être séparé par cristallisation ou à l'aide de membranes en fibres creuses, et utilisé dans l'industrie pharmaceutique. Le lactose peut être hydrolysé pour

produire du glucose et du galactose qui pourraient être valorisés par des procédés chimiques ou biologiques (Das *et al.*, 2016; Fernández-Gutiérrez *et al.*, 2017).

Amrane (2019) a étudié l'électro-isomérisation du lactose en lactulose directement in situ du perméat de lactosérum en utilisant la technologie d'électro-activation en vue d'obtenir un nouveau prébiotique à haute valeur ajoutée avec des propriétés antioxydantes. L'étude a montré que le rendement du lactulose est très important via l'utilisation de KCL. L'application de l'électro-activation des perméats du lactosérum et du lactose a amélioré la capacité antioxydante des produits obtenus.

La transformation des flux de lactosérum a évolué vers la concentration et la production de poudres de lactosérum et de ces composants (Nishanthi *et al.*, 2017; Domínguez-Niño *et al.*, 2018; Mahdi Jafari *et al.*, 2019, 2019; Nani and Krishnaswamy, 2022a).

I.3.3. Biotransformation du lactosérum

Le lactose est la source de carbone ou nutriment principal pour les microorganismes à l'origine de la fermentation (Spreer, 1998), dans ces méthodes la fermentation permet la conversion du lactose du lactosérum en différents produits tels que les enzymes, la biomasse riche en protéines, l'éthanol, le biogaz et les additifs alimentaires.

Une étude réalisée par Nouredine *et al.* (2014), sur la production d'éthanol ont conclu que l'utilisation de la levure *Candida inconspicua* est efficace dans la production de bioéthanol à partir du lactosérum lorsqu'elle est immobilisée. La fermentation du lactosérum dans des réacteurs discontinus ou continus par différentes souches de *Clostridium* favorise la production de butanol plutôt que d'acétone (Pescuma *et al.*, 2015).

La poudre de lactosérum reconstituée est utilisée comme une source de carbone pour une culture d'*E. coli* strain HMS174(DE3), présente énormément d'opportunités pour la production des enzymes par rapport à l'utilisation du lactose comme une source de carbone (Hausjell *et al.*, 2019). La poudre du lactosérum est également utilisée comme un substrat pour la production de bioéthanol et de l'acide galactonique (Zhou *et al.*, 2019).

Des nouveaux concepts intégrés de bioraffinage sont proposés pour inaugurer l'exploitation complète du lactosérum de fromage pour formuler de nouveaux produits aux applications finales diversifiées (Lappa *et al.*, 2019; Sebastián-Nicolás *et al.*, 2020). Dans un même contexte Remón *et al.* (2016), ont utilisé le lactosérum pour la production d'hydrogène associée à la production de l'alcool, de méthane et de phénols.

Németh and Kaleta (2015) ont étudié la production d'ergosterol, à partir du lactosérum, ainsi, les résidus résultant de leur conception ont été utilisés pour la production d'acide propionique et de vitamine B 12. Cette étude a constatée qu'au cours de ce processus, il existe une relation appropriée avec la théorie du "zéro déchet" et les produits à valeur ajoutée.

D'autres études similaire développées par Domingos *et al.* (2018) montrent la faisabilité de la production de concentrations élevées de polyhydroxyalcanoates (PHA) par la fermentation anaérobie du lactosérum pour la production de biopolymères.

Ces différentes méthodes de valorisation, peuvent, non seulement diminuer la charge polluante du lactosérum ou de son perméat, mais peut augmenter le portefeuille d'activités des entreprises laitières (Jmp *et al.*, 2017).

I.4. Procédés de séchage des produits laitiers

Le séchage fait partie des techniques de conservation des aliments utilisés pour des fruits, des légumes, des céréales, des produits laitiers et des plantes (Anandharamakrishnan, 2017). Le séchage limite la croissance des micro-organismes et empêche les changements physicochimiques des produits alimentaires pendant le stockage (Karthik *et al.*, 2017).

Les produits laitiers sont déshydratés pour les stabiliser pendant le stockage et faciliter leur utilisation ultérieure. Ces produits sont principalement destinés à la consommation humaine et/ou à l'alimentation animale (Bhandari *et al.*, 2013). Plusieurs techniques de séchage sont utilisées sur les produits laitiers, qui se focalisent sur le changement d'état physique de l'eau, à savoir le séchage sur tambour, lyophilisation et le séchage par atomisation (Caparino *et al.*, 2012; Mustafa *et al.*, 2014; Aalaei *et al.*, 2017; Zouari *et al.*, 2018; de Oliveira *et al.*, 2020). Le produit final obtenu par ces méthodes peut différer par ses propriétés physico-chimiques ou nutritionnelles et ses microstructures (Caparino *et al.*, 2012).

I.4.1 Séchage sur tambour

Pendant de nombreuses années, le séchage sur tambour était la principale technologie utilisée pour la production du lait écrémé en poudre jusqu'en 1960 (Aalaei *et al.*, 2017). C'est une technique qui consiste à appliquer une fine couche du liquide sur la surface extérieur de tambour rotatif chauffé à l'intérieur par la vapeur saturée à haute température (120-170 °C) (Caparino *et al.*, 2012). Le matériau d'alimentation est alimenté sur le tambour par immersion, éclaboussure ou pulvérisation (Anandharamakrishnan, 2017). Le produit séché est retiré à l'aide d'un racleur statique. Le produit séché est ensuite broyé en flocons ou en poudre (Tang *et al.*, 2003).

Le séchage à tambour est efficace sur le plan énergétique pour le séchage des aliments à haute viscosité ou des aliments en purée (Tang *et al.*, 2003; Karthik *et al.*, 2017). Cette méthode de séchage a été utilisée pendant une dizaine d'années avant d'être plus ou moins remplacée par une méthode plus efficace qui est le séchage par atomisation. Selon Karthik *et al.* (2017), les sécheurs à tambour sont classés en fonction du nombre et de la disposition des tambours (simples, doubles) (Tang *et al.*, 2003).

I.4.1.1 Séchoir à tambour simple

Il contient un seul tambour qui est utilisé dans l'industrie alimentaire (fig. 2). Il se compose d'un tambour rotatif, d'un rouleau applicateur pour répartir uniformément l'alimentation liquide, d'une raclette ou d'un couteau pour retirer le produit séché, et d'un convoyeur pour transférer le produit séché du séchoir à la section de remplissage. Les rouleaux applicateurs ont un effet de pétrissage, ce qui empêche la formation de grumeaux dans les produits collants. Un dispositif de réglage fixé au couteau contrôle l'épaisseur du film étalé (Anandharamakrishnan, 2017).

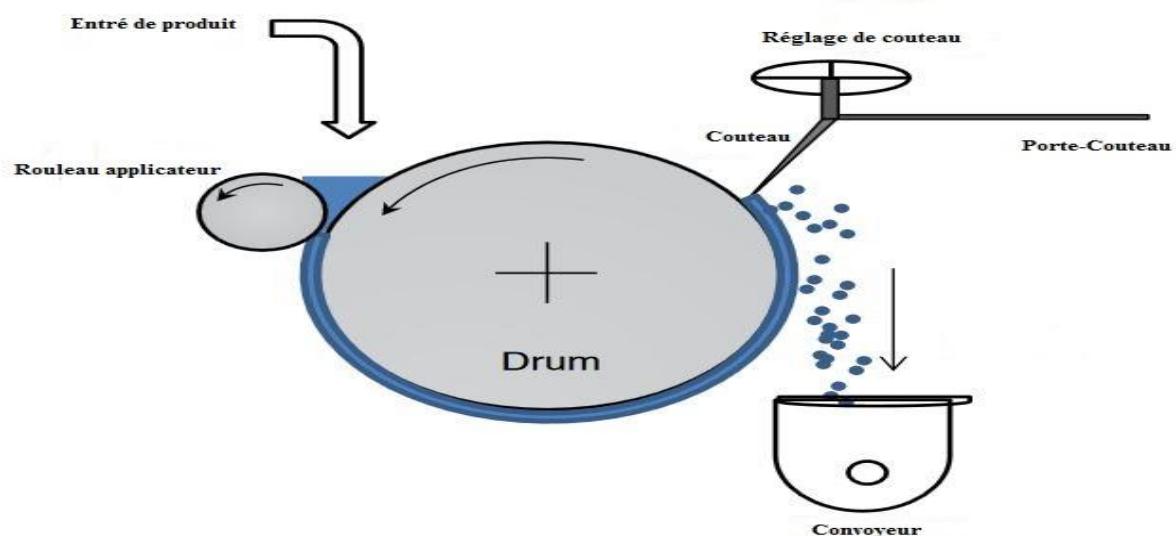


Figure 2 : Séchoir à tambour simple (Anandharamakrishnan, 2017).

I.4.1.2 Séchoir à double tambour

Il contient deux cylindres rotatifs horizontaux de même diamètre et de même longueur tournant dans des directions opposées, voir la figure 3, (Tang *et al.*, 2003).

La distance entre les deux tambours peut être réglée de manière appropriée en fonction de l'épaisseur de la couche de film désirée. Les couteaux sont fixés individuellement sur les

deux tambours pour collecter le produit séché, et se déplacent par le biais d'un convoyeur sur les deux tambours. Un séchoir à double tambour est souvent utilisé pour les aliments à faible viscosité. L'alimentation liquide est introduite dans le carter entre les deux tambours (Karthik *et al.*, 2017).

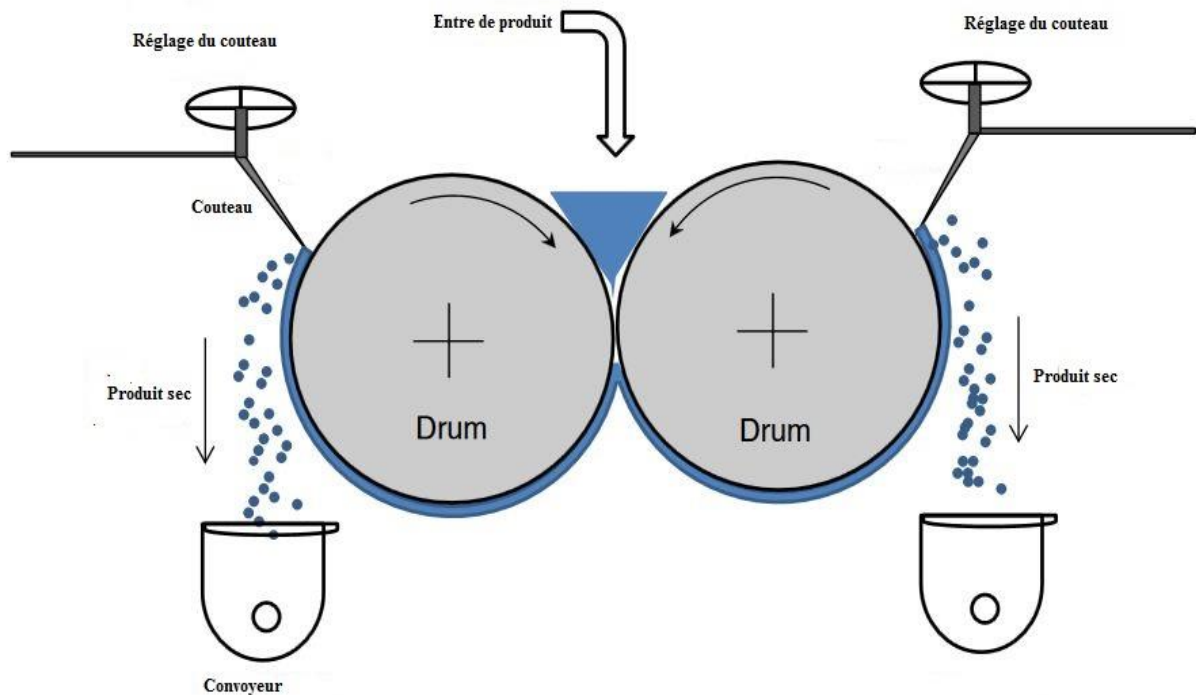


Figure 3 : séchoir à tambour (double) (Anandharamakrishnan, 2017).

I.4.2 Lyophilisation

La lyophilisation est l'opération par laquelle l'eau est éliminée d'un produit par sublimation et désorption. Le procédé consiste, dans un premier temps, à congeler le produit puis à l'exposer à un vide poussé pour sublimer la glace (Garcia-Amezquita *et al.*, 2016). La lyophilisation est effectuée à basse température ; ce qui permet de préserver la saveur, la couleur et l'apparence et de minimiser les dommages thermiques aux nutriments sensibles à la chaleur (Berk, 2018; Hamad *et al.*, 2022).

C'est une technique qui garantit un taux de survie important lors du séchage des bactéries lactique et des levures (Atalar and Dervisoglu, 2015). De plus la lyophilisation est généralement considérée comme la meilleure méthode pour la production de produits secs de haute qualité. Néanmoins, cette technique présente des coûts de production élevés, avec une forte consommation d'énergie et un rendement faible (Caparino *et al.*, 2012). Elle n'est

économiquement réalisable que dans le cas de produits à haute valeur ajoutée et lorsque la qualité supérieure du produit justifie un coût de production plus élevé (Berk, 2018).

L'installation d'un équipement de lyophilisation (fig. 4) dépend des caractéristiques des produits à sécher. Généralement, un lyophilisateur typique est composé d'une chambre de séchage, d'un condenseur, d'une pompe à vide et d'une source de chaleur (Bhushani and Anandharamakrishnan, 2017).

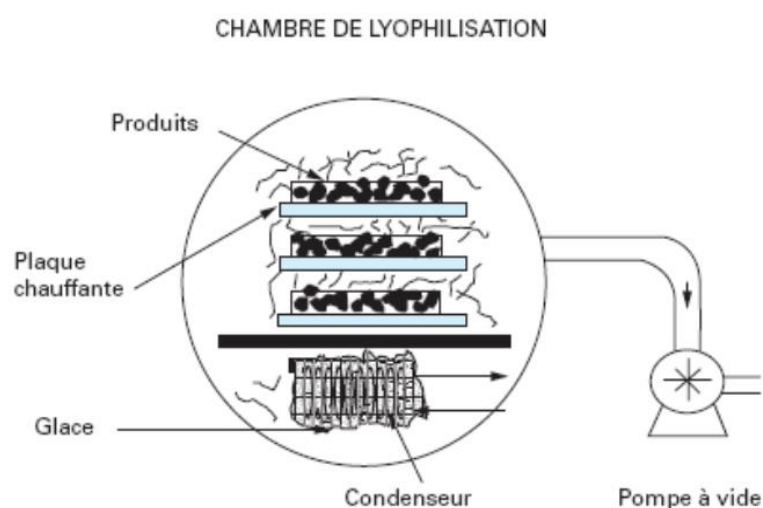


Figure 4 : Principaux composants d'un lyophilisateur (Bhushani and Anandharamakrishnan, 2017)

I.4.3 Séchage par atomisation des produits laitiers

Au cours du siècle dernier, un intérêt considérable a été porté à la conversion du lait et de ses dérivés en poudres laitières afin de prolonger leur durée de conservation. En général, ils sont fabriqués à l'aide de la technologie de séchage par pulvérisation (Reddy *et al.*, 2014; Atalar and Dervisoglu, 2015; Mahdi Jafari *et al.*, 2019; Himmetagaoglu *et al.*, 2020; Queiroz *et al.*, 2021). Le séchage par pulvérisation est l'un des procédés thermiques les plus importants utilisés pour produire différentes poudres et matériaux encapsulés (Homayoonfal *et al.*, 2022).

Dans ce procédé, l'eau est évaporée dans un contact de courte durée avec l'air chaud et sec. Avant le séchage, le lait peut être soumis à différents prétraitements susceptibles de modifier la structure et les fonctionnalités de la poudre de lait (Zouari *et al.*, 2020). La partie sur les généralités sur le séchage par atomisation fournira des informations détaillées sur ce procédé.

Revue Bibliographique

- ✓ Alimentation animale
- ✓ fertilisation du sol

- ✓ Boissons aux lactosérums
- ✓ Fromage de lactosérum

Valorisation directe

Lactosérum

Valorisation indirecte

Traitement physique

Séparation

- ✓ Fines
- ✓ Crème

Concentration des solides totaux

Evaporation sous vide

Séchage par pulvérisation

- ✓ Poudre du lactosérum
- ✓ Lactosérum concentré
- ✓ Lactosérum concentré sucre

Fraction des solides totaux

Ultrafiltration

Osmoses inverse

Déminéralisation

- ✓ Concentré de PL
- ✓ Isolat de PL
- ✓ Fractions de PL
- ✓ PL déminéralisée
- ✓ Lactose
- ✓ Eléments minéraux

Généralité sur le lactosérum

Traitement biotechnologique

Digestion anaérobie

Fermentation

Figure 1 : Différentes voies de valorisation du lactosérum

I.5 Utilisations de la poudre du lactosérum

Les poudres de lactosérum sont produites depuis de nombreuses années et trouvent leur application dans diverses industries alimentaires, notamment dans les produits de boulangerie ou de charcuterie et dans les crèmes glacées. La valeur des poudres de lactosérum peut être augmentée et leur gamme d'applications étendue par une ou plusieurs modifications du processus (Fox *et al.*, 2017).

Le lactosérum sec est largement utilisé dans des industries du lait, de la boulangerie, de la viande et des boissons comme ingrédient ou additif alimentaire (Secchi *et al.*, 2011; Selvamuthukumar, 2019; Miano *et al.*, 2021; Shin *et al.*, 2021). En outre elle est utilisée pour la fabrication du chocolat au lait (Lapčíková *et al.*, 2022).

La poudre de lactosérum n'est pas utilisée seulement comme additif dans l'industrie de la charcuterie, confiserie, l'industrie des produits laitiers, et dans la formulation des boissons lactées (Selvamuthukumar, 2019), mais aussi elle a été exploitée comme un support de séchage afin d'améliorer les propriétés des poudres alimentaires (Erbay *et al.*, 2015; Felix da Silva *et al.*, 2018; Mahdi Jafari *et al.*, 2019). Une étude réalisée sur le séchage de l'extrait de sumac par pulvérisation a démontré que la poudre de lactosérum a été choisie comme un meilleur support de séchage (Caliskan and Nur Dirim, 2013). Aussi, des études récentes ont démontrées son importance comme un agent de séchage par atomisation des probiotiques (Lavari *et al.*, 2014, 2017; Huang *et al.*, 2016, 2017). De plus, elle a été utilisée dans la fabrication des emballages biodégradables (Sert *et al.*, 2021).

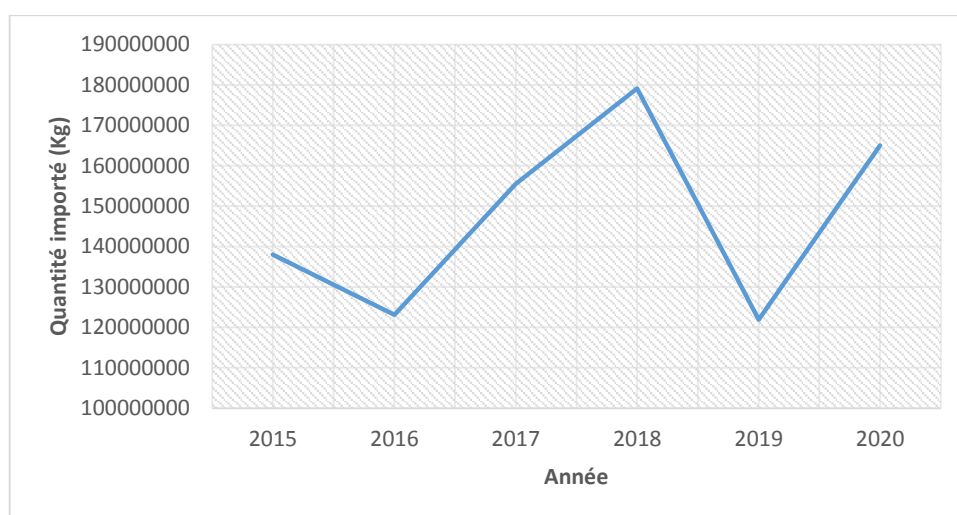
I.6. Problématique du lactosérum en Algérie

Selon un recueil réalisé par Djamel BELAID en 2016 sur le secteur agroalimentaire en Algérie, il a été noté que l'Algérie est le premier consommateur laitier du Maghreb, avec une consommation de l'ordre de 140 l/habitant/an, et une consommation de fromage près de 100 000 t/an, dont 80 % de fromage fondus. En outre, la production du fromage a été estimée à 2 708 tonne/an en 2019 équivalent à un rejet de 25 000 tonne /an du lactosérum liquide (OECD and FAO, 2020). Cette dernière est acheminée sans traitement vers les oueds, ce qui va engendrer des pertes énormes des constituants nobles de lactosérum et un impact négatif sur l'environnement. Le tableau suivant présente les quantités de nutriments rejetés, par rapport à la quantité de lactosérum produite, ainsi que leur DBO et DCO.

Tableau 5 : DBO, DCO et les nutriments du lactosérum produit en Algérie

Quantité de lactosérum jeté	Effets	Eléments	Quantité
25000 tonne /an De lactosérum liquide	Pertes de valeur nutritionnelle	Lactose Protéines EST	1.225 tonne/an 0.2 tonne/an 1.66 tonne/an
	Impact environnementale	DBO DCO	1.1 tonne (O ₂)/an 1.77 tonne(O ₂) /an

Selon le centre national des statistiques, l'Algérie a importé plus de 160 millions de tonnes de poudre de lactosérum en 2020, et ce, suite à la demande industrielle, ces quantités sont équivalentes à plus de 436 millions de dollars. La figure suivante présente l'évolution de l'importation de poudre de lactosérum au cours des cinq dernières années.

**Figure 5.** Importations de poudre de lactosérum par l'Algérie (CNS, 2020)

Des efforts scientifiques ont été déployés à travers le territoire national afin de remédier à cette situation. Des travaux de recherche sur la valorisation du lactosérum ont été menés dans différentes universités notamment, université Constantine 1 (INATAA), Université Boumerdès, Bejaia, Bouiraetc. Les travaux de recherche ont concerné la récupération des protéines du lactosérum en utilisant les techniques membranaires (ultrafiltration) (Lachebi and Yelles, 2018), la déminéralisation du lactosérum doux en vue de modifier leurs propriétés interfaciales Acem et al. (2018), l'utilisation du lactosérum pour la culture des bactéries lactiques (Gana and Touzi, 2001; Hanoune *et al.*, 2015), ainsi que l'incorporation du lactosérum liquide dans la formulation de la mousse de chocolat par Bouizar *et al.* (2021), la fabrication du pain et des crèmes glacées à base de lactosérum en poudre (Abdelkader *et al.*, 2018; Amina *et al.*, 2018). Ces travaux restent dans le cadre de la recherche, aucun travail cité auparavant n'a trouvé une application industrielle.

II.1. Généralités sur le séchage par atomisation

La déshydratation des aliments permet de prolonger la durée de conservation en réduisant les activités chimiques et microbiennes des aliments. Le séchage réduit la teneur en humidité de la poudre, ce qui garantit un stockage long et sûr (Zareifard *et al.*, 2012; O'Sullivan *et al.*, 2019; Pui and Lejaniya, 2022).

Le séchage par atomisation est une déshydratation par convection de gouttelettes atomisées, le mécanisme qui constitue l'ensemble du processus de déshydratation est un mécanisme de transfert convectif de chaleur et de masse (Bhandari *et al.*, 2013). Ce mécanisme de transport convectif est induit par le mouvement des particules dans la chambre (Kamal *et al.*, 2019).

La première observation de séchage par atomisation a été datée en 1860 avec un dispositif primitif qui a été breveté par Samuel Percy aux États-Unis en 1872 (G. dos Santos *et al.*, 2018; O'Sullivan *et al.*, 2019). La mise en application industrielle de la technique de séchage par pulvérisation dans l'industrie laitière et des détergents a débuté dans les années 1920 (Chen and Mujumdar, 2008; Keshani *et al.*, 2015).

Le séchage par atomisation a été développé pendant la Seconde Guerre mondiale, en raison de réduire le poids de transport des aliments et autres matériaux (Patel *et al.*, 2009). Le séchage par atomisation a fait l'objet d'une recherche et d'un développement intensifs afin que les équipements modernes puissent répondre aux exigences de production d'une poudre avec des spécifications sur mesure requises par l'utilisateur final (Westergaad, 2010).

Il s'agit d'une opération de traitement unitaire continue en une seule étape. C'est l'une des plus importantes méthodes de séchage des aliments fluides dans le monde (Mujumdar, 2014). Le produit à transformer peut être une solution, une émulsion, une suspension ou une pâte (Chen and Mujumdar, 2008; Westergaad, 2010; Bhandari *et al.*, 2013; Keshani *et al.*, 2015).

L'atomisation est utilisée pour la production de divers produits laitiers séchés notamment le lait écrémé en poudre, le lait entier en poudre, les protéines de lactosérum en poudre, le fromage en poudre et le yaourt en poudre (Amiri-Rigi *et al.*, 2012; Foerster *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2016; Anandharamakrishnan, 2017; Demirkol and Tarakci, 2018; Felix da Silva *et al.*, 2020).

L'application du séchage par atomisation a été étendue à divers types de produits alimentaires tels que les ovo-produits, les boissons, les protéines végétales, les extraits de fruits et de légumes, les glucides et les extraits de thé (Rannou *et al.*, 2013; Keshani *et al.*, 2015;

Moser *et al.*, 2018). Il peut également être utilisé pour produire des microparticules ayant la taille de particule et les caractéristiques des poudres souhaitées, comme la solubilité, la fluidité et la densité apparente (Al Zaitone *et al.*, 2020) et de préserver les molécules bioactives (Obón *et al.*, 2020).

Le produit séché par pulvérisation peut se présenter sous forme de poudres, de granulés ou d'agglomérats, en fonction des propriétés physiques et chimiques de l'aliment, la conception du séchoir et les propriétés finales souhaitées de la poudre (Keshani *et al.*, 2015).

La figure 6 est un schéma simplifié montrant étape par étape chaque gouttelette déshydratée dans un sécheur par atomisation.

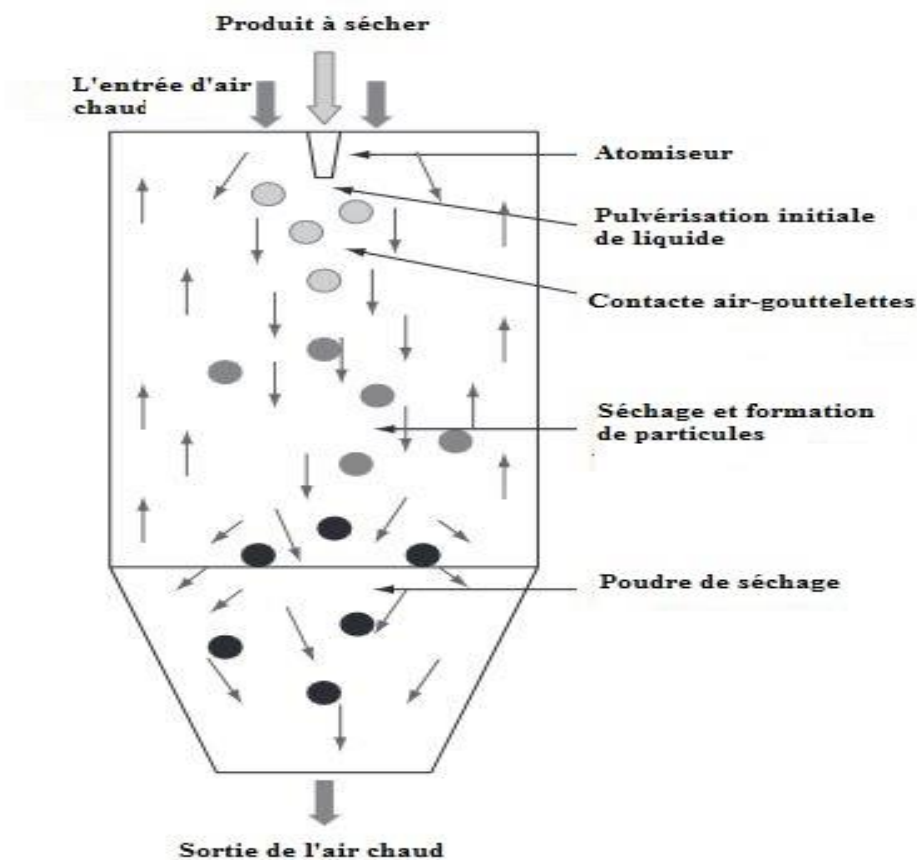


Figure 6 : Illustration du processus de séchage par atomisation (Bhandari *et al.*, 2013)

II.2. Principe du séchage par atomisation

Le processus de séchage par atomisation peut être décrit par trois phases principales (atomisation, conversion des gouttelettes en particules et collecte des particules) (Mujumdar, 2014). bien que pour le décrire plus en détail, certains auteurs utilisent quatre ou cinq étapes

mineures (Patel *et al.*, 2009; Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015; G. dos Santos *et al.*, 2018).

Selon Westergaad (2010), un séchoir par pulvérisation est constitué d'une chambre de séchage, d'un pulvérisateur, d'un cyclone pour la séparation des poudres et d'un système de refroidissement pneumatique (fig.7).

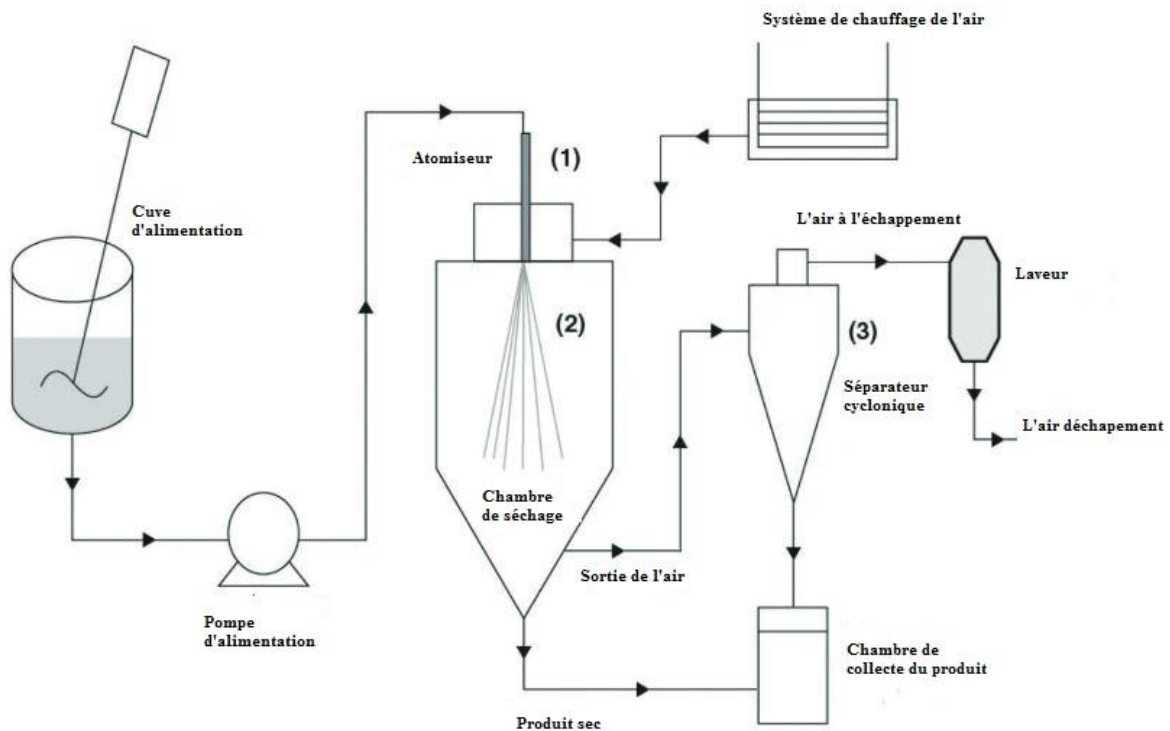


Figure 7 : Séchoir par atomisation, (1) atomiseur, (2) conversion des gouttes en particules, (3) collection des particules (Mujumdar, 2014)

La conception des différents compartiments du séchoir est réalisée en fonction des propriétés physiques et chimiques des matériaux à sécher et des caractéristiques du produit final (Mujumdar, 2014)

Le transfert de chaleur et de masse à partir des gouttelettes dépend fortement du volume de la chambre de séchage, le rayon et le type de la buse d'atomisation et des propriétés physiques de produit à sécher et des propriétés de l'air de séchage (Al Zaitone *et al.*, 2020).

II.2.1 Chambre de séchage

Selon Bhandari *et al.* (2013), la première partie de la conception consiste à déterminer la taille, le diamètre et la longueur de la chambre de pulvérisation. La chambre de séchage fournit de l'espace et du temps de résidence aux particules sans dépôts indésirables sur le mur de la chambre de séchage, et d'avoir l'humidité désirée sans dégradation thermique des produits. La

forme de la chambre dépend du type d'atomiseur utilisé car l'angle de pulvérisation détermine la trajectoire des gouttelettes et donc le diamètre et la hauteur de la chambre de séchage (Mujumdar, 2014). La chambre de séchage la plus courante est la chambre cylindrique avec un cône de 40-60°, afin que la poudre puisse sortir de la chambre par gravité (Westergaad, 2010; G. dos Santos *et al.*, 2018).

Deux types de transfert sont constatés au niveau de la chambre de séchage (Woo and Bhandari, 2013).

En premier lieu, c'est le transfert de chaleur, et ce suite à l'entraînement des gouttelettes par un air chaud et sec, qui peut se traduire par l'équation donnée par Woo and Bhandari, (2013).

$$\frac{dT}{dt} = h A (T_{air} - T_{gouttelette}) - \frac{dm}{dt} \Delta H_{evap} \quad (01)$$

Dont ; $\frac{dT}{dt}$: vitesse de changement de la température (en K s⁻¹) ; h : coefficient de transfert de chaleur (en W. m⁻². K⁻¹) ; A : surface d'échange de la gouttelette (m²) ; T_{air} - T_{gouttelette} : différence de température (en K) ; $\frac{dm}{dt}$: vitesse de séchage (kg s⁻¹) et ΔH_{évap} : chaleur latente d'évaporation (kJ kg⁻¹).

Ensuite, c'est le transfert de matière, qui se traduit quand la différence de concentration en humidité entre la surface des gouttelettes et l'air de séchage y'aura lieu. Alors le transfert de matière est estimé selon la formule suivante ;

$$\frac{dm}{dt} = h_m A (p_{surface\ de\ gouttelette} - p_{air}) \quad (02)$$

Dont : h_m ; le coefficient de transfert de matière (m s⁻¹), A ; surface d'échange de la gouttelette (m²), $p_{surface\ de\ gouttelette} - p_{air}$; différence de concentration en vapeur (kg m⁻³)

La configuration de la chambre de pulvérisation joue un rôle important dans le phénomène de refroidissement par évaporation.

Il existe différentes configurations de chambres de séchage en fonction de la direction d'injection de flux du gaz chaud et d'alimentation, à savoir sécheurs à co-courant, contre-courant et sécheurs à flux mixte (Samsu and Mohamad Zahir, 2020; Jamil Ur Rahman *et al.*, 2021).

II.2.1.1 Chambre de séchage à Co-courant

Dans ce modèle le disperseur de l'air et l'atomiseur sont placés soit au sommet soit au bas de la chambre (Nguyen ,2014). Le produit atomisé et le gaz chauffé se déplacent dans le

même sens (figure 8). Dans ce type de séchage, la température du produit est toujours inférieure à la température de sortie de l'air de séchage (Anandharamakrishnan, 2017; G. dos Santos *et al.*, 2018).

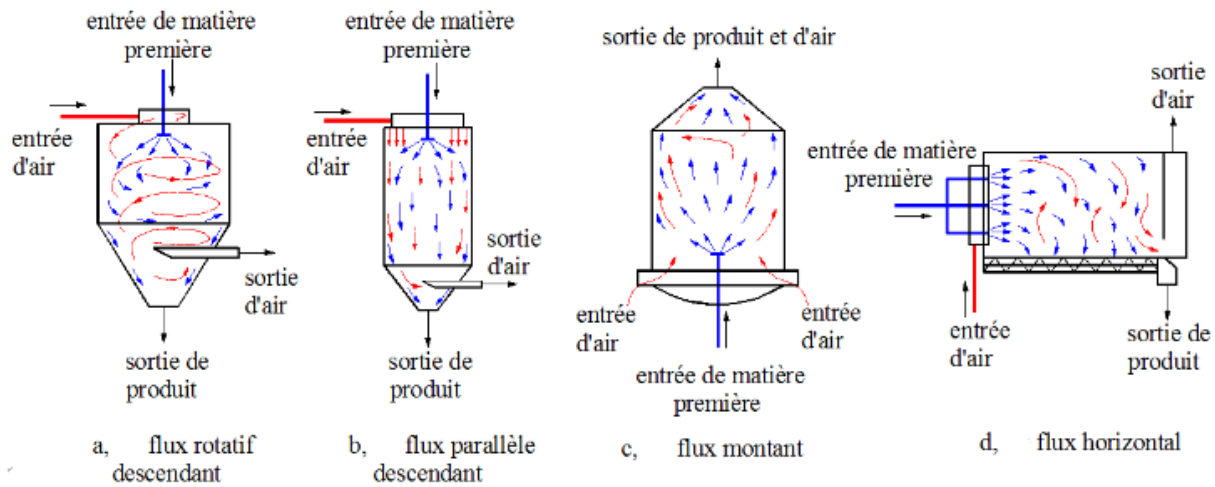


Figure 8 : Chambres de séchage à co-courant (Nguyen ,2014)

II.2.1.2 Chambre de séchage à Contre-courant et flux mixte

Dans une configuration à contre-courant et mixte (figure 9), la gouttelette est injectée dans la chambre de séchage dans la direction opposée à celle du débit d'air chaud à l'entrée (Bhandari *et al.*, 2013; Anandharamakrishnan, 2017). Ce processus expose les particules sèches à des températures plus élevées, ce qui peut donner des produits extrêmement secs (Samantha *et al.*, 2015).

Dans le processus de séchage mixte (figure 9, b) le produit est atomisé dans une direction ascendante, tandis que l'air chaud est introduit par le haut, avec une circulation totalement descendante à l'intérieur de la chambre. Cela signifie que le matériau atomisé entame des mouvements ascendants, mais change de direction pour devenir descendant après avoir été entraîné par l'air (Samantha *et al.*, 2015).

II.2.2 Système d'alimentation de la matière première et de l'air de séchage

Selon Nguyen, (2014) le système de fourniture de la matière première en premier lieu se compose du réservoir, d'un filtre, d'une pompe, d'un atomiseur qui doivent être fabriqués pour assurer les règles d'hygiène et l'accès facile à l'entretien. Concernant le système d'approvisionnement de l'air de séchage, il comporte un filtre d'air, un réchauffeur, un ventilateur et un disperseur d'air.

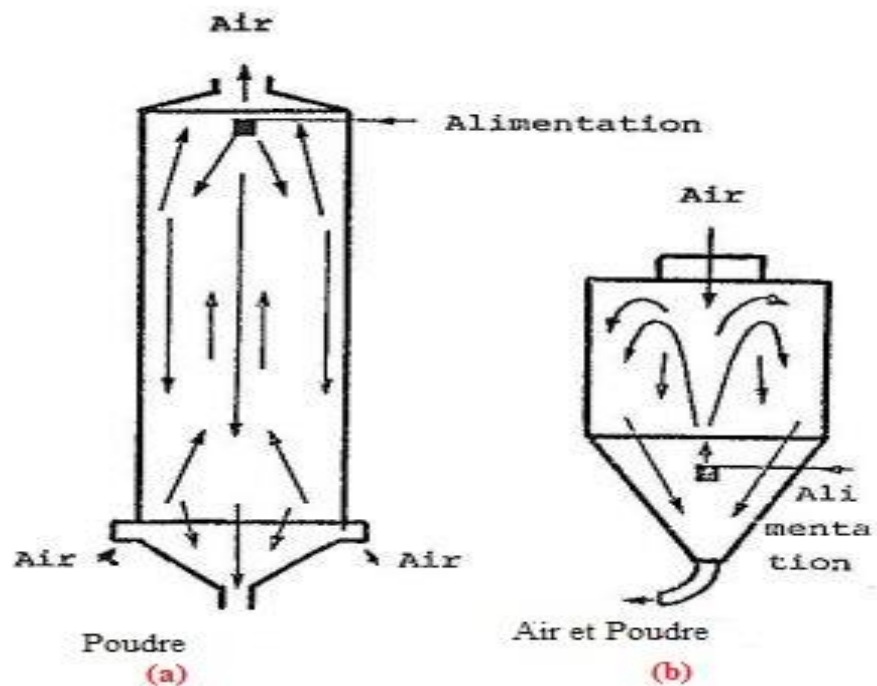


Figure 9 : chambre de séchage ; (a) à contre-courant, (b) à flux mixte

L'air doit être préfiltré et fourni par un ventilateur séparé à la salle du ventilateur/filtre/chauffage. Cette pièce doit être sous pression pour éviter l'entrée de l'air non filtré (Westergaad, 2010). Un filtre est généralement placé à l'entrée d'air afin de retenir les impuretés qui pourraient endommager l'atomiseur et qui peuvent influencer aussi sur la qualité du produit.

Dans le séchoir par pulvérisation, l'alimentation de l'atomiseur est assurée par une pompe d'alimentation, et son installation dépend du type d'atomiseur utilisé et en fonction des propriétés des matières premières (Nguyen, 2014 ; Anandharamakrishnan, 2017)

Des pompes à basse pression sont utilisées en combinaison avec des pulvérisateurs rotatifs et des buses bi-fluides. Les pompes à haute pression sont utilisées avec des buses à pression (Masters, 1985).

Les pompes péristaltiques sont le plus souvent utilisées pour le séchage par atomisation. Ces pompes sont appropriées pour traiter une alimentation visqueuse à faible débit et basse pression en combinaison avec des atomiseurs à roue rotative. D'autre part, les pompes à piston conviennent pour les applications à haute pression en combinaison avec des pulvérisateurs à buses à haute pression (Anandharamakrishnan, 2017).

L'atomisation est le cœur de l'opération du séchage et constitue le premier processus de transformation que subit l'aliment au cours du séchage. La forme, la structure, la vitesse et la distribution de la taille des gouttelettes ont une influence directe sur la taille et la nature des particules du produit final (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015).

L'objectif principal de l'atomisation est d'assurer une grande surface de séchage par transformation d'un liquide en un spray ou brouillard qui permet d'augmenter l'efficacité du transfert de chaleur et de matière (Westergaad, 2010; Tontul and Topuz, 2017; O'Sullivan *et al.*, 2019). Le taux d'évaporation est directement proportionnel à la surface des gouttelettes. Ainsi, il est hautement souhaitable d'obtenir une atomisation fine pour un fonctionnement plus efficace du sécheur par atomisation ; et c'est également critique pour déterminer les propriétés physiques des poudres résultantes telles que la densité apparente, la mouillabilité, la dispersibilité et la solubilité (Patel *et al.*, 2009; O'Sullivan *et al.*, 2019).

L'atomisation peut être réalisée par des atomiseurs rotatifs, des buses hydrauliques, des buses pneumatiques et des buses à ultrasons (voir la figure 10), (Chen and Mujumdar, 2008; Tontul and Topuz, 2017). Les plus utilisés sont les atomiseurs à roue rotative et les atomiseurs mono-fluides à buse sous pression, et les buses pneumatiques sont utilisées dans des applications très spéciales (Mujumdar, 2014).

Dans tout type d'atomisation, l'énergie est nécessaire pour disperser le liquide et créer des gouttelettes individuelles.

Les atomiseurs rotatifs ou centrifuges (figure 10, A), utilisent l'énergie d'une roue tournant à grande vitesse pour briser le flux du liquide en une pulvérisation de gouttelettes. Les atomiseurs rotatifs n'ont généralement pas de problèmes de blocage interne et peuvent fonctionner longtemps, sans intervention de l'opérateur, sous une faible pression d'alimentation (Westergaad, 2010; Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015).

Les atomiseurs rotatifs produisent de grandes quantités de particules fines, ce qui peut rendre nécessaire l'utilisation de filtres à manches. Les atomiseurs rotatifs sont connus pour leur capacité à gérer des débits élevés sans duplication de l'atomiseur. Ils produisent des poudres de faible densité apparente et à forte occlusion d'air (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015).

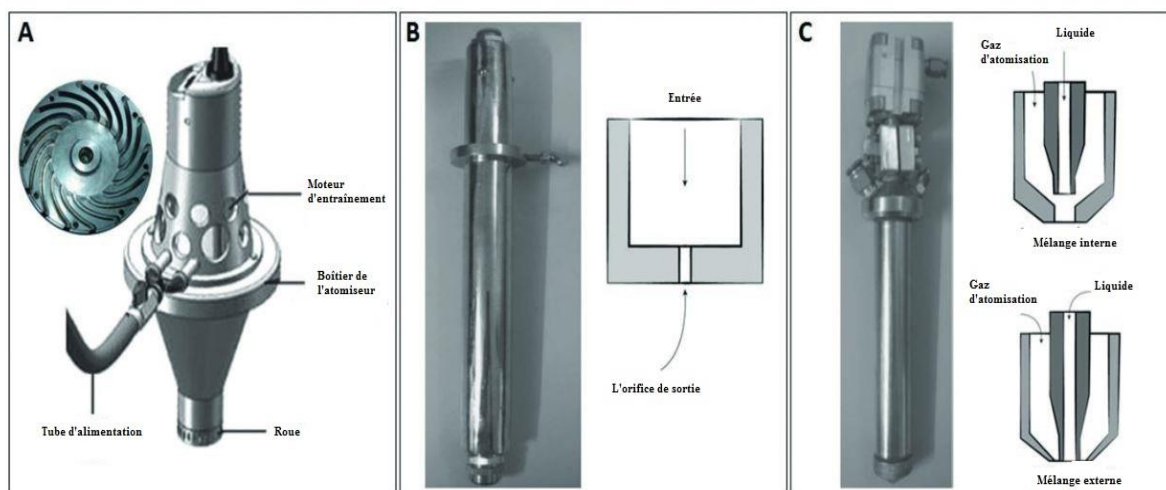


Figure 10 : différents atomiseurs utilisés dans le séchage par pulvérisation, (A) ; Atomiseur rotatif avec atomiseur à disque respectif en détail, (B) ; Atomiseur à buse hydraulique, (C) ; Atomiseur à buse pneumatique - buses à deux fluides interne et externe (Anandharamakrishnan, 2017; G. dos Santos *et al.*, 2018).

La fonction de base des buses à pression (figure 10,B) est de convertir l'énergie de pression fournie par la pompe haute pression en énergie cinétique (Westergaad, 2010) .Le produit sortant de l'orifice de la buse sous forme d'un film à grande vitesse se brise facilement en un jet de gouttelettes. Elles produisent généralement des poudres ayant une densité apparente élevée, avec de bonnes caractéristiques d'écoulement. En outre, à des débits élevés, les particules de poudre sont généralement moins homogènes et plus grossières que celles des atomiseurs rotatifs (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015).

Les buses pneumatiques (figure 10, C), sont également appelées buses bi-fluides car elles utilisent de l'air comprimé ou de la vapeur pour atomiser le fluide (Mujumdar, 2014). Concernant l'énergie disponible pour l'atomisation dans les atomiseurs bi-fluides, elle est indépendante du débit et de la pression du liquide (Westergaad, 2010).

La pulvérisation est assurée par des forces de frottement et de cisaillement élevé entre la surface du liquide et l'air comprimé ayant une vitesse élevée et produit une large gamme de tailles de gouttelettes. Les buses bi-fluides sont capables de traiter des aliments très visqueux. Ces atomiseurs produisent également un jet beaucoup plus fin et homogène par rapport aux buses à pression. Ces buses exercent un meilleur contrôle sur la taille des gouttelettes, néanmoins, elles entraînent une teneur élevée en air occlus dans les particules ; ce qui se traduit par une faible densité (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015).

L'atomiseur est généralement situé au centre supérieur de la chambre de séchage pour la plupart des opérations de séchage par atomisation (Chen and Mujumdar, 2008).

L'atomisation est régie par la théorie proposée par Ohnesorge en 1936, selon laquelle la désintégration du jet liquide émanant de l'atomiseur dépend de sa viscosité, de sa densité et de sa tension superficielle (Westergaad, 2010).

L'étape d'atomisation permet de contrôler la taille et la répartition des gouttelettes, leur trajectoire et leur vitesse, et donc de déterminer la taille finale des particules. Les atomiseurs les plus couramment utilisés pour le séchage du lait et des produits laitiers sont des buses rotatives et les atomiseurs à buse (Bhandari *et al.*, 2013; Anandharamakrishnan, 2017).

II.2.3 Système de récupération des poudres

La majorité des produits en poudre sort par le bas de la chambre de pulvérisation, l'étape de séparation du produit est terminée lorsque la poudre, entraînée dans le courant d'air de séchage, est récupérée par un précipitateur électrostatique, séparateur cyclonique et d'un filtre à manches (Chen and Mujumdar, 2008; Anandharamakrishnan, 2017). Le Cyclone, le filtre à poches et l'épurateur humide sont les plus utilisés dans l'industrie laitière (Westergaad, 2010).

II.3 Influence des paramètres opératoires sur la qualité des poudres

Le processus de séchage par pulvérisation est principalement influencé par plusieurs paramètres, liés aux caractéristiques du produit à sécher ou au sécheur (voir figure 11) (Patel, 2009; Keshani *et al.*, 2015; Pui and Lejaniya, 2022). Ces paramètres affectent les propriétés physiques et fonctionnelles des poudres séchées par pulvérisation, notamment, le rendement, la teneur en humidité, l'activité de l'eau, l'hygroscopicité, la solubilité et la densité apparente, etc (Mujumdar, 2014; Samsu and Mohamad Zahir, 2020; Baldelli *et al.*, 2022).

Le bon choix des paramètres opérationnels est la clé pour l'obtention de poudre de haute qualité nutritive et fonctionnelles ayant des caractéristiques spécifiques (Fernández-Pérez *et al.*, 2004; Pui and Lejaniya, 2022).

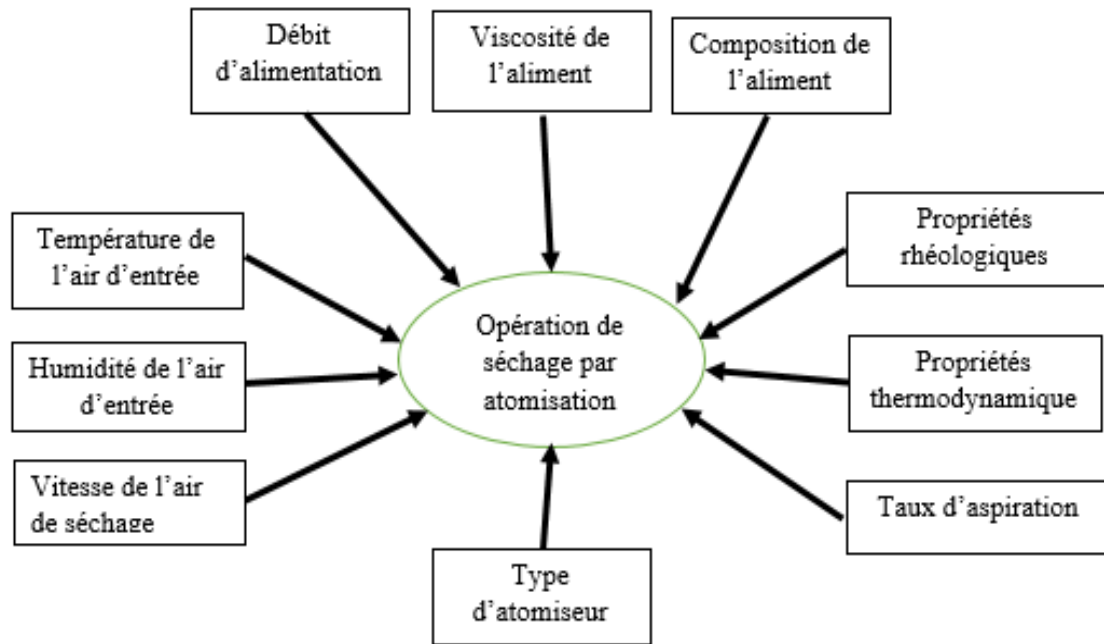


Figure 11 : Paramètres affectant le processus de séchage par atomisation (Keshani *et al.*, 2015)

II.3.1 Température de l'air d'entrée

La température de l'air d'entrée se réfère à la température du gaz de séchage chauffé, mesurée juste avant son entrée dans la chambre de séchage. Le choix de la température de l'air d'entrée doit être fait en fonction des propriétés de la matière première (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015; Dos Santos *et al.*, 2018). Plus la température de l'air d'entrée est élevée, plus l'évaporation est importante (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015).

La température de l'air d'entrée peut également affecter l'hygroscopicité des poudres alimentaires (Phisut, 2012). Les tailles des particules sont importantes lors du séchage des gouttelettes à une température élevée et ce suite à la formation rapide de la croûte à la surface des particules (Samsu and Mohamad Zahir, 2020). La température de l'air d'entrée affecte également le taux de récupération de l'extrait sec dans le cyclone (Largo Ávila *et al.*, 2015; Duangchuen *et al.*, 2020).

II.3.2 Température de l'air de sortie

La température de l'air de sortie résulte de tous les échanges de chaleur et de masse à l'intérieur de la chambre de séchage (D. Santos *et al.*, 2018). La température de l'air de sortie contrôle la teneur en humidité finale de la poudre (Bringas-Lantigua *et al.*, 2016). De plus, la température de sortie est le facteur clé pendant le processus de séchage par atomisation pour

déterminer la qualité des matériaux thermosensibles (Singh *et al.*, 2014) ; elle n'est pas contrôlée par l'opérateur dans la plus part des sécheurs. Cependant, elle varie en fonction des paramètres du sécheur tels que la température d'entrée, le débit de l'air de séchage et le débit d'alimentation (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015; D. Santos *et al.*, 2018).

Il existe une corrélation entre la température de l'air de sortie et le taux d'humidité finale ainsi que la morphologie des particules du produit final (Maas *et al.*, 2011). Une relation inversement proportionnelle a été constatée entre la température de sortie et la teneur en eau des poudres (Nguyen, 2014). La température de l'air à la sortie du séchage est le principal paramètre qui influence l'activité de l'eau, la température de transition vitreuse et la masse volumique des poudres de lait (ZOUARI, 2019).

Il est nécessaire de signaler que l'écart de température entre la température d'entrée et la température de sortie dans un processus de séchage par atomisation est important (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015). La capacité de la chambre de séchage est proportionnelle à la différence de température de l'air d'entrée et de sortie, Cependant, il y a certaines limites à prendre en compte. Pour de nombreux produits, une augmentation de la température d'entrée provoque de sérieux dommages au produit et une diminution de la température de l'air de sortie entraîne une augmentation de la teneur en humidité du produit séché (Mujumdar, 2014).

II.3.3 Débit et concentration de l'aliment à sécher

Le débit d'alimentation est un paramètre très important pour contrôler la température de l'air de sortie. Il faut augmenter le débit d'alimentation pour diminuer la température de sortie de l'air dans le cas de la température de l'air d'entrée élevée (Nguyen, 2014). En général le débit d'alimentation a un effet négatif sur la teneur en humidité du produit final. Plus le débit est élevé, plus la taille des gouttelettes formées est grande et plus le temps de contact entre les gouttelettes et l'air de séchage est court (Samsu and Mohamad Zahir, 2020).

Un débit d'alimentation trop élevé peut influencer négativement les propriétés de la poudre. De plus il réduit le rendement de la poudre et entraîne une augmentation de la charge de séchage et une plus grande quantité de particules non séchées dans la chambre de séchage (Banožić *et al.*, 2021). Néanmoins, un débit d'alimentation faible peut entraîner une inefficacité énergétique du processus.

Une teneur élevée de matière sèche dans un liquide a tendance à avoir une influence sur le taux d'évaporation pendant la formation des particules dans la chambre de séchage ; ce qui

se traduit généralement par le grossissement de la taille des particules (Vickovic *et al.*, 2023). Aussi, une viscosité élevée du fluide à sécher induit une augmentation de la masse volumique apparente et de la mouillabilité de la poudre finale et une diminution de sa solubilité (Tanguy-Sai, 2018).

II.3.4 Agents de séchage

Plusieurs études démontrent l'intérêt d'utiliser des supports de séchage pour augmenter le rendement du séchage ou améliorer les propriétés technofonctionnelles ou fonctionnelles des poudres alimentaires (Adetoro *et al.*, 2020; Etzbach *et al.*, 2020; Ahad *et al.*, 2022). Les agents le plus utilisés sont les polysaccharides notamment, le maltodextrine, l'amidon et les gommés, ainsi que les protéines (Mahdi Jafari *et al.*, 2019; Duangchuen *et al.*, 2020; Himmetagaoglu *et al.*, 2020; Banožić *et al.*, 2021; Sobulska and Zbicinski, 2021).

II.4 Propriétés des poudres alimentaires

Dans l'industrie agro-alimentaire les poudres alimentaires sont utilisées, en tant qu'ingrédients et/ou matières premières entrant dans la fabrication des aliments (Barbosa-Cánovas, 2005). Les poudres séchées par atomisation ont de bonnes caractéristiques de dispersion et sont faciles à incorporer dans les produits alimentaires (Pui and Lejaniya, 2022). La réhydratation de la poudre est essentielle, car la poudre doit être entièrement dissoute afin d'exprimer ses propriétés fonctionnelles et de respecter la composition chimique et la teneur en nutriments spécifiées dans le produit final. Les propriétés d'hydratation des poudres sont liées aux paramètres suivants, mouillabilité, coulabilité, dispersibilité et solubilité (Andersson, 2020). La figure 12 présente les différentes étapes d'hydratations citées auparavant.

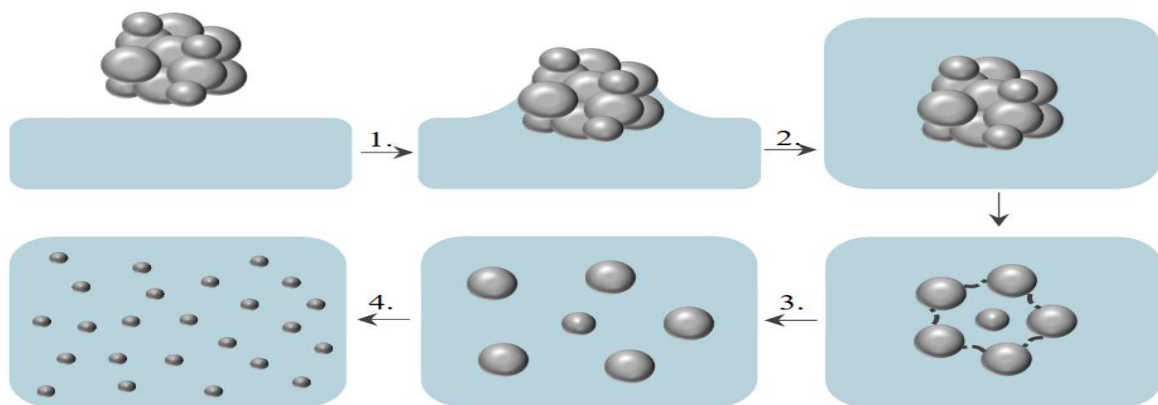


Figure 12 : Etapes de réhydratation de la poudre de lactosérum agglomérée. 1. Mouillage, 2. Coulée, 3. Désintégration et 4. Dissolution ((Forny *et al.*, 2011; Andersson, 2020).

II.4.1 Propriétés d'hydratation des poudres

II.4.1.1 Dispersibilité

La dispersibilité est une mesure de la facilité avec laquelle la poudre se décompose en particules individuelles dans l'eau par agitation douce (Ji *et al.*, 2016; Ding *et al.*, 2020), qui peuvent traverser un tamis dont le diamètre des pores est défini préalablement (Westergaard, 2010; Schuck, 2011). Elle est exprimée en pourcentage (g/100g) des solides dispersées (Sharma *et al.*, 2012).

La dispersibilité est proportionnelle à la taille des particules, contrairement aux pourcentages des particules fines (inférieures à 90 μm). Une mauvaise agglomération est due à une petite taille des particules, ou une quantité excessive de particules fines inférieures à 125 μm , qui peut entraîner la formation de gros grumeaux qui se déposent au fond d'un récipient (Fang *et al.*, 2007).

La teneur en protéines, le profil granulométrique, la température de l'air de sortie, et les conditions de reconstitution sont des facteurs influençant la dispersibilité des poudres (Schuck, 2011). Le taux de matière grasse a une influence sur la dispersibilité des poudres (Sharma *et al.*, 2012). Une augmentation de 6% du taux de matière grasse peut diminuer le taux de poudre dispersée de 30%. De même, une augmentation de 5% du poids de la maltodextrine entraîne une baisse de 5% de la dispersibilité (Baldelli *et al.*, 2022).

II.4.1.2 Solubilité

La solubilité d'une poudre est sa capacité à se dissoudre dans l'eau, généralement, utilisée pour décrire le processus complet d'hydratation. C'est une propriété de reconstitution cruciale qui influence l'utilisation potentielle des poudres comme ingrédient fonctionnel et son acceptation par les consommateurs (Schuck, *et al.*, 2012; Nani and Krishnaswamy, 2022). L'indice de solubilité (g/100g) est un autre terme utilisé dans l'industrie laitière afin de décrire les différentes combinaisons des propriétés de reconstitution du lait en poudre (Fang *et al.*, 2007). De plus la solubilité des poudres reflète la dénaturation des protéines lors du séchage par atomisation (Fang *et al.*, 2012).

Une faible solubilité a été signalée au lait en poudre en raison de la formation de réseaux de protéines réticulées à la surface de la poudre, empêchant la pénétration de l'eau (Anema *et al.*, 2006).

La solubilité des poudres est influencée par plusieurs facteurs à savoir, la viscosité, la température de l'air d'entrée et de sortie, la composition biochimique des poudres, la structure des protéines, la taille des particules et les conditions de reconstitution (Schuck, 2011).

La solubilité instantanée est directement liée à la microstructure de la poudre. Une surface amorphe plus importante signifie que la poudre aura une plus grande solubilité dans l'eau ; à l'inverse, la présence des particules à l'état cristallin entraîne une solubilité plus faible (Caparino *et al.*, 2012; Largo Ávila *et al.*, 2015).

Les poudres séchées par atomisation ayant des diamètres relativement plus petits présentent souvent une solubilité élevée (93.69%) dans l'eau (Baldelli *et al.*, 2022).

II.4.1.3 Mouillabilité

La mouillabilité est définie comme la capacité d'une poudre à être mouillée avec l'eau à une température donnée (Westergaad, 2010). L'indice de mouillabilité est exprimé en termes de temps (en seconde) nécessaire pour qu'une quantité donnée de poudre soit pénétrée la surface libre de l'eau au repos (Schuck, *et al.*, 2012).

La mouillabilité des poudres est favorisée par la présence de molécules hydrophiles à la surface des particules, notamment, les hydrates de carbone ou les agents tensioactifs (Ji *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2020; Fournaise *et al.*, 2021). En revanche, une couverture de surface élevée des particules en protéines hydrophobes ou en lipides présente une vitesse de mouillage plus lente (Bhandari *et al.*, 2013; Silva and O'Mahony, 2017; Cenini *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2020). Il faut avoir moins de 0.03 % de matière grasse à la surface des particules des poudres du lait écrémé pour avoir une bonne mouillabilité (Westergaad, 2010).

Il a été constaté que le transfert d'eau dans les particules de poudre de protéines du lait concentré (CPL) est inhibé lorsque la concentration en protéines augmente dans les poudres, ce qui entraîne un mouillage plus lent (Vos *et al.*, 2016). Aussi des études antérieures ont montré que le mouillage des poudres est plus efficace pour les grosses particules (plus de 90 µm) ou les poudres agglomérées (Schuck, Dolivet, *et al.*, 2012; Fournaise *et al.*, 2020, 2021).

La présence de particules plus petites, qui ont une plus grande surface, pourrait entraîner de moins bonnes propriétés d'instantanéisation et une plus grande susceptibilité aux réactions de dégradation (Braga *et al.*, 2018).

II.4.1.4 Instantaneisation

Additivement aux trois attributs de l'hydratation citées auparavant, l'immersibilité est souvent exploitée pour définir les aliments instantanés en poudre (Shittu and Lawal, 2007). Deux étapes supplémentaires sont effectuées afin d'améliorer les propriétés d'instantaneisation d'une poudre, à savoir l'agglomération et la lécithination (Boiarkina *et al.*, 2016)

L'agglomération est assurée par le contact de deux ou plusieurs particules après réhumidification qui donne des granules avec des tailles et de structure favorisant leur hydratation rapide. L'agglomération par lit fluidisé est la plus utilisée. Aussi, la lécithine, est ajoutée pour améliorer la mouillabilité de la poudre (Shittu and Lawal, 2007; Boiarkina *et al.*, 2016).

II.4.2 Propriétés physiques des poudres alimentaires

II.4.2.1 Coulabilité

La fluidité d'une poudre peut être décrite comme les comportements d'une masse de particules interagissant entre elles (Sharma *et al.*, 2012). La fluidité est parmi les indicateurs de base de la qualité du lait en poudre (Pugliese *et al.*, 2017). Le domaine de la fluidité des poudres, au sens large du terme, n'est pas encore bien maîtrisé (Juliano and Barbosa-Cánovas, 2010).

La masse volumique apparente, tassée et leurs rapports (par exemple, le rapport de Hausner et l'indice de Carr) sont utilisés comme descripteurs qualitatifs de la fluidité des poudres alimentaires (Pugliese *et al.*, 2017). Le tableau 6, présente les caractéristiques de poudre en utilisant les paramètres citées précédemment.

La fluidité dépend généralement des propriétés physiques de la poudre, telles que la taille et la forme des particules, la structure de surface, la densité des particules, la densité apparente, la teneur en humidité et la teneur en matière grasse (Kim *et al.*, 2005). En général, une bonne fluidité est obtenue à partir de grosses particule plus denses (Westergaad, 2010).

Tableau 6 : Classification des poudres selon leurs indices d'écoulement (Lebrun *et al.*, 2012)

Ecoulement	Indice de Carr (%)	Ratio de Hausner
Excellent	0-10	1-1.11
Bien	11-15	1.12-1.18
Acceptable	16-20	1.19-1.25
Passable	21-25	1.26-1.34
Faible	26-31	1.35-1.45
Très faible	32-37	1.46-1.59
Extrêmement faible	>38	>1.60

II.4.2.2 Densité apparente et tassée

La densité apparente ou densité d'emballages est une évaluation de la masse des poudres qui occupe un espace précis (Westergaad, 2010; Sharma *et al.*, 2012). Elle varie selon la densité, la porosité interne et la disposition des particules dans le récipient (Sharma *et al.*, 2012), ainsi que le type de séchage utilisé (Sulieman *et al.*, 2014), et la teneur en matière grasse (Erbay *et al.*, 2015). De plus, une teneur plus faible en solides totaux dans la masse d'alimentation produit une densité plus faible (Largo Ávila *et al.*, 2015). La densité apparente et tassée augmentent avec la teneur en lactose (Hogan and O'Callaghan, 2010).

La densité apparente est influencée par les paramètres du sécheur (Singh *et al.*, 2014). C'est une propriété importante sur le plan économique, commercial et fonctionnel. Une densité apparente élevée est souhaitable pour réduire le coût d'expédition et d'emballage. En outre, elle permet d'économiser le matériel d'emballage et les capacités de stockage (Westergaad, 2010).

Une poudre dont la densité apparente est élevée indique qu'il y a peu d'air entre les particules, ce qui réduit l'espace de stockage requis. En revanche, une poudre à faible densité apparente nécessite un espace de stockage plus important (Duangchuen *et al.*, 2020).

II.4.2.3 Couleur

La couleur du produit final lors de la transformation des aliments est influencée par la couleur du liquide d'alimentation et les composants issus de la réaction de Maillard produite lors du séchage. Elle joue un rôle important dans l'acceptation du produit par le consommateur (Pugliese *et al.*, 2017; Domingos *et al.*, 2018; Nani and Krishnaswamy, 2022).

II.4.2.4 Hygroscopicité

L'hygroscopicité d'une poudre est une propriété physique définie comme un gain de poids en eau lors de son séjour dans une enceinte ayant une humidité donnée (80% HR à 20°C) (Westergaad, 2010). L'hygroscopie des poudres alimentaires est influencé par le type du support de séchage utilisé (Santana *et al.*, 2017; Adetoro *et al.*, 2020). L'utilisation d'isolats de protéines du lactosérum comme un support de séchage contribue à une hygroscopicité plus faible que celle des gommages arabiques (Ahad *et al.*, 2021).

Une température plus élevée de l'air d'entrée favorise facilement l'absorption de l'eau, ce qui augmente l'hygroscopicité du poudre (Suhag and Nanda, 2016; Ahad *et al.*, 2021). L'état amorphe du lactose est plus hygroscopique que la forme cristalline et absorbe facilement l'eau

dans un environnement humide, créant ainsi des poudres collantes qui s'agglomèrent facilement et présentent une mauvaise stabilité au stockage (Nijdam *et al.*, 2008; Nielsen *et al.*, 2021).

II.4.2.5 Degré d'agglomération

Le mottage ou le degré d'agglomération est un processus indésirable où l'agglomération spontanée de particules individuelles forme des blocs cohérents appelés grumeaux de taille et dureté différentes. L'agglomération est un problème dans de nombreuses usines de manipulation de poudres, ayant des effets négatifs et irréversibles sur la qualité de la poudre et peut détériorer gravement les propriétés de la poudre et entraîne toujours des pertes économiques importantes (Carpin *et al.*, 2017; Kamyabi *et al.*, 2017). L'agglomération est influencée par la teneur en eau et la taille des particules de la poudre (Modugno *et al.*, 2015).

II.4.2.6 Température de transition vitreuse (Tg)

La transition vitreuse est une propriété thermo-physique importante des polymères amorphes (G. dos Santos *et al.*, 2018). Cette transition est une altération physique indésirable dans les poudres laitières. Afin de limiter cette altération, il est nécessaire de connaître la température de transition vitreuse (Tg) des poudres (Carter and Schmidt, 2012). Au-dessus de la Tg, le matériau passe d'un état vitreux rigide à un état plus caoutchouteux (G. dos Santos *et al.*, 2018).

Le problème de l'adhésivité et de l'agglomération des poudres est principalement dû à une faible température de transition vitreuse (Tg) des sucres à faible poids moléculaire, essentiellement le saccharose, le glucose et le fructose (Goula and Adamopoulos, 2010). Le taux de dépôt du lait écrémé est important, en raison de sa température de transition vitreuse plus basse que celle de la maltodextrine (Jamil Ur Rahman *et al.*, 2021).

Afin d'éviter le problème de l'adhésivité qui influence négativement le rendement du séchoir lors du séchage des produits riche en sucre, il est important de maintenir la température de la goutte/particule au-dessous de la température de transition vitreuse (Tg +20 °C) (Fang *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2018; Sobulska and Zbicinski, 2021).

La Tg n'est pas affectée par les protéines du lactosérum mais influencée positivement par la maltodextrine (Fang *et al.*, 2012), aussi, elle est influencée par la température de sortie de produit (Vickovic *et al.*, 2022) et la teneur en eau d'une poudre (Hogan and O'Callaghan, 2010).

Une concentration d'acide lactique élevée dans les poudres séchées par pulvérisation influence négativement la température de transition vitreuse (Vickovic *et al.*, 2023).

II.4.2.7 Morphologie d'une poudre

Lors du séchage des produits alimentaires par pulvérisation, diverses morphologies des particules peuvent être constatées. Les particules de caséine en poudre sont des sphères ridées, les particules du lactose sont partiellement cristallisées et fragmentées, les particules des maltodextrine sont fragmentées et les particules de protéines de lactosérum sont des sphères creuses. Les solutions plus complexes comme le lait écrémé et le lait entier forment des particules sphériques et agglomérées poreuses (Both, 2019). La figure 13, montre diverses morphologies des particules séchées par atomisation.

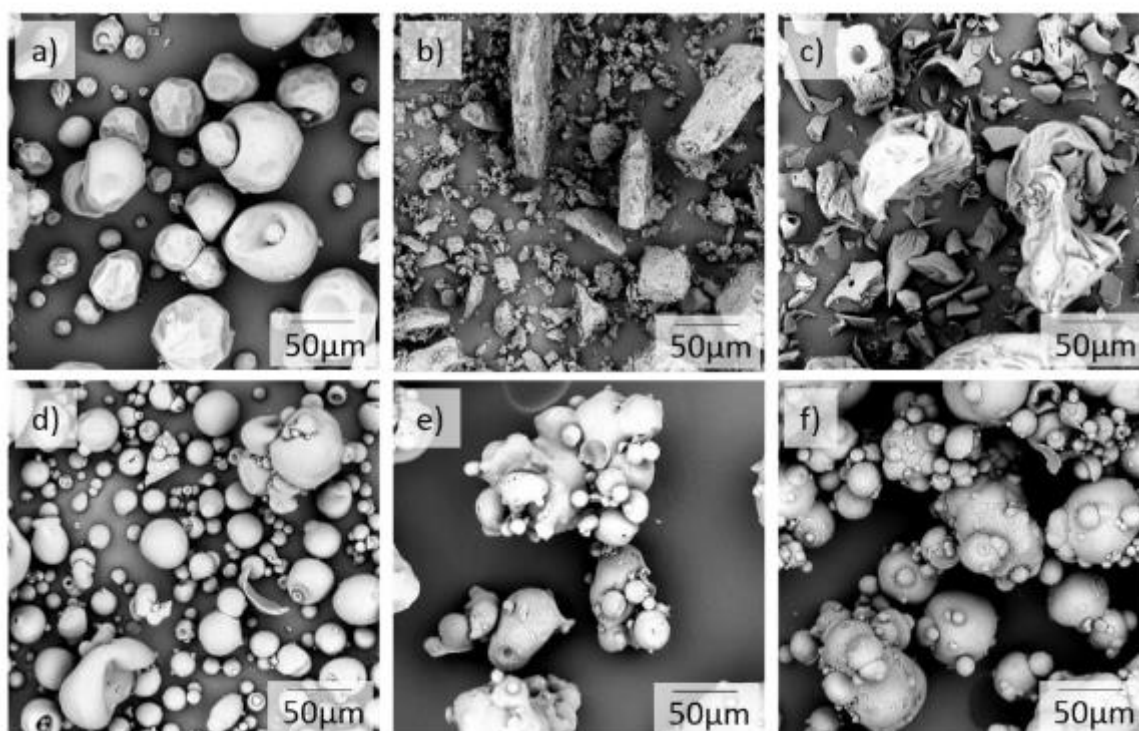


Figure 13 : Morphologie de poudres industrielles séchées, avec a) caséine micellaire, b) lactose, c) maltodextrine DE12, d) protéines de lactosérum, e) lait écrémé, f) lait entier (Both, 2019)

II.4.2.8 Cristallinité d'une poudre

La mobilité moléculaire dans les solides amorphes est importante pour déterminer sa stabilité physique, ainsi cette forme changera en fonction de la différence entre la température (T) et la température de transition vitreuse (T_g). Dans les systèmes vitreux, la mobilité et la diffusion moléculaires sont pratiquement inexistantes (Burin *et al.*, 2000). L'état amorphe d'un matériau fait référence à sa structure moléculaire aléatoire et désordonnée, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de définir la position exacte des molécules constitutives à un moment donné ne

peuvent être définies. Les états amorphes comprennent les états gazeux et liquides des matériaux, alors que l'état cristallin est hautement organisé (Roos, 2010).

II.5 Séchage du lactosérum

Le séchage du lactosérum acide est déconseillé car, il est riche en acide lactique qui provoque un dépôt énorme dans la tour de séchage et la corrosion des matériaux de ce dernier (Nani and Krishnaswamy, 2022). Lorsque les acides lactiques sont éliminés de lactosérum acide, on constate une diminution du dépôt de poudre du lactosérum (voir figure 14) (Bédas *et al.*, 2017). Devant cet état, le séchage du lactosérum acide est subordonné au traitement préliminaire qui demandera un coût d'investissement supplémentaire par rapport au séchage de lactosérum doux ; ce qui justifie la prédominance de ce dernier sur le marché.

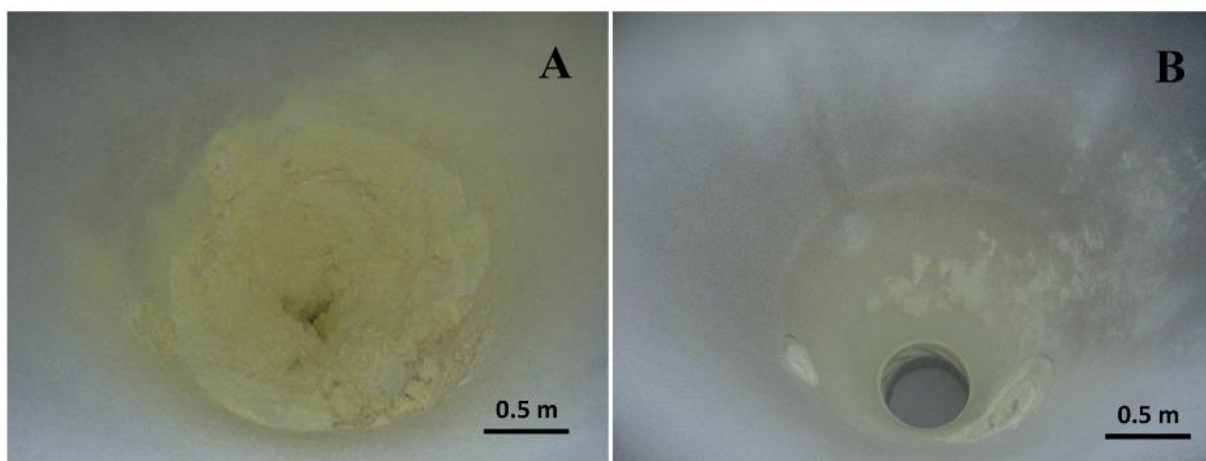


Figure 14 : Fond de la tour de séchage après la production de poudre de lactosérum acide (A) et de poudre de lactosérum acide nano filtré (B) (Bédas *et al.*, 2017).

II.6. Avantages et inconvénients du séchage par atomisation

Le séchage par atomisation est la méthode couramment utilisée dans l'industrie alimentaire pour la micro-encapsulation en raison de la faiblesse des dépenses opérationnelles par rapport aux autres méthodes de séchage. Plus précisément, le séchage par atomisation est huit fois plus économique que la lyophilisation et quatre fois plus économique que le séchage sous vide (Samsu and Mohamad Zahir, 2020).

Le séchage par atomisation est considéré comme un procédé technologique puissant, car, il permet de produire des particules fluides de taille bien définie. Il s'agit d'un procédé de fabrication rentable capable de produire des particules séchées dans une gamme submicronique à micronique. La possibilité d'utiliser différentes matières premières, la productivité élevée et diverses applications de cette technique la rendent de plus en plus attrayante pour la

communauté scientifique (Anandharamakrishnan and Ishwarya, 2015; G. dos Santos *et al.*, 2018).

Le séchage par atomisation est une principale méthode de séchage des matériaux fluides sensibles à la chaleur, tels que les aliments et les matériaux biologiques (Maciel *et al.*, 2014; Mujumdar, 2014; Lavari *et al.*, 2017). Autre que ces matériaux, le séchage par atomisation permet la micro-encapsulation de certaines substances bioactifs (Arepally and Goswami, 2019; Kamal *et al.*, 2019; Ćujić-Nikolić *et al.*, 2019).

Néanmoins, le coût d'investissement initial est assez élevé. Il est difficile de récupérer 100% du produit sec, et le dépôt de poudre sur la chambre de séchage peut entraîner une dégradation du produit, voire un risque d'incendie.

L'opération est énergivore ; ce qui constitue un frein à son développement pour les produits de faible valeur ajoutée (Mujumdar, 2014).

Matériel et Méthodes

Partie Expérimentale

Matériel et Méthodes

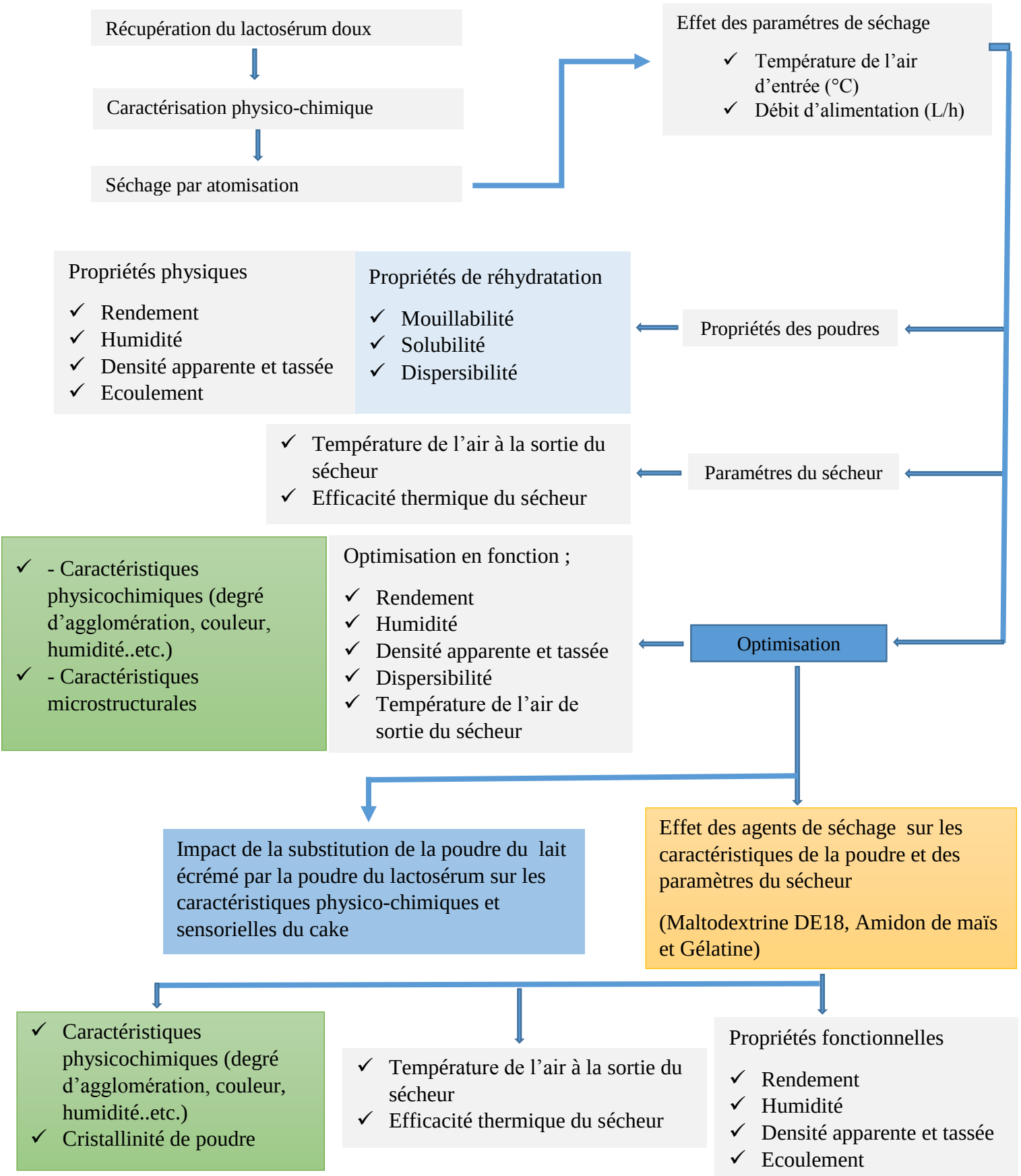


Figure 15 : schéma récapitulatif du protocole de recherche de la thèse

Pour rappel, le but de ce travail était de récupérer par atomisation des constituants originaires du lait qui habituellement se retrouvent dans les effluents (lactosérum), et comme un deuxième objectif, l'incorporation de la poudre obtenue dans la fabrication du cake en substituts de poudre du lait écrémé (PLE).

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons réparti notre travail en trois parties, en premier lieu, nous procéderons à l'optimisation des conditions du séchage afin d'obtenir une poudre de bonne qualité avec un rendement acceptable. En deuxième lieu, nous étudierons l'influence des agents de séchage sur les conditions du séchage et les propriétés des poudres de lactosérum et enfin, la poudre du lactosérum obtenue sera utilisée pour étudier l'effet de la substitution de poudre du lait écrémé dans la fabrication du cake.

Le choix du cake comme matrice alimentaire est justifié par le fait que la poudre de lait écrémé est un ingrédient principal dans sa formulation, de plus le cake est un produit représentatif des produits céréaliers et sa mise en œuvre est simple.

L'expérimentation de ce travail a été effectuée entre deux universités : l'université Constantine 3 Saleh Boubnider (Hall de pilote de la faculté de génie des procédés), dans laquelle, nous avons procédé à l'opération de séchage par atomisation pendant la période allant de novembre 2019 à juin 2021, et l'université frère Mentouri Constantine 1, où la partie de la substitution de poudre du lait écrémé par la poudre du lactosérum, a été réalisée.

La figure, 15, résume le protocole global de la réalisation de la partie pratique de la thèse.

I Matières premières

I. 1 Lactosérum doux : obtenue par coagulation enzymatique, issu de la fabrication du fromage camembert provient de l'unité GIPLAIT-Numidia (Constantine-Algérie). Il a été recueilli proprement dans des bidons en plastiques de 5 litre, transporté par véhicule personnelle (~ 10 minutes du trajet) au laboratoire pédagogique de l'institut de la nutrition, de l'alimentation et de technologies agro-alimentaire (INATAA), et ce pour préserver son état de fraîcheur, puis repartit dans des bouteilles en plastique de 1.5 L (pour faciliter la décongélation) et conservé à -18 °C dans un congélateur pour une durée maximale de 72 h. La décongélation est faite le même jour que l'opération de séchage par atomisation à une température de 37 °C dans un bain marie.

La récupération du lactosérum a été effectuée dans deux périodes : de novembre 2019 jusqu'à mars 2020 et ce pour la réalisation la première partie, et de mars 2021 jusqu'à juin 2021 pour la réalisation de la deuxième partie (effets des agents de séchage).

I.2 Amidon de maïs : de marque NISASTA, fabriqué en Turquie (conditionné dans des sacs de 25 Kg) est acheté de Bejaia en mars 2021.

I.3 Maltodextrine DE18 : fabriqué en Turquie (Lot n° ND18P00252005-360), importé par SEBAA INDUSTRY, Annaba, Algérie, dont la date de fabrication est le 05/2020, et la date de péremption est le 05/2022.

I.4 Gélatine bovine : produite en Egypte, acheté de Bejaia en mars 2021.

I.5 Farine (T55) : farine de blé tendre de la marque MAMI (Lot n° 0028A1), conditionnée dans des sacs de 5 kg, produite à Blida, Algérie.

I.6 Sucre blanc raffiné (Skor) : produit par Cevital, Algérie, (acheté dans une supérette algérienne en décembre 2022).

I.7 Poudre du lait écrémé (0 % MG) : originaire de l'Irlande du nord, fourni par l'entreprise Candia, porte le numéro H.316, dont la date de fabrication est le 25/10/ 2021 et la date limite de consommation est le 25/10/2023 (voir sa caractérisation en annexe n° 1)

I.8 Œufs entiers frais : acheté du marché algérien en décembre 2022, et conserver dans un réfrigérateur (4 à 6 °C).

I.9 Huile végétale (Elio) : 100 % soja, produite par Cevital, Algérie (achetée dans une supérette algérienne, en décembre 2022).

I.10 Levure chimique (Nouara) : produite par la S.A.R.L SIPADES, Algérie, conditionnée dans des sachets de 10 g, achetée dans une supérette algérienne en décembre 2022. Elle est composée de : pyrophosphate de sodium, bicarbonate de sodium et amidon de maïs.

I.11 Poudre de lactosérum :

- Dans la première partie, nous avons exploité la poudre de lactosérum doux de la marque MAYBI, Turquie (caractérisation en annexe n° 2). Cette poudre a servi comme témoin de comparaison de microstructure avec la poudre obtenue dans cette étude.
- Dans la troisième partie (substitution de la poudre du lait écrémé), nous avons utilisé la poudre obtenue dans cette étude après l'optimisation.

I-12 Eau distillé

II. Caractérisation physico-chimique de lactosérum doux

Les analyses physico-chimiques de lactosérum doux (liquide) et des poudres de lactosérum obtenues, ainsi que les propriétés d'hydratations de ces dernières ont été effectuées (en triplicata) au sein des laboratoires de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.), du laboratoire de Génie Agro-Alimentaire (GENIAAL) et des laboratoires pédagogiques.

II.1. Mesure du pH et de l'acidité titrable

Le pH et l'acidité titrable du lactosérum doux, de la poudre du lactosérum et de la poudre du lait écrémé sont déterminés selon le protocole décrit par Chegini *et al.*, (2014). Une quantité de 6 g de la poudre du lactosérum ont été dispersées et dissous dans 100 ml d'eau distillée, puis agités doucement. Le tout a été reposé pendant environ 1 h.

Le pH reflète la concentration d'ions H^+ dans l'eau, ce qui donne une information sur son état de conservation vis-à-vis des altérations probables par les bactéries lactiques.

L'acidité est déterminée par le dosage de l'acide lactique à l'aide de l'hydroxyde de sodium (NaOH) (N/9) en présence d'un indicateur coloré. L'acidité titrable a été calculée en utilisant l'équation suivante :

$$AT (\%) = \frac{v * N * 90 * 100}{V * 1000} \quad (03)$$

Dont v ; volume de NaOH titré ;

N : normalité de NaOH ;

V : volume de la solution en ml utilisé.

II.2 Détermination de l'extrait sec total (EST)

Selon la norme NF V04-282 AFNOR (1980), l'extrait sec total a été déterminé. Un volume connue (3 ml) du lactosérum est séché dans une étuve réglée à $103 \pm 2^\circ C$ jusqu'à l'évaporation complète de l'eau (environ 24 heures), et le poids du résidu a été utilisé pour déterminer la teneur totale en solides. L'extrait sec total est exprimé en pourcentage ou en grammes par litre de lactosérum. Il est obtenu par la formule suivante :

$$EST (\%) = 100 - H\% \quad (04)$$

Dont H : Taux d'humidité

II.3 Détermination de la teneur en matière grasse (méthode de Gerber)

Le principe de la méthode de Gerber est basé sur la séparation de la matière grasse du lactosérum par centrifugation dans un butyromètre, après la digestion des protéines par l'acide sulfurique concentré favorisée par l'addition de l'alcool isoamylique (AFNOR NF 04-210, 1980).

Une quantité de 10 ml de l'acide sulfurique est introduite dans le butyromètre, suivi par l'addition de 11 ml de lactosérum ou 2.5 g de poudre du lactosérum reconstituées. Un volume de 1 ml d'alcool iso amylique est versé à la surface du lactosérum sans mouiller le col du butyromètre ni mélanger les liquides. Après une centrifugation pendant une durée de 5 minutes à une vitesse de 1200 tr/min, le butyromètre est placé dans un bain marie à 65 °C, pour favoriser la séparation entre les phases. Le taux de matière grasse est lu directement sur le butyromètre.

II.4 Dosage des cendres

La détermination des cendres est réalisée par incinération de l'échantillon à une température de 525 °C ± 25 °C (Bédas *et al.*, 2017). Le taux de cendres de l'échantillon est exprimé comme suit :

$$Teneur\ en\ cendre\ (\%) = \frac{a-b}{c-b} * 100 \quad (05)$$

Dont, a : poids du creuset et de l'échantillon sec

b : poids du creuset

c : poids de l'échantillon et du creuset

II.5 Dosage des protéines

Le dosage des protéines du lactosérum a été déterminé par la méthode de Bradford se basant sur le principe de la liaison des protéines au bleu de Coomassie (Bradford, 1976). Le réactif de Bradford se caractérise à l'état libre par une couleur rouge avec un maximum d'absorption à 465 nm. Après la formation du complexe au niveau des chaînes latérales basiques et aromatiques des acides aminés entre le colorant et les protéines, ce réactif prend une teinte bleue avec un maximum d'absorption à 595 nm, ainsi l'intensité de cette teinte est proportionnelle à la quantité de protéines présente dans l'échantillon. Afin de déterminer la concentration en protéine, une courbe d'étalonnage par l'albumine sérique bovine (BSA) a été utilisée (voir annexe 3).

III Processus du séchage

Le séchage du lactosérum a été réalisé dans un séchoir à pulvérisation à l'échelle pilote (modèle MP314, DALTALEB, France), avec une tour d'atomisation en inox (diamètre 1,1 m, hauteur 2 m avec base conique) et il est muni d'une cuve d'alimentation, d'un réchauffeur et d'un support de coffret électrique.

Le liquide est alimenté sous pression, le contact du produit et l'air du séchage est soumis à un écoulement contre-courant à phase inverse (figure16). La pulvérisation de la suspension dans la chambre de séchage est assurée par une Buse bi-fluide d'injection d'air et de liquide. Le processus est initié en pulvérisant 5 L de l'eau distillée pour vérifier la performance de la buse et permettre d'atteindre l'état d'équilibre du sécheur.

Le lactosérum décongelé à une température de 37 °C (température de lactosérum après son expulsion par le coagulum), filtré par mousseline pour éliminer les suspensions des caséines restantes après l'égouttage de coagulum. Il a été séché par atomisation selon un plan d'expérience à des températures comprises entre 150 et 210°C, avec un débit d'alimentation du produit compris entre 2 et 7 L/h. Ces deux paramètres ont été utilisés comme variables indépendantes pour l'optimisation du processus.

La température du produit a été maintenue à 37 °C, le débit d'air de séchage a été fixé à 250 m³/h, et le débit d'air d'injection à la buse a été maintenu à 300 L/h.

Les conditions du fonctionnement du sécheur par atomisation ont été choisies suite aux essais préliminaires.

Les poudres obtenues ont été conservées dans des boîtes en verre hermétiquement fermées à température ambiante pour des analyses ultérieures.

III.1 Effets des conditions du séchage

Suite à des essais préliminaires et des données bibliographiques sur l'influence des paramètres du séchage sur les propriétés de la poudre, nous avons fixé deux paramètres essentiels influençant la qualité du produit, à savoir, la température de l'air d'entrée et le débit d'alimentation.

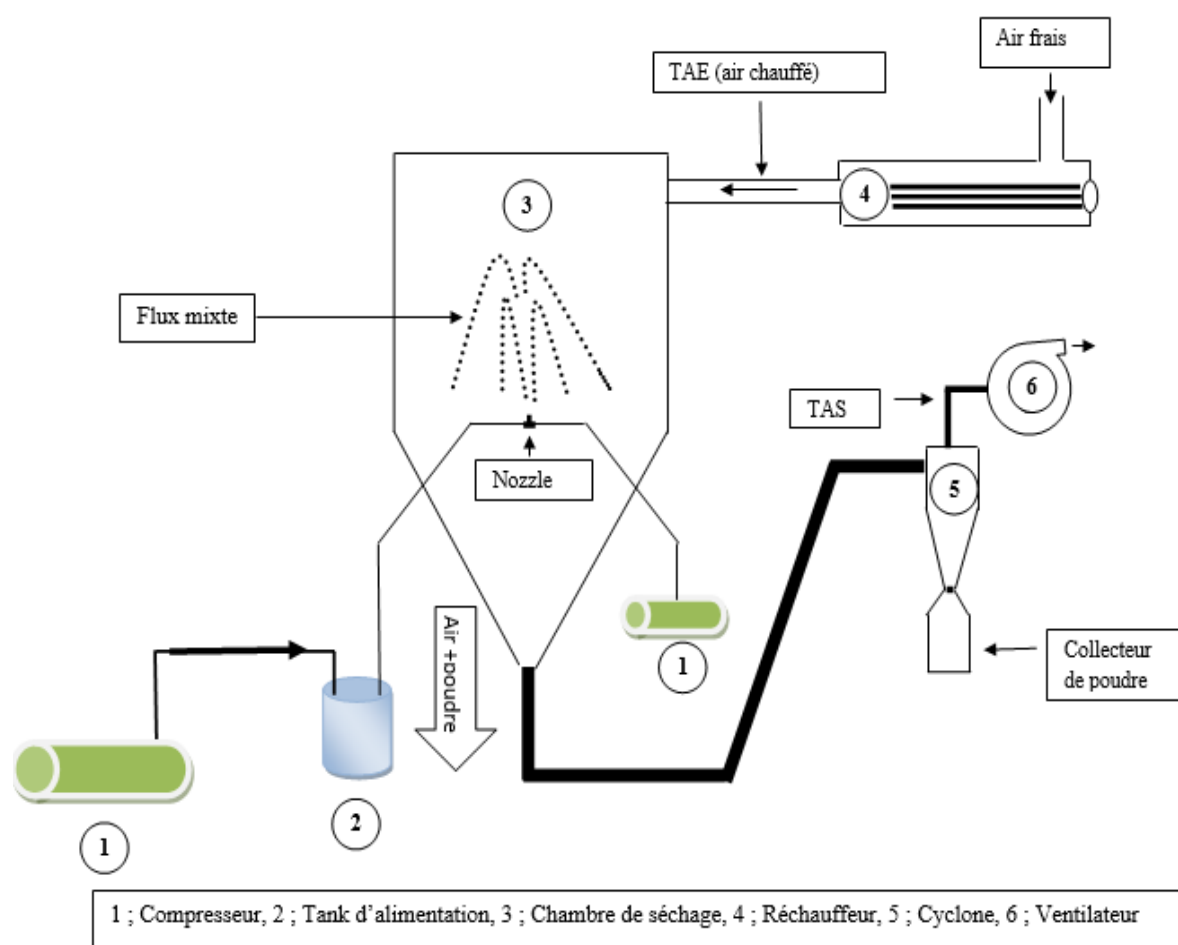


Figure 16 : sécheur par atomisation utilisé doté par une chambre à flux mixte

Pour déterminer l'influence de ces derniers sur les caractéristiques physico-chimiques et fonctionnelles de la poudre du lactosérum, un plan d'expérience composite centré à deux facteurs a été utilisé (Tableau 7).

Tableau 7 : Plan d'expérience de la méthode RSM

Point	Température de l'air d'entrée (°C)	Débit alimentation (L/h)
min (- α)	137	1
(-1)	150	2
Point central	180	4.5
(+1)	210	7
max (+ α)	222	8

La méthode des surfaces de réponse (RSM) a été utilisée pour déterminer l'effet des conditions du séchoir sur les propriétés des poudres de lactosérum et des paramètres du séchoir.

Un plan central composite avec 13 essais formés par 5 points centraux et 4 points axiaux pour 2^2 plan factoriel complet est utilisé (Tableau 08).

Table 8. Conditions de séchage par atomisation

N° expérimentation	Température de l'air d'entrée (°C)	Débit d'alimentation (l/h)
1	150 (-1)	2(-1)
2	210(+1)	2(-1)
3	150(-1)	7(+1)
4	210(+1)	7(+1)
5	137(-1.41)	4.5(0)
6	222(+1.41)	4.5(0)
7	180(0)	1(-1.41)
8	180(0)	8(+1.41)
9	180(0)	4.5(0)
10	180(0)	4.5(0)
11	180(0)	4.5(0)
12	180(0)	4.5(0)
13	180 (0)	4.5(0)

III.1.1 Détermination du rendement

Le rendement en poudre séchée par atomisation a été déterminé par le rapport du poids de la poudre recueillie après l'atomisation sur la teneur totale en solides de l'aliment (Chandralekha *et al.*, 2017).

Étant donné qu'une certaine quantité de poudre s'est accumulée dans la tuyauterie du sécheur ainsi que dans le cyclone, il n'a pas été possible de confirmer le bilan massique global. Alors que seule la poudre collectée a été prise en compte dans l'évaluation du rendement du procédé. Le rendement en poudre (% p/p) a été calculé par l'équation suivante.

$$RDT (\%) = \frac{W_p}{T_s} * 100 \quad (06)$$

Où :

W_p est le poids de la poudre recueillie après séchage par atomisation ;

T_s est l'extrait sec dans le lactosérum mise en œuvre.

III.1.2 Caractérisation des poudres du lactosérum

III.1.2.1 Détermination de l'humidité

L'humidité a été déterminée selon la méthode décrite par GEA Niro (2006), correspondant à quantifier les pertes de poids (%) de 3 g de poudre de lactosérum après le séchage à 87 °C pendant 6 heures. La teneur en eau a été déterminée selon la formule suivante :

$$H\% = \frac{M_1 - M}{M_1 - M_0} * 100 \quad (07)$$

M₀: masse en grammes de la capsule vide ; M₁: masse en grammes de la capsule avec la prise d'essai avant séchage; M: masse en grammes de la capsule avec la prise d'essai après séchage.

III.1.2.2 Densité apparente et tassée

Le principe se base sur la détermination de la masse d'un volume connu (10 ml) de la poudre du lactosérum. Elle consiste à remplir un cylindre avec une quantité de poudre à l'aide d'une spatule jusqu'à sa partie supérieur sans compression, puis à peser le cylindre. Le poids de l'échantillon W₁ est noté et est utilisé pour déterminer la densité apparente. Après tassement de la poudre dans le cylindre, le poids W₂ est noté avec nouveau volume (V₂) (Schuck, *et al.*, 2012).

(DA) Densité apparente (g/L) = W₁ / volume de poudre en vrac.

(DT) Densité tassée (g/L) = W₂ / V₂

III.1.2.3 Propriété d'écoulements

La fluidité et la cohésion de la poudre ont été évaluées en termes d'indice de Carr (CI) et de ratio de Hausner (HR) (Seth *et al.*, 2017), qui ont été déterminé à partir des densités apparente et tassée de la poudre selon les formules données par Reddy *et al.* (2014).

$$CI (\%) = \frac{DT - DA}{DT} * 100 \quad (08)$$

$$HR = \frac{DT}{DA} \quad (09)$$

Dont (DT) : Densité tassée, (DA) : densité apparente.

III.1.3 Propriétés de réhydratation

III.1.3.1 Mouillabilité

La mouillabilité est déterminée selon la méthode décrite par GEA Niro, (2005), avec quelques modifications. Une quantité de 100 ml d'eau distillée à 20 ± 0.2° C a été versée dans un bécher de 250 ml. Un entonnoir a été placé sur le bord supérieur du bécher. Un tube à essai a été placé à l'intérieur de l'entonnoir pour bloquer l'ouverture inférieure de l'entonnoir. L'échantillon de poudre (6 g) a été placé autour de l'éprouvette, puis le tube a été soulevé en

même temps le chronomètre a été déclenché. Enfin, le temps à laquelle la poudre a été complètement mouillée a été enregistré.

III.1.3.2 Solubilité

La solubilité de la poudre a été déterminée par la méthode décrite par Seth *et al.*, (2017) avec quelques modifications. Une quantité de 1 g de la poudre du lactosérum a été mélangé avec 100 ml d'eau distillée à $24^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Le mélange a été homogénéisé avec un Ultraturax à 3800-4000 tours par minute pendant 90 secs. La solution a été transférée dans des tubes à centrifuger de 50 ml et centrifuger à 3000 g pendant 5 min. La solution a été laissée décanter pendant 30 minutes avant qu'un volume de 25 ml du surnageant était transféré dans des boîtes de Pétri puis séché au four à 105°C pendant 5 h. La solubilité (%) est mesurée par la différence de poids.

$$\text{Sol (\%)} = \frac{M_1 - M}{M_1 - M_0} * 100 \quad (10)$$

Dont :

M_0 : masse en grammes de la boîte de Pétri vide ;

M_1 : masse en grammes de la boîte de Pétri avec la prise d'essai avant séchage;

M: masse en grammes de la boîte de Pétri avec la prise d'essai après séchage.

III.1.3.3 Dispersibilité

Dans un bécher, 1 g de poudre de lactosérum a été mélangé dans 10 ml d'eau distillée à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, à l'aide d'une spatule le mélange a été agité vigoureusement pendant 15 sec, puis filtré à travers un tamis de 200 microns. En fin l'extrait sec du filtrat a été déterminé après séchage à 105°C pendant 7 h (Schuck, *et al.*, 2012). La dispersibilité est mesurée selon la formule suivante :

$$\text{Dis (\%)} = \frac{(10+a)*ts}{a(100-b)/100} \quad (11)$$

Dont :

a : quantité de lactosérum en poudre prélevée,

b (%) : humidité de la poudre,

ts (%) : matière sèche de la poudre du lactosérum reconstituée après son passage à travers tamis.

III.1.4 Détermination des paramètres opératoires de l'atomiseur

III.1.4.1 Température de l'air de sortie

La température de sortie est donnée automatiquement au moyen d'une sonde connectée à la sortie du cyclone, pour chaque combinaison de conditions de fonctionnement.

III.1.4.2 Efficacité thermique de sécheur

La quantité de chaleur utilisée par rapport à la quantité de chaleur fournie par l'atomiseur a été déterminée selon la formule donnée par Saha *et al.*, (2019).

$$ET (\%) = \frac{T_{AE} - T_{AS}}{T_{AE} - T_a} \quad (12)$$

Dont :

ET : efficacité thermique (%) ;

TAE : la température d'air d'entrée (°C) ;

TAS : la température de l'air de sortie (°C) ;

T_a : la température de l'air ambiante (°C).

III.2. Optimisation des conditions du séchage

Les conditions de séchage du lactosérum par atomisation ont été réalisées par l'utilisation de la méthode de surface de réponse. Cette méthode est l'approche la plus largement utilisée pour l'optimisation du séchage par atomisation (Homayoonfal *et al.*, 2022). Les surfaces de réponses ont été élaborées avec le logiciel JMP pro 2014.

La vérification du modèle de surface de réponse a été effectuée en comparant la valeur expérimentale obtenue à partir d'un ensemble d'échantillons indépendant avec la valeur prédite obtenue à partir du modèle optimisé (Largo Ávila *et al.*, 2015).

Une équation polynomiale de second degré est utilisée pour relier les réponses (Y) aux variables indépendantes (X).

$$Y = B_0 + \sum B_i X_i + \sum B_{ii} X_i^2 + \sum B_{ij} X_i X_j \quad (13)$$

Ou,

Y ; variable réponse mesurée

B_i ; coefficients de régressions

X_i ; variables opératoires

i et j ; indices des facteurs

La méthode de la fonction de désirabilité a été utilisée pour optimiser simultanément plusieurs réponses. L'équation finale de la fonction de désirabilité est présentée ci-dessous Amiri-Rigi *et al.*, (2011).

$$D = \sum_{i=r}^1 (d_1^{r1} \times d_2^{r2} \times \dots \times d_n^{rn}) \quad (14)$$

Où d_i est l'indice de désirabilité de chaque réponse ($d_i = 0$, la moins désirable ; et $d_i = 1$, la plus désirable) et r_i est l'importance relative de chaque réponse.

Les poudres obtenues dans les conditions optimales ont été caractérisées. Les propriétés fonctionnelles et d'hydratations et les paramètres du sécheur ont été réalisés selon les protocoles cités dans les sections précédentes. En plus des propriétés déjà étudiées, nous avons complété la caractérisation des optima par d'autres propriétés fonctionnelles et structurales.

III.2.1 Hygroscopicité

L'hygroscopicité a été déterminée selon la méthode proposée par Moghbeli *et al.* (2020), avec quelques modifications. Environ 1 g de la poudre de lactosérum sec a été réparti uniformément sur des boîtes de pétri. Les échantillons ont été placés dans un dessiccateur contenant de solution de NaCl saturée (75,3% correspondant à une humidité relative de 25°C°). Après une semaine, les échantillons ont été pesés et l'hygroscopicité a été exprimée en g d'humidité adsorbée pour 100 g de solides secs (g/100 g).

$$\text{Hygroscopicité (\%)} = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (15)$$

Dont : m_0 (g) ; le poids des poudres du lactosérum,

m_1 (g) et m_2 (g) sont respectivement le poids de la boîte de pétri et des poudres du lactosérum avant et après absorption d'eau.

III.2.2 Degré d'agglomération

La détermination du degré d'agglomération a été effectuée selon la méthode décrite par GEA Niro (2005); Westergaad (2010), qui consiste à mettre l'échantillon provenant du test d'hygroscopicité (m_2) à une température de 102°C pendant 1 heure. Après refroidissement, l'échantillon est tamisé à l'aide d'un tamis de 500 microns dans un appareil d'agitation pendant 5 minutes. La poudre retenue à travers le tamis est pesée. Le degré d'agglomération a été déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$DA \% = \frac{d}{c} * 100 \quad (16)$$

Dont :

DA : degré d'agglomération (%) ;

c : quantité de poudre utilisée pour le tamisage ;

d : taux de rejet à 500 microns.

III.2.3 Détermination de la couleur

La couleur de la poudre du lactosérum a été déterminée selon la méthode donnée par Mahdi Jafari *et al.* (2016), avec quelques modifications. Une boîte spéciale dont les murs internes sont entièrement recouverts par une couleur noire a été utilisée. Cette boîte est équipée par des lampes LED blanche de 3 w, et ce afin d'éviter toute réflexion de longueur d'onde dans l'espace et d'avoir des conditions d'éclairage stable.

La description de la couleur a été déterminée en utilisant l'application mobile Color Grab (version 3.9.2, 2021, Loomatix Ltd.), aux images prises à partir des quantités des poudres de lactosérum sec réparties uniformément sur des boîtes de pétri avec une épaisseur d'environ 1 cm (Carretero-Peña *et al.*, 2019).

Le mode d'espace couleur CIE-Lab., a été choisi, dont "L" est utilisé pour définir la luminosité, "a" pour la rougeur et la verdure, et "b" pour le jaune et le bleu (Mahdi Jafari *etal.*, 2019).

III.2.4 Caractéristiques microstructurales

III.2.4.1 X-Ray Diffraction

Un diffractomètre à rayons X Bruker AXS, D8 Advance (Allemagne) a été utilisé pour déterminer l'état physique des constituants de la poudre du lactosérum optimisée. L'échantillon a été analysé sans aucun traitement à 35 kV et 30 mA, dans la plage de balayage 5° à 90° (Zolnere and Ciprovica, 2019). Cette technique a été réalisée au centre de recherche physico chimique (CRPC) à Bejaia.

III.2.4.2 Microscopie électronique à balayage

La morphologie de la poudre du lactosérum a été examinée à l'aide d'un microscope électronique à balayage JEOL JSM-7001F Allemagne. Ce dernier fonctionne à une tension d'accélération de 12 kV. L'examen des échantillons a été effectué au laboratoire Dosage, Analyse et caractérisation en haute résolution (L.D.A.C) à l'université Ferhat Abbas Sétif, et ce sans aucun traitement préalable.

III.2.5 Caractérisation microbiologique de la poudre du lactosérum

La recherche de la flore pathogène dans les poudres du lactosérum a été réalisée selon les protocoles donnés par les normes internationales ISO 6579-1 pour rechercher des *salmonella spp* qui nécessite quatre phases successives à savoir pré-enrichissement en milieu non sélectif, suivies par l'enrichissement en milieu sélectif à des températures sélectives et isolement sur le milieu solide (gélose XLD) et enfin, c'est la confirmation de l'absence ou la présence dans 25

g de poudre initialement reconstituée avec l'eau peptonnée. ISO 21528-1, utilisée pour la recherche *staphylococcus aureus*, dont l'enrichissement est assuré sur le milieu gélosé de Baird-Parker, pour plus de détails voir *Annexe 04*.

III.3 Effet de l'ajout des agents de séchage sur la qualité des poudres du lactosérum

Plusieurs études ont démontré l'intérêt de l'utilisation des agents de séchage sur la rentabilité des sécheurs et les propriétés des poudres alimentaires. A cet effet, dans cette partie nous avons étudié l'impact des agents de séchage en utilisant deux (02) polysaccharides, et une protéine animale qui sont respectivement le maltodextrine, l'amidon de maïs et la gélatine.

Les agents de séchage ont été choisis suite à la recherche bibliographique, la disponibilité, le prix notamment la maltodextrine et amidon de maïs. Le choix de gélatine a été motivé par le fait que cet agent de séchage n'a pas été utilisé auparavant dans le séchage des produits laitiers.

Avant de procéder au séchage par atomisation, les solutions du lactosérum ont été préparées par dissolution des différentes concentrations d'agents de séchage, à savoir le maltodextrine DE 18 dans les proportions de 2,5, 5 et 7,5 % p/v, l'amidon de maïs de 1,5, 2,5, et 5 % p/v, et la gélatine de 0,5, 1 et 1,5 %, p/v. Les concentrations ont été choisies après des tests préliminaires et ce qui a été rapporté par la bibliographie.

Les poudres obtenues ont été conservées dans des boîtes en verre hermétiquement fermées à température ambiante pour des analyses ultérieures.

Concernant les conditions opératoires de séchage sont les mêmes conditions exercées dans la première partie après optimisation, et ce, pour tous les essais expérimentaux.

III.3.1 Caractérisation des poudres du lactosérum après ajout d'agents de séchage

Les poudres obtenues après ajout des agents de séchages ont été caractérisées de la même manière que les poudres sans ajout d'agents de séchage. Les méthodes de caractérisation des propriétés fonctionnelles, d'hydratation, physiques, l'hygroscopicité, le degré d'agglomération et la couleur ont été décrites dans les parties précédentes.

Les méthodes de détermination des paramètres opératoires de l'atomiseur (température de sortie et efficacité thermique) et de la caractérisation microstructurale ont été décrites dans les parties précédentes.

IV. Effet de la substitution de la poudre du lait écrémé par la poudre du lactosérum sur la qualité texturale et sensorielle du cake

IV.1 Préparation du cake

La formulation de la pâte témoin à cake a été préparée selon la composition décrite par (Rodríguez-García *et al.*, 2012), avec quelques modifications. Dans toutes les formulations de la pâte à cake, les ingrédients sont maintenus fixes à l'exception la quantité de poudre du lait écrémé qui varie en fonction du ratio du lactosérum en poudre ajouté de 20 à 100 % en poids total du lait écrémé en poudre. Le tableau 9, présente six (06) formules de pâtes à cakes qui ont été préparées.

Tableau 9 : Formules des cakes après substitution du lait écrémé par la poudre du lactosérum

Echantillon Ingrédients (%)	T (%)	CPL20 (%)	CPL40 (%)	CPL (60 %)	CPL (80 %)	CPL (100 %)
Farine	24.69	24.69	24.69	24.69	24.69	24.69
Sucre	24.69	24.69	24.69	24.69	24.69	24.69
Jaune d'œuf	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66
Blanc d'œuf	13.33	13.33	13.33	13.33	13.33	13.33
Lait écrémé en poudre	12.345	9.876	7.407	4.938	2.469	0
Poudre de lactosérum	00	2.469	4.938	7.407	9.876	12.345
Huile végétale	11.35	11.35	11.35	11.35	11.35	11.35
Levure chimique	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
Eau distillée	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17
Total (%)	100	100	100	100	100	100

La quantité étant indiquée en pourcentage en poids total de la recette.

T : échantillon témoin, **CPL20** : Substitution de 20 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL40** : Substitution de 40 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL60** : Substitution de 60 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL80** : Substitution de 80 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL100** : Substitution de 100 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum

Les ingrédients sont mélangés à l'aide d'un batteur-mixeur d'une marque de CRRRAFT electronics (model BT849) à la 2^{ème} vitesse (2), pendant 5 min. La préparation de la pâte a été effectuée conformément aux étapes décrites par. La pâte à cake a été préparée en battant un mélange de sucre et des œufs dans un récipient en plastique jusqu'à la formation de la fouette blanche (environ 4), ensuite le mélange composé de la poudre du lait écrémé ou bien la poudre de lactosérum et l'huile végétale ont été ajouté au mélange et mélanger pendant 2 min. Enfin, la farine, la levure chimique et l'eau distillé ont été ajouté et mélanger légèrement jusqu' à ce que la pâte homogène soit formée. Après l'étape de mélange, la pâte a été placée dans un moule

(9 x 4.5 x 3 (cm³)) à cake en aluminium étalé par une graisse, cuite dans un four à une température de 180 °C pendant 23 min. Après la cuisson, les cakes ont été démoulés, refroidis pendant 1 h à température ambiante et conservés dans des sacs en plastique pour éviter leur dessèchement.

IV.2 Caractérisation de la pâte à cake

IV.2.1 Densité de la pâte

La densité de la pâte à gâteau a été déterminée en rapportant le poids d'un volume connu de pâte au poids du même volume d'eau (Khalilian Movahhed *et al.*, 2016; Hedayati *et al.*, 2022).

IV.2.2 Microstructure de la pâte

Pour visualiser les bulles, une petite goutte de pâte a été placée sur une lame de microscope. L'échantillon a été soigneusement recouvert d'une autre lame de microscope pour éviter l'inclusion de bulles d'air exogènes (Curti *et al.*, 2021). Les échantillons de pâte ont été examinés à un grossissement de x10 en utilisant un microscope (MOTIC, Chine). Les images ont été prise à l'aide d'un mobile Android d'une marque honore et transférer vers un logiciel image J afin de déterminer la surface aérée.

IV.3 Caractérisation des cakes

IV.3.1 Détermination des pertes à la cuisson

La perte de poids à la cuisson est mesurée par le rapport du poids avant et après la cuisson au poids de la pâte (Djeghim *et al.*, 2021). Le taux de perte à la cuisson est exprimé en % par la formule suivante :

$$Perte\ de\ poids = \frac{P\ masse\ initiale\ fraiche - P\ masse\ après\ la\ cuisson}{P\ masse\ intaile\ fraiche} \times 100 \quad (17)$$

Dont, **P** ; représente la masse (g)

IV.3.2 Détermination de la teneur en eau

Pour la teneur en eau, une quantité de 4 g de cake ont été séchés dans à 105°C pendant 16 h, jusqu'à poids constant. Le taux d'humidité a été calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$H\ (\%) = \frac{P\ avant\ séchage - P\ après\ séchage}{P\ avant\ séchage} \times 100 \quad (18)$$

Où, **P** représente la masse (g).

IV.3.3 Détermination de l'indice volumique du cake

L'indice volumique des échantillons de gâteau a été mesuré selon la méthode décrite par Chinma *et al.* (2014); Rahmati and Mazaheri Tehrani (2015). Dans cette méthode, le gâteau est coupé verticalement au centre, et les hauteurs de l'échantillon du gâteau ont été mesurées en trois points différents (B, C et D) le long des gâteaux en coupe transversale (voir fig., 17)

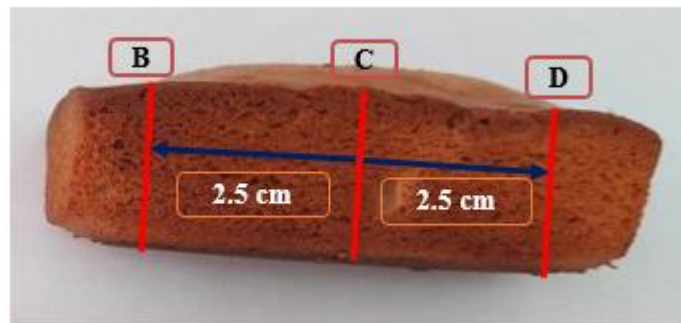


Figure 17 : détermination de l'indice volumique du cake

L'indice volumique a été déterminé par la formule suivante :

Indice volumique (*IV*) = *B* + *C* + *D*, où *C* : est la hauteur du gâteau au point central, tandis que *B* et *D* sont les hauteurs du gâteau aux points situés à 2,5 cm du centre vers les côtés gauche et droit du gâteau, respectivement.

IV.3.4 Détermination du volume spécifique et de la hauteur du cake

Le volume spécifique est l'une des propriétés physiques les plus importantes des gâteaux en raison des préférences des consommateurs. Plus le volume spécifique est grand, plus le produit est apprécié (Shao *et al.*, 2015). Le volume spécifique des gâteaux est déterminé indirectement en déplaçant des petites particules (Semsem) de volume spécifique connu dans un récipient où se trouve le gâteau final, selon la méthode décrite par (Benatallah, 2009).

IV.3.5 Détermination de la couleur du cake

La couleur de la croûte et de la mie du cake a été déterminée selon la méthode donnée dans la section III.2.3 (voir page 51).

La couleur tridimensionnelle *L**, *a**, et *b** est également exprimée sous forme d'indice de brunissement (IB), selon l'équation ci-dessous (Gao *et al.*, 2017).

$$IB = 100 (X - 0.31) / 0.172, \text{ dont } X = a^* + 1.75L^* / (5.645L^* + a^* - 3.012b^*)$$

IV.3.6 Propriétés texturales de la mie du cake

Les propriétés de la mie des cakes ont été déterminées selon le protocole décrit par Djeghim *et al.* (2021) avec modification. Des photos des deux tranches horizontales des cakes ont été capturées à l'aide d'un appareil mobile de marque honore et sauvegardées sous format Tagged Image File (TIF). En application d'un logiciel image J, le nombre de cellules, la taille moyenne en mm² et la fraction de la surface des pores ont été déterminés.

IV.3.4. Caractérisation sensorielle

L'évaluation sensorielle des cakes a été réalisée auprès d'un panel sensoriel de vingt (20) personnes, (hommes et femmes- âgés de 22 à 39 ans), composés d'étudiants en graduation et en post-graduation et des enseignants universitaires de l'Institut de nutrition, de l'alimentation et des technologies alimentaires, Université Constantine 1.

Les cakes ont été évalués pour leur couleur, leur apparence, leur texture, leur saveur et leur acceptabilité globale conformément à la grille d'évaluation (annexe 5), en utilisant une échelle hédonique à 10 points, qui a été notée suite aux critères spécifique de notation sensorielle (annexe 6). Une opération de rinçage de la bouche a été demandée aux panélistes lors du changement des échantillons en fonction de l'appréciation du goût et du test de préférence (Kaur *et al.*, 2017).

Les proportions de cinq indicateurs d'évaluation sensorielle comme l'apparence (S1), la couleur (S2), l'odeur (S3), la texture (S4) et la sensation à l'intérieur de la bouche (S5) ont été attribuées 0,1, 0,1, 0,1, 0,3, 0,4, et le score sensoriel total = $S1 \times 0,1 + S2 \times 0,1 + S3 \times 0,1 + S4 \times 0,3 + S5 \times 0,4$ (Wang *et al.*, 2020).

V. Traitement statistique

Toutes les analyses ont été mesurées avec trois répétitions de chaque échantillon. Les résultats ont été traités statiquement à l'aide d'un logiciel Minitab 2018 (Minitab® Statistical Software), et la différence significative a été déterminée par l'analyse de variance (ANOVA à sens unique), après la comparaison des moyennes par le test de Tukey ($p \leq 0,05$). Le test de corrélation entre les propriétés sensorielles et la qualité du cake a été déterminé en utilisant logiciel Excel 2013.

Résultats et discussion

Résultats et discussion

Dans cette partie nous présenterons les résultats obtenus qui concerneront en premier lieu le séchage par atomisation et l'impact des différents facteurs sur la qualité de la poudre et en deuxième lieu l'impact de la substitution du lait en poudre par de la poudre du lactosérum produite dans les conditions optimales du séchage sur la qualité d'une matrice alimentaire à savoir le cake.

I. Séchage par atomisation du lactosérum

I.1 Caractéristiques physicochimiques du lactosérum doux (laiterie Numidia)

Le tableau 10, présente les principales caractéristiques physico-chimiques du lactosérum doux à sécher par atomisation. Ce lactosérum est issu de la fabrication d'un fromage type camembert au niveau de la laiterie Numidia.

Tableau 10. Caractéristiques physicochimiques du lactosérum doux

Paramètres	M ±SD
pH	6.34 ±0.2
Acidité D°	14.5 ±1.5
Extrait sec total (g L ⁻¹)	52.40 ±1.13
Matière grasse (g L ⁻¹)	5.5 ±0.05
Cendres (g L ⁻¹)	5.28 ±0.07
Protéines (g L ⁻¹)	7.73 ±0.36
Carbohydrates (g L ⁻¹)	34.7 ±1.17
Densité (kg L ⁻¹)	1.063
Couleur Lab CIE	
L *	52.23 ± 0.46
a *	-18.70 ± 0.26
b *	27.43 ± 0.05

L ; (blancheur/obscurité) ; a (verdure/rougeur) ; b (jaunâtre/bleu)

M ±SD ; valeurs moyennes ± l'erreur standard.

Le pH et l'acidité Dornic du lactosérum sont de 6.34 et 14.5 °D respectivement ce qui classe ce type du lactosérum comme lactosérum doux (Królczyk *et al.*, 2016; Ganju and Gogate, 2017; Rocha-Mendoza *et al.*, 2021; Anirudh, 2022). Les caractéristiques physicochimiques du lactosérum sont comparables à celles notées dans la bibliographie (Lavari *et al.*, 2014; Fernández-Gutiérrez *et al.*, 2017; Lappa *et al.*, 2019; Sebastián-Nicolás *et al.*, 2020).

I.2 Impact des conditions du séchage sur la qualité des poudres

L'impact des conditions du séchage à savoir la température de l'air d'entrée et le débit de l'alimentation sur les différentes propriétés des poudres a été étudié selon un plan d'expérience composite central à deux facteurs. Les réponses étudiées sont le rendement, l'humidité finale de la poudre, les propriétés techno-fonctionnelles des poudres à savoir la densité apparente, la densité tassée, la dispersibilité et la mouillabilité. La température de sortie de l'air et l'efficacité thermique du sécheur ont été aussi étudiées. Le tableau 11 présente les différentes réponses obtenues.

Tableau 11 : Impact de la température de l'air d'entrée et du débit de l'alimentation sur les propriétés des poudres

Variables		Réponses						
X ₁	X ₂	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
150	2	24.03	4.04	0.24	0,42	99.05	408	69.04
210	2	19.98	2.70	0.19	0,32	91.74	726	96.3
150	7	00	-	-	-	-	-	42.4
210	7	13.67	8.00	0.24	0,45	89.26	525	59.9
137	4.5	10.31	3.81	0.31	0,55	84.85	513	51.2
222	4.5	15.06	4.00	0.23	0,35	87.12	216	85.0
180	1	24.23	2.70	0.18	0,35	94.99	433	91.7
180	8	4.26	9.92	0.23	0,47	82.45	334	53.9
180	4.5	40.04	2.13	0.21	0,34	98.94	225	68.9
180	4.5	36.27	2.12	0.24	0,35	97.09	190	71.1
180	4.5	29.77	2.18	0.26	0,46	93.62	265	70.6
180	4.5	31.00	2.20	0.24	0,47	93.32	310	69.5
180	4.5	32.34	2.18	0.25	0,43	93.93	303	70.0

Variables : **X₁**; Température de l'air d'entrée (°C), **X₂**; Débit d'alimentation (L h⁻¹)

Réponses : **Y1**; RDT (%), **Y2**; H (%), **Y3**; DA (g mL⁻¹), **Y4**; DT (g mL⁻¹), **Y5**; Dispersibilité (%), **Y6**; Mouillabilité (s), **Y7**; Température de sortie (°C)

Tableau 12

Effets des termes linéaires, quadratiques et d'interaction pour chaque variable de réponse traitée par ANOVA

	RDT (%)		Humidité (%)		DA (g mL ⁻¹)		DT (g mL ⁻¹)		Dispersibilité (%)		TAS (°C)	
Source	Coeff	P value	Coeff	P value	Coeff	P value	Coeff	P value	Coeff	P value	Coeff	P value
Model	32.77	<0.0001*	2.160	<0.000*	0.24000	<0.0001	0.4100	<0.0001*	95.36	<0.0001*	70.05	<0.0001
A	1.88	0.151	-0.026	0.862	-0.02574	0.008*	-0.0597	0.034*	1.02	0.369	11.581	<0.0001*
B	-7.36	<0.0001*	2.334	<0.0001*	0.02043	0.020*	0.0532	0.051	-5.31	0.002*	-14.687	<0.0001*
A ²	-9.71	<0.0001*	0.771	<0.0001*	0.01544	0.051	0.0211	0.357	-4.25	0.006*	-1.876	0.087
B ²	-9.17	<0.0001*	1.998	<0.000*	-0.01772	0.031*	0.0007	0.973	-2.86	0.031*	0.522	0.584
AB	4.43	0.031*	0.553	0.047*	0.0020	0.849	0.0018	0.961	4.88	0.026*	-2.35	0.088
R ²	95.86%		99 %		87.69%		69.30 %		87.50 %		98.63%	
I aj	0.95		0.000		0.85		0.78		0.4		0.01	

Coeff : coefficient du modèle

A= température de l'air à l'entrée (°C),

B = débit d'alimentation (L h⁻¹)

I aj : Inadéquation de l'ajustement

* Valeurs statistiquement significatives (valeur p < 0,05)

I.2.1 Rendement

Le taux de récupération de la poudre est l'un des facteurs les plus importants pour évaluer l'efficacité de la production et la performance du pulvérisateur (Wang *et al.*, 2013).

Le rendement obtenu variait de 00 à 40.04 %. Le diagramme de Pareto des effets normalisés montre que le rendement de l'extrait récupéré est influencé par le débit d'alimentation (fig. 18). Le rendement augmente avec l'augmentation du débit d'alimentation jusqu'à ce que le débit atteigne 4 l/h où nous avons constaté une diminution du rendement (fig.19).

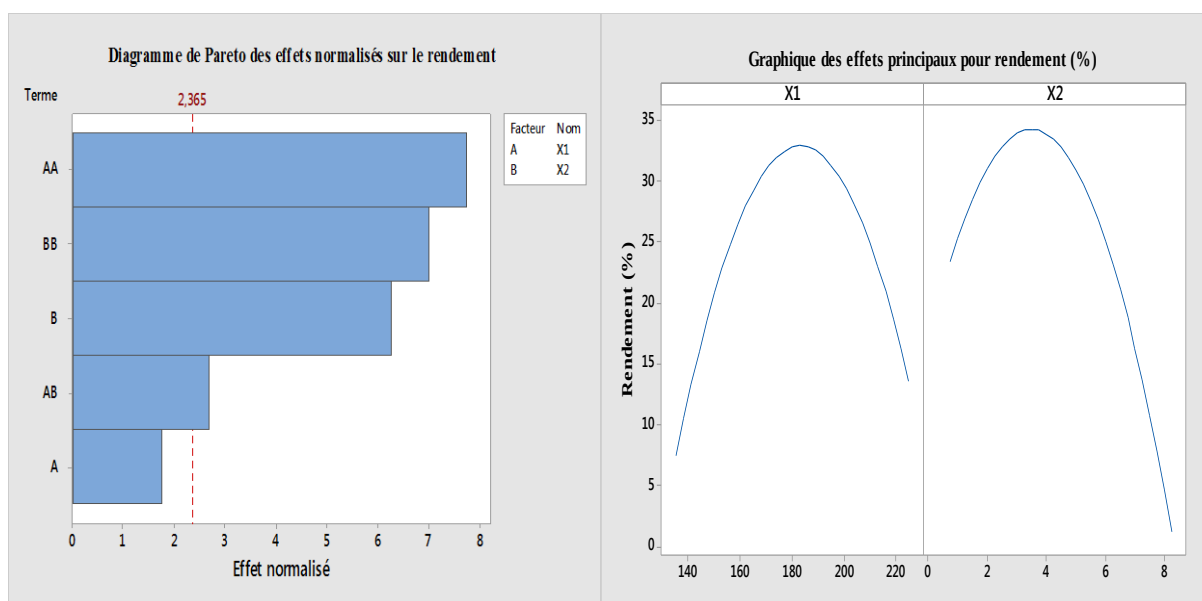


Figure 18 : Effet de la température d'entrée et du débit d'alimentation sur le rendement de sécheur

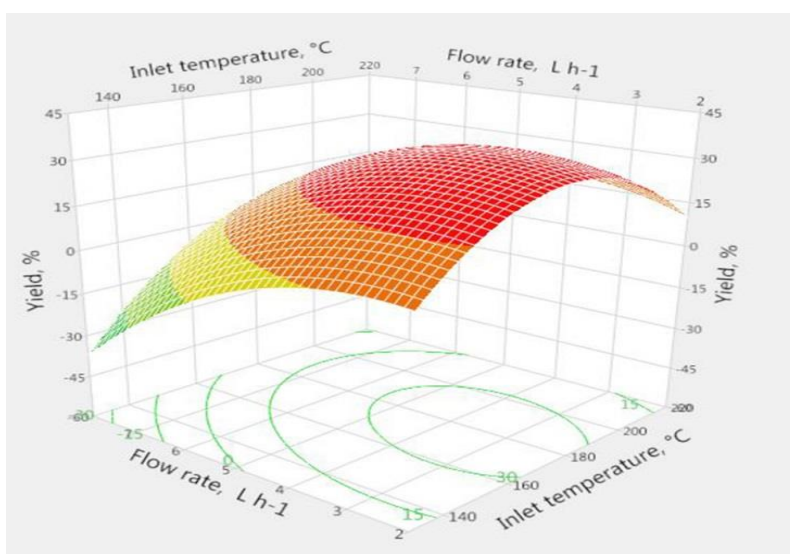


Figure 19 : Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur le rendement de sécheur

L'équation de régression suivante illustre la relation qui existe entre le rendement et les facteurs indépendants, (température de l'air d'entrée (X_1) et le débit d'alimentation (X_2) (eq 19).

$$\text{RDT \%} = -325.2 + 3.987 X_1 + 0.34 X_2 - 0.01162 X_1^2 - 1.546 X_2^2 + 0.0591 X_1 * X_2 \dots (19)$$

D'après l'équation de régression (eq 16), le débit de l'alimentation a un effet linéaire et quadratique négatif sur le rendement ($p \leq 0.001$). Nous avons noté également une influence ($p \leq 0.05$) concernant l'interaction entre la température de l'air d'entrée et le débit d'alimentation sur le rendement (tableau 12). Pour l'expérience dans laquelle la température d'entrée de l'air est de 150 °C et le débit d'alimentation est de 7 L/h, aucune poudre n'a été récupérée dans le cyclone.

Le taux de récupération de la poudre du lactosérum n'est pas influencé de manière significative par la température de séchage de l'air d'entrée, ce qui correspond aux résultats obtenus lors de séchage de lait écrémé par Amiri-Rigi *et al.* (2011) et la cerise acide (Can Karaca *et al.*, 2016). Contrairement à ce qui a été rapporté par Fazaeli *et al.* (2012) ; Santhalakshmy *et al.* (2015); Habtegebriel *et al.* (2018), qui ont noté que le taux des solides totaux dans le cyclone est augmenté suite à l'augmentation de la température de l'air d'entrée. Le rendement diminuait lorsque la température de l'air d'entrée augmente (Mahdi Jafari *et al.*, 2019). Les meilleurs rendements ont été enregistrés à un débit d'alimentation de 4.5 L/h et une température de l'air d'entrée de 180 °C, cela pourrait être dû à une meilleure efficacité du transfert thermique.

Bhandari *et al.* (1997); Tontul and Topuz (2017) ont indiqué qu'un séchage par atomisation réussi doit avoir un taux de récupération en poudre supérieur à 50 %.

Les rendements élevés de 40.07 à 92.27% rapportés par Amiri-Rigi *et al.* (2011) pour le séchage du lait écrémé et de 33.9 à 96.4% pour le séchage du lactosérum rapporté par Mahdi Jafari *et al.* (2019) sont supérieurs à ceux constatés dans notre étude. Cette différence peut être justifiée par le volume de la chambre de séchage utilisée. En revanche, les rendements constatés dans ce travail sont supérieurs à ceux rapportés par Santhalakshmy *et al.* (2015) lors du séchage des jus.

La température de transition vitreuse, l'hygroscopicité, la solubilité, le point de fusion, et la viscosité sont les principaux facteurs influençant le rendement des poudres riches en sucre (Lin *et al.*, 2018 ; Can Karaca *et al.*, 2016; Tontul and Topuz, 2017). Un faible rendement peut s'expliquer par l'adhésivité et le dépôt de particules de poudre sur les parois de la chambre de

séchage. Ceci est due aux comportements des particules humides et collantes provoquant une difficulté de la collecte des particules dans le cyclone (Amiri-Rigi *et al.*, 2012; Bhusari *et al.*, 2014). Il faut tenir compte également, le fait que l'équipement utilisé fonctionne en mode discontinu, et le caractère collant de la poudre dû à la teneur en lactose déterminant un volume mort, ou une quantité morte de poudre séchée, qui peut être important lors du séchage de petits volumes en mode discontinu (Lavari *et al.*, 2014; Vickovic *et al.*, 2023).

I.2.2 Teneur en eau

La teneur en humidité d'une poudre est une propriété primordiale pour déterminer sa durée de conservation et sa stabilité (Bhusari *et al.*, 2014; Saha *et al.*, 2019). D'après le tableau 11, la teneur en humidité de la poudre du lactosérum varie de 2.12 à 9.92 %. L'humidité la plus élevée a été enregistrée à une température de l'air d'entrée de 210 C° et un débit d'alimentation de 7 L/h, ce qui est due probablement à un mauvais transfert de chaleur, transfert de matière causé par un temps de contact très court entre les gouttelettes du liquide et l'air chaud (Manickavasagan *et al.*, 2015).

Le débit d'alimentation est le seul facteur qui a un effet significatif sur le taux d'humidité ($p < 0.05$), comme il est montré par le digramme de Pareto des effets normalisés sur l'humidité (fig. 21). La teneur en eau est proportionnelle à l'augmentation du débit d'alimentation (fig. 20). Aucun effet significatif n'a été enregistré de l'interaction des variables indépendantes sur la teneur en eau. Nous avons également constaté que la température de l'air d'entrée n'a aucun effet significatif sur le taux d'humidité ($p > 0.5$) (tableau 12).

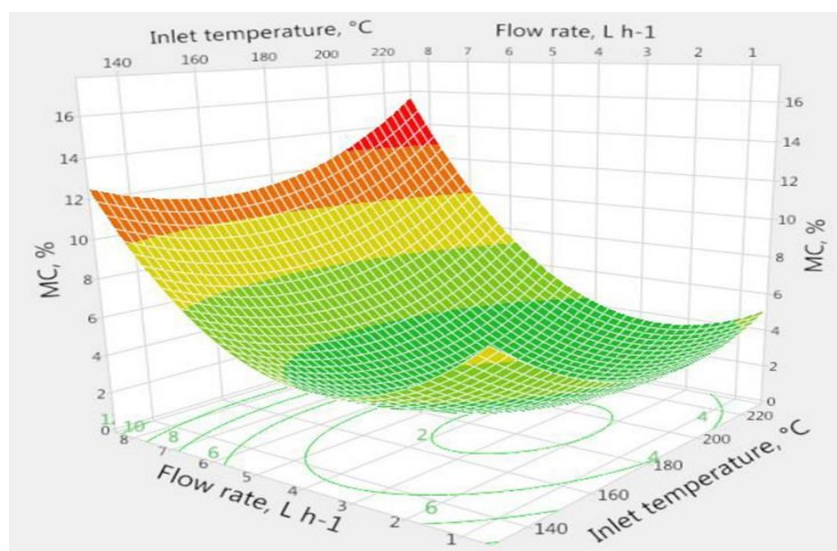


Figure 20 : Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur l'humidité des poudres

La relation entre les variables de réponse et le séchage par pulvérisation a été déterminée selon l'expression mathématique suivante :

$$H \% = 46 - 0.4208 X_1 - 3.552 X_2 + 0.001074 X_1^2 + 0.3510 X_2^2 + 0.00737 X_1 * X_2 \dots (20)$$

((X_1) ; Température de l'air à l'entrée, (X_2) ; le débit d'alimentation

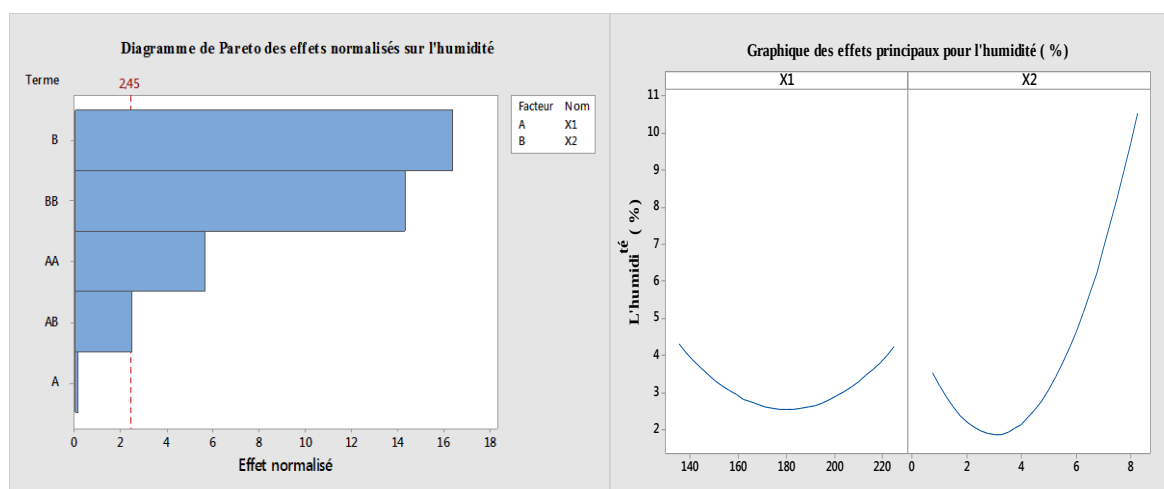


Figure 21 : Effet de la température d'entrée et du débit d'alimentation sur le taux d'humidité des poudres

I.3 Impact sur les propriétés fonctionnelles

I.3.1 Densité apparente et densité tassée

La densité apparente et tassée sont des caractéristiques importantes des poudres, pour des raisons fonctionnelles et économiques (Shishir *et al.*, 2014). Elles sont utilisées pour déterminer la taille et le type des matériaux utilisés pour l'emballage lors du transport des produits (Saha *et al.*, 2019). Une densité apparente élevée des poudres est très souhaitable (Zouari *et al.*, 2018).

La densité apparente de la poudre du lactosérum séchée par pulvérisation était de 0.18 à 0.31 g/cc, (tableau 11), ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Zouari *et al.* (2018) lors du séchage du lait de vache et de chamelle, et ceux rapportés par Samsu and Mohamad Zahir, (2020) pour un lait de palme. La densité en vrac du lait de vache et du lait de palme se situent dans les fourchettes de 0,16 à 0,35 g/cc, et de 0.24 à 0.27 g/cc (Zouari *et al.*, 2018; Samsu and Mohamad Zahir, 2020). Une densité apparente élevée est justifié par une production de particules de petites tailles (Samsu and Mohamad Zahir, 2020). Une densité apparente faible est due à un volume occupé par les particules de poudre de taille plus élevée (Bhusari *et al.*, 2014).

Le tableau 12, montre que la densité apparente est affecté significativement par les deux facteurs la température de l'air d'entrée et le débit d'alimentation ($p < 0.05$). Elle démontre également l'effet linéaire négatif de la température d'entrée sur la densité apparente, et l'impact linéaire positif du débit d'alimentation avec un effet quadratique négatif.

La densité de la poudre du lactosérum variait de 0,32 à 0,55 g/cc. D'après le graphique des effets principaux sur la densité apparente, (fig.22), la densité de poudre est influencée positivement par le taux d'alimentation et négativement par la température de l'air d'entrée. La densité tassée est approximativement deux fois supérieures à la densité apparente, et ceci est justifié probablement par la taille très fine des particules du lactosérum en poudre.

L'équation suivante détermine la densité tassée en fonction des variables indépendantes.

$$DT = 1.455 - 0.01055X_1 + 0.016X_2 + 0.000023 X_1^2 + 0.00012 X_2^2 + 0.000023 X_1 * X_2 \dots(21)$$

(X_1) ; Température de l'air à l'entrée, (X_2) ; le débit d'alimentation

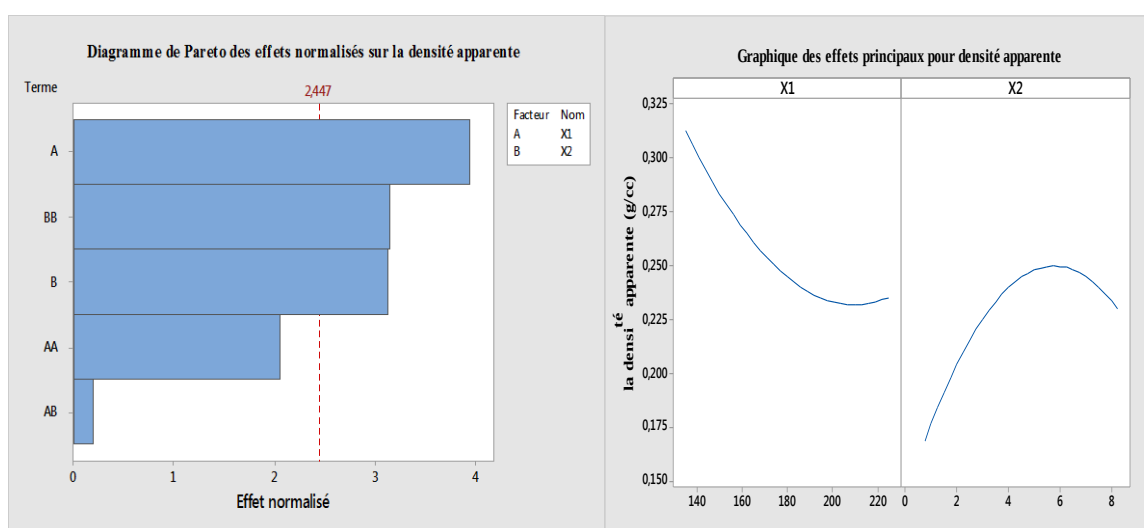


Figure 22 : Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur la densité apparente des poudres

Le diagramme de surface de réponse montre (fig., 23 a) que la densité apparente diminue avec l'augmentation de la température du séchage de l'air d'entrée, conformément à ce qui a été indiqué par Chegini and Ghobadian (2005); Tonon *et al.* (2008); Reddy *et al.* (2014); Saha *et al.* (2019). Les études de Şahin-Nadeem *et al.* (2013); Yue *et al.* (2018) n'ont montré aucun effet significatif de la température de l'air d'entrée sur la densité apparente. En revanche, Manickavasagan *et al.* (2015); Samsu and Mohamad Zahir, (2020) ont indiqué que la température de l'air d'entrée affecte positivement la densité apparente. Un séchage par atomisation du fruit d'*Opuntia stricta* à des température d'entrée de 80 °C à 160 °C a permis de

donner des poudres avec des densités apparentes comprises entre 0.53 à 0.59 g/cc (Manickavasagan *et al.*, 2015).

L'équation suivante donne la densité apparente en fonction les variables indépendants (température de l'air d'entrée (X_1) et le débit d'alimentation (X_2))

$$DA = 0.878 - 0.00716X_1 + 0.0288X_2 + 0.000017 X_1^2 - 0.00284 X_2^2 + 0.000027 X_1 * X_2 \dots(22)$$

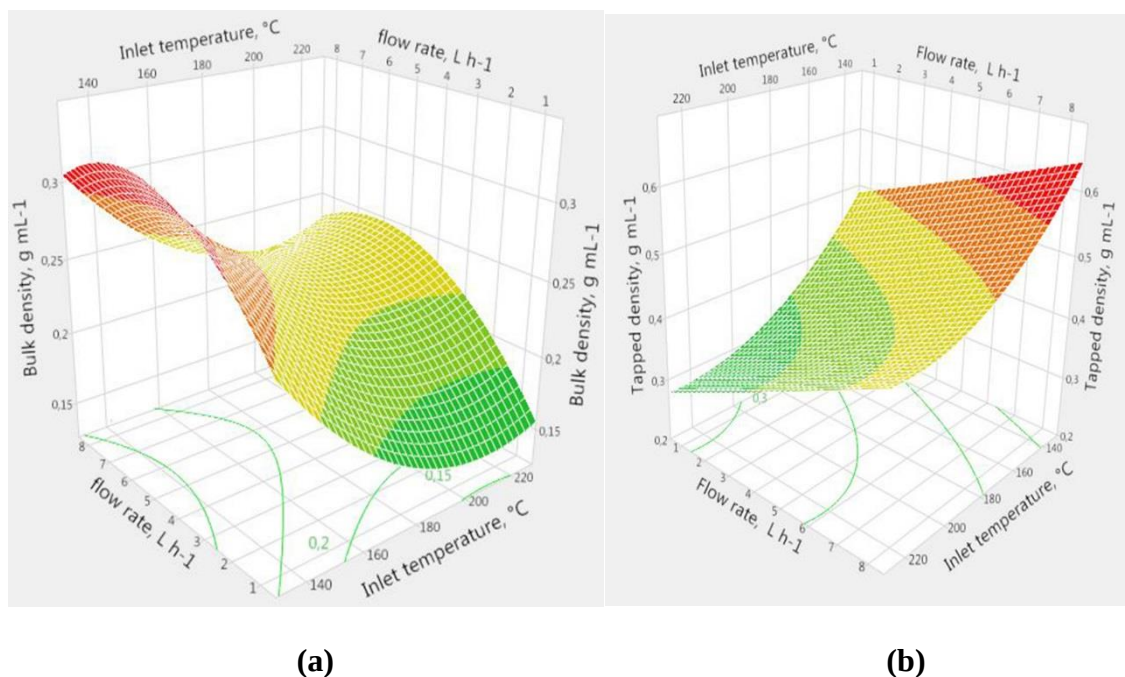


Figure 23 : Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur la densité apparente (a) et tassée (b) des poudres

I.3.2 Coulabilité

La coulabilité ou la fluidité d'une poudre peut être définie comme le comportement d'une masse de particules entre elles ou son mouvement devant la surface de la paroi de son contenu. Afin de caractériser la fluidité d'une poudre, plusieurs indices ont été proposés en particulier l'indice de Carr et la ratio de Hausner (Kelly, 2016).

La figure 24, montre que l'indice de Carr et le ratio de Hausner varient de 9.44 à 49.86 et de 1.10 à 1.90 respectivement.

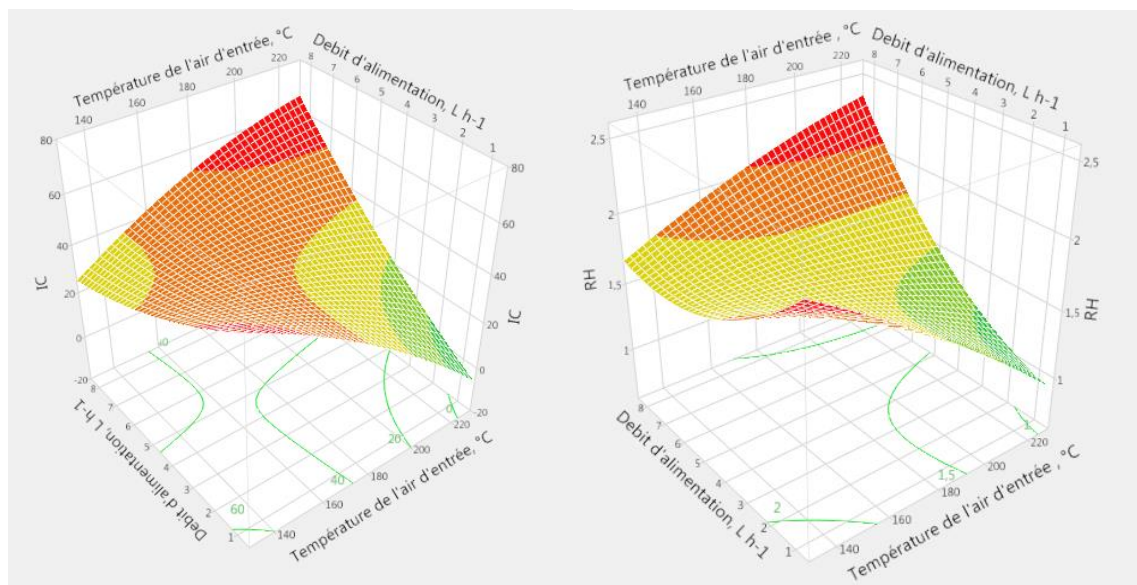
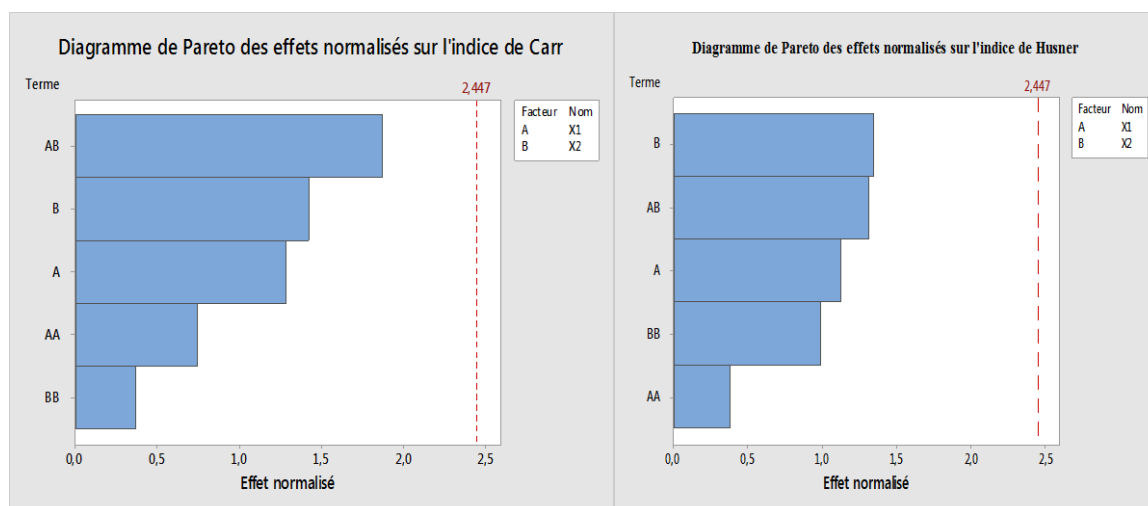


Figure 24 : Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur la fluidité des poudres

La poudre du lactosérum est caractérisée par une mauvaise fluidité, à l'exception du lactosérum séché à une température d'entrée de 210 et le débit d'alimentation 2 L/h, qui présente une bonne fluidité. Nos résultats sont similaires aux résultats indiqués par Santhalakshmy *et al.*, (2015) pour la poudre de jus de BlackBerry. L'humidité influence négativement la fluidité de la poudre (Bhusari *et al.*, 2014).



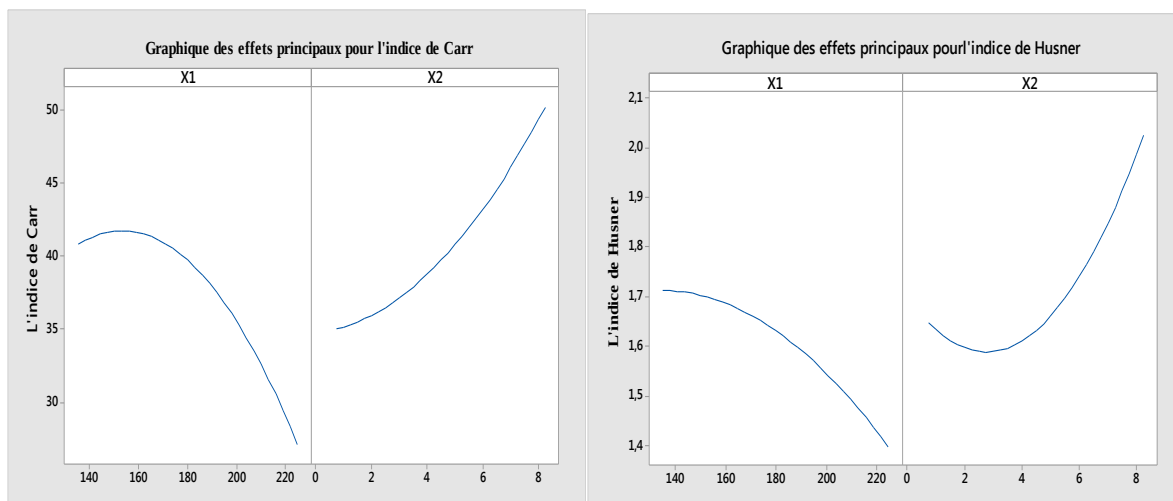


Figure 25 : Effet de la température d'entrée et du débit d'alimentation sur la coulabilité des poudres

(X₁) ; Température de l'air à l'entrée, (X₂) ; le débit d'alimentation

Selon les graphiques des effets principaux (fig.25), la température de l'air d'entrée influence positivement la fluidité de la poudre, contrairement au débit d'alimentation qui influence négativement la coulabilité des poudres.

I.4 Effet sur les propriétés de réhydratation

I.4.1 Dispersibilité

La dispersibilité est l'une des plus importantes propriétés de reconstitution d'une poudre (Saha *et al.*, 2019). La dispersibilité de la poudre de lactosérum obtenue variait de 82.45 à 97.09 %. Cette dispersibilité est comparable aux résultats cités par Bhusari *et al.* (2014) pour une dispersibilité acceptable de poudre alimentaire de 67,05 à 99,98 %, et celle notée par Saha *et al.* (2019) pour la poudre de lait d'arachide. Cependant l'étude présentée par Felfoul *et al.*, (2020) sur l'impact des conditions de séchage par pulvérisation sur les propriétés physico-chimiques et la capacité de réhydratation des poudres du lait de dromadaire écrémé et du lait de vache a révélé une dispersibilité inférieure à nos résultats, qui est 20.71-19.35 et 34.84 - 41.82 % pour la poudre du lait de vache écrémé et du lait de dromadaire écrémé respectivement. Scheidegger *et al.* (2013) ont indiqué que la dispersibilité du lait écrémé et du lait entier est de 87 et 80.7 % respectivement.

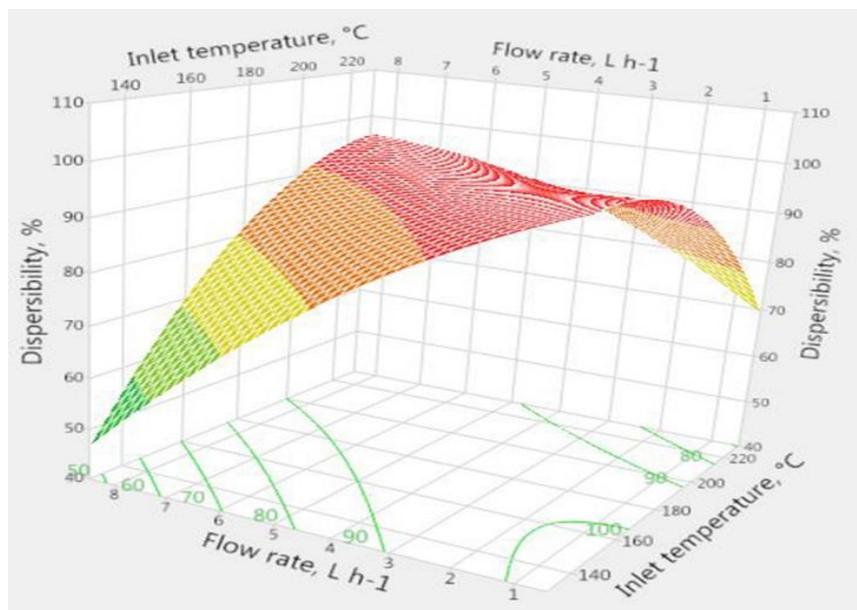


Figure 26 : Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur la dispersibilité des poudres

Selon les résultats du plan d'expérience, la dispersibilité a été affectée négativement par le débit d'alimentation ($p < 0.05$) (tableau 12), avec une légère influence de la température de l'air d'entrée côté quadratique et l'interaction des deux facteurs. D'après Koç *et al.* (2014) la température de l'air d'entrée n'a pas d'effet significatif sur la dispersibilité de la poudre de yaourt. Par contre Reddy *et al.* (2014) ont indiqué que la température de l'air d'entrée a un effet négatif sur la dispersibilité. En plus la dispersibilité de la poudre du lait d'arachide n'a pas été affecté par le débit d'alimentation mais influencée légèrement par la température de l'air d'entrée (Saha *et al.*, 2019).

La relation entre la dispersibilité et les facteurs indépendants est montrée par l'équation suivante :

$$\text{Dis (\%)} = 9.8 + 1.217 X_1 - 10.21 X_2 - 0.00410 X_1^2 - 0.381 X_2^2 + 0.0641 X_1 * X_2 \dots (23)$$

Dont ; (X_1) ; Température de l'air à l'entrée, (X_2) ; le débit d'alimentation

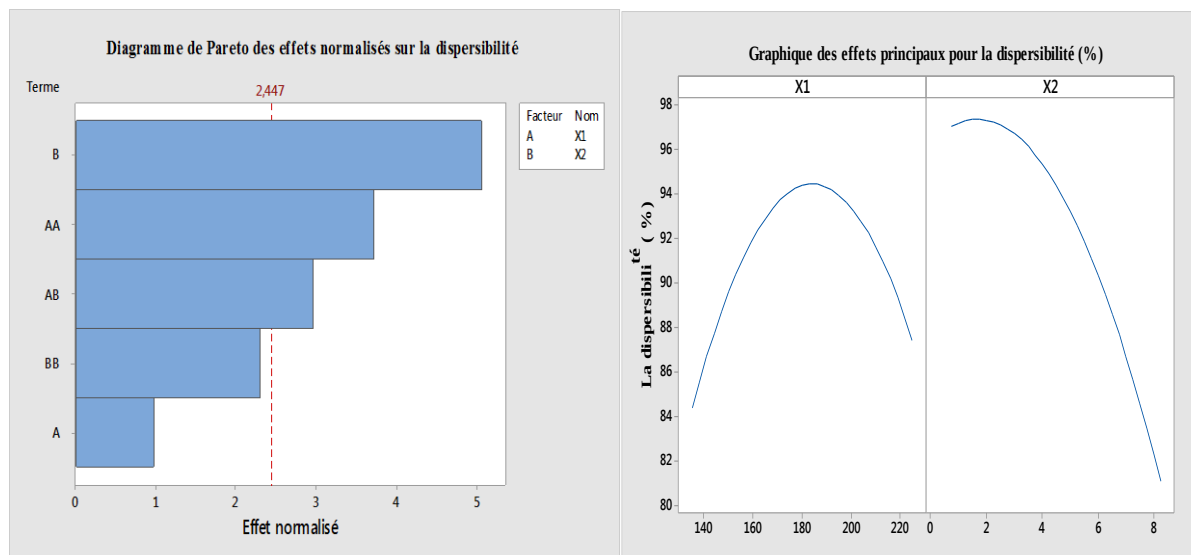


Figure 27 : Effet de la température d'entrée et du débit d'alimentation sur la dispersibilité des poudres

I.4.2 Solubilité

La solubilité est considérée comme un facteur déterminant de la qualité globale de la reconstitution d'une poudre (Koç *et al.*, 2014). Pendant le processus de séchage par pulvérisation la solubilité est utilisée comme un indicateur du taux de dénaturation des protéines et ce dernier détermine la solubilité de la poudre (Saha *et al.*, 2019). La solubilité montre la réhydratation complète de la poudre (Sadat *et al.*, 2017).

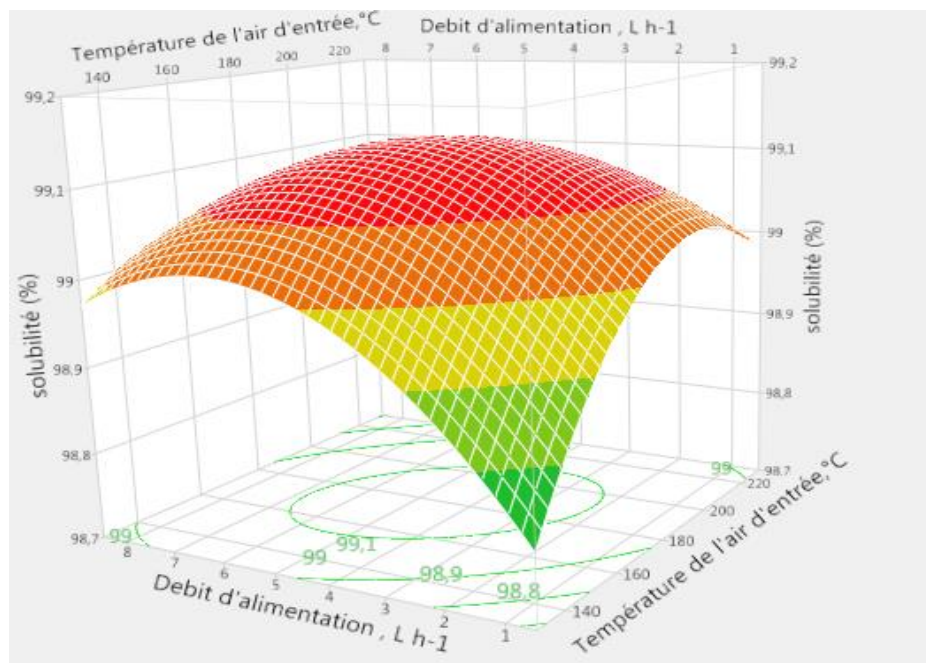


Figure 28 : Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur la solubilité des poudres.

Dans le secteur laitier, selon Westergaad, (2010); Schuck *et al.* (2012), une poudre est considérée comme soluble si sa solubilité dépasse 99 %. La figure 28 montre que la solubilité de la poudre du lactosérum est située entre 98.94% à 99.46%. Les résultats de ce travail sont supérieurs à ceux indiqués par Erbay *et al.* (2015) pour la poudre du fromage et Seth *et al.* (2017) pour la poudre de yaourt et similaire aux résultats signalés par Amiri-Rigi *et al.*, (2012) pour la poudre du lait écrémé.

D'après le digramme de Pareto des effets normalisés, aucun effet significatif n'a été signalé par la température de l'air d'entrée et le débit d'alimentation sur la solubilité (fig.29).

Des études ont été faites sur l'effet de séchage de la température de l'air d'entrée sur la solubilité ont signalé que cette dernière n'est pas affectée de manière significative par ces facteurs (Fazaeli *et al.*, 2012; Mishra *et al.*, 2014; Katekhong and Charoenrein, 2018; Yue *et al.*, 2018). T.A. Tran and V.H. Nguyen (2018) ont indiqué que la solubilité est passée de 66,60 % à 85,73 % lorsque la température d'entrée est passée de 110 à 150 °C. De plus Muzaffar and Kumar (2017) ont indiqué que lors du séchage de la pulpe de tamarin aux températures de 143 et 177 C°, la solubilité passe de 59.82 à 65.22%.

Dans ce travail, selon le traitement statistique ANOVA aucun effet n'est enregistré par le débit d'alimentations sur la solubilité, ce qui concorde aux travaux donnés par Amiri-Rigi *et al.* (2012).

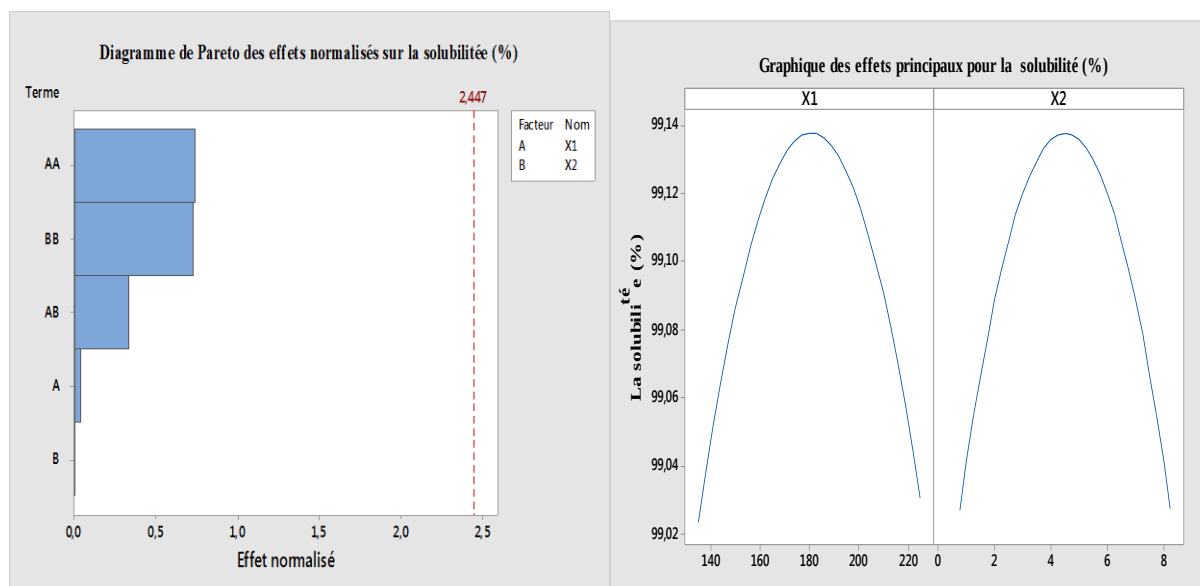


Figure 29 : Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur la solubilité des poudres

I.4.3 Mouillabilité

Le temps de mouillabilité est utilisé pour étudier le caractère instantané d'une poudre (Westergaad, 2010). Le temps de mouillabilité de la poudre de lactosérum est compris entre 190 et 726 s, le temps le plus élevé a été enregistré lors du séchage à une température d'entrée d'air de 210 °C et un débit d'alimentation de 2 L h⁻¹, tandis que le plus faible a été obtenu à 180 °C et 4,5 L h⁻¹.

La mouillabilité de la poudre laitière est considérée comme meilleure lorsque le temps de pénétration des particules dans l'eau est inférieur à 120 s (Schuck, Dolivet, *et al.*, 2012). La poudre obtenue dans cette étude est classée comme non mouillable, et cela est probablement justifié par la taille fines des particules. Selon Gaiani *et al.*, (2007), le temps de mouillage est principalement lié à la charge de surface et à la taille des particules, à la porosité, à la composition de la surface, à l'angle de contact entre la poudre et l'eau et à la densité de la poudre. Les poudres caractérisées par des particules plus grandes ont un temps de mouillage plus faible car les espaces entre les particules sont très grands et facilement pénétrés par le liquide. D'après la figure 30, aucun impact des deux paramètres étudiés sur la mouillabilité.

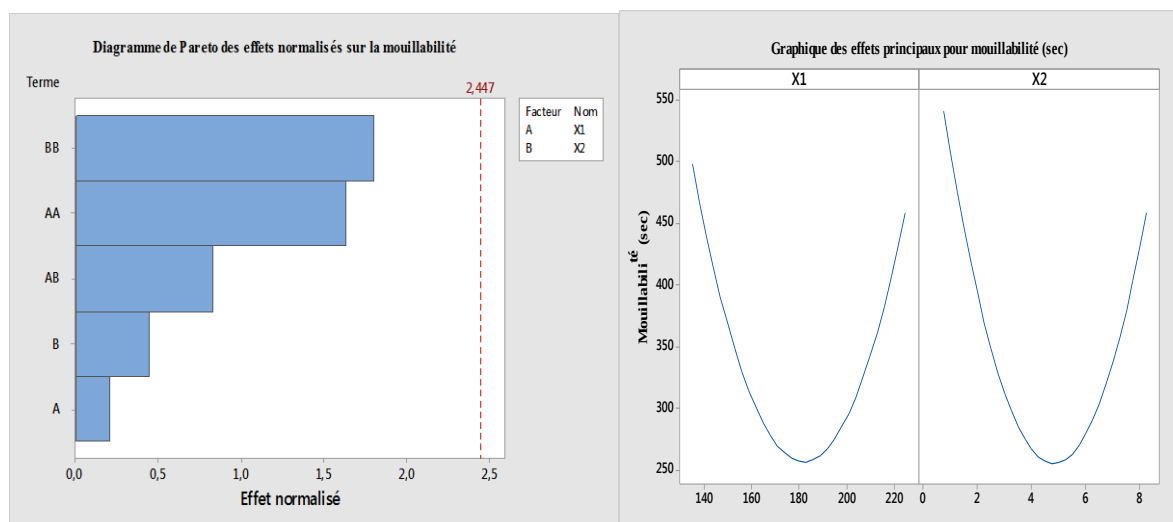


Figure 30 : Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur la mouillabilité des poudres

I.5 Effet sur les paramètres opératoires de l'atomiseur

I.5.1 Température de sortie

La qualité du produit obtenu par le procédé de séchage par atomisation est influencée par la température de sortie (Koc *et al.*, 2010; Atalar and Dervisoglu, 2015). L'ANOVA a montré

un effet linéaire des variables indépendants sur la température de sortie avec un coefficient de régression ($R^2 = 98.58$) (tableau12).

$$TS = -59.4 + 1.226 X_1 - 0.94X_2 - 0.00195X_1^2 + 0.078X_2^2 - 0.0313 X_1 * X_2 \dots(24)$$

Dont ; (X_1) ; Température de l'air à l'entrée, (X_2) ; le débit d'alimentation

La température de sortie a été notée entre 42,4 et 96,3 °C, cette variation est due aux changements des valeurs de la température de l'air d'entrée et le débit d'alimentation utilisé.

Une basse température de sortie (42,4 °C) a été obtenue pour une température d'entrée de 150 C° et un débit d'alimentation de 7 L h⁻¹, tandis qu'une température de sortie très élevée a été notée à une température de l'air d'entrée de 210 °C et un débit d'alimentation faible (2 L h⁻¹).

D'après le diagramme de Pareto des effets (fig.31), la température de l'air de sortie est fortement influencée par le débit d'alimentation et la température de l'air d'entrée.

Selon l'équation (23), un effet linéaire positif ($p < 0.0001$), a été enregistré pour la température de l'air d'entrée sur la température de sortie. Le taux d'alimentation a montré un effet linéaire négatif sur la température de sortie ($p < 0.0001$), ceci est montré sur le graphique des effets principaux des paramètres indépendants sur la température de sortie (fig.31). D'autre part, aucun effet quadratique n'a été signalé sur la température de sortie ($p > 0,05$). Les mêmes constats qui ont été observés dans une étude qui a été réalisé par Lavari *et al.* (2014).

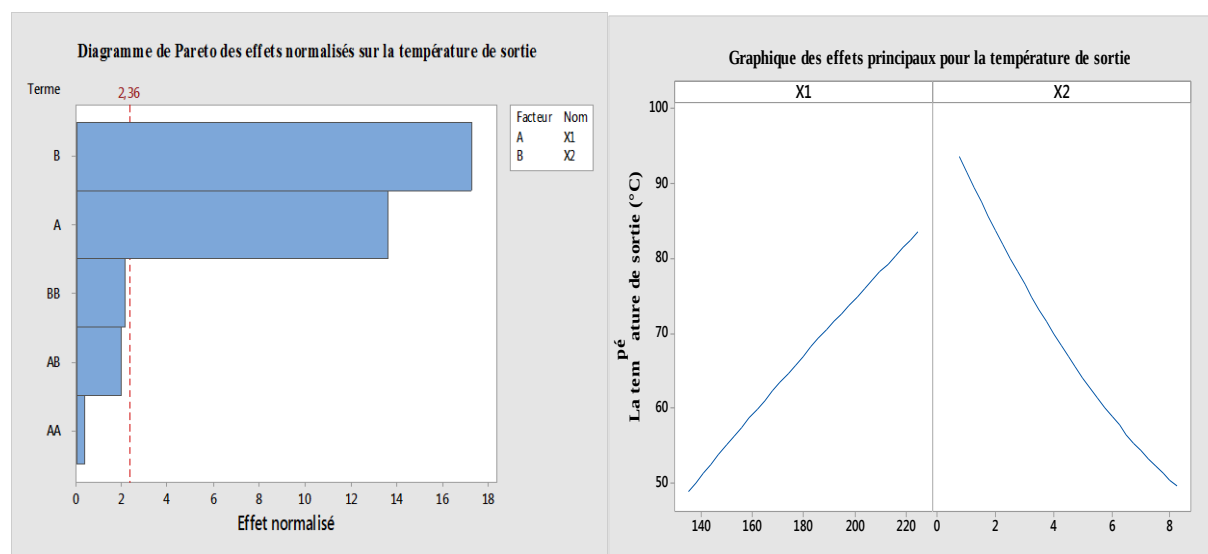


Figure 31 : Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur la température de l'air à la sortie

I.5.2 Efficacité thermique

L'efficacité thermique du sécheur par pulvérisation est définie comme la quantité de chaleur utilisée par rapport à la quantité de chaleur fournie. Additivement au taux de récupération de poudre, l'efficacité thermique est un indicateur de l'efficacité économique du processus de séchage par pulvérisation (Gouaou *et al.*, 2019; Saha *et al.*, 2019).

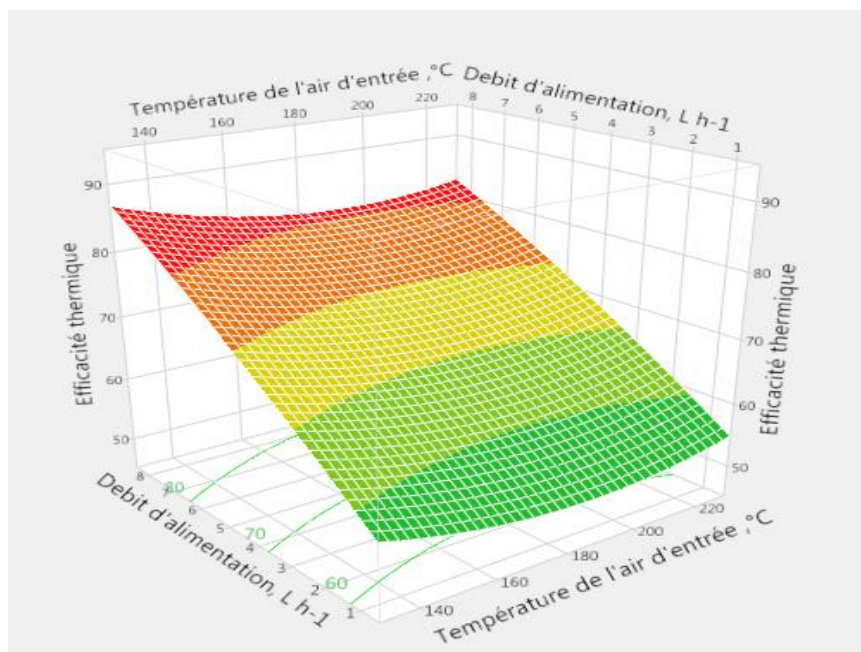


Figure 32 : Surface de réponse de l'effet des conditions de séchage sur l'efficacité thermique de l'atomiseur

D'après le diagramme de surface de réponse (fig.32), l'efficacité thermique du sécheur variait de 55 à 81%. L'efficacité la plus élevée a été enregistrée pour une température de 150 °C et le débit d'alimentation de 7 L h⁻¹, où nous avons constaté qu'aucune poudre n'a été récupérée pour ces paramètres. La plus faible efficacité thermique a été notée pour une température de l'air d'entrée de 180 °C et un débit d'alimentation de 1 L h⁻¹. D'après le diagramme de surface de réponse (fig.32), l'efficacité thermique du sécheur est proportionnelle au débit d'alimentation. Le débit d'alimentation est le seul facteur qui influence positivement l'efficacité thermique de sécheur (fig. 33).

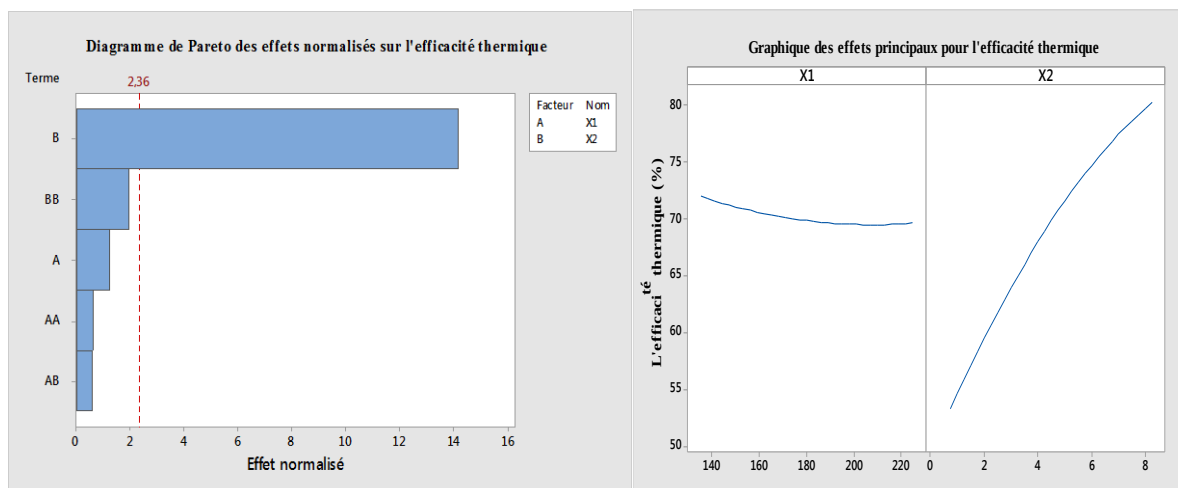


Figure 33 : Effet de la température de l'air d'entrée et du débit d'alimentation sur l'efficacité thermique de l'atomiseur

II. Optimisation des conditions de séchage

Les conditions du séchage ont été optimisées afin de sélectionner les paramètres opératoires pour obtenir le meilleur rendement, une faible teneur en humidité, une dispersibilité élevée, une densité apparente élevée et une température de sortie maximale pour assurer une faible teneur en eau et augmenter la température de transition vitreuse. Les conditions optimales du processus de séchage données sont une température de l'air d'entrée de 182 °C et un débit d'alimentation de 3,2 L/h.

II.1 Caractéristiques physicochimiques et microbiologique de poudre optimisée

Les caractéristique physico-chimiques (tableau 13), à savoir le pH, l'acidité, le taux de cendres et les protéines de la poudre du lactosérum optimale sont de 6.43, 0.12 %, 7.66% et 11 % respectivement. Ce type du lactosérum est classé comme une poudre du lactosérum doux et conforme aux recommandations du *codex alimentarius* (FAO *et al.*, 2007), et sont comparable aux résultats notés par Sert *et al.* (2021).

Les résultats des analyses microbiologiques ont montré l'absence de *salmonella* dans 25 g, et une présence de germe de *Staphylocoques à coagulase+* avec une concentration de 7 ufc/g. Ce dernier est probablement justifié par l'absence de traitement thermique avant l'atomisation ou une contamination post séchage. Néanmoins, ce produit présente une qualité microbiologique satisfaisante et ce conformément aux recommandations données par le journal officiel algérien n° 39 du 02 juillet 2017.

Tableau 13 : Caractéristiques physicochimiques et microbiologiques des poudres optimisées

pH	6.43
Acidité	0.12 %
Cendre	7.66%
Taux de protéines	11 %
<i>Salmonella</i>	Absence dans 25 g
<i>Staphylocoques à coagulase +</i>	7 ufc/g

II.2 Caractéristiques technofonctionnelles de poudre optimisée

De plus des caractéristiques déjà étudiés, nous avons déterminé la couleur, l'indice de Carr, le ratio de Hausner, la solubilité, la mouillabilité, l'hygroscopicité, le degré d'agglomération, la cristallinité, la morphologie, et la température de transition vitreuse de la poudre de lactosérum optimisée. Les réponses prédites et expérimentales sont présentées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Valeurs expérimentales et prédites de la poudre de lactosérum

Réponses	réponses prédites	Réponses expérimentales	Différence Moyenne	<i>P</i> value
Rendement (%)	35.12	32.23 ± 5.10	-2.89	>0.05
Humidité (%)	1.53	1.80 ± 0.25	+ 0.05	>0.05
Densité apparente (g mL ⁻¹)	0.22	0.24 ± 0.01	+ 0.02	>0.05
Densité tassée (g mL ⁻¹)	0.38	0.41± 0.03	+ 0.03	>0.05
Température de l'air de sortie (°C)	77.98	78.96 ±1.36	+ 2.59	>0.05
Dispersibilité (%)	97.22	94.77± 0.26	-1.76	<0.05

Le rendement de la poudre obtenue dans cette étude est supérieur à celui rapporté par Lavari *et al.* (2014). Cependant, les propriétés de la poudre telles que la teneur en eau, la dispersibilité et la solubilité sont acceptables et conforme aux recommandations (Westergaad, 2010; Schuck, Dolivet, *et al.*, 2012; Bhusari *et al.*, 2014; Mahdi Jafari *et al.*, 2019). La solubilité dépasse 99% ce qui classe la poudre comme soluble.

En ce qui concerne le ratio de Hausner (HI) et l'indice de Carr (CI), la poudre de lactosérum est très difficile à écouler (CI > 38, HI > 1,60), et ce conformément à la classification donné par Reddy *et al.* (2014).

Une bonne mouillabilité de la poudre laitière doit avoir un temps de pénétration dans l'eau inférieur à 120 sec (Schuck, Gernigon, *et al.*, 2012), la poudre séchée dans les conditions

optimales reste non mouillable avec un temps de 230 sec. Afin de trouver la température de l'eau idéale pour une bonne mouillabilité, nous avons testé 3 températures de reconstitutions différentes, à savoir une température de 25, 35 et 45 °C. La figure 34 montre l'influence du chauffage de l'eau sur la mouillabilité de la poudre.

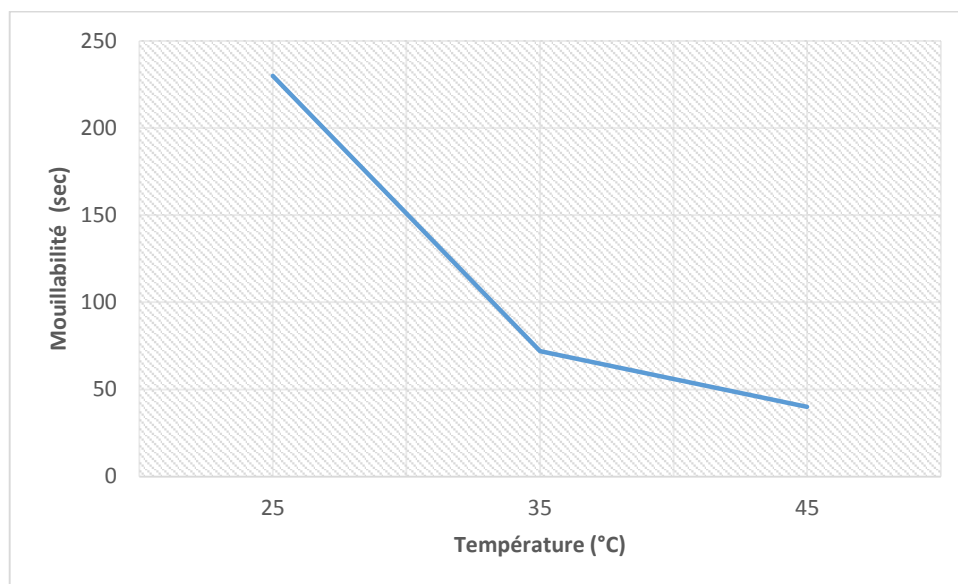


Figure 34 : Impact de la température de reconstitution sur la mouillabilité de la poudre du lactosérum

Nous avons noté que le temps de pénétration de l'eau dans les particules de poudre diminue avec l'augmentation de la température de l'eau. La mouillabilité passe de 250 s à 25°C à seulement 74 s et 39 s pour une température de 35 °C de 45 °C respectivement.

Les coordonnées chromatiques (L^* , a^* , b^*) de la poudre du lactosérum séchée dans les conditions optimales sont respectivement de 94.48, -0.6 et 1.11 (Tableau 15), ces derniers sont comparables à ceux rapportés par Schuck et *al.* (2012); Milovanovic et *al.* (2020). Le lactosérum est un sous-produit jaune affecté par les réactions de Maillard.

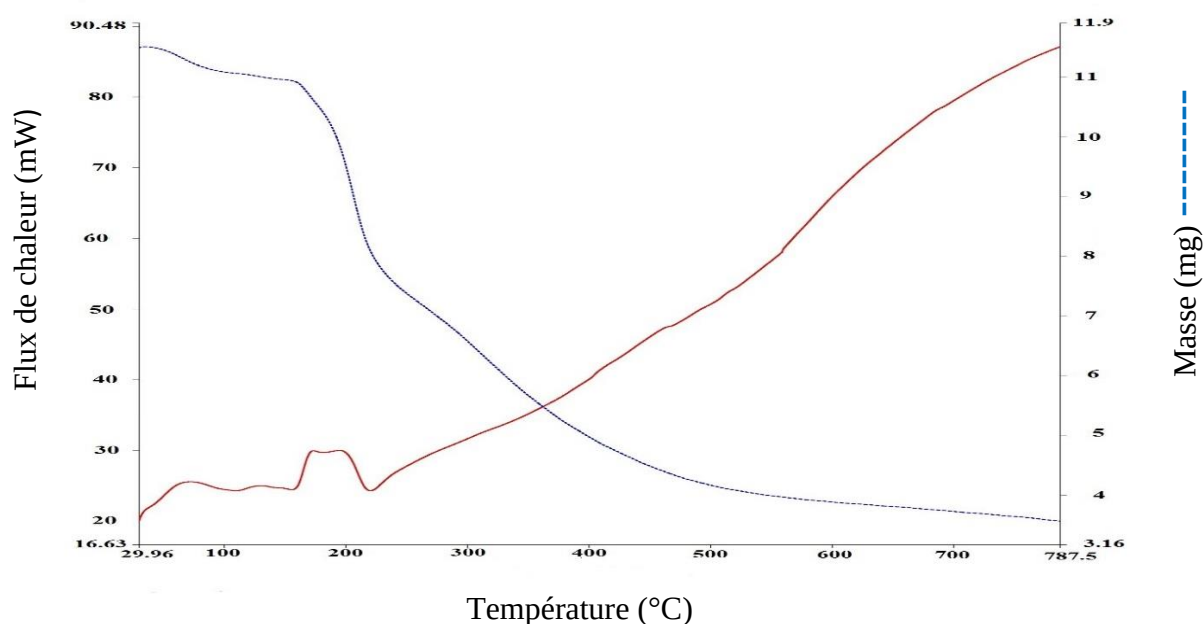
L'hygroscopicité de la poudre du lactosérum est de 16,10 % (tableau 15), ce qui la classe parmi les poudres alimentaires hygroscopiques (Schuck, Dolivet, *et al.*, 2012). Elle est également caractérisée par un degré d'agglomération supérieur à 50 %, cette poudre est classée comme une poudre extrêmement agglomérée (GEA Niro, 2005a).

La température de transition vitreuse est utilisée comme indicateur de la stabilité des aliments et pour prédire le comportement des aliments lors de stockage (Li et *al.*, 2019).

Table 15 : Caractéristiques de la poudre optimale

Caractéristiques	Valeurs
Solubilité (%)	99.00 $\pm$ 0.008
Mouillabilité (s)	230
Indice de Carr (CI) (%)	41.37 $\pm$ 1.85
ratio de Hausner (HI)	1.70 $\pm$ 0.05
Couleur	L* 94.48 $\pm$ 0.57 a* -0.6 $\pm$ 0.23 b* 1.11 $\pm$ 0.21
Hygroscopicité (%)	16.10 $\pm$ 0.06
Degré d'agglomération (%)	85.56 $\pm$ 2.43

La température de transition vitreuse de la poudre produite dans les conditions optimales est de 65 °C (Fig. 35). ZOUARI (2019) a rapporté une Tg inférieure (55 °C), cette différence est justifiée probablement par la teneur en eau (3.6 %) qui est supérieur à la teneur (1.8%) signalée dans ce travail.

**Figure 35 :** Courbe d'analyse thermogravimétrique (ATG/DSC) de la poudre de lactosérum optimisée

Concernant la cristallinité des constituants et la morphologie de la poudre de lactosérum, nous avons comparé la poudre obtenue dans notre étude avec une poudre commerciale d'une marque (Maybi, Turquie).

La cristallinité de la poudre du lactosérum a été déterminée par analyse de diffraction de rayons X. La poudre de lactosérum commerciale a montré des pics cristallins significatifs, contrairement au lactosérum séché par pulvérisation qui présente une forme amorphe (Fig.36). Ce résultat a été noté également par une étude réalisée sur le séchage de perméat de lait, de perméat de lactosérum doux et acide, qui a conclu que le lactose se présente en état amorphe lors du séchage au lieu de la forme cristalline celle de l' α -monohydrate du lactose (Zolnere and Ciprovica, 2019).

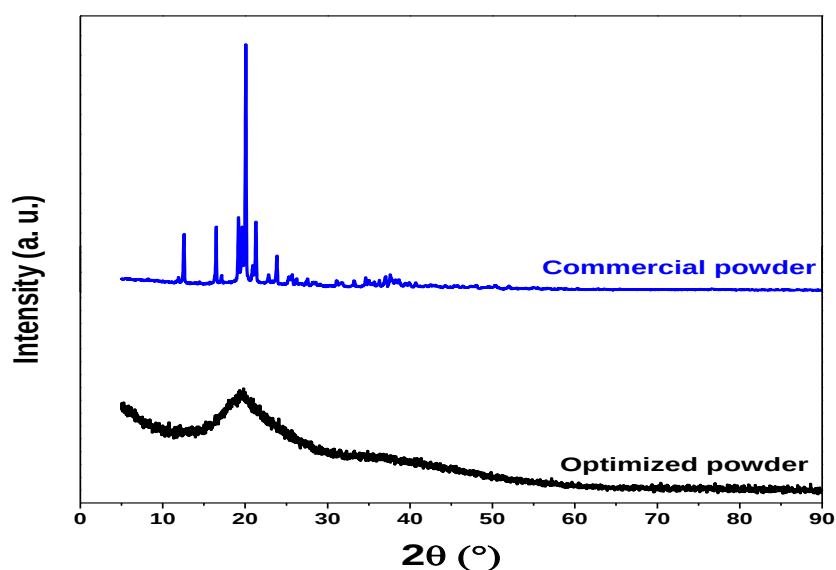
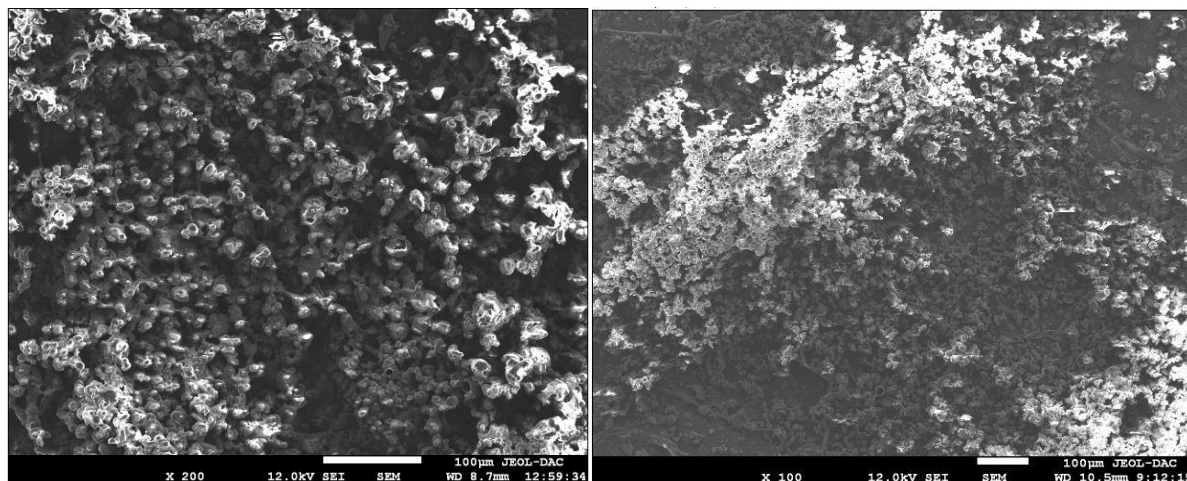
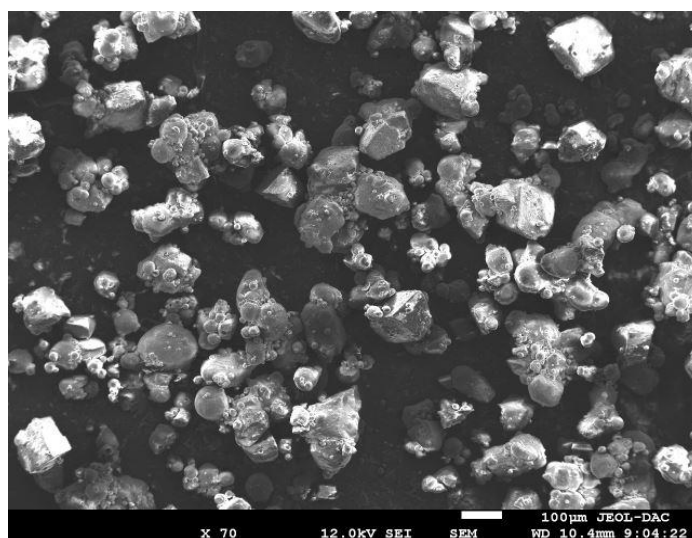


Figure 36 : Diagrammes de diffraction des rayons X de la poudre de lactosérum

La figure 37, présente la morphologie des particules de la poudre d lactosérum. La poudre du lactosérum obtenue après optimisation se caractérise par des particules avec différente tailles, lisse et/ou en forme sphérique, ayant une structure agglomérée (figure 37 a). Par contre, la poudre commerciale présente une forme de cristaux distincts (figure 37 b).



(a)



(b)

Figure 37 : Photographie de MEB des poudres de lactosérum séchées par atomisation (a) Poudre de lactosérum optimisée, (b) Poudre de lactosérum commerciale

Ce résultat est comparable à ceux rapportés par León-Martínez *et al.* (2010); Chegini *et al.* (2014); Mahdi Jafari *et al.* (2019).

III. Effet des agents de séchage sur la qualité des poudres du lactosérum

Dans cette partie du travail nous avons utilisé différents agents de séchage (Maltodextrine, amidon, gélatine) à différentes concentrations, Afin de déterminer l'effet de ces éléments sur la qualité de la poudre de lactosérum, en prenant en compte ses propriétés physiques et d'hydratation. (Tableau 16).

Tableau 16 : Effet des agents de séchage à différentes concentrations sur les propriétés physiques de poudre de lactosérum.

Type d'agent de séchage	Concentration de l'agent de séchage (% p/v)	Rendement (%)	Humidité (%)	Densité apparente (g mL ⁻¹)	Hygroscopicité (%)	Degré d'agglomération (%)
Lactosérum	0	35.12 ^{a/a/d}	1.85 ± 0.25 ^{a/b/b}	0.24 ± 0.01 ^{a/c/ab}	16.06 ± 0.01 ^{a/a/a}	86.89 ± 1.03 ^{b/a/a}
Maltodextrine	2.5	19.37 ^d	1.24 ± 0.04 ^b	0.24 ± 0.01 ^a	12.32 ± 0.52 ^b	92.10 ± 1.63 ^{ab}
	5	24.41 ^c	1.15 ± 0.04 ^b	0.23 ± 0.02 ^{ab}	7.05 ± 0.11 ^c	87.16 ± 3.46 ^b
	7.5	24.52 ^b	1.74 ± 0.1 ^a	0.20 ± 0.01 ^b	7.57 ± 0.16 ^c	95.89 ± 0.56 ^a
Amidon de maïs	1.5	18.48 ^c	2.52 ± 0.93 ^a	0.35 ± 0.03 ^{ab}	13.35 ± 0.17 ^b	90.45 ± 5.21 ^a
	2.5	23.07 ^b	1.51 ± 0.26 ^b	0.30 ± 0.02 ^b	12.58 ± 0.11 ^b	89.86 ± 2.81 ^a
	5	16.49 ^d	1.89 ± 0.13 ^b	0.38 ± 0.02 ^a	7.61 ± 0.8 ^c	93.09 ± 0.13 ^a
Gélatine	0.5	36.52 ^c	0.71 ± 0.1 ^d	0.28 ± 0.01 ^a	15.80 ± 2.48 ^a	90.96 ± 4.31 ^a
	1	39.47 ^a	1.21 ± 0.1 ^c	0.22 ± 0.03 ^b	11.88 ± 1.47 ^{ab}	88.94 ± 2.81 ^a
	1.5	37.03 ^b	7.85 ± 0.7 ^a	0.26 ± 0.03 ^{ab}	7.85 ± 0.03 ^b	91.78 ± 2.30 ^a

(a-b) significativement différentes les unes des autres à p<0,05 selon le test de tukey

III.1. Impact sur les propriétés physiques des poudres du lactosérum

III.1.1 Teneur en eau et rendement

La teneur en eau de la poudre de lactosérum obtenue variait de 0,71 à 7,85% (fig.38). La poudre de lactosérum obtenue sans ajout de l'agent de séchage a une humidité de 1,85 %. L'ajout de maltodextrine entraîne une diminution de la teneur en eau à 1,5 % pour la concentration de 5 % (p/v), tandis que l'ajout de l'amidon de maïs conduit à une augmentation de l'humidité jusqu'à 2,52 % pour une concentration de 1,5 % p/v. D'autre part, l'ajout de gélatine entraîne une augmentation de l'humidité de la poudre du lactosérum de 0.71 à 7.85 %. Nous avons constaté une faible teneur en eau de 0.71 % pour une concentration de gélatine de 0,5% (p/v), tandis que pour une concentration de gélatine de 1,5% p/v, nous avons constaté une augmentation de teneur en eau à 7,85% p/v. Ceci peut être attribué à la capacité de rétention d'eau des protéines (Westergaad, 2010; Anuar *et al.*, 2021). Les taux d'humidité de tous les échantillons de poudre étaient inférieures à 5% à l'exception de celle de 1,5% de gélatine, cette humidité est sûre pour le stockage en raison des faibles activités de l'eau.

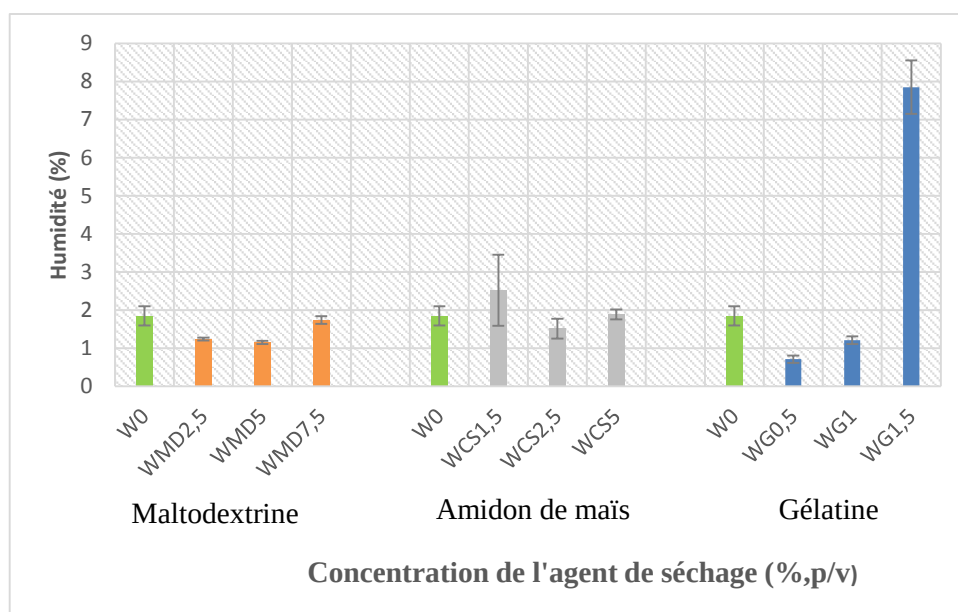


Figure 38. Effets de la concentration en agents de séchage sur la teneur en eau des poudres de lactosérum (W0 : lactosérum, WMD : lactosérum avec maltodextrine, WCS : lactosérum avec amidon de maïs, WG : lactosérum avec gélatine)

Le rendement de la production de poudre varie de 16,49 à 39,47 % (fig., 39). L'ajout des agents de séchage n'a entraîné aucune augmentation du rendement par rapport au lactosérum seul quel que soit l'agent de séchage et quel que soit la concentration utilisée (polysaccharide), à l'exception l'utilisation de la gélatine.

Lors de l'utilisation de l'amidon de maïs à des concentrations supérieures à 2,5 %, nous avons observé la formation d'un gel à l'intérieur du tuyau d'alimentation du produit ce qui peut justifier la diminution significative du rendement en poudre ($p < 0,05$) (voir annexe 7). Les mêmes observations ont été signalées par Sarabandi *et al.*, (2018).

Une différence significative ($p < 0,05$) a été notée entre le rendement de la poudre séchée avec le maltodextrine et l'amidon de maïs par rapport au témoin, cette différence est probablement due à l'adhésion de la poudre aux parois internes de la chambre de séchage suite à la fusion du matériau (Largo Ávila *et al.*, 2015). Par contre, une bonne récupération de la poudre a été observée après l'ajout de 0,5 % de gélatine. Le film riche en protéines est converti en un état vitreux non collant pendant le séchage, et ce film a été formé par la migration des protéines vers l'interface air-eau de la solution d'alimentation (Fang and Bhandari, 2012; Gong *et al.*, 2018). De plus, il a été constaté que l'augmentation du rapport protéine/lactose dans une solution d'alimentation diminue le risque de collage de la poudre en raison de l'influence combinée de Tg et T-Tg (Hogan and O'Callaghan, 2010).

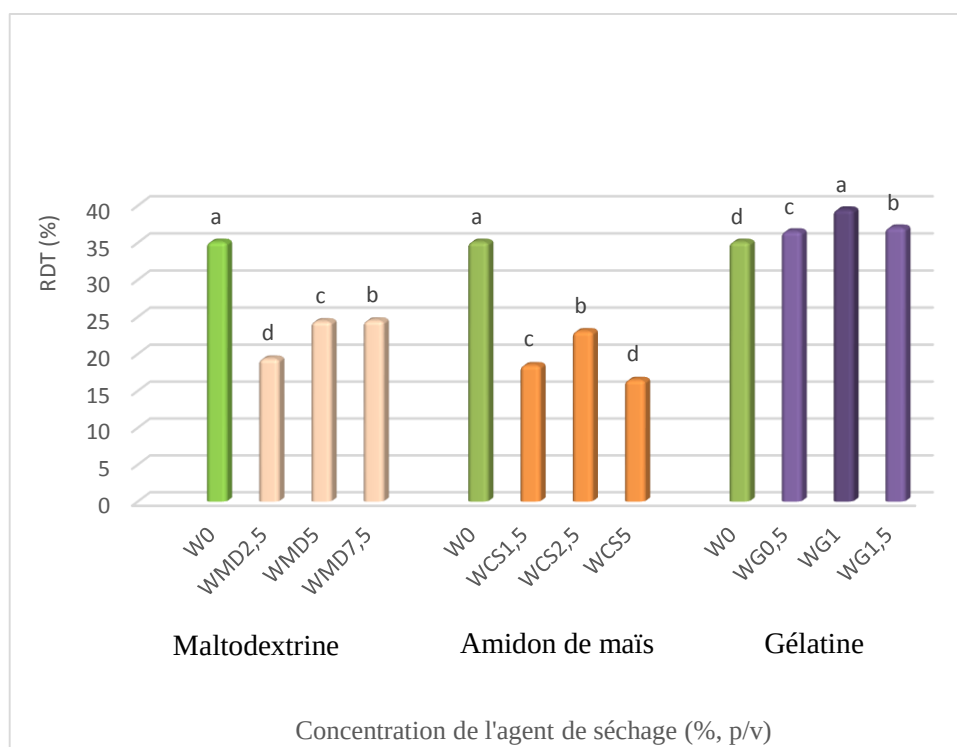


Figure 39 : Effets de la concentration en agents de séchage sur le rendement de poudre de lactosérum (W0 : lactosérum, WMD : lactosérum avec maltodextrine, WCS : lactosérum avec amidon de maïs, WG : lactosérum avec gélatine)

Amiri-Rigi *et al.* (2011) ont rapporté des rendements de séchage du lait écrémé de 40,07 à 92,27%, tandis que pour le séchage du lactosérum Mahdi Jafari *et al.* (2019) ont rapporté des rendements de 23,2 à 96,4%, ce qui est plus élevé que celui trouvé dans notre étude. Cette différence est probablement due à la méthode et aux conditions de séchage utilisées notamment le type de sécheur.

III.1.2 Densités apparente et densité tassée des poudres

La densité apparente de la poudre du lactosérum avec différents supports était dans la gamme de 0,20 à 0,38 g mL⁻¹ (Tableau 16). Nani and Krishnaswamy (2022) ont rapporté les mêmes résultats, lors du séchage par pulvérisation du lactosérum acide.

Une différence significative dans la densité apparente des échantillons ($p < 0,05$) a été signalée lors de l'ajout des agents de séchage. La densité apparente de la poudre de lactosérum obtenue a diminué ($p < 0,05$) de 0,24 à 0,20 g cc⁻¹ lorsque la concentration en maltodextrine augmente de 2,5 à 7,5 %. L'augmentation de la concentration en amidon de maïs et en gélatine a diminué de manière significative ($p < 0,05$) la densité de la poudre du lactosérum (fig.40).

La diminution de la densité apparente avec l'augmentation du taux d'ajout de support peut être due à l'augmentation de la viscosité de l'aliment (Yousefi *et al.*, 2011; Fazaeli *et al.*, 2012; Bhusari *et al.*, 2014). En général, les poudres produites avec l'amidon ont montré la densité apparente la plus élevée.

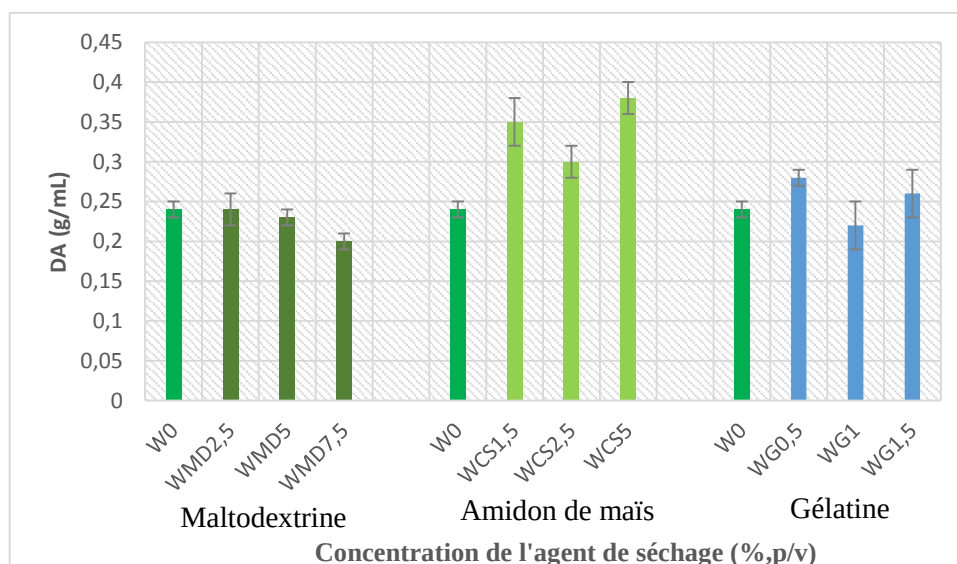


Figure 40 : Effets de la concentration en agents de séchage sur la densité apparente des poudres de lactosérum (W0 : lactosérum, WMD : lactosérum avec maltodextrine, WCS : lactosérum avec amidon de maïs, WG : lactosérum avec gélatine)

III.1.3 Coulabilité

La fluidité des différents échantillons du lactosérum est présentée dans le tableau 17. L'indice de Carr et le ratio de Hausner des poudres de lactosérum varient respectivement de 25,55 à 51,36 % et de 1,34 à 2,05.

Tableau 17. Indice de Carr (IC) et ratio de Hausner (HR) des poudres de lactosérum

Type de l'agent de séchage	Concentration de l'agent de séchage (% w/v)	CI (%)	HR
Lactosérum	0	$41.37 \pm 1.85^{a/b/b}$	$1.70 \pm 0.05^{d/b/b}$
Lactosérum + Maltodextrine	2.5	41.74 ± 0.005^a	1.71 ± 0.16^c
	5	41.07 ± 0.19^a	1.70 ± 0.73^b
	7.5	45.40 ± 0.002^a	1.83 ± 0.05^a
Lactosérum + Amidon de maïs	1.5	48.20 ± 2.22^a	1.93 ± 0.08^a
	2.5	51.36 ± 1.74^a	2.05 ± 0.07^a
	5	40.74 ± 2.20^b	1.68 ± 0.06^b
Lactosérum + Gélatine	0.5	43.86 ± 3.26^{ab}	1.70 ± 0.1^{ab}
	1	49.46 ± 2.98^a	1.98 ± 0.12^a
	1	49.46 ± 2.98^a	1.98 ± 0.12^a
	1.5	25.55 ± 0.96^c	1.34 ± 0.01^c

^(a-b) significativement différents les uns des autres à $p < 0,05$ selon le test de Tukey.

En général, il a été constaté que l'indice de Carr augmente ($p < 0,05$) avec l'augmentation du taux de l'agent de séchage (amidon de maïs, gélatine). Néanmoins, aucune différence significative n'a été observée lorsque la maltodextrine DE18 a été utilisé comme agent de séchage. Le rapport de Hausner des poudres a été affecté par l'ajout d'agent de séchage, ($p < 0,05$).

En termes de propriétés de manipulation, la poudre de lactosérum séchée avec différents agents de séchage avait les mêmes caractéristiques d'écoulement, et sont classées comme des poudres hautement cohésives par rapport à leur ratio de Hausner qui est supérieur à 1,4. Ceci est en accord avec leur indice de Carr qui indique que leur fluidité est faible (Jinapong *et al.*, 2008). Néanmoins, la poudre de lactosérum séché avec 1,5% de gélatine présente une bonne fluidité et une cohésivité moyenne. Cette variation de la fluidité est probablement due à la taille des particules, ainsi qu'à la présence de protéines car les protéines provoquent une augmentation de la viscosité de la solution, ce qui entraîne la formation de particules de poudre plus grosses (Bhusari *et al.*, 2014), une taille de particule plus importante offre moins de points de contact, ce qui réduit la cohésion (Muzaffar and Kumar, 2017).

III.1.4 Hygroscopicité

L'hygroscopicité est l'une des principales caractéristiques de la stabilité des poudres alimentaires (Šavikin *et al.*, 2021). L'absorption d'humidité dans les poudres alimentaires réduit la qualité, la durée de conservation et augmente le taux de réactions destructrices (Sarabandi *et al.*, 2018). L'hygroscopicité est influencée par la composition du produit et la concentration des agents de séchage (Koç and Dirim, 2018).

La teneur en agent de séchage dans les solutions alimentaires a un effet significatif ($p < 0,05$) sur l'hygroscopicité des poudres comme, il a montré dans tableau 15. L'ajout d'agents de séchage a diminué l'hygroscopicité de la poudre du lactosérum obtenue (fig.41). L'hygroscopicité de la poudre du lactosérum sans agent de séchage est de 16,06 %, qui est supérieur à celle de la poudre séchée avec le maltodextrine DE18, l'amidon de maïs et la gélatine, dont leur valeurs variaient de 7,05 à 12,32 g/100 g, 7,61 à 13,35 g/100 g et 7,85 à 15,80 g/100 g, respectivement. Il est important de noter que l'hygroscopicité la plus élevée est notée à la concentration la plus faible de chaque agent de séchage utilisé.

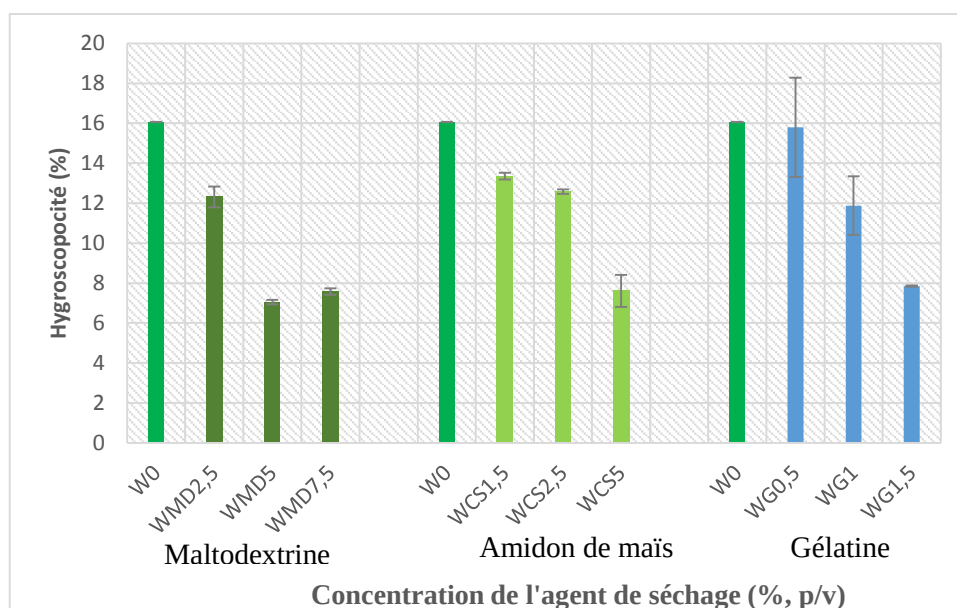


Figure 41 : Effets de la concentration en agents de séchage sur hygroscopicité des poudres de lactosérum (W0 : lactosérum, WMD : lactosérum avec maltodextrine, WCS : lactosérum avec l'amidon de maïs, WG : lactosérum avec gélatine)

La température de transition vitreuse (T_g), est un indicateur descriptif de l'hygroscopicité, plus la T_g de la poudre est élevée, plus son hygroscopicité est faible (Bhusari *et al.*, 2014). La diminution de l'hygroscopicité de la poudre contenant le maltodextrine et l'amidon est probablement due à leur poids moléculaire élevé.

III.1.5 Degré d'agglomération

Les résultats du degré d'agglomération des poudres du lactosérum obtenues sont illustrés dans le tableau 16. Les résultats ont montré que le degré d'agglomération n'était pas influencé par l'augmentation de la concentration dans le cas d'utilisation de l'amidon et la gélatine ($p > 0,05$) comme agents de séchage. Par contre, une différence significative a été notée lors de l'ajout de maltodextrine ($p < 0,05$) dans la solution à pulvériser.

Le degré d'agglomération des poudres de lactosérum séchées variait de 92,10 à 95,89 %, après ajout de maltodextrine de 90,45 à 93,09 % après ajout de l'amidon de maïs et de 90,96 à 91,78 % après ajout de gélatine. Le degré d'agglomération de la poudre du lactosérum sans ajout d'un agent de séchage est de 86.89%.

Toutes les poudres avaient un degré d'agglomération supérieur à 50%, elles sont considérées comme des poudres extrêmement collantes (GEA Niro, 2005a; Schuck, Dolivet, *et al.*, 2012). Il a été constaté une corrélation négative entre l'hygroscopicité et le degré d'agglomération de la poudre du lactosérum séché avec différents agents de séchage.

III.1.6 Couleur des poudres

Les résultats d'analyses de la couleur de la poudre de lactosérum séché avec différents agents de séchage en fonction de leur concentration, sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 18 : Couleur des poudres de lactosérum séchées avec différentes concentrations des agents de séchage

Type de l'agent de séchage	Concentration de l'agent de séchage (% w/v)	L*	a*	b*
Lactosérum	témoin	94.77±0.43 ^{b/b/b}	-0.55 ±0.23 ^{a/b/a}	1.17±0.2 ^{a/a/bc}
Lactosérum + Maltodextrine	2.5	95.9±0.43 ^b	-0.32 ±0.56 ^a	0.35 ±0.1 ^a
	5	97.1± 0.49 ^a	-0.62 ± 0.15 ^a	0.45 ±0.25 ^a
	7.5	95.9 ±0.75 ^b	-0.67 ±0.20 ^a	0.57 ±0.93 ^a
Lactosérum + Amidon de maïs	1.5	94.05 ±0.55 ^b	-0.97 ±0.20 ^a	0.19 ±0.23 ^a
	2.5	96.65± 0.65 ^a	-1.00 ±0.57 ^a	0.22 ±1.12 ^a
	5	97.50± 0.71 ^a	-0.65 ±0.19 ^a	1.50 ± 0.27 ^a
Lactosérum +Gélatine	0.5	96.87±0.77 ^a	-0.7 ±0.16 ^{ab}	1.62 ±0.32 ^{ab}
	1	95.90 ±0.74 ^{ab}	-0.25 ±0.1 ^a	0.62 ±0.25 ^c
	1.5	94.77±0.18 ^b	-1.12 ±0.37 ^b	2.3 ±0.63 ^{ab}

(a-b) significativement différentes les unes des autres à $p < 0,05$ selon le test de tukey

D'après le tableau 18, la luminosité L^* , de la poudre du lactosérum variait de 94.77 à 97.50. L'addition des agents de séchage a montré une augmentation de la luminosité, dû probablement à la couleur des agents utilisés. L'utilisation des polysaccharides comme des agents de séchage à savoir le maltodextrine et l'amidon de maïs ont montré l'augmentation de la luminosité de 95.9 à 97 et 94.05 à 97.50 respectivement, en fonction de leur concentration. Par contre, l'utilisation de protéine comme un support de séchage a montré une diminution de valeur L^* de 96.87 à 94.77.

Concernant les valeurs des coordonnées chromatiques a^* et b^* , tous les échantillons ont montré a^* négatif et b^* positif. Ceci indique que la couleur de ces échantillons est située dans la bande jaune-verte dans l'espace du système CIElab, qui est la couleur initiale du lactosérum liquide. Le traitement statistique n'a montré aucune différence significative ($p > 0.05$).

III.2 Propriétés d'hydratation

III.2.1 Solubilité

La plupart des aliments en poudre sont destinés à une réhydratation instantanée et complète. Comme le montre le tableau 19, la solubilité de la poudre du lactosérum séchée avec différents agents varie de 97,93 à 99,25 %. Les poudres des produits laitiers dont la solubilité est supérieure à 99 % sont classées comme poudres solubles (Schuck, Dolivet, *et al.*, 2012). Les poudres séchées avec le maltodextrine comme agent de séchage ont une solubilité égale ou supérieure à 99%, aucune différence significative n'a été notée entre les différentes concentrations ($p > 0,05$). Ce résultat est principalement justifié par une bonne solubilité de la maltodextrine dans l'eau (Wang *et al.*, 2020; Šavikin *et al.*, 2021). En revanche, un effet significatif ($p < 0,05$) a été observé lors l'utilisation de l'amidon de maïs comme agent de séchage, dont la solubilité est passée de 98,95 à 99,25 %, pour une concentration de 3,5 % (p/v) d'amidon de maïs.

Dans le cas de 0,5 % (p/v) de gélatine ajoutée, la solubilité passe de 98,98 à 99,16 %, après quoi aucune différence significative n'est constatée. Ces résultats sont similaires aux résultats obtenus par Wang *et al.* (2020) lorsque le jus de grenade est séché avec des protéines de lactosérum. La bonne solubilité de la poudre de lactosérum en utilisant la gélatine comme agent de séchage est justifiée par une bonne solubilisation de la gélatine après séchage par atomisation (Kanwate *et al.*, 2019)

Tableau 19 : Propriétés de reconstitution des poudres de lactosérum séchées avec différents agents de séchage

Type de l'agent de séchage	Concentration de l'agent de séchage (% w/v)	Solubilité (%)	Dispersibilité (%)
Lactosérum	0	99.00 ± 0.006 ^{a/b/b}	94.77 ± 0.26 ^{d/b/a}
Lactosérum + Maltodextrine	2.5	99.04 ± 0.005 ^a	96.41 ± 0.16 ^c
	5	99.03 ± 0.19 ^a	97.87 ± 0.73 ^b
	7.5	99.00 ± 0.002 ^a	98.98 ± 0.05 ^a
Lactosérum + Amidon de maïs	1.5	98.95 ± 0.005 ^c	94.31 ± 0.93 ^b
	2.5	98.98 ± 0.01 ^b	99.59 ± 0.26 ^a
	5	99.25 ± 0.01 ^a	98.22 ± 0.13 ^a
Lactosérum + Gélatine	0.5	98.98 ± 0.025 ^b	94.96 ± 0.1 ^a
	1	99.16 ± 0.005 ^a	88.57 ± 0.1 ^b
	1.5	99.12 ± 0.03 ^a	83.49 ± 0.7 ^c

(a-b) significativement différents les uns des autres à $p < 0,05$ selon le test de Tukey.

III.2.2 Dispersibilité

La dispersibilité est également un élément important du processus de reconstitution/réhydratation, et elle est principalement liée à la taille des particules. Le tableau 18 montre que la dispersibilité de la poudre du lactosérum se situe entre 83,49 et 99,59 %. Une différence significative a été observée lors du séchage du lactosérum avec différents agents de séchage ($p < 0,05$). Ces poudres sont classées comme poudres dispersibles selon l'intervalle donné par Bhusari *et al.* (2014), qui est de l'ordre de 67,05 à 99,98%.

La dispersibilité de la poudre a augmenté de 94,77 à 98,98%, et de 94,77 à 99,59%, lors de l'ajout de 7,5% (p/v) de maltodextrine et de 2,5% (p/v) de l'amidon de maïs, respectivement. Ces résultats peuvent être expliqués par l'augmentation de la taille des particules de la poudre (Seth *et al.*, 2017; Felfoul *et al.*, 2021). D'autre part, la dispersibilité de la poudre a diminué de 94,96 à 83,49 %, lorsque la concentration de gélatine dans le lactosérum passe de 0,5 à 1,5 % (p/v), respectivement. Ces résultats peuvent être justifiés par la capacité de rétention d'eau de la gélatine. Une corrélation négative a été notée entre la dispersibilité et la teneur en eau dans les poudres séchées en utilisant des protéines comme agents de séchage (Goula and Adamopoulos, 2005; Saha *et al.*, 2019).

III.3 Température de l'air à la sortie et l'efficacité thermique de sécheur

La qualité du produit obtenu par le processus de séchage par atomisation et la quantité d'énergie consommée sont influencées par la température de sortie (Koc *et al.*, 2010; Atalar and

Dervisoglu, 2015; Domínguez-Niño *et al.*, 2018). Les effets des différents agents de séchage et leurs concentrations sur la température de sortie et l'efficacité thermique de l'atomiseur sont présentés dans le tableau 20 et la figure 42, et 43.

L'analyse statistique, a montré une différence significative ($p < 0,05$) entre les différentes concentrations lors de l'ajout de la maltodextrine (Tableau 20) sur la température de l'air à la sortie et l'efficacité thermique de sécheur, mais aucune différence significative n'a été notée lors de l'ajout de l'amidon. Cependant, une différence significative a également été observée lorsqu'une concentration de 1,5 % de gélatine a été ajoutée par rapport au contrôle.

Tableau 20. Effet des agents de séchage à différentes concentrations sur la température de l'air de sortie et l'efficacité thermique de l'atomiseur

Type de l'agent de séchage	Concentration de l'agent de séchage (% p/v)	Température de sortie (°C)	Efficacité thermique (%)
Lactosérum	0	78.96 ± 1.63 ^{c/a/a}	64 ± 0.01 ^{a/b/b}
Lactosérum + Maltodextrine	2.5	79.90 ± 4.4 ^{bc}	63 ± 0.02 ^a
	5	86.50 ± 2.5 ^{ab}	58 ± 0.01 ^b
	7.5	87.90 ± 1.05 ^a	58 ± 0.00 ^b
Lactosérum + Amidon de maïs	1.5	73.36 ± 3.96 ^a	69 ± 0.01 ^a
	2.5	78.90 ± 1.83 ^a	67 ± 0.01 ^a
	5	76.23 ± 2.74 ^a	67 ± 0.01 ^a
Lactosérum + Gélatine	0.5	76.93 ± 0.55 ^a	65 ± 0.00 ^{ab}
	1	76.76 ± 2.08 ^a	65 ± 0.01 ^{ab}
	1.5	73.20 ± 0.95 ^b	67 ± 0.00 ^a

(a-b) significativement différents les uns des autres à $p < 0,05$ selon le test de Tukey.

Selon la figure 43, la température de sortie de l'air augmente avec l'augmentation de concentration de maltodextrine et diminue avec l'ajout de l'amidon de maïs. L'ajout de gélatine a diminué la température de sortie de 78,96 à 76,76 °C. Elle a diminué de manière significative lorsque la concentration de gélatine augmente de 0,5 à 1,5%. Cette variation de la température de l'air à la sortie peut s'expliquer par le taux de l'extrait sec d'une part et d'autre part par la capacité de rétention d'eau exercée par la gélatine.

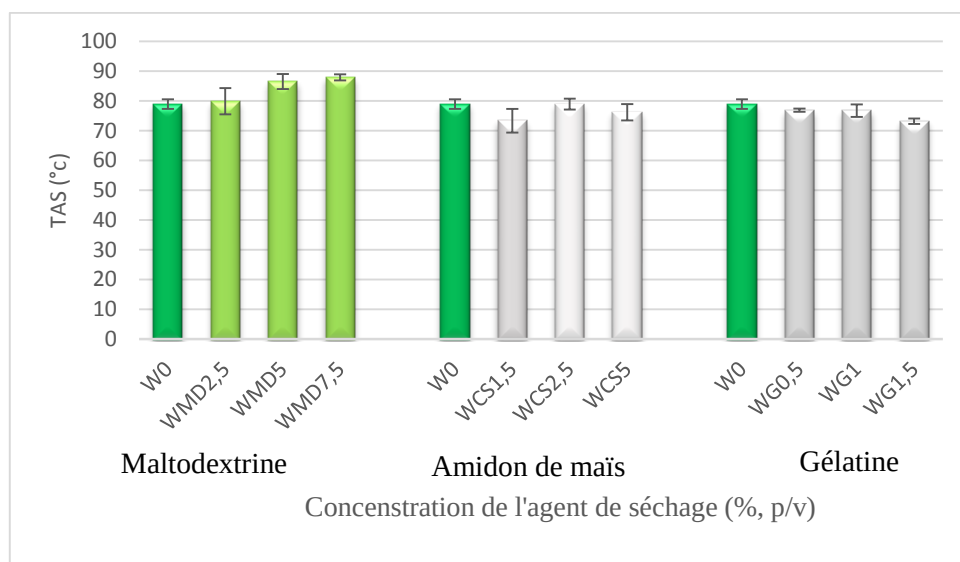


Figure 42 : Effets de la concentration en agents de séchage sur la température de l'air à sortie de l'atomiseur (W0 : lactosérum, WMD : lactosérum avec maltodextrine, WCS : lactosérum avec amidon de maïs, WG : lactosérum avec gélatine)

L'efficacité thermique du séchoir varie de 58 à 67 % (Tableau 20, Figure 44). L'efficacité thermique du sécheur lors de séchage de lactosérum sans agent de séchage était de 64%, l'utilisation de maltodextrine à différentes concentrations a causé la diminution de l'efficacité thermique jusqu'à 58%. Lors de l'utilisation de l'amidon de maïs et de gélatine, l'efficacité thermique a augmenté de 64 à 69%. Cette amélioration pourrait être due à l'augmentation de la surface de contact entre le lactosérum et l'air, ce qui favorise un transfert de chaleur de l'air vers le lactosérum.

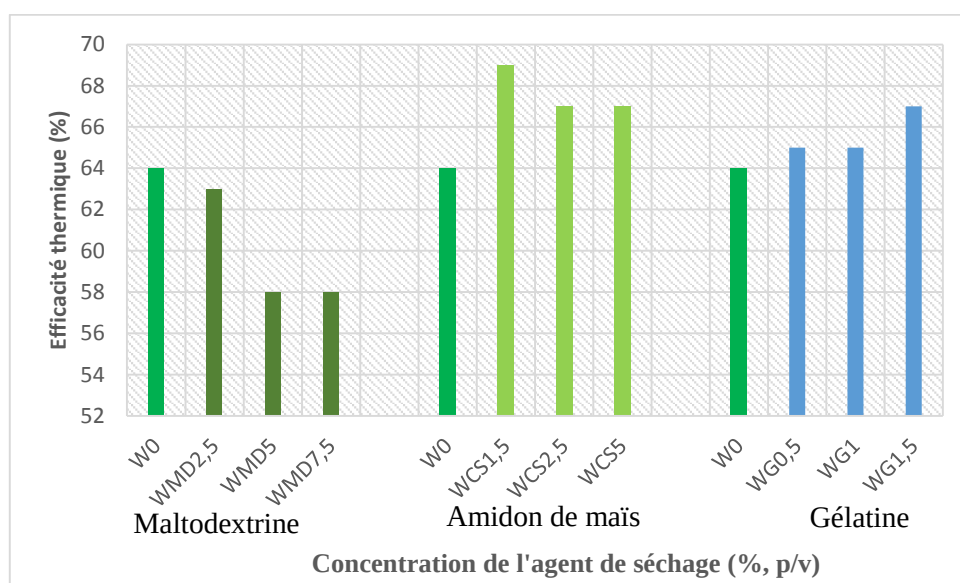


Figure 43 : Effets de la concentration en agents de séchage sur l'efficacité thermique de l'atomiseur (W0 : lactosérum, WMD : lactosérum avec maltodextrine, WCS : lactosérum avec amidon de maïs, WG : lactosérum avec gélatine)

III.4 Cristallinité des poudres de lactosérum

La cristallinité des constituants de la poudre de lactosérum séchée avec différents gents de séchage à savoir maltodextrine, l'amidon de maïs et de gélatine sont présentées dans les figures 44,45 et 46 respectivement.

Lors de l'utilisation de l'amidon comme agent de séchage à différente concentration, il a été constaté que les pics de la forme cristalline de la poudre étaient absents avec présence de la forme amorphe. Les mêmes observations ont été notées lors de l'utilisation du maltodextrine comme support de séchage à différente concentration. Par contre, le séchage du lactosérum en utilisant la gélatine comme un support de séchage a influencé la cristallinité des constituants de la poudre. L'utilisation de 1.5 % (p/v) permet de transférer la forme amorphe d'une poudre vers la forme cristalline.

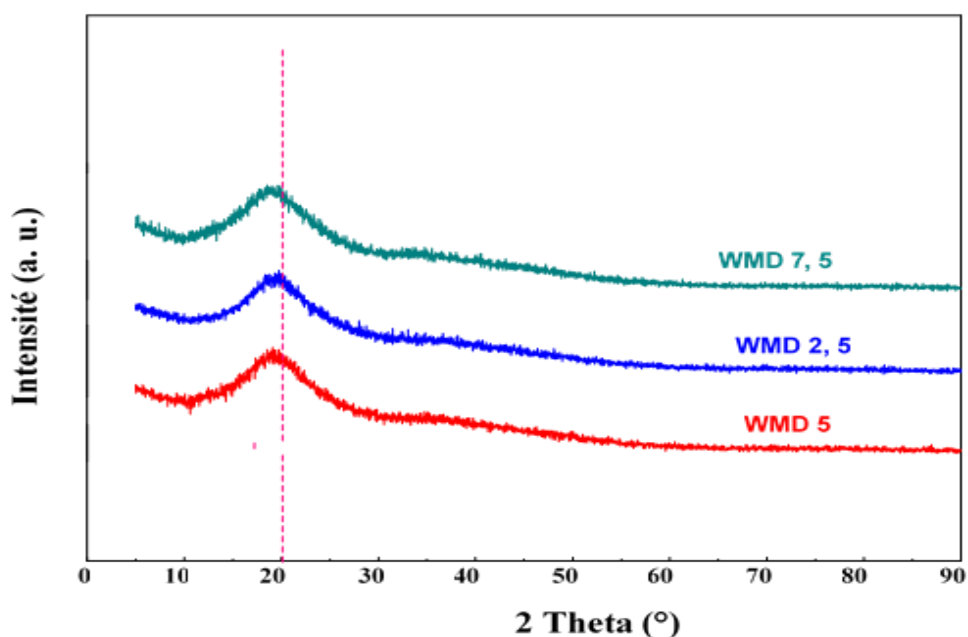


Figure 44 : Diffractogrammes des rayons X de la poudre de lactosérum produite en fonction de la teneur en Maltodextrine (WMD 7.5 ; (7.5 % (p/v), WMD 5 ; (5 % (p/v), WMD 2.5 ; (2.5 % (p/v))

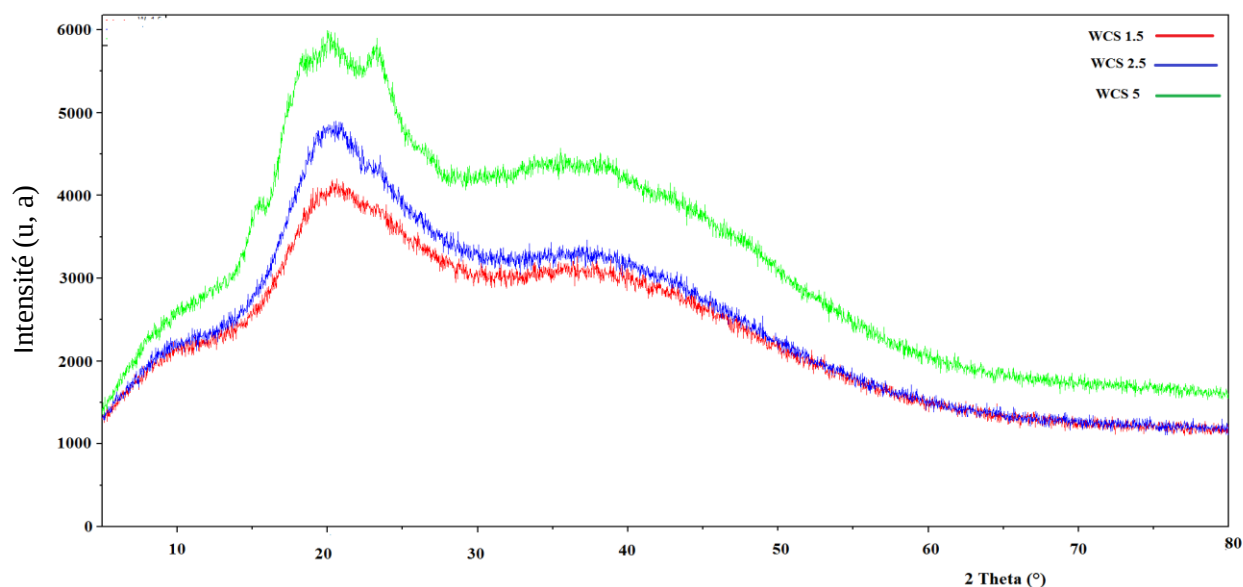


Figure 45 : Diffractogrammes des rayons X de la poudre de lactosérum produite en fonction de la teneur en amidon de maïs (WCS 5 ; (5 % (p/v), WCS 2.5 ; (2.5 % (p/v), WCS 1.5 ; (1.5 % (p/v))

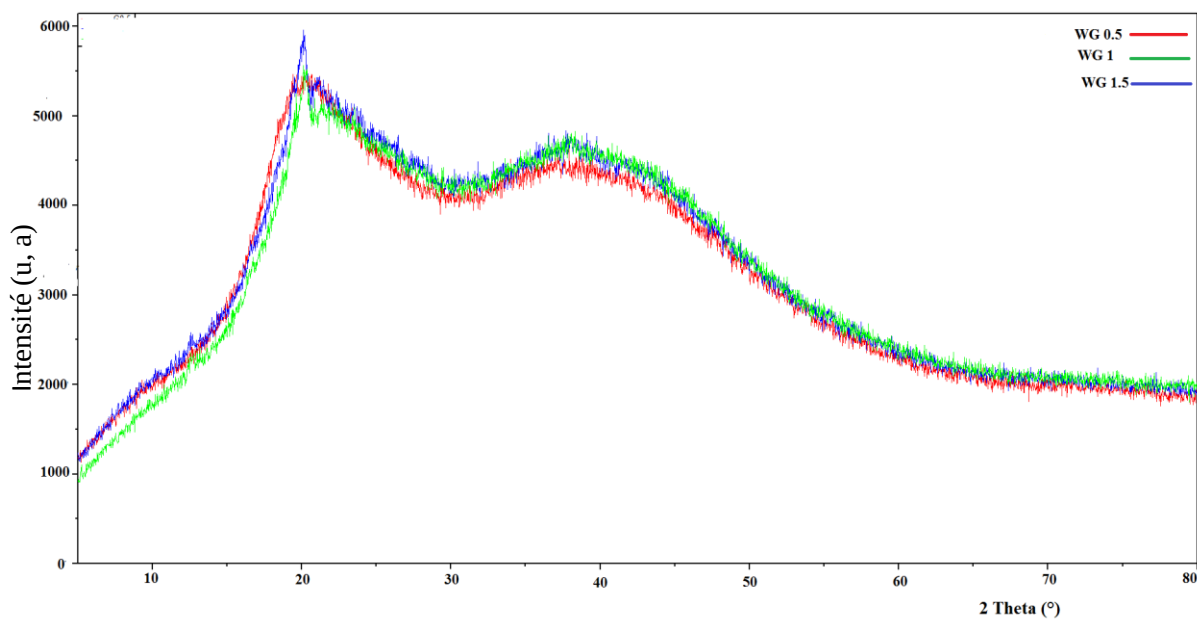


Figure 46 : Diffractogrammes des rayons X de la poudre de lactosérum produite en fonction de la teneur en gélatine maïs (WCS 5 ; (5 % (p/v), WCS 2.5 ; (2.5 % (p/v), WCS 1.5 ; (1.5 % (p/v))

IV. Impact de la substitution de la poudre du lait écrémé par la poudre du lactosérum

Pour rappel, dans cette section, nous avons fabriqué un cake en substituant la poudre du lait écrémé par la poudre du lactosérum obtenue dans la première partie, avec des taux de 20 à 100 %.

IV.1. Densité et microstructure de la pâte

La densité de la pâte est une propriété physique très importante qui indique la quantité de bulles d'air incorporée initialement dans la pâte pendant le mélange (Chaiya and Pongsawatmanit, 2011; Díaz-Ramírez *et al.*, 2016; Jyotsna *et al.*, 2016). La densité de la pâte peut être utilisée pour prévoir la qualité du produit fini cuit (Chaiya and Pongsawatmanit, 2011). Elle varie en fonction de la tension superficielle et de la viscosité de la pâte. La densité de la pâte est influencée par la vitesse et la conception du mélangeur. Une densité de pâte faible est souhaitée.

L'effet de la substitution du lait écrémé par la poudre du lactosérum sur la densité et le taux d'aération de la pâte est illustré dans la figure 47. La densité et le taux d'aération en fonction de la substitution variaient de 1.065 à 1.17 g/mL et 12.89 à 14.42 % respectivement. Le taux d'aération le plus faible (12.89 %) correspond à la densité de la pâte la plus faible (1.065 g/mL). Alors que pour avoir une densité de la pâte plus faible, il est nécessaire de favoriser l'incorporation de l'air lors de l'opération du mélange de la pâte. Le taux d'aération de la pâte se situe entre de 12.89 à 14.47 %, une faible densité donne un nombre important de bulles d'air (Marcela Jarpa-Parra *et al* 2017).

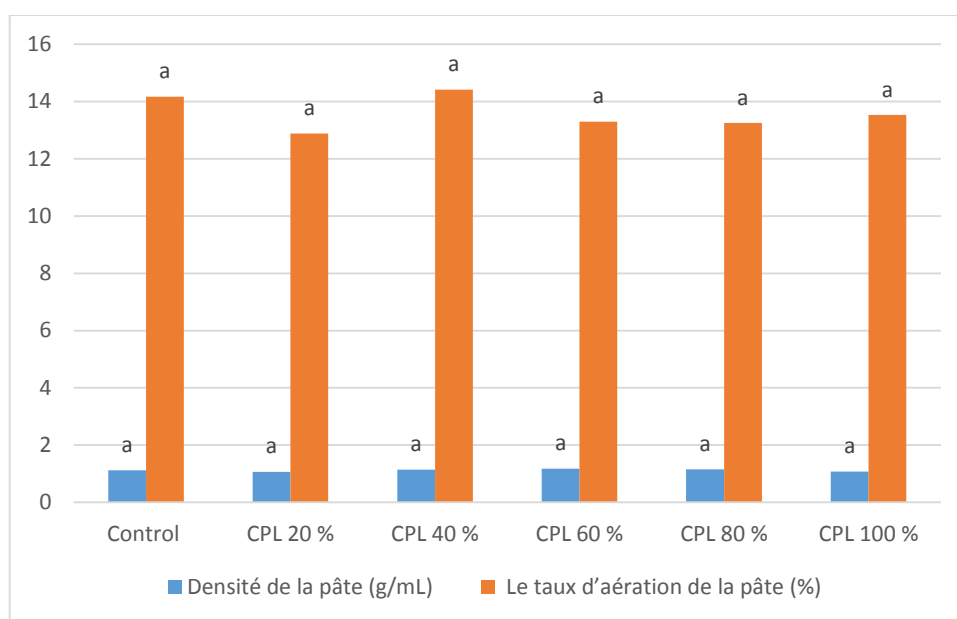


Figure 47 : Effet de la substitution de lait écrémé par la poudre du lactosérum sur la densité et le taux d'aération de la pâte à cake

Les analyses au microscope de la pâte (Fig. 48) ont montré que la répartition de l'air et la taille des bulles de l'air n'étaient pas affectées par le taux de remplacement de la poudre du lait

écrémé. L'analyse de la variance ANOVA, n'a montré aucun effet significatif ($p>0.05$) du taux de substitutions de la poudre sur la densité et la proportion de l'air dans la pâte.

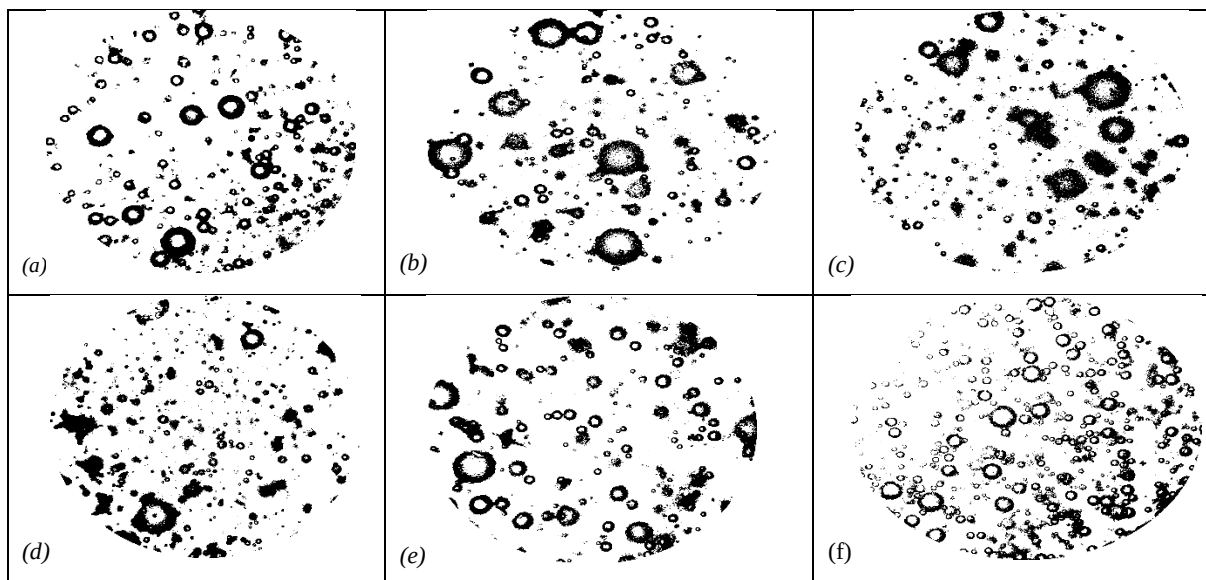


Figure 48 : microphotographie de la pâte, (a) Control, (b) CPL 20%, (c) CPL 40%, (d) CPL 60% (e) CPL 80%, (f) CPL 100%

IV.2 Caractéristiques physiques du cake

IV.2.1 Teneur en eau et pertes de poids

Les pertes à la cuisson sont dues à la transformation de l'eau du cake en vapeur en raison de la chaleur élevée pendant le processus de cuisson (Shin *et al.*, 2021). La teneur en eau et les pertes à la cuisson du cake variaient de 10.18 à 11.21 % et de 10.03 à 14.46 %, respectivement (tableau 21).

Tableau 21 : Teneur en eau et pertes de poids à la cuisson du cake

Echantillon	Teneur en eau (%)	Perte à la cuisson (%)
Control	11.21±0.08 ^a	10.03±0.05 ^c
CPL 20 %	10.18±0.13 ^a	11.73±0.37 ^{bc}
CPL 40 %	10.37±0.14 ^a	11.20±0.72 ^c
CPL 60 %	8.93±0.28 ^b	14.44±0.33 ^a
CPL 80 %	10.37±0.14 ^a	12.65±0.70 ^{ab}
CPL 100 %	10.44±0.03 ^a	14.46±0.49 ^a

^(a-b) significativement différents les uns des autres à $p<0,05$ selon le test de Tukey

Il a été constaté une légère augmentation de la teneur en eau en fonction du taux de la substitution de poudre, ainsi la teneur en eau du cake control est significativement supérieure

($p < 0.05$) à celles des cakes qui contiennent de la poudre du lactosérum. Le cake CPL 60 % a présenté l'humidité la plus faible ($p < 0.05$) à tous échantillons.

En revanche, la perte à la cuisson, a augmenté suite à l'augmentation du taux de substitution de la poudre du lait écrémé. Les résultats obtenus dans ce travail sont similaires à ceux trouvés par Díaz-Ramírez *et al.* (2016) lors de l'ajout des isolats des protéines de lactosérum dans le cake, aucun effet n'a été noté avec un concentré de protéines du lactosérum sur la teneur en eau du cake sans gluten (Ammar *et al.*, 2021).

IV.2.2 Poids, index volumique et taille du cake

Les caractéristiques physiques du cake à savoir le poids, l'index volumique et la taille sont données dans le tableau suivant 22.

Le poids et l'indice volumique du cake variaient de 34.6 à 35.85 g et 8.03 à 7.23 respectivement. Les valeurs les plus élevées sont notées dans le cake sans poudre de lactosérum et les plus faibles ont été observées dans le cake contenant 60 % de poudre de lactosérum. La figure 49, montre une légère diminution de l'indice volumique en fonction du taux de la substitution. Le traitement statistique ANOVA à sens unique n'a montré aucun effet significatif ($P > 0,05$).

Tableau 22 : Caractéristiques physiques des cakes

Echantillon	Poids (g)	Indice volumique	Vs (mL/g)	Hauteur du cake (cm)
Control	35.85±0.21 ^a	8.03±0.098 ^a	2.96±0.12 ^c	3.08±0.01 ^a
CPL 20 %	35.35±0.21 ^a	8.03±0.011 ^a	3.00±0.04 ^{bc}	2.75±0.07 ^b
CPL 40 %	35.65±0.35 ^a	7.50±0.070 ^a	3.15±0.27 ^{abc}	2.72±0.03 ^b
CPL 60 %	34.60±0.14 ^a	7.23±0.12 ^a	2.28±0.04 ^d	2.35±0.07 ^c
CPL 80 %	35.20±0.28 ^a	7.40±0.56 ^a	3.66±0.04 ^a	2.75±0.07 ^b
CPL 100 %	35.15±0.63 ^a	7.47±0.035 ^a	3.50±0.03 ^{ab}	2.50±0.00 ^c

(a-b) significativement différents les uns des autres à $p < 0,05$ selon le test de Tukey

Control : échantillon témoin, **CPL20** : Substitution de 20 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL40** : Substitution de 40 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL60** : Substitution de 60 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL80** : Substitution de 80 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL100** : Substitution de 100 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum

La taille du cake est l'un des critères de qualité recherché par le consommateur. La taille du cake se situe entre 3.08 et 2.50 cm, le cake contrôle a montré la taille la plus élevée suivi par le cake avec un taux de substitution de 20 % de poudre de lactosérum.

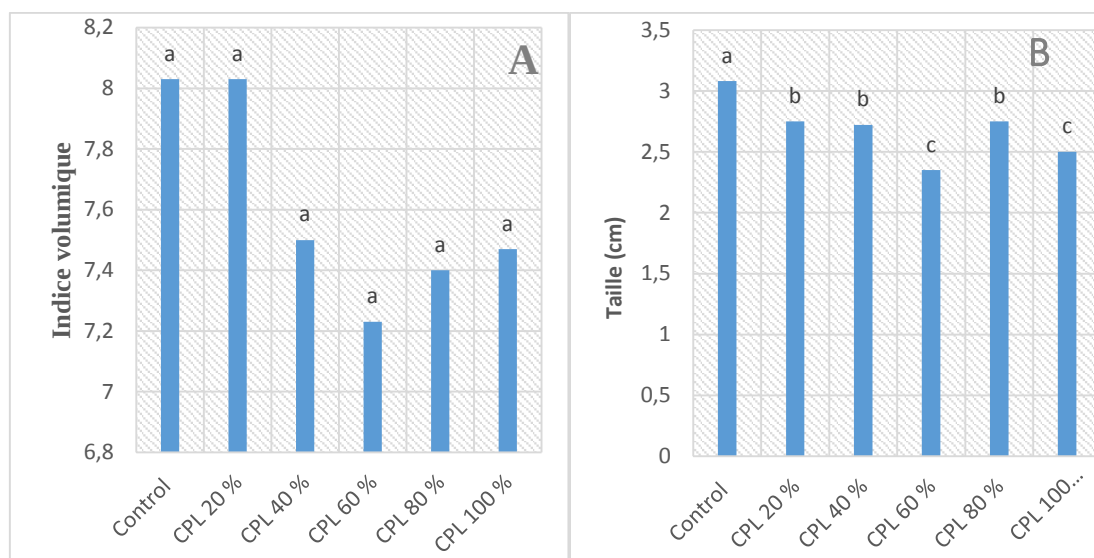


Figure 49 : Effet de la substitution sur, (A) l'indice volumique et (B) la taille du cake

Une différence significative ($P < 0,05$) a été enregistrée entre la taille du cake control et ceux avec des taux de substitution par la poudre de lactosérum. Singh *et al.*, (2015) ont constaté les mêmes observations qui ont été soulevé dans notre étude au sujet de la taille, qui a été réalisée sur l'influence de l'incorporation de jambolan et de gomme xanthane sur les propriétés des muffins de riz sans gluten.

La particularité du cake CPL 60 % était sa faible teneur en eau, son poids léger et sa faible expansion du produit.

IV.2.3 Volume spécifique du cake

Le consommateur est très attentif au volume spécifique du cake, qui est l'une des propriétés physiques les plus recherchées (Shao *et al.*, 2015; Abdul-Rahman, 2020; Wang *et al.*, 2020). Il reflète la quantité d'air emprisonné dans le produit après la cuisson (Chaiya and Pongsawatmanit, 2011). Il affecte directement l'apparence et la valeur économique du cake.

D'après le tableau 21, les volumes spécifiques variaient de 2,28 à 3,66 mL/g. La figure 50 montre que le volume le plus élevé a été noté pour le cake de CPL 80%. L'ajout de poudre de lactosérum dans la recette du cake a entraîné une augmentation du volume spécifique, à l'exception du cake avec un taux de substitution de 60%.

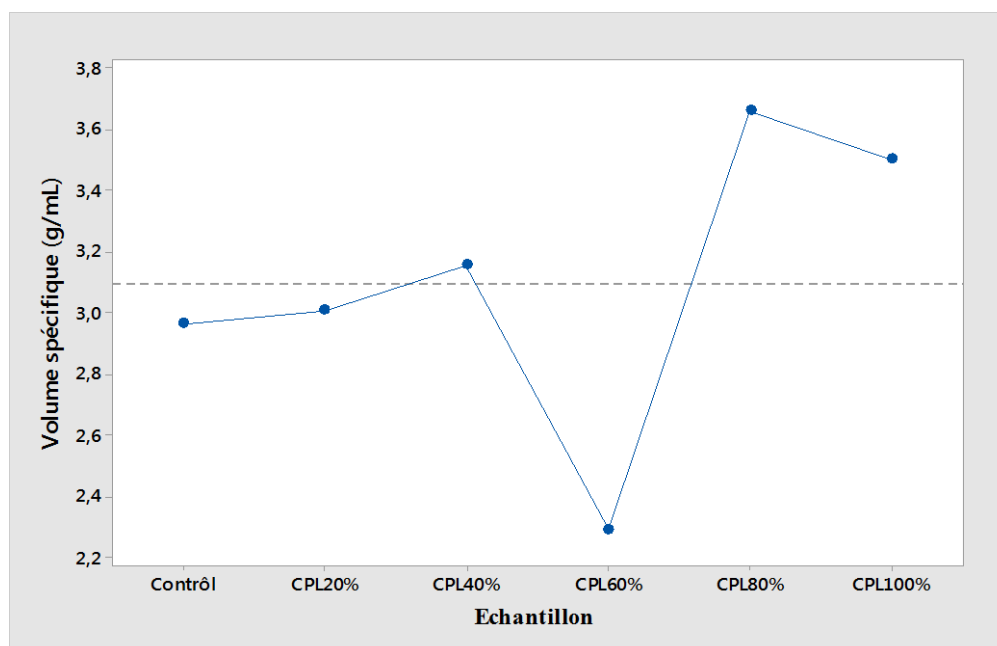


Figure 50 : Effet du taux de substitution de PLE par W_0 sur le Vs du cake

L'augmentation du volume spécifique est justifiée par une rétention de gaz et l'expansion du produit (Chaiya and Pongsawatmanit, 2011). Des études réalisées par Camargo *et al.* (2018); Ammar *et al.* (2021), ont constaté les mêmes observations qui ont été signalés dans cette étude concernant l'augmentation du volume spécifique du cake lors l'ajout de protéines de lactosérum. De plus, selon l'étude de Azarbad *et al.* (2019), cette augmentation du volume spécifique est également observée avec l'augmentation de niveau de la farine de sorgho.

Par contre Maravić *et al.* (2022), ont signalé la diminution du volume spécifique lors de l'ajout de concentré de protéine du lactosérum. Une faible quantité de lactosérum en poudre a permis d'améliorer le volume spécifique de brownies lors de la substitution de la farine par la poudre de lactosérum (Shin *et al.*, 2021).

Le volume spécifique du gâteau n'est pas affecté seulement par la densité de la pâte (Prokopov *et al.*, 2015). Aussi il est lié à la quantité de gaz retenue par la pâte (Rahmati and Mazaheri Tehrani, 2015). La figure 51 montre que le coefficient de régression linéaire R^2 est égal à 0.29, ce qui montre que seulement 29 % de la variabilité du volume du cake pourrait être expliqué par la densité de la pâte.

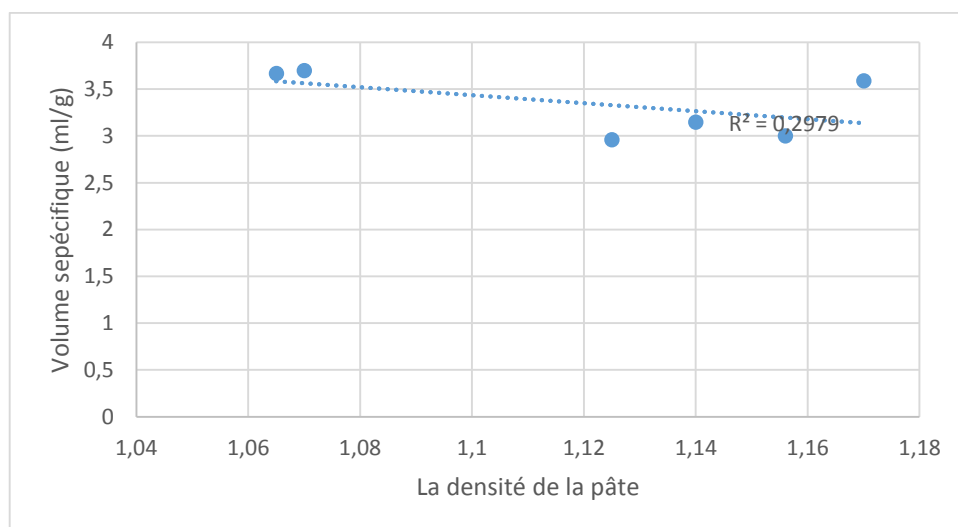


Figure 51 : Volume spécifique du cake en fonction de la densité de la pâte

IV.2.4 Couleur des cakes

La couleur de la croûte du cake est un paramètre de la qualité critique, elle affecte directement l'acceptabilité initial du produit (Gao *et al.*, 2017; Garsa Ali Alshehry, 2019; Maravić *et al.*, 2022).

D'après le tableau 23, les valeurs de luminosité (L^*) variaient de 66.23 à 78.73. La luminosité diminue suite à l'augmentation du taux de substitution de la poudre de lait écrémé par la poudre du lactosérum. La valeur L^* la plus élevée (78.73) a été observée dans le cake control, et la valeur L^* la plus faible (66.23) a été notée dans le cake qui contient 100% de lactosérum. Ceci peut être justifié par la présence des composés colorés via la réaction de Maillard et de la caramélisation du sucre (Wani *et al.*, 2015; Bajaj *et al.*, 2019). Aucune différence significative entre la valeur L^* du cake control et du cake contenant 20 % de poudre de lactosérum.

Tableau 23 : Couleur des cakes en fonction de taux de substitution par la poudre de lactosérum

Echantillon	Couleur de la croûte			La couleur de la mie		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
Control	78.73±0.70 ^a	1.96±0.83 ^b	59.56±0.45 ^c	94.56±0.05 ^a	-5.46±0.4 ^a	24.86±0.68 ^c
CPL 20 %	77.7±1.45 ^a	2.76±0.96 ^b	61.23±1.65 ^{bc}	95.83±0.32 ^a	-5.73±0.25 ^a	24.70±1.13 ^c
CPL 40 %	70.40±1.93 ^b	11.90±0.62 ^a	67.20±1.11 ^a	94.63±1.79 ^a	-5.03±0.32 ^a	24.30±2.85 ^c
CPL 60 %	69.4±2.71 ^b	11.83±0.64 ^a	62.20±0.62 ^b	90.13±2.30 ^b	-5.86±1.18 ^a	37.96±3.63 ^a
CPL 80 %	67.76±1.26 ^b	13.20±1.58 ^a	62.23±0.65 ^b	93.46±0.98 ^a	-5.90±0.2 ^a	33.03±2.21 ^{ab}
CPL 100 %	66.23±0.15 ^b	13.60±0.60 ^a	61.80±0.2 ^{bc}	90.33±0.23 ^b	-5.10±0.17 ^a	31.80±0.86 ^b

(a-b) significativement différents les uns des autres à $p < 0,05$ selon le test de Tukey

Control : échantillon témoin, **CPL20** : Substitution de 20 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL40** : Substitution de 40 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL60** : Substitution de 60 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL80** : Substitution de 80 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL100** : Substitution de 100 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum

L'augmentation du taux de substitution a favorisé l'augmentation de la couleur jaune (b^*) et rouge (a^*) de la croûte de cake, cela peut être dû à la couleur du lactosérum jaune verdâtre. Il a été constaté dans cette étude que la couleur L^* , a^* , b^* de la croûte et de la mie du cake à un taux de substitution de 20 % sont similaires au cake contrôle. Une corrélation négative a été remarquée entre la couleur L^* et b^* .

IV.2.5 Structure de la mie des cakes

Le tableau 24, montre que la substitution de la poudre du lait a une influence sur la texture de la mie du cake. Les nombres des alvéoles qui ont été notés lors de l'analyse de la mie du cake par image j, varient de 270 à 645 cellules/mm², dont le nombre le plus élevé (645 cellules/mm²) est observé dans le CPL 20% avec une taille moyenne importante (0.66 mm) et le plus faible (270 cellules/mm²) est enregistré dans le CPL 60%.

Tableau 24 : Caractéristiques de la mie des cakes

Echantillon	Nombre des alvéoles	Taille moyen des alvéoles (mm)	Pourcentage de l'air (%)	Périmètre	Circularité	Solidité
Control	639.2±0.70 ^a	0.19±0.83 ^b	44.94±0.45 ^{ab}	1.00±0.05 ^b	0.85±0.4 ^{cd}	0.87±0.68 ^c
CPL 20 %	645.68±1.45 ^a	0.68±0.96 ^a	42.54±1.65 ^{bc}	1.86±0.32 ^a	0.88±0.25 ^b	0.91±1.13 ^b
CPL 40 %	418.8±1.93 ^{bc}	0.23±0.62 ^b	42.29±1.11 ^{bc}	1.18±1.79 ^b	0.84±0.32 ^d	0.86±2.85 ^c
CPL 60 %	270.5±2.71 ^c	0.73±0.64 ^a	39.78±0.62 ^c	1.64±2.30 ^a	0.91±1.18 ^a	0.93±3.63 ^a
CPL 80 %	446.4±1.26 ^b	0.28±1.58 ^b	47.56±0.65 ^b	1.19±0.98 ^b	0.85±0.2 ^c	0.88±2.21 ^c
CPL 100 %	551.2±0.15 ^{ab}	0.57±0.60 ^a	47.20±0.2 ^a	1.66±0.23 ^a	0.89±0.17 ^b	0.91±0.86 ^b

(a-b) significativement différents les uns des autres à $p < 0,05$ selon le test de Tukey

Le taux de l'aération de la mie variait de 39.78 à 47.56 %. La structure de la mie la plus aérée a été notée dans le cake CPL80%, et une structure avec une mauvaise aération a été observée pour le cake 60%.

Le périmètre du cake CPL 20%, est supérieur (1.86) aux autres périmètres, néanmoins aucune différence significative n'a été observée entre le cake 60 et 100%.

La solidité des cakes se situe entre 0.86 à 0.91. Elle reflète la forme des cellules de gaz, la valeur la plus faible pour les alvéoles ayant une forme irrégulière, par contre, la forme régulière présente une solidité élevée (Djeghim, 2022). À partir de ce contexte, les cakes CPL 20, 60 et 100% sont caractérisés par une forme d'alvéoles régulière (solidité = 0.91), et allongés, et ronds, leur circularités sont 0.88, 0.89 et 0.91 respectivement.

D'après le test statistique de comparaison multiple de Dunnett avec un contrôle, la taille moyenne des alvéoles, le taux d'aération, le périmètre, la circularité et la solidité du cake CPL

40 et 80 % sont similaires à celui du cake control. Le nombre des alvéoles de ce dernier est comparable au cake CPL 20%.

IV.3 Propriétés sensorielles des formules du cake

Le tableau 25 représente l'appréciation de la qualité organoleptique du cake jugé par 20 panélistes.

Tableau 25 : Propriétés organoleptiques des cakes

Echantillon	Aspect	Couleur de la croûte	Odeur	Texture	Sensation	Score sensoriel total	Goute sucré
Control	7.92±1.39 ^a	7.40±1.13 ^a	6.35±2.18 ^a	6.50±1.85 ^a	6.60±2.25 ^a	6.75	5.05 ±1.44 ^b
CPL 20 %	7.95±1.72 ^a	7.37±1.62 ^a	6.62±2.33 ^a	6.41±2.11 ^a	7.05±2.21 ^a	6.93	5.27±1.42 ^{ab}
CPL 40 %	6.92±1.94 ^{ab}	6.68±2.10 ^{ab}	6.10±2.1 ^a	6.30±1.92 ^a	6.45±1.99 ^a	6.44	5.42±1.40 ^{ab}
CPL 60 %	4.65±1.98 ^c	5.27±2.11 ^b	7.05±1.76 ^a	5.60±2.05 ^a	5.82±2.00 ^a	5.70	6.5±1.79 ^a
CPL 80 %	5.80±1.93 ^{bc}	5.35±1.50 ^b	6.32±1.79 ^a	6.52±1.81 ^a	6.42±1.91 ^a	6.27	6.37±1.97 ^{ab}
CPL 100 %	6.60±1.27 ^{af}	5.55±1.93 ^b	6.87±1.94 ^a	7.27±1.57 ^a	6.47±1.55 ^a	6.67	6.22±1.1 ^{ab}

Chaque appréciation est une moyenne de notation de 20 panelistes

(^{a-b}) significativement différents les uns des autres à $p < 0,05$ selon le test de Tukey

Control : échantillon témoin, CPL20 : Substitution de 20 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL40** : Substitution de 40 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, **CPL60** : Substitution de 60 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, CPL80 : Substitution de 80 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum, CPL100 : Substitution de 100 % de la poudre lait écrémé par la poudre du lactosérum

La substitution de la poudre du lait écrémé par la poudre du lactosérum a eu une influence sur le score sensoriel total ($p < 0.05$). Le score le plus élevé a été noté pour le cake CPL 20%, ayant une surface extérieure du cake claire, sans fissures et sans affaissements. Tandis que le score le plus bas a été enregistré dans le cake CPL 60% qui était dur et sec. Le cake CPL 100% avait une taille de pores régulière. La couleur du cake a été affectée légèrement ($p < 0.05$) par le taux de substitution. La couleur du cake control et du cake CPL20%, est uniforme et sans taches. Cependant le traitement statistique par ANOVA, n'a montré aucune différence significative pour l'odeur, la texture et la sensation du cake pour les différents taux de substitution. La même observation a été rapportée par Díaz-Ramírez *et al.*, (2016), lors de l'incorporation des isolats de protéines de lactosérum dans le cake. Une corrélation positive a été notée entre le taux de substitution et le goût sucré du cake, et est probablement dû à la concentration du lactose dans la poudre de lactosérum.

IV.4 Corrélations des paramètres de qualité de cake

La figure 52, illustre les résultats de l'analyse de corrélations entre le taux de la substitution de la poudre de lait écrémé par la poudre de lactosérum et les paramètres physiques et organoleptiques du cake. Il a été constaté que le taux de substitution de la poudre de lait

écrémé par la poudre de lactosérum est corrélé positivement à la perte de poids, la couleur a^* et le goût sucré du cake (0.933, 0.892 et 0.869). Une corrélation négative a été observée entre le taux d'addition de poudre de lactosérum et l'index volumique, la luminosité et la couleur de la croûte du cake (-0.934, -0.950 et -0.891), de plus la taille et l'aspect sont liés au taux de substitution de la poudre de lait (-0.699, -0.64).

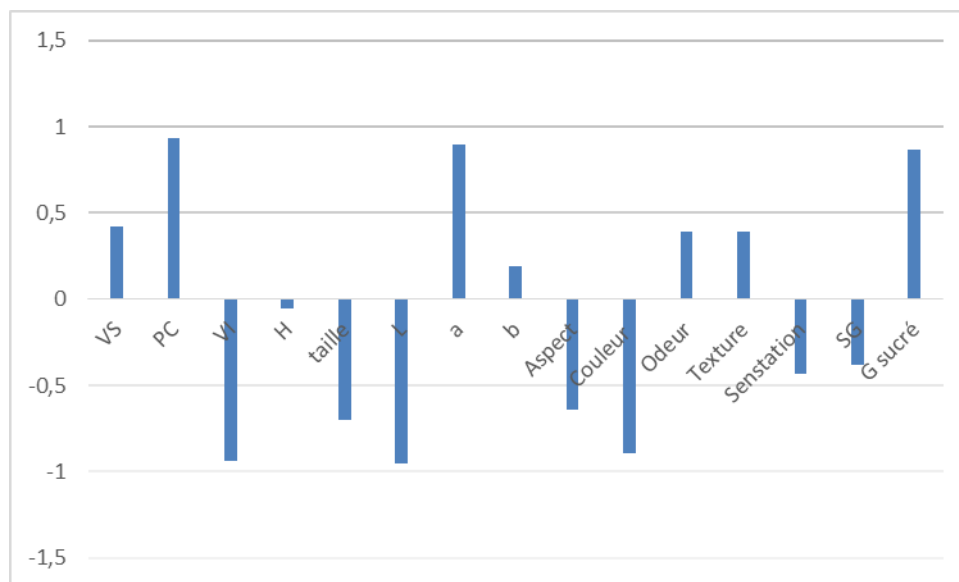


Figure 52 : Corrélation entre le taux de substitution et des paramètres physiques et organoleptiques du cake

Les corrélations entre les paramètres qui sont liées à la qualité du cake sont présentées dans le tableau 26. Le volume spécifique et les scores globaux du cake sont influencés négativement par la teneur en eau (-0.787, -0.758). La perte de poids est corrélée négativement à l'index volumique, la taille, la couleur L^* et la couleur de la croûte du cake est positivement corrélé à la couleur a^* , l'odeur et le goût sucré. Ceci est dû probablement au déclenchement important du phénomène de transfert de matières favorisant la formation des arômes de caramel par une réaction de caramélisation des sucres et réduisant ainsi la luminosité de la surface de la croûte du cake. Ceci est confirmé par l'existence d'une corrélation positive entre l'index volumique, la couleur L^* de la croûte et la taille du cake. L'aspect du cake est hautement corrélé avec la couleur de la croûte, le score global et la sensation du cake à la bouche.

Tableau 26 : Corrélations entre les caractéristiques rhéologiques et la qualité des cakes

	TS(%)	VS (g/ml)	PC (%)	VI	H (%)	Taille (cm)	L	a	b	Aspect	Couleur de la croûte	Odeur	Texture	Sensation	Score globale	Goût sucré
TS(%)	1,00															
VS (g/mL)	0,42	1,00														
PC (%)	0,93	0,31	1,00													
VI	-0,93	-0,32	-0,79	1,00												
H(%)	-0,05	-0,84	-0,05	-0,05	1,00											
Taille (cm)	-0,70	0,29	-0,77	0,69	-0,41	1,00										
L	-0,95	-0,33	-0,80	1,00	-0,04	0,71	1,00									
A	0,89	0,28	0,71	-0,98	0,06	-0,69	-0,99	1,00								
B	0,19	0,10	0,02	-0,44	-0,21	-0,27	-0,43	0,54	1,00							
ASPECT	-0,64	0,27	-0,51	0,71	-0,62	0,77	0,74	-0,75	-0,20	1,00						
Couleur de la croûte	-0,89	-0,10	-0,77	0,88	-0,34	0,75	0,91	-0,88	-0,14	0,91	1,00					
Odeur	0,39	-0,47	0,61	-0,24	0,58	-0,74	-0,25	0,16	-0,42	-0,48	-0,47	1,00				
Texture	0,39	0,57	0,18	-0,30	-0,26	0,11	-0,37	0,37	-0,03	-0,32	-0,45	-0,31	1,00			
Sensation	-0,43	0,45	-0,28	0,60	-0,80	0,61	0,59	-0,63	-0,20	0,90	0,74	-0,41	-0,06	1,00		
Score globale	-0,38	0,48	-0,23	0,52	-0,76	0,63	0,54	-0,60	-0,25	0,95	0,74	-0,36	-0,21	0,94	1,00	
G SUCRE	0,87	0,03	0,79	-0,82	0,37	-0,79	-0,85	0,82	0,05	-0,91	-0,99	0,56	0,44	-0,71	-0,73	1,00

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail de thèse est focalisé sur la valorisation du lactosérum, produit par les laiteries en Algérie et qui est rejeté dans les oueds sans aucun traitement. Pour rappel, ce coproduit est riche en éléments nutritifs précieux notamment les protéines de haute valeur nutritionnelle et technologique, le lactose, les minéraux et les vitamines. Il est aussi caractérisé par une charge polluante importante qui affecte le milieu environnemental et déséquilibre les écosystèmes. Devant cet état et comme nous l'avons évoqué auparavant, notre objectif est d'optimiser les conditions de séchage par atomisation et étudier l'impact de ces conditions sur la qualité des poudres obtenues. Nous examinerons également l'impact de l'incorporation de la poudre obtenue dans la formulation du cake en remplaçant le lait écrémé par cette poudre.

Ce travail est scindé en deux parties, une première partie consacrée à l'étude du séchage par atomisation, l'étude des paramètres du séchage sur le rendement, les propriétés fonctionnelles et propriétés de réhydratation de la poudre obtenue en utilisant un plan d'expérience composite centré (PCC) à deux facteurs (température de l'air d'entrée et débit d'alimentation). En se basant sur les résultats obtenus, nous avons déterminé les paramètres optimaux pour l'obtention d'une poudre de bonne qualité avec un rendement acceptable. Nous avons également étudié l'impact de l'ajout de supports de séchage à savoir le maltodextrine DE18, l'amidon de maïs et la gélatine sur les propriétés de la techno-fonctionnelles des poudres obtenues.

La deuxième partie a été consacrée à l'étude de l'effet de l'incorporation de la poudre de lactosérum obtenue sur la qualité et les propriétés, physicochimiques, technologiques et organoleptiques du cake par substitution de la poudre de lait écrémé de l'ordre de 20 à 100%.

Les principaux résultats obtenus dans ce travail montrent que toutes les réponses ont été principalement influencées par le débit d'alimentation du lactosérum liquide. Les conditions optimales d'atomisation correspondent à une température de l'air d'entrée de 182 °C, et un débit d'alimentation de 3,2 L/h. La poudre obtenue dans ces conditions a présenté un rendement de 32,23% et est caractérisée par une teneur en eau de 1,80 %, une solubilité de 99 % et une dispersibilité de 94,77 %. Ces caractéristiques sont conformes aux recommandations pour les poudres alimentaires. La mouillabilité était supérieure à 120 sec, le chauffage de l'eau à une température de 35 °C permet de réduire la mouillabilité de 230 à 72 secs ; ce qui améliore nettement cette propriété. La poudre obtenue présente un indice de Carr supérieur à 38 et un indice de Hausner supérieur à 1,60, ce qui rend son écoulement difficile.

Conclusion générale

Elle est aussi qualifiée d'hygroscopique avec un degré d'agglomération élevé, un état amorphe et des tailles de particules variées. En ce qui concerne les propriétés physico-chimiques et microbiologiques de la poudre obtenue, elles sont conformes aux recommandations du Codex Alimentarius et aux normes algériennes.

L'efficacité thermique de sécheur variait de 55 à 81% et la température de sortie variait de 42,4 à 96,3 °C.

Les rendements et les propriétés des poudres ont été affectés de manière controversée par l'addition des agents de séchage. Il a été remarqué que l'utilisation d'une faible quantité de gélatine permet d'obtenir un meilleur rendement. Une diminution significative des rendements a été observée en raison de l'utilisation de maltodextrine et d'amidon de maïs comme agents de séchage. Toutes les poudres contiennent une quantité d'eau inférieure à 4 %.

Les densités apparentes de poudre de lactosérum en utilisant l'amidon de maïs comme un agent de séchage sont supérieures à celles qui sont séchées avec la gélatine et la maltodextrine. Cependant, une relation inversement proportionnelle est observée entre l'augmentation de la concentration de maltodextrine et la densité apparente.

L'hygroscopicité de la poudre de lactosérum diminue avec l'augmentation du taux des agents dans la solution. La solubilité de la poudre varie en fonction de la concentration de support de séchage. Elle est améliorée suite à l'augmentation de la concentration du support de séchage. L'utilisation des polysaccharides comme un support de séchage améliore la dispersibilité, par contre l'augmentation de la concentration de gélatine a diminué la dispersibilité de la poudre de 94.77 à 83.49%.

La cristallinité des particules de poudre n'est pas influencée par l'ajout de l'amidon et la maltodextrine. La forme amorphe des particules est dominante dans toutes les poudres. Néanmoins, des pics de la forme cristalline ont été constatés lors l'ajout de la gélatine dans lactosérum en concentration importante.

Concernant les résultats de deuxième partie relatifs à l'impact de la substitution de la poudre du lait écrémé par la poudre du lactosérum obtenue, il a été montré que la substitution partielle est possible. La substitution améliore le volume spécifique du cake. Le nombre des alvéoles diminue avec l'augmentation du taux de substitution de la poudre du lait écrémé par la poudre du lactosérum. En revanche, la taille moyenne des alvéoles est généralement augmentée avec de l'augmentation du taux substitution.

Conclusion générale

La majorité des résultats physiques et organoleptiques du cake révèle que le cake contenant 20 % de poudre du lactosérum est similaire au cake control. Le cake obtenu par une substitution de 20 % a été classé meilleur que le cake control par le jury de dégustation. La totalité des échantillons étaient acceptables.

Suite aux résultats de ce travail, qui ont apporté plusieurs réponses peuvent être exploités dans le domaine secteur socioéconomique et environnemental et qui ouvre de nouvelles perspectives pour d'autres travaux, nous suggérons de terminer ce travail par :

- L'étude de l'influence de la concentration de lactosérum par évaporation sous vide en utilisant différents agents de séchage sur la qualité de la poudre séché par atomisation ;
- Examiner le coût de production de poudre de lactosérum après avoir augmenté la concentration de lactosérum liquide à 50 % en extrait sec ;
- L'étude de l'influence de la déshumidification de l'air de séchage sur la qualité de poudre du lactosérum séché par atomisation ;
- L'utilisation d'autres agents de séchage et d'autres concentrations pour sécher le lactosérum afin de trouver l'agent idéal qui répondra à toutes les recommandations industrielles ;
- Effet de la substitution de poudre du lait écrémé par la poudre de lactosérum séché avec différents agent de séchage sur la qualité du cake et d'autres produits de pâtisserie
- L'étude de la substitution de poudre de lait écrémé par la poudre du lactosérum séché sans ou avec des agents de séchage dans différentes matrices alimentaires

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- 1- Aalaei, K., Sjöholm, I., Rayner, M. & Tareke, E. (2017) 'The Impact of Different Drying Techniques and Controlled Storage on the Development of Advanced Glycation End Products in Skim Milk Powders Using Isotope Dilution ESI-LC-MS/MS', *Food and Bioprocess Technology*, 10, 1704–1714.
- 2- Abdelkader, D.B., Amina, D.B. & Ismail, M. (2018) 'Whey powder in the preparation of pastry creams', *Academic Perspective Procedia, Academic Perspective*, 1, 158–167.
- 3- Abdul-Rahman, S.M. (2020) 'Evaluation of Egg Substitutes on The Physiochemical and Sensory Properties of Cupcake', *S. M.*, 10, 7.
- 4- Acem, K., Choukri, A., Saoudet, N., Tergou, S. & Trari, H. (2018) 'Demineralization Effect on the Physicochemical and Interfacial Properties of Sweet Whey', in Abdelbaki, B., Safi, B., and Saidi, M. (eds) *Proceedings of the Third International Symposium on Materials and Sustainable Development*, Cham: Springer International Publishing, 516–526.
- 5- Adetoro, A.O., Opara, U.L. & Fawole, O.A. (2020) 'Effect of Carrier Agents on the Physicochemical and Technofunctional Properties and Antioxidant Capacity of Freeze-Dried Pomegranate Juice (*Punica granatum*) Powder', *Foods*, 9, 1388.
- 6- (AFNOR) Association Française de Normalisation (1980) Recueil de normes Françaises lait et produits laitiers: Méthodes d'analyse. éditeur Courbevoie: AFNOR, Paris, 286 p
- 7- Ahad, T., Gull, A., Masoodi, F.A., Hussein, D.S. & Alkahtani, J. (2022) 'Effect of process parameters on production of ginger oleoresin powder by spray drying using whey protein isolate as the wall material', *Biomass Conversion and Biorefinery*, Springer, 1–10.
- 8- Ahad, T., Masoodi, F.A., Gull, A., Wani, S.M. & Shafi, M.N. (2021) 'Optimization of process parameters for spray drying of ginger oleoresin powder using response surface methodology', *Journal of Food Processing and Preservation*, 45.
- 9- Al Zaitone, B., Al-Zahrani, A., Al-Shahrani, S. & Lamprecht, A. (2020) 'Drying of a single droplet of dextrin: Drying kinetics modeling and particle formation', *International Journal of Pharmaceutics*, 574, 118888.
- 10- Amina, D.B., Ismail, M. & Abdelkader, D.B. (2018) 'Whey powder in the preparation of special bread', *Academic Perspective Procedia, Academic Perspective*, 1, 148–157.
- 11- Amiri-Rigi, A., Emam-Djomeh, Z., Mohammadifar, M.A. & Mohammadi, M. (2012) 'Spray drying of low-phenylalanine skim milk: optimisation of process conditions for improving solubility and particle size: Optimisation of solubility and particle size', *International Journal of Food Science & Technology*, 47, 495–503.
- 12- Amiri-Rigi, A., Mohammadifar, M.A., Emam-Djomeh, Z. & Mohammadi, M. (2011) 'Response surface optimisation of spray dryer operational parameters for low-phenylalanine skim milk powder: RSM modelling of low-Phe skim milk spray-drying', *International Journal of Food Science & Technology*, 46, 1830–1839.
- 13- Ammar, I., Gharsallah, H., Ben Brahim, A., Attia, H., Ayadi, M.A., Hadrich, B. & Felfoul, I. (2021) 'Optimization of gluten-free sponge cake fortified with whey protein concentrate using mixture design methodology', *Food Chemistry*, 343, 128457.
- 14- Amrane, D. (2019) *Contribution à la réduction de l'impact environnemental du perméat de lactosérum via sa valorisation intégrale par un procédé d'électro-activation en solution: Preuve du concept et analyse de la qualité du produit*, Laval.

Références bibliographiques

- 15- Anandharamakrishnan, C. (2017) *Handbook of Drying for Dairy Products*. This edition first published 2017 © 2017 John Wiley&Sons Ltd, India: 9600 Garsington Road, Oxford, OX4 2DQ, UK, 339.
- 16- Anandharamakrishnan, C. & Ishwarya, S.P. (2015) *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation*: This edition first published 2015 © 2015 by John Wiley&Sons, Ltd, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 312.
- 17- Anandharamakrishnan, C., Rielly, C.D. & Stapley, A.G. (2008) 'Loss of solubility of α -lactalbumin and β -lactoglobulin during the spray drying of whey proteins', *LWT-Food Science and Technology*, 41, 270–277.
- 18- Andersson, I.-M. (2020) 'Functionality of Spray-Dried Whey Protein Powders - Surface Composition, Particle Morphology and Rehydration', *Department of Food Technology Lund University*.81.
- 19- Anema, S.G., Pinder, D.N., Hunter, R.J. & Hemar, Y. (2006) 'Effects of storage temperature on the solubility of milk protein concentrate (MPC85)', *Food Hydrocolloids*, 20, 386–393.
- 20- Anirudh, J. (2022) 'Whey as crucial component in rejuvenating athlete health- a review', *Journal of Postharvest Technology*, 10, 135–155.
- 21- Anuar, N.H.S., Kormin, F., Isa, N.L.M., Iwansyah, A.C., Abu Bakar, M.F., Mohamad Fuzi, S.F.Z. & Sabran, F. (2021) 'Spray Drying Microencapsulation of Kantan Extract (*Etlingera Elatior*) with Various Wall Materials', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 736, 012007.
- 22- Arab, S.A., Kaemipoor, M., Alkhaleel, R. & Mahdian, A. (2023) 'Recent Trends in Developing Whey Products by Advanced Technologies', *Scholars Academic Journal of Biosciences*, 11, 74–79.
- 23- Arepally, D. & Goswami, T.K. (2019) 'Effect of inlet air temperature and gum Arabic concentration on encapsulation of probiotics by spray drying', *LWT*, 99, 583–593.
- 24- Arevalo, A.T. (2017) *Étude environnementale comparative des procédés de valorisation du lactosérum*, PhD Thesis. Université Laval.
- 25- Atalar, I. & Dervisoglu, M. (2015) 'Optimization of spray drying process parameters for kefir powder using response surface methodology', *LWT - Food Science and Technology*, 60, 751–757.
- 26- Athira, S., Mann, B., Saini, P., Sharma, R., Kumar, R. & Singh, A.K. (2015) 'Production and characterisation of whey protein hydrolysate having antioxidant activity from cheese whey: Characterisation of whey protein hydrolysate', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 2908–2915.
- 27- Azarbad, H.R., Tehrani, M.M. & Rashidi, H. (2019) 'Optimization of Gluten-Free Bread Formulation Using Sorghum, Rice, and Millet Flour by D-Optimal Mixture Design Approach', 15.
- 28- Bajaj, R., Singh, N. & Kaur, A. (2019) 'Effect of native and gelatinized starches from various sources on sponge cake making characteristics of wheat flour', *Journal of Food Science and Technology*, 56, 1046–1055.
- 29- Baldasso, C., Barros, T.C. & Tessaro, I.C. (2011) 'Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration', *Desalination*, 278, 381–386.

Références bibliographiques

- 30- Baldelli, A., Oguzlu, H., Liang, D.Y., Subiantoro, A., Woo, M.W. & Pratap-Singh, A. (2022) 'Spray freeze drying of dairy products: Effect of formulation on dispersibility', *Journal of Food Engineering*, 335, 111191.
- 31- Banožić, M., Vladić, J., Banjari, I., Velić, D., Aladić, K. & Jokić, S. (2021) 'Spray Drying as a Method of Choice for Obtaining High Quality Products from Food Wastes– A Review', *Food Reviews International*, 1–33.
- 32- Barbosa-Cánovas, G.V. (ed.) (2005) *Food powders: physical properties, processing, and functionality*, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers (Food engineering series).
- 33- Barukcic, I. (2018) 'Whey as a Potential Functional Food–Properties, Processing and Future Perspective', *Journal of Food Biotechnology Research*, 2, 2.
- 34- Becerra, M., Cerdán, M.E. & González-Siso, M.I. (2015) 'Biobutanol from cheese whey', *Microbial Cell Factories*, 14, 15.
- 35- Bédas, M., Tanguy, G., Dolivet, A., Méjean, S., Gaucheron, F., Garric, G., Senard, G., Jeantet, R. & Schuck, P. (2017) 'Nanofiltration of lactic acid whey prior to spray drying: Scaling up to a semi-industrial scale', *LWT - Food Science and Technology*, 79, 355–360.
- 36- Benatallah, B.E.F.L. (2009) 'Couscous et pain sans gluten pour malades coeliaques', Université Mentouri Constantine.
- 37- Berk, Z. (2018) 'Freeze drying (lyophilization) and freeze concentration', in *Food Process Engineering and Technology*, Elsevier, 567–581.
- 38- Bhandari, B., Bansal, N., Zhang, M. & Schuck, P. (2013) *Handbook of food powders, Processes and properties* (255 vol). First published 2013, USA: Woodhead Publishing Limited, 682.
- 39- Bhandari, B.R., Datta, N. & Howes, T. (1997) 'Problems associated with spray drying of sugar-rich foods', *Drying technology*, 15, 671–684.
- 40- Bhusari, S.N., Muzaffar, K. & Kumar, P. (2014) 'Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder', *Powder Technology*, 266, 354–364.
- 41- Bhushani, A. & Anandharamakrishnan, C. (2017) 'Freeze drying', *Handbook of drying for dairy products*, Wiley Online Library, 95–121.
- 42- Boiarkina, I., Sang, C., Depree, N., Prince-Pike, A., Yu, W., Wilson, D.I. & Young, B.R. (2016) 'The significance of powder breakdown during conveying within industrial milk powder plants', *Advanced Powder Technology*, 27, 2363–2369.
- 43- Both, E.M. (2019) *Powder morphology development during spray drying*, PhD Thesis. Wageningen University, 130.
- 44- Bouizar, R., Mouzai, A. & Boughellout, H. (2021) 'Impact of milk substitution by sweet whey on chocolate mousse physicochemical, microstructural and sensory properties', *Algerian Journal of Nutrition and Food Sciences*, 1, 17–24.
- 45- Božanić, R., Barukčić, I. & Lisak, K. (2014) 'Possibilities of whey utilisation', *Austin J. Nutr. Food Sci.*, 2, 7.

Références bibliographiques

- 46- Bradford, M.M. (1976) 'A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding', *ANALYTICAL BIOCHEMISTRY*, 248–254.
- 47- Braga, M.B., Rocha, S.C. dos S. & Hubinger, M.D. (2018) 'Spray-Drying of Milk-Blackberry Pulp Mixture: Effect of Carrier Agent on the Physical Properties of Powder, Water Sorption, and Glass Transition Temperature: Spray-drying of milk-blackberry pulp mixture...', *Journal of Food Science*, 83, 1650–1659.
- 48- Brandelli, A., Daroit, D.J. & Corrêa, A.P.F. (2015) 'Whey as a source of peptides with remarkable biological activities', *Food Research International*, 73, 149–161.
- 49- Bringas-Lantigua, M., Pino, J.A. & Aragüez-Fortes, Y. (2016) 'Influence of process conditions on the physicochemical properties of honey powder produced by spray drying', *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 47, 46–69.
- 50- Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E. & Hebishy, E. (2023) 'Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives', *International Journal of Dairy Technology*, 1471–0307.12935.
- 51- Burin, L., Jouppila, K., Roos, Y., Kansikas, J. & Buera, M. del P. (2000) 'Color Formation in Dehydrated Modified Whey Powder Systems As Affected by Compression and T_g ', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 5263–5268.
- 52- Caliskan, G. & Nur Dirim, S. (2013) 'The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract', *Food and Bioproducts Processing*, 91, 539–548.
- 53- Camargo, L.R., Silva, L.M., Komerowski, M.R., Kist, T.B.L., Rodrigues, C.E., Rios, A. de O., Silva, M.M., Doneda, D., Schmidt, H. de O. & Oliveira, V.R. (2018) 'Effect of whey protein addition on the nutritional, technological and sensory quality of banana cake', *International Journal of Food Science & Technology*, 53, 2617–2623.
- 54- Can Karaca, A., Guzel, O. & Ak, M.M. (2016) 'Effects of processing conditions and formulation on spray drying of sour cherry juice concentrate: Spray drying of sour cherry juice concentrate', *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96, 449–455.
- 55- Caparino, O.A., Tang, J., Nindo, C.I., Sablani, S.S., Powers, J.R. & Fellman, J.K. (2012) 'Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine "Carabao" var.) powder', *Journal of Food Engineering*, 111, 135–148.
- 56- Carmo, E.L., Teodoro, R.A.R., Campelo, P.H., Figueiredo, J. de A., Botrel, D.A., Fernandes, R.V. de B. & Borges, S.V. (2019) 'The use of different temperatures and inulin:whey protein isolate ratios in the spray drying of beetroot juice', *Journal of Food Processing and Preservation*, 9.
- 57- Carpin, M., Bertelsen, H., Dalberg, A., Bech, J.K., Risbo, J., Schuck, P. & Jeantet, R. (2017) 'How does particle size influence caking in lactose powder?', *Journal of Food Engineering*, 209, 61–67.
- 58- Carretero-Peña, S., Calvo Blázquez, L. & Pinilla-Gil, E. (2019) 'Estimation of PM10 Levels and Sources in Air Quality Networks by Digital Analysis of Smartphone Camera Images Taken from Samples Deposited on Filters', *Sensors*, 19, 4791.

Références bibliographiques

- 59- Carter, B., Patel, H., Barbano, D.M. & Drake, M. (2018) 'The effect of spray drying on the difference in flavor and functional properties of liquid and dried whey proteins, milk proteins, and micellar casein concentrates', *Journal of Dairy Science*, 101, 3900–3909.
- 60- Carter, B.P. & Schmidt, S.J. (2012) 'Developments in glass transition determination in foods using moisture sorption isotherms', *Food Chemistry*, 132, 1693–1698.
- 61- de Castro, R.J.S., Domingues, M.A.F., Ohara, A., Okuro, P.K., dos Santos, J.G., Brexó, R.P. & Sato, H.H. (2017) 'Whey protein as a key component in food systems: Physicochemical properties, production technologies and applications', *Food Structure*, 14, 17–29.
- 62- Cenini, V.L., Gallagher, L., McKerr, G., McCarthy, N.A., McSweeney, D.J., Auty, M.A.E. & O'Hagan, B.M.G. (2020) 'A novel approach for dynamic in-situ surface characterisation of milk protein concentrate hydration and reconstitution using an environmental scanning electron microscope', *Food Hydrocolloids*, 108, 105881.
- 63- Chaiya, B. & Pongsawatmanit, R. (2011) 'Quality of Batter and Sponge Cake Prepared from Wheat-Tapioca Flour Blends', *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, 45, 305–313.
- 64- Chandralekha, A., Rani, A., Tavanandi, H.A., Amrutha, N., Hebbar, U. & Raghavarao, K.S.M.S. (2017) 'Role of carrier material in encapsulation of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) by spray drying', *Drying Technology*, 35, 1029–1042.
- 65- Chatzipaschali, A.A. & Stamatidis, A.G. (2012) 'Biotechnological Utilization with a Focus on Anaerobic Treatment of Cheese Whey: Current Status and Prospects', *Energies*, 5, 3492–3525.
- 66- Chegini, G., HamidiSepel, A., Dizaji, M.F. & Mirnezami, S.V. (2014) 'Study of physical and chemical properties of spray drying whey powder', *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3, 62.
- 67- Chegini, G.R. & Ghobadian, B. (2005) 'Effect of Spray-Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder', *Drying Technology*, 23, 657–668.
- 68- Chen, G.Q., Eschbach, F.I.I., Weeks, M., Gras, S.L. & Kentish, S.E. (2016) 'Removal of lactic acid from acid whey using electrodialysis', *Separation and Purification Technology*, 158, 230–237.
- 69- Chen, X.D. & Mujumdar, A.S. (eds) (2008) *Drying technologies in food processing*. This edition first, Oxford: Blackwell Pub, 322.
- 70- Chinma, C.E., Gbadamosi, K.B., Ogunsina, B.S., Oloyede, O.O. & Salami, S.O. (2014) 'Effect of Addition of Germinated Moringa Seed Flour on the Quality Attributes of Wheat-based Cake: Wheat-germinated Moringa Cake', *Journal of Food Processing and Preservation*, 38, 1737–1742.
- 71- Ćujić-Nikolić, N., Stanisavljević, N., Šavikin, K., Kalušević, A., Nedović, V., Samardžić, J. & Janković, T. (2019) 'Chokeberry polyphenols preservation using spray drying: effect of encapsulation using maltodextrin and skimmed milk on their recovery following in vitro digestion', *Journal of Microencapsulation*, 36, 693–703.
- 72- Curti, M.I., Belorio, M., Palavecino, P.M., Camiña, J.M., Ribotta, P.D. & Gómez, M. (2021) 'Effect of sorghum flour properties on gluten-free sponge cake', *Journal of Food Science and Technology*, 12.

Références bibliographiques

- 73- Das, B., Sarkar, S., Sarkar, A., Bhattacharjee, S. & Bhattacharjee, C. (2016) 'Recovery of whey proteins and lactose from dairy waste: A step towards green waste management', *Process Safety and Environmental Protection*, 101, 27–33.
- 74- De Wit, J.N. (2001) *Lecturer's Handbook on whey and whey products* - Euromilk. fi rst ed., Belgium.: *European Whey Products Association*, Brussels, 91.
- 75- Demirkol, M. & Tarakci, Z. (2018) 'Effect of grape (*Vitis labrusca* L.) pomace dried by different methods on physicochemical, microbiological and bioactive properties of yoghurt', *LWT - Food Science and Technology*, 36.
- 76- Díaz-Ramírez, M., Calderón-Domínguez, G., García-Garibay, M., Jiménez-Guzmán, J., Villanueva-Carvajal, A., Salgado-Cruz, Ma. de la P., Arizmendi-Cotero, D. & Del Moral-Ramírez, E. (2016) 'Effect of whey protein isolate addition on physical, structural and sensory properties of sponge cake', *Food Hydrocolloids*, 61, 633–639.
- 77- Ding, H., Yu, W., Boiarkina, I., Depree, N. & Young, B.R. (2020) 'Effects of morphology on the dispersibility of instant whole milk powder', *Journal of Food Engineering*, Elsevier, 276, 109841.
- 78- Djeghim, F., Bourekoua, H., Różyło, R., Bieńczyk, A., Tanaś, W. & Zidoune, M.N. (2021) 'Effect of By-Products from Selected Fruits and Vegetables on Gluten-Free Dough Rheology and Bread Properties', *Applied Sciences*, 11, 4605.
- 79- Djouab, A. (2019) 'Contribution à la réduction de l'impact environnemental du perméat de lactosérum via sa valorisation intégrale par un procédé d'électro-activation en solution: Preuve du concept et analyse de la qualité du produit', 169.
- 80- Djouab, A. & Aïder, M. (2018) 'Whey permeate integral valorisation via in situ conversion of lactose into lactulose in an electro-activation reactor modulated by anion and cation exchange membranes', *International Dairy Journal*, 54.
- 81- Domingos, J.M.B., Puccio, S., Martinez, G.A., Amaral, N., Reis, M.A.M., Bandini, S., Fava, F. & Bertin, L. (2018) 'Cheese whey integrated valorisation: Production, concentration and exploitation of carboxylic acids for the production of polyhydroxyalkanoates by a fed-batch culture', *Chemical Engineering Journal*, 336, 47–53.
- 82- Domínguez-Niño, A., Cantú-Lozano, D., Ragazzo-Sanchez, J.A., Andrade-González, I. & Luna-Solano, G. (2018) 'Energy requirements and production cost of the spray drying process of cheese whey', *Drying Technology*, Taylor & Francis, 36, 597–608.
- 83- Duangchuen, J., Pathaveerat, S., Noypitak, S. & Jermwongruttanachai, P. (2020) 'Effect of Spray Drying Air Temperature to the Changes of Properties of Skimmed Coconut Milk Powder', *Applied Science and Engineering Progress*, 14, 187–195.
- 84- Erbay, Z., Koca, N., Kaymak-Ertekin, F. & Ucuncu, M. (2015) 'Optimization of spray drying process in cheese powder production', *Food and Bioproducts Processing*, 93, 156–165.
- 85- Etzbach, L., Meinert, M., Faber, T., Klein, C., Schieber, A. & Weber, F. (2020) 'Effects of carrier agents on powder properties, stability of carotenoids, and encapsulation efficiency of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) powder produced by co-current spray drying', *Current Research in Food Science*, 3, 73–81.
- 86- Fang, Y. (2012) 'Functionality of milk protein concentrate: Effect of spray drying temperature', *Biochemical Engineering Journal*, 5.

Références bibliographiques

- 87- Fang, Y., Rogers, S., Selomulya, C. & Chen, X.D. (2012) 'Functionality of milk protein concentrate: Effect of spray drying temperature', *Biochemical Engineering Journal*, Elsevier, 62, 101–105.
- 88- Fang, Y., Selomulya, C. & Chen, X.D. (2007) 'On Measurement of Food Powder Reconstitution Properties', *Drying Technology*, 26, 3–14.
- 89- Fang, Z. & Bhandari, B. (2012) 'Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice', *Food Research International*, 48, 478–483.
- 90- FAO, WHO--Work programme, Joint FAO/WHO Food Standards Programme, & Joint FAO/WHO Codex Alimentarius Commission (2007) *Codex alimentarius: lait et produits laitiers.*, Rome; [Genève: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ; Organisation mondiale de la santé, 266.
- 91- Favaro-Trindade, C.S., Santana, A.S., Monterrey-Quintero, E.S., Trindade, M.A. & Netto, F.M. (2010) 'The use of spray drying technology to reduce bitter taste of casein hydrolysate', *Food Hydrocolloids*, 24, 336–340.
- 92- Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi Ashtari, A. & Omid, M. (2012) 'Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder', *Food and Bioproducts Processing*, 90, 667–675.
- 93- Felfoul, I., Burgain, J., Perroud, C., Gaiani, C., Scher, J., Attia, H. & Petit, J. (2020) 'Impact of spray-drying conditions on physicochemical properties and rehydration ability of skim dromedary and cow's milk powders', *Drying Technology*, 1–13.
- 94- Felfoul, I., Burgain, J., Perroud, C., Gaiani, C., Scher, J., Attia, H. & Petit, J. (2021) 'Impact of spray-drying conditions on flow properties of skim dromedary and cow's milk powders using the FT4 powder rheometer', *Journal of Food Processing and Preservation*, 45.
- 95- Felix da Silva, D., Hirschberg, C., Ahrné, L., Hougaard, A.B. & Ipsen, R. (2018) 'Cheese feed to powder: Effects of cheese age, added dairy ingredients and spray drying temperature on properties of cheese powders', *Journal of Food Engineering*, 36.
- 96- Felix da Silva, D., Tziouri, D., Ahrné, L., Bovet, N., Larsen, F.H., Ipsen, R. & Hougaard, A.B. (2020) 'Reconstitution behavior of cheese powders: Effects of cheese age and dairy ingredients on wettability, dispersibility and total rehydration', *Journal of Food Engineering*, 270, 109763.
- 97- Fernández-Gutiérrez, D., Veillette, M., Giroir-Fendler, A., Ramirez, A.A., Fauchaux, N. & Heitz, M. (2017) 'Biovalorization of saccharides derived from industrial wastes such as whey: a review', *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16, 147–174.
- 98- Fernández-Pérez, V., Tapiador, J., Martín, A. & Luque de Castro, M.D. (2004) 'Optimization of the drying step for preparing a new commercial powdered soup', *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5, 361–368.
- 99- Fischer, C. & Kleinschmidt, T. (2021) 'Valorisation of sweet whey by fermentation with mixed yoghurt starter cultures with focus on galactooligosaccharide synthesis', *International Dairy Journal*, 119, 105068.
- 100- Foerster, M., Gengenbach, T., Woo, M.W. & Selomulya, C. (2016) 'The impact of atomization on the surface composition of spray-dried milk droplets', *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 140, 460–471.

Références bibliographiques

- 101- Forkwa, G.E. (2017) Boissons fermentées de type yogourt à boire enrichies en protéines de lactosérum et en probiotiques, PhD Thesis. Université Laval.
- 102- Forny, L., Marabi, A. & Palzer, S. (2011) 'Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders', *Powder technology*, Elsevier, 206, 72–78.
- 103- Fournaise, T., Burgain, J., Perroud, C., Scher, J., Gaiani, C. & Petit, J. (2020) 'Impact of formulation on reconstitution and flowability of spray-dried milk powders', *Powder Technology*, 372, 107–116.
- 104- Fournaise, T., Petit, J. & Gaiani, C. (2021) 'Main powder physicochemical characteristics influencing their reconstitution behavior', *Powder Technology*, 383, 65–73.
- 105- Fox, P.F., Guinee, T.P., Cogan, T.M. & McSweeney, P.L.H. (2017) 'Whey and Whey Products', in Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H., *Fundamentals of Cheese Science*, Boston, MA: Springer US, 755–769.
- 106- Gaiani, C., Schuck, P., Scher, J., Desobry, S. & Banon, S. (2007) 'Dairy Powder Rehydration: Influence of Protein State, Incorporation Mode, and Agglomeration', *Journal of Dairy Science*, 90, 570–581.
- 107- Gana, S. & Touzi, A. (2001) 'Valorisation du Lactosérum par la Production de Levures Lactiques avec les Procédés de Fermentation Discontinue et Continue', *Rev. Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse*, 8.
- 108- Ganju, S. & Gogate, P.R. (2017) 'A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents', *Journal of Food Engineering*, 215, 84–96.
- 109- Gao, J. (2018) *Physicochemical and sensory quality of muffin made with Stevianna® or inulin as sucrose replacer*, PhD Thesis. Lincoln University.
- 110- Gao, J., Brennan, M.A., Mason, S.L. & Brennan, C.S. (2017) 'Effects of Sugar Substitution with "Stevianna" on the Sensory Characteristics of Muffins', *Journal of Food Quality*, 2017, 1–11.
- 111- Garcia-Amezquita, L.E., Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F.T. & Bermúdez-Aguirre, D. (2016) 'Freeze-drying: The Basic Process', in *Encyclopedia of Food and Health*, Elsevier, 104–109.
- 112- Garsa Ali Alshehry (2019) 'Utilization of Beetroot As A Natural Antioxidant, Pigment and Antimicrobial in Cupcake During the Storage Period', *International Journal of Engineering Research and technology*, 8, 652-659.
- 113- GEA Niro (2005a) 'A 15 a - Degree of Caking_tcm29-30923.pdf - https://www.google.dz/search?q=A+15+a+-+Degree+of+Caking_tcm29-30923.pdf&source=hp&ei=vNGSYePaH6SHjLsPyvC8iAI&iflsig=ALs-wAMAAAAAYZLfzJOfUnPse39yMXPhnZQ4nofMRkb1&oq=A+15+a+-+Degree+of+Caking_tcm29-30923.pdf&gs_lcp=Cgdnnd3Mtd2l6EANQ_wpY_wpg7xNoAHAAeACAAbYGIAHoCZIBBzQtMS4wLjGYAQCgAQKgAQGwAQQA&sclient=gws-wiz&ved=0ahUKEwjMvGqJv0AhWkA2MBHUo4DyEQ4dUDCAc&uact=5 (accessed November 2021).
- 114- GEA Niro (2005b) 'GEA Niro Method No. A 5 to .2005 - <https://www.google.com/search?q=GEA+Niro+Method+No.+A+5+to+.2005&ei=4Dna>

Références bibliographiques

- YPuAH5SNhbIPy8SOiAM&oq=GEA+Niro+Method+No.+A+5+to+.2005&gs_lcp=Cgnd3Mtd2l6EAMyCAghEBYQHRAeSgQIQRgAUNeRP1jXkT9ggp0_aAFwAngAgAGEBIgbKQaSAQcyLTEuNS0xmAEAoAEBoAECqgEHZ3dzLXdperABAMABAQ&sclient=gws-wiz&ved=0ahUKEwj78IfnbvxAhWURkEAHUuiAzEQ4dUDCA4&uact=5 (accessed June 2021).
- 115- GEA Niro (2006) 'Free Moisture GEA Niro Method No. A 1 c Revised: September 2006 - Recherche Google'. Available at: https://www.google.com/search?q=+Free+Moisture++GEA+Niro+Method+No.+A+1+c++++Revised%3A+September+2006+&source=hp&ei=1znaYNXzKI7CgQajzoCYBw&iflsig=AINFCbYAAAAAYNpH51xztBNJdrkacmEFqwu552H17W2&oq=+Free+Moisture++GEA+Niro+Method+No.+A+1+c++++Revised%3A+September+2006+&gs_lcp=Cgnd3Mtd2l6EANQjxNYjxNgvhp0AHAAeACAAasCiAGrApIBAzItMZgBAKABAqABAaoBB2d3cy13aXo&sclient=gws-wiz&ved=0ahUKEwiVu-zonbvxAhUOYcAKHSMnAHMQ4dUDCAc&uact=5 (accessed June 2021).
 - 116- Ghanimah, M. & Ibrahim, E. (2018) 'Effect of pH, carbohydrates, and NaCl on functional properties of whey proteins', *Journal of Sustainable Agricultural Sciences*, 44, 93–99.
 - 117- Gong, Z., Yu, M., Wang, W. & Shi, X. (2018) 'Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin', *International Journal of Food Properties*, 21, 2229–2238.
 - 118- Gouaou, I., Shamaei, S., Koutchoukali, M.S., Bouhelassa, M., Tsotsas, E. & Kharaghani, A. (2019) 'Impact of operating conditions on a single droplet and spray drying of hydroxypropylated pea starch: Process performance and final powder properties', *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 14, 18.
 - 119- Goula, A.M. & Adamopoulos, K.G. (2005) 'Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties', *Journal of Food Engineering*, 66, 35–42.
 - 120- Goula, A.M. & Adamopoulos, K.G. (2010) 'A new technique for spray drying orange juice concentrate', *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11, 342–351.
 - 121- Guimarães, P.M.R., Teixeira, J.A. & Domingues, L. (2010) 'Fermentation of lactose to bio-ethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorisation of cheese whey', *Biotechnology Advances*, 28, 375–384.
 - 122- Guo, Xiaobing, Guo, Xiaoming, Meng, H., Chen, X., Zeng, Q. & Yu, S. (2018) 'Influences of different pectins on the emulsifying performance of conjugates formed between pectin and whey protein isolate', *International Journal of Biological Macromolecules*, 43.
 - 123- Habtegebriel, H., Edward, D., Wawire, M., Sila, D. & Seifu, E. (2018) 'Effect of operating parameters on the surface and physico-chemical properties of spray-dried camel milk powders', *Food and Bioproducts Processing*, 112, 137–149.
 - 124- Hamad, A., Hayuningtyas, A. & Jitphongsakul, P. (2022) 'Comparison of Physical and Chemical Changes of Dried Berries Fruits Powders from Spray and Freeze Drying', *Journal of Chemical Process and Material Technology*, 1, 37–44.
 - 125- Hanafy, N.M., Ghanimah, M.A., Hassanein, A.M. & Hashim, M.A. (2016) 'The effect of using whey protein concentrate on the quality of nonfat fresh cheese', *J Biol Chem Environ Sci*, 11, 455–69.

Références bibliographiques

- 126- Hanoune, S., Djeghri-Hocine, B., Kassas, Z., Derradji, Z., Boudour, A. & Boukhemis, M. (2015) 'Optimization of *Lactobacillus fermentum* DSM 20049 Growth on Whey and Lupin Based Medium Using Response Surface Methodology', *Advance Journal of Food Science and Technology*, 9, 679–685.
- 127- Hausjell, J., Miltner, M., Herzig, C., Limbeck, A., Saracevic, Z., Saracevic, E., Weissensteiner, J., Molitor, C., Halbwirth, H. & Spadiut, O. (2019) 'Valorisation of cheese whey as substrate and inducer for recombinant protein production in *E. coli* HMS174(DE3)', *Bioresource Technology Reports*, 8, 100340.
- 128- Hedayati, S., Ansari, S., Javaheri, Z., Golmakani, M.-T. & Ansarifar, E. (2022) 'Multi-objective optimization of cakes formulated with fig or date syrup and different hydrocolloids based on TOPSIS', *LWT*, 171, 114088.
- 129- Hedayati, S. & Mazaheri Tehrani, M. (2018) 'Effect of total replacement of egg by soymilk and lecithin on physical properties of batter and cake', *Food Science & Nutrition*, 6, 1154–1161.
- 130- Hernandez Miranda, J., Soto Simental, S., Guemes Vera, N., Piloni Martini, J., Quintero Lira, A. & Rodriguez Avila, J.A. (2021) 'Whey beverage improves hydrating capacity of the soccer players', *Food Research*, 5, 63–71.
- 131- Himmetagaoglu, A.B., Berktaş, S., Cam, M. & Erbay, Z. (2020) 'Optimisation of spray drying process in microencapsulated cream powder production', *Journal of Dairy Research*, 87, 375–378.
- 132- Hogan, S.A. & O'Callaghan, D.J. (2010) 'Influence of milk proteins on the development of lactose-induced stickiness in dairy powders', *International Dairy Journal*, 20, 212–221.
- 133- Homayoonfal, M., Malekjani, N., Baeghbali, V., Ansarifar, E., Hedayati, S. & Jafari, S.M. (2022) 'Optimization of spray drying process parameters for the food bioactive ingredients', *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Taylor & Francis, 1–41.
- 134- Huang, S., Cauty, C., Dolivet, A., Le Loir, Y., Chen, X.D., Schuck, P., Jan, G. & Jeantet, R. (2016) 'Double use of highly concentrated sweet whey to improve the biomass production and viability of spray-dried probiotic bacteria', *Journal of Functional Foods*, 23, 453–463.
- 135- Huang, S., Vignolles, M.-L., Chen, X.D., Le Loir, Y., Jan, G., Schuck, P. & Jeantet, R. (2017) 'Spray drying of probiotics and other food-grade bacteria: A review', *Trends in Food Science & Technology*, 63, 1–17.
- 136- Hundre, S.Y., Karthik, P. & Anandharamakrishnan, C. (2015) 'Effect of whey protein isolate and β -cyclodextrin wall systems on stability of microencapsulated vanillin by spray-freeze drying method', *Food chemistry*, 174, 16–24.
- 137- Huppertz, T., Vasiljevic, T., Zisu, B. & Deeth, H. (2019) 'Novel Processing Technologies, Effects on Whey Protein Structure and Functionality', in *Whey Proteins*, Elsevier, 281–334.
- 138- Illanes, A. (2016) 'Chapter 1 - Lactose: Production and Upgrading', in *Lactose-Derived Prebiotics*, San Diego: *Academic Press*, 1–33.
- 139- Iltchenko, S., Preci, D., Bonifacino, C., Fraguas, E.F., Steffens, C., Panizzolo, L.A., Colet, R., Fernandes, I.A., Abirached, C., Valduga, E. & Steffens, J. (2018) 'Whey protein concentration by ultrafiltration and study of functional properties', *Ciência Rural*, 11.

Références bibliographiques

- 140- ISO-6579-1 (2017) 'Norme internationale, Microbiologie de la chaîne alimentaire — Méthode horizontale pour la recherche, le dénombrement et le sérotypage des *Salmonella*'.
- 141- ISO-6888-1 (1999) 'Norme internationale, Microbiologie des aliments — Méthode horizontale pour le dénombrement des staphylocoques à coagulase positive (*Staphylococcus aureus* et autres espèces)'.
- 142- Jamil Ur Rahman, U., Pozarlik, A.K. & Brem, G. (2021) 'Experimental analysis of spray drying in a process intensified counter flow dryer', *Drying Technology*, 1–21.
- 143- Jarpa-Parra, M., Wong, L., Wismer, W., Temelli, F., Han, J., Huang, W., Eckhart, E., Tian, Z., Shi, K., Sun, T. & Chen, L. (2017) 'Quality characteristics of angel food cake and muffin using lentil protein as egg/milk replacer', *International Journal of Food Science & Technology*, 52, 1604–1613.
- 144- Ji, J., Cronin, K., Fitzpatrick, J. & Miao, S. (2017) 'Enhanced wetting behaviours of whey protein isolate powder: The different effects of lecithin addition by fluidised bed agglomeration and coating processes', *Food Hydrocolloids*, 71, 94–101.
- 145- Ji, J., Fitzpatrick, J., Cronin, K., Maguire, P., Zhang, H. & Miao, S. (2016) 'Rehydration behaviours of high protein dairy powders: The influence of agglomeration on wettability, dispersibility and solubility', *Food Hydrocolloids*, 58, 194–203.
- 146- Jinapong, N., Supphantharika, M. & Jamnong, P. (2008) 'Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration', *Journal of Food Engineering*, 84, 194–205.
- 147- Jmp, C., Jn, P., Mvl, F., Rivera, L., Vh, A., Mjc, G. & Let, T. (2017) 'Milk Whey- From a Problematic Byproduct to a Source of Valuable Products for Health and Industry: An Overview from Biotechnology', *La Prensa Medica Argentina*, 103, 11.
- 148- Juliano, P. & Barbosa-Cánovas, G.V. (2010) 'Food Powders Flowability Characterization: Theory, Methods, and Applications', *Annual Review of Food Science and Technology*, 1, 211–239.
- 149- Jyotsna, R., Soumya, C., Swati, S. & Prabhasankar, P. (2016) 'Rheology, texture, quality characteristics and immunochemical validation of millet based gluten free muffins', *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10, 762–772.
- 150- Kamal, Md.M., Ali, Md.R., Rahman, Md.M., Shishir, M.R.I., Yasmin, S. & Sarker, Md.S.H. (2019) 'Effects of processing techniques on drying characteristics, physicochemical properties and functional compounds of green and red chilli (*Capsicum annum* L.) powder', *Journal of Food Science and Technology*, 56, 3185–3194.
- 151- Kamyabi, M., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R. & Saleh, K. (2017) 'Principles of viscous sintering in amorphous powders: A critical review', *Chemical Engineering Research and Design*, 125, 328–347.
- 152- Kanwate, B.W., Ballari, R.V. & Kudre, T.G. (2019) 'Influence of spray-drying, freeze-drying and vacuum-drying on physicochemical and functional properties of gelatin from *Labeo rohita* swim bladder', *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 135–141.
- 153- Karthik, P., Chhanwal, N. & Anandharamakrishnan, C. (2017) 'Drum Drying', in Anandharamakrishnan, C. (ed.) *Handbook of Drying for Dairy Products*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 43–56.

Références bibliographiques

- 154- Kasmi, M., Hamdi, M. & Trabelsi, I. (2017) 'Processed milk waste recycling via thermal pretreatment and lactic acid bacteria fermentation', *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 13604–13613.
- 155- Katekhong, W. & Charoenrein, S. (2018) 'Influence of spray drying temperatures and storage conditions on physical and functional properties of dried egg white', *Drying Technology*, 36, 169–177.
- 156- Kaur, M., Singh, V. & Kaur, R. (2017) 'Effect of partial replacement of wheat flour with varying levels of flaxseed flour on physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of cookies', *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 9, 14–20.
- 157- Kelly, G.M. (2016) The effects of formulation and processing on surface characteristics and functional properties of dairy powders, PhD Thesis. University College Cork.
- 158- Keshani, S., Daud, W.R.W., Nourouzi, M.M., Namvar, F. & Ghasemi, M. (2015) 'Spray drying: An overview on wall deposition, process and modeling', *Journal of Food Engineering*, 146, 152–162.
- 159- Khalilian Movahhed, M., Mohebbi, M., Koocheki, A. & Milani, E. (2016) 'The effect of different emulsifiers on the eggless cake properties containing WPC', *Journal of Food Science and Technology*, 53, 3894–3903.
- 160- Kheroufi, A., Brassesco, M.E., Campos, D.A., Mouzai, A., Boughellouta, H. & Pintado, M.E. (2022) 'Whey protein-derived peptides: The impact of chicken pepsin hydrolysis upon whey proteins concentrate on their biological and technological properties', *International Dairy Journal, Elsevier*, 134, 105442.
- 161- Khramtsov, A.G., Borisenko, A.A., Volodin, D.N. & Borisenko, L.A. (2022) 'Problems of processing milk whey as universal agricultural raw material and some ways to solve them', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 9.
- 162- Kim, E.H.-J., Chen, X.D. & Pearce, D. (2005) 'Effect of surface composition on the flowability of industrial spray-dried dairy powders', *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 46, 182–187.
- 163- Kim, J. (2018) 'Effects of Acid Whey Marination on Tenderness, Sensory and Other Quality Parameters of Beef Eye of Round, PhD Thesis. Department of Nutrition, Dietetics, and Food Science Brigham Young University.
- 164- Koç, B., Sakin-Yilmazer, M., Kaymak-Ertekin, F. & Balkır, P. (2014) 'Physical properties of yoghurt powder produced by spray drying', *Journal of Food Science and Technology*, 51, 1377–1383.
- 165- Koc, B., Yilmazer, M.S., Balkır, P. & Ertekin, F.K. (2010) 'Spray Drying of Yogurt: Optimization of Process Conditions for Improving Viability and Other Quality Attributes', *Drying Technology*, 28, 495–507.
- 166- Koç, G.Ç. & Dirim, S.N. (2018) 'Spray dried spinach juice: powder properties', *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12, 1654–1668.
- 167- Kosseva, M.R. (ed.) (2020) Food industry wastes: assessment and recuperation of commodities. 2nd ed., San Deigo: Elsevier, 501.
- 168- Królczyk, J.B., Dawidziuk, T., Janiszewska-Turak, E. & Sołowiej, B. (2016) 'Use of Whey and Whey Preparations in the Food Industry – A Review', *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 66, 157–165.

Références bibliographiques

- 169- Kumar, P.A. & Bangaraiah, P. (2014) 'FORMULATION OF WHEY-SWEET ORANGE BASED READY-TO-SERVE FRUIT BEVERAGE', *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 5, 11.
- 170- Lachebi, S. & Yelles, F. (2018) 'Valorisation du lactosérum par technique membranaire', *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 4, 6
- 171- Lapčíková, B., Lapčík, L., Salek, R., Valenta, T., Lorencová, E. & Vašina, M. (2022) 'Physical characterization of the milk chocolate using whey powder', *LWT*, Elsevier, 154, 112669.
- 172- Lappa, I.K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Terpou, A., Koulougliotis, D., Eriotou, E. & Kopsahelis, N. (2019) 'Cheese Whey Processing: Integrated Biorefinery Concepts and Emerging Food Applications', *Foods*, 8, 347.
- 173- Largo Ávila, E., Cortés Rodríguez, M. & Ciro Velásquez, H.J. (2015) 'Influence of Maltodextrin and Spray Drying Process Conditions on Sugarcane Juice Powder Quality', *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68, 7509–7520.
- 174- Lavari, L., Burns, P., Páez, R., Reinheimer, J. & Vinderola, G. (2017) 'Study of the effects of spray drying in whey-starch on the probiotic capacity of *Lactobacillus rhamnosus* 64 in the gut of mice', *Journal of applied microbiology*, 123, 992–1002.
- 175- Lavari, L., Páez, R., Cuatrin, A., Reinheimer, J. & Vinderola, G. (2014) 'Use of cheese whey for biomass production and spray drying of probiotic lactobacilli', *Journal of Dairy Research*, 81, 267–274.
- 176- Lebrun, P., Krier, F., Mantanus, J., Grohgan, H., Yang, M., Rozet, E., Boulanger, B., Evrard, B., Rantanen, J. & Hubert, P. (2012) 'Design space approach in the optimization of the spray-drying process', *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, Elsevier, 80, 226–234.
- 177- León-Martínez, F.M., Méndez-Lagunas, L.L. & Rodríguez-Ramírez, J. (2010) 'Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization', *Carbohydrate Polymers*, 81, 864–870.
- 178- Li, R., Lin, D., Roos, Y.H. & Miao, S. (2019) 'Glass transition, structural relaxation and stability of spray-dried amorphous food solids: A review', *Drying Technology*, 37, 287–300.
- 179- Lin, Y., Liu, Y., Wang, L., Xie, Y., Gao, Z. & Wang, S. (2018) 'Optimization of drying conditions and components to reduce wall sticking during spray drying of infant formula milk', *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11, 214–218.
- 180- Maas, S.G., Schaldach, G., Littringer, E.M., Mescher, A., Griesser, U.J., Braun, D.E., Walzel, P.E. & Urbanetz, N.A. (2011) 'The impact of spray drying outlet temperature on the particle morphology of mannitol', *Powder Technology*, 213, 27–35.
- 181- Maciel, G.M., Chaves, K.S., Grosso, C.R.F. & Gigante, M.L. (2014) 'Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* La-5 by spray-drying using sweet whey and skim milk as encapsulating materials', *Journal of Dairy Science*, 97, 1991–1998.
- 182- Macwan, S.R., Dabhi, B.K., Parmar, S.C. & Aparnathi, K.D. (2016) 'Whey and its Utilization', *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5, 134–155.
- 183- Mahdi Jafari, S., Azizi, D., Mirzaei, H. & Dehnad, D. (2016) 'Comparing Quality Characteristics of Oven-Dried and Refractance Window-Dried Kiwifruits: Refractance

Références bibliographiques

- Window Drying of Kiwifruits', *Journal of Food Processing and Preservation*, 40, 362–372.
- 184- Mahdi Jafari, S., Masoudi, S. & Bahrami, A. (2019) 'A Taguchi approach production of spray-dried whey powder enriched with nanoencapsulated vitamin D 3', *Drying Technology*, 37, 2059–2071.
- 185- Manickavasagan, A., Thangavel, K., Dev, S.R.S., Delfiya, D.S.A., Nambi, E., Orsat, V. & Raghavan, G.S.V. (2015) 'Physicochemical Characteristics of Date Powder Produced in a Pilot-Scale Spray Dryer', *Drying Technology*, 33, 1114–1123.
- 186- Maravić, N., Škrobot, D., Dapčević-Hadnađev, T., Pajin, B., Tomić, J. & Hadnađev, M. (2022) 'Effect of Sourdough and Whey Protein Addition on the Technological and Nutritive Characteristics of Sponge Cake', *Foods*, 11, 1992.
- 187- Martínez-Cervera, S., Salvador, A., Muguerza, B., Moulay, L. & Fiszman, S.M. (2011) 'Cocoa fibre and its application as a fat replacer in chocolate muffins', *LWT - Food Science and Technology*, 44, 729–736.
- 188- Masters, K. (1985) 'Spray drying handbook.', *Spray drying handbook.*, George Godwin Ltd, 696.
- 189- Masum, A.K.M., Chandrapala, J., Adhikari, B., Huppertz, T. & Zisu, B. (2019) 'Effect of lactose-to-maltodextrin ratio on emulsion stability and physicochemical properties of spray-dried infant milk formula powders', *Journal of Food Engineering*, 254, 34–41.
- 190- Mestry, A.P., Mujumdar, A.S. & Thorat, B.N. (2011) 'Optimization of Spray Drying of an Innovative Functional Food: Fermented Mixed Juice of Carrot and Watermelon', *Drying Technology*, 29, 1121–1131.
- 191- Miano, T.F., Dogan, M., Hyata, M., Miano, T.F. & Shamim, A. (2021) 'FOAMING STABILITY OF YOGURT SMOOTHIE WITH WHEY POWDER AND XANTHAN GUM', *Pakistan Journal of Science*, 73, 6.
- 192- Miloud, B., Halima, Z.-K.A. & Nour-Eddine, K. (2017) 'Development of a sweet whey-based medium for culture of *Lactobacillus*', *African Journal of Biotechnology*, 16, 1630–1637.
- 193- Milovanovic, B., Djekic, I., Miocinovic, J., Djordjevic, V., Lorenzo, J.M., Barba, F.J., Mörlein, D. & Tomasevic, I. (2020) 'What Is the Color of Milk and Dairy Products and How Is It Measured?', *Foods*, 9, 1629.
- 194- Mishra, P., Mishra, S. & Mahanta, C.L. (2014) 'Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embllica officinalis*) juice powder', *Food and Bioproducts Processing*, 92, 252–258.
- 195- Modugno, C., Paterson, A.H.J. & McLeod, J. (2015) 'Lactose Caking: Influence of the Particle Size Distribution and the Water Content', *Procedia Engineering*, 102, 114–122.
- 196- Moghbeli, S., Jafari, S.M., Maghsoudlou, Y. & Dehnad, D. (2020) 'A Taguchi approach optimization of date powder production by spray drying with the aid of whey protein-pectin complexes', *Powder Technology*, 359, 85–93.
- 197- Mollea, C., Marmo, L. & Bosco, F. (2013) 'Valorisation of Cheese Whey, a By-Product from the Dairy Industry', in Muzzalupo, I. (ed.) *Food Industry*, InTech, 549–588.

Références bibliographiques

- 198- Moser, P., Gallo, T.C.B., Zuanon, L.A.C., Pereira, G.E. & Nicoletti, V.R. (2018) 'Water sorption and stickiness of spray-dried grape juice and anthocyanins stability', *Journal of Food Processing and Preservation*, e13830.
- 199- Mujumdar, A. (2014) *Handbook of Industrial Drying*. 4th ed., Boca Raton London New York: CRC Press, 1334.
- 200- Mustafa, L., Alsaed, A.K. & Al-Domi, H. (2014) 'Drying of sweet whey using drum dryer technique and utilization of the produced powder in French-type bread and butter cookies', *Pakistan Journal of Biological Sciences, Asian Network for Scientific Information (ANSINET)*, 17, 812.
- 201- Muzaffar, K. & Kumar, P. (2017) 'Spray drying of tamarind pulp: effect of process parameters using protein as carrier agent', *Journal of food processing and preservation*, Wiley Online Library, 41, e12781.
- 202- Nani, M. & Krishnaswamy, K. (2022) 'Circular Economy for Food Industry Waste: Development and Characterization of Spray-Dried Acid Whey Encapsulated in Millet Matrix', *ACS Food Science & Technology*, American Chemical Society, 3, 123–133.
- 203- Németh, Á. & Kaleta, Z. (2015) 'Complex utilization of dairy waste (whey) in Biorefinery', 11, 9.
- 204- Nguyen, D.Q. (2014) *Étude comparative expérimentale des opérations d'atomisation et d'autovaporisation: application à la gomme arabique et au soja*, PhD Thesis. UFR Pôle Science et Technologie, Université de La Rochelle, 212.
- 205- Nielsen, E.N., Merkel, A., Yazdi, S.R. & Ahrné, L. (2021) 'The effect of acid whey composition on the removal of calcium and lactate during electrodialysis', *International Dairy Journal*, 117, 104985.
- 206- Nijdam, J., Ibach, A. & Kind, M. (2008) 'Fluidisation of whey powders above the glass-transition temperature', *Powder Technology*, 187, 53–61.
- 207- Nishad, J., Selvan, C.J., Mir, S.A. & Bosco, S.J.D. (2017) 'Effect of spray drying on physical properties of sugarcane juice powder (*Saccharum officinarum* L.)', *Journal of Food Science and Technology*, 54, 687–697.
- 208- Nishanthi, M., Vasiljevic, T. & Chandrapala, J. (2017) 'Properties of whey proteins obtained from different whey streams', *International Dairy Journal*, 66, 76–83.
- 209- Nouredine E, Bouchra L, Latifa B, Mehdi C (2014) Valorisation of whey: Bioethanol production by free and immobilized yeasts. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 6:493–498
- 210- Obón, J.M., Luna-Abad, J.P., Bermejo, B. & Fernández-López, J.A. (2020) 'Thermographic studies of cocurrent and mixed flow spray drying of heat sensitive bioactive compounds', *Journal of Food Engineering*, 268, 109745.
- 211- OECD & FAO (2020) *OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029*, OECD (OECD-FAO Agricultural Outlook).
- 212- De Oliveira, A.H., Duarte, M.E.M., Pasquali, M. & Lisboa, H.M. (2020) 'Influence of spray drying conditions on the properties of whole goat milk', *Drying Technology An International Journal*, 39, 726–737.

Références bibliographiques

- 213- O'Sullivan, J.J., Norwood, E.-A., O'Mahony, J.A. & Kelly, A.L. (2019) 'Atomisation technologies used in spray drying in the dairy industry: A review', *Journal of Food Engineering*, 243, 57–69.
- 214- Panghal, A., Kumar, V., Dhull, S., Gat, Y. & Chhikara, N. (2017) 'Utilization of Dairy Industry Waste-Whey in Formulation of Papaya RTS Beverage', *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 5, 168–174.
- 215- Panghal, A., Patidar, R., Jaglan, S., Chhikara, N., Khatkar, S.K., Gat, Y. & Sindhu, N. (2018) 'Whey valorization: current options and future scenario – a critical review', *Nutrition & Food Science*, 48, 520–535.
- 216- Park, C.W., Stout, M.A. & Drake, M. (2016) 'The effect of spray-drying parameters on the flavor of nonfat dry milk and milk protein concentrate 70%', *Journal of Dairy Science*, 99, 9598–9610.
- 217- Park, Y.W. & Haenlein, G.F.W. (2013) 'Production, Composition and Health', 738.
- 218- Patel, D.V. (2009) 'Spray Drying : A Review | Pharmainfo.net', 24.
- 219- Patel, R.P., Patel, M.P. & Suthar, A.M. (2009) 'Spray drying technology: an overview', *Indian Journal of Science and Technology*, 2, 44–47.
- 220- Patel, S. (2015) 'Functional food relevance of whey protein: A review of recent findings and scopes ahead', *Journal of Functional Foods*, 19, 308–319.
- 221- Pescuma, M., de Valdez, G.F. & Mozzi, F. (2015) 'Whey-derived valuable products obtained by microbial fermentation', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 6183–6196.
- 222- Phisut, N. (2012) 'Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product', *International Food Research Journal*, 19, 1297–1306.
- 223- Pires, A.F., Marnotes, N.G., Rubio, O.D., Garcia, A.C. & Pereira, C.D. (2021) 'Dairy By-Products: A Review on the Valorization of Whey and Second Cheese Whey', *Foods*, 10, 1067.
- 224- Prashanth, B.M., Jayaprakash, H.M., Soumyashree, T.C. & Madhusudhan, N.M. (2018) 'Development of fruit enriched whey beverage', *International Journal of Chemical Studies*, 6, 2386–2392.
- 225- Prazeres, A.R., Carvalho, F. & Rivas, J. (2012) 'Cheese whey management: A review', *Journal of Environmental Management*, 110, 48–68.
- 226- Prokopov, T., Goranova, Z., Baeva, M., Slavov, A. & Galanakis, C.M. (2015) 'Effects of powder from white cabbage outer leaves on sponge cake quality', *International Agrophysics*, 29, 493–500.
- 227- Pugliese, A., Cabassi, G., Chiavaro, E., Paciulli, M., Carini, E. & Mucchetti, G. (2017) 'Physical characterization of whole and skim dried milk powders', *Journal of Food Science and Technology*, 54, 3433–3442.
- 228- Pui, L.P. & Lejaniya, A.K.S. (2022) 'Effects of spray-drying parameters on physicochemical properties of powdered fruits', *Foods and Raw Materials*, 235–251.
- 229- Queiroz, E.S., Lopes Rezende, A.L., Perrone, Í.T., Francisquini, J. d'Almeida, Fernandes de Carvalho, A., Germano Alves, N.M., Cappa de Oliveira, L.F. & Stephani,

Références bibliographiques

- R. (2021) 'Spray drying and characterization of lactose-free goat milk', *LWT*, 147, 111516.
- 230- Rahmati, N.F. & Mazaheri Tehrani, M. (2015) 'Replacement of Egg in Cake: Effect of Soy Milk on Quality and Sensory Characteristics: Soy Milk as an Egg Substitute in Cake', *Journal of Food Processing and Preservation*, 39, 574–582.
- 231- Rannou, C., Texier, F., Moreau, M., Courcoux, P., Meynier, A. & Prost, C. (2013) 'Odour quality of spray-dried hens' egg powders: The influence of composition, processing and storage conditions', *Food Chemistry*, 138, 905–914.
- 232- Recham, H. (2015) 'Les marches des industries alimentaires en Algérie, L'ESSENTIEL DE L'AGROALIMENTAIRE ET L'AGRICULTURE - N°97'.
- 233- Reddy, R.S., Ramachandra, C.T., Hiregoudar, S., Nidoni, U., Ram, J. & Kammar, M. (2014) 'Influence of processing conditions on functional and reconstitution properties of nadeem made from Osmanabadi goat milk by spray drying', *Small Ruminant Research*, 119, 130–137.
- 234- Remón, J., Ruiz, J., Oliva, M., García, L. & Arauzo, J. (2016) 'Cheese whey valorisation: Production of valuable gaseous and liquid chemicals from lactose by aqueous phase reforming', *Energy Conversion and Management*, 124, 453–469.
- 235- Rocha-Mendoza, D., Kosmerl, E., Krentz, A., Zhang, L., Badiger, S., Miyagusuku-Cruzado, G., Mayta-Apaza, A., Giusti, M., Jiménez-Flores, R. & García-Cano, I. (2021) 'Invited review: Acid whey trends and health benefits', *Journal of Dairy Science*, 104, 1262–1275.
- 236- Rodríguez-García, J., Puig, A., Salvador, A. & Hernando, I. (2012) 'Optimization of a Sponge Cake Formulation with Inulin as Fat Replacer: Structure, Physicochemical, and Sensory Properties', *Journal of Food Science*, 77, C189–C197.
- 237- Roos, Y.H. (2010) 'Glass Transition Temperature and Its Relevance in Food Processing', *Annual Review of Food Science and Technology*, 1, 469–496.
- 238- Sabokbar, N. & Khodaiyan, F. (2016) 'Total phenolic content and antioxidant activities of pomegranate juice and whey based novel beverage fermented by kefir grains', *Journal of Food Science and Technology*, 53, 739–747.
- 239- Sadat, A., Ezzatpanah, H. & Bakhoda, H. (2017) 'Solubility and structure of milk powders manufactured with the addition of disodium phosphate and tetrasodium pyrophosphate mixtures', *International Journal of Food Properties*, 20, 2645–2657.
- 240- Saha, D., Nanda, S.K. & Yadav, D.N. (2019) 'Optimization of spray drying process parameters for production of groundnut milk powder', *Powder Technology*, Elsevier, 355, 417–424.
- 241- Şahin-Nadeem, H., Dinçer, C., Torun, M., Topuz, A. & Özdemir, F. (2013) 'Influence of inlet air temperature and carrier material on the production of instant soluble sage (*Salvia fruticosa* Miller) by spray drying', *LWT - Food Science and Technology*, 52, 31–38.
- 242- Samantha, S.C., Bruna, A.S.M., Adriana, R.M., Fabio, B., Sandro, A.R. & Aline, R.C.A. (2015) 'Drying by spray drying in the food industry: Micro-encapsulation, process parameters and main carriers used', *African Journal of Food Science*, 9, 462–470.
- 243- Samsu, Z. 'Asyiqin & Mohamad Zahir, A.Z. (2020) 'Production of oil palm milk powder by spray drying technique', *Materials Today: Proceedings*, 31, 306–312.

Références bibliographiques

- 244- Santana, A.A., Martin, L.G.P., de Oliveira, R.A., Kurozawa, L.E. & Park, K.J. (2017) 'Spray drying of babassu coconut milk using different carrier agents', *Drying Technology*, 35, 76–87.
- 245- Santhalakshmy, S., Don Bosco, S.J., Francis, S. & Sabeena, M. (2015) 'Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder', *Powder Technology*, 274, 37–43.
- 246- Santos, D., Maurício, A.C., Sencadas, V., Santos, J.D., Fernandes, M.H. & Gomes, P.S. (2018) 'Spray Drying: An Overview'. (eds) *Biomaterials - Physics and Chemistry - New Edition*, InTech, 28.
- 247- Santos, G. dos, Nogueira, R.I. & Rosenthal, A. (2018) 'Powdered yoghurt produced by spray drying and freeze drying: a review', *Brazilian Journal of Food Technology*, 21, 9.
- 248- Sarabandi, Kh., Peighambaroust, S.H., Sadeghi Mahoonak, A.R. & Samaei, S.P. (2018) 'Effect of different carriers on microstructure and physical characteristics of spray dried apple juice concentrate', *Journal of Food Science and Technology*, 55, 3098–3109.
- 249- Šavikin, K., Nastić, N., Janković, T., Bigović, D., Miličević, B., Vidović, S., Menković, N. & Vladić, J. (2021) 'Effect of Type and Concentration of Carrier Material on the Encapsulation of Pomegranate Peel Using Spray Drying Method', *Foods*, 10, 1968.
- 250- Scheidegger, D., Radici, P.M., Vergara-Roig, V.A., Bosio, N.S., Pesce, S.F., Pecora, R.P., Romano, J.C.P. & Kivatinitz, S.C. (2013) 'Evaluation of milk powder quality by protein oxidative modifications', *Journal of Dairy Science*, 96, 3414–3423.
- 251- Schuck, P. (2011) 'Modifications des propriétés fonctionnelles des poudres de protéines laitières : Impact de la concentration et du séchage', *Innovations Agronomiques*, 13, 71–99.
- 252- Schuck, P., Dolivet, A. & Jeantet, R. (2012) *Analytical methods for food and dairy powders*, first edition, Hoboken, N.J.: Wiley, 239.
- 253- Schuck, P., Gernigon, G. & Meyer, H.-L. (2012) 'Chercheurs et industriels font sur point sur les avancées technologiques du séchage.', *Revue Laitière Française*, 30–33.
- 254- Sebastián-Nicolás, J.L., González-Olivares, L.G., Vázquez-Rodríguez, G.A., Lucho-Constantino, C.A., Castañeda-Ovando, A. & Cruz-Guerrero, A.E. (2020) 'Valorization of whey using a biorefinery', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18.
- 255- Secchi, N., Stara, G., Anedda, R., Campus, M., Piga, A., Roggio, T. & Catzeddu, P. (2011) 'Effectiveness of sweet ovine whey powder in increasing the shelf life of Amaretti cookies', *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1073–1078.
- 256- Seki, N. & Saito, H. (2012) 'Lactose as a source for lactulose and other functional lactose derivatives', *International Dairy Journal*, 22, 110–115.
- 257- Selvamuthukumar, M. (2019) 'Spray Drying of Dairy and Cereal Food Products', in *Handbook on Spray Drying Applications for Food Industries*. CRC Press, 68–85.
- 258- Sert, D., Üçok, G., Kara, Ü. & Mercan, E. (2021) 'Development of gelatine-based edible film by addition of whey powders with different demineralisation ratios: Physicochemical, thermal, mechanical and microstructural characteristics', *International Journal of Dairy Technology*, 74, 414–424.

Références bibliographiques

- 259- Seth, D., Mishra, H.N. & Deka, S.C. (2017) 'Functional and reconstitution properties of spray-dried sweetened yogurt powder as influenced by processing conditions', *International Journal of Food Properties*, 20, 1603–1611.
- 260- Shao, Y.-Y., Lin, K.-H. & Chen, Y.-H. (2015) 'Batter and product quality of eggless cakes made of different types of flours and gums', *Journal of Food Processing and Preservation*, Wiley Online Library, 39, 2959–2968.
- 261- Sharma, A., Jana, A.H. & Chavan, R.S. (2012) 'Functionality of Milk Powders and Milk-Based Powders for End Use Applications-A Review', *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11, 518–528.
- 262- Shin, J.-H., Chae, M.J. & Han, J.-A. (2021) 'Physical and sensory characteristics of brownies containing whey powder', *Korean Journal of Food Science and Technology*, 53, 321–328.
- 263- Shishir, M.R.I., Taip, F.S., Aziz, N.A. & Talib, R.A. (2014) 'Physical Properties of Spray-dried Pink Guava (Psidium Guajava) Powder', *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 74–81.
- 264- Shraddha RC, C.R. & Nalawade T, K.A. (2015) 'Whey Based Beverage: Its Functionality, Formulations, Health Benefits and Applications', *Journal of Food Processing & Technology*, 6.
- 265- Silva, J.V.C. & O'Mahony, J.A. (2017) 'Flowability and wetting behaviour of milk protein ingredients as influenced by powder composition, particle size and microstructure', *International Journal of Dairy Technology*, 70, 277–286.
- 266- Singh, J.P., Kaur, A., Shevkani, K. & Singh, N. (2015) 'Influence of jambolan (Syzygium cumini) and xanthan gum incorporation on the physicochemical, antioxidant and sensory properties of gluten-free eggless rice muffins', *International Journal of Food Science & Technology*, 50, 1190–1197.
- 267- Singh, V.K., Pandey, S., Pare, A. & Singh, R.B. (2014) 'Optimization of process parameters for the production of spray dried Ber (Ziziphus jujube L.) powder', *Journal of Food Science and Technology*, 51, 3956–3962.
- 268- Sinha, R., Radha, C., Prakash, J. & Kaul, P. (2007) 'Whey protein hydrolysate: Functional properties, nutritional quality and utilization in beverage formulation', *Food Chemistry*, 101, 1484–1491.
- 269- Smithers, G.W. (2008) 'Whey and whey proteins—from “gutter-to-gold”', *International Dairy Journal*, 18, 695–704.
- 270- Sobulska, M. & Zbicinski, I. (2021) 'Advances in spray drying of sugar-rich products', *Drying Technology*, 39, 1774–1799.
- 271- Sousa, G.T., Lira, F.S., Rosa, J.C., de Oliveira, E.P., Oyama, L.M., Santos, R.V. & Pimentel, G.D. (2012) 'Dietary whey protein lessens several risk factors for metabolic diseases: a review', *Lipids in Health and Disease*, 11, 67.
- 272- Spălățelu, C. (2012) 'BIOTECHNOLOGICAL VALORISATION OF WHEY', *Innovative Romanian Food Biotechnology*, 10, 8.
- 273- Spreer, E. (1998) *Milk and Dairy Product Technology*. EDITORIAL BOARD, Taylor and Francis (FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY), 498.

Références bibliographiques

- 274- Suhag, Y. & Nanda, V. (2016) 'Optimization for spray drying process parameters of nutritionally rich honey powder using response surface methodology', *Cogent Food & Agriculture*, 2,12.
- 275- Sulieman, A.M.E., Elamin, O.M., Elkhailifa, E.A. & Laleye, L. (2014) 'Comparison of physicochemical properties of spray-dried camel's milk and cow's milk powder', *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering, Scientific and Academic Publishing*, 4, 15–19.
- 276- T.A. Tran, T. & V.H. Nguyen, H. (2018) 'Effects of Spray-Drying Temperatures and Carriers on Physical and Antioxidant Properties of Lemongrass Leaf Extract Powder', *Beverages*, 4, 84.
- 277- Tang, J., Feng, H. & Shen, G.-Q. (2003) 'Drum drying', *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering, Marcel Dekker Inc.*: New York, 211–214.
- 278- T Tanguy-Sai, G. (2018) *Concentration of dairy products in falling-film evaporators: limiting factors and technological alternatives*, PhD Thesis. AGROCAMPUS OUEST COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE, 185.
- 279- Tonon, R.V., Brabet, C. & Hubinger, M.D. (2008) 'Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying', *Journal of Food Engineering*, 88, 411–418.
- 280- Tontul, I. & Topuz, A. (2017) 'Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties', *Trends in Food Science & Technology*, 63, 91–102.
- 281- Vajda, á., Zeke, I., Juhász, R., Barta, J. & Balla, Cs. (2013) 'Effect of acid whey concentrate on thermophysical properties of milk-based ice-cream', *Acta Alimentaria*, 42, 107–115.
- 282- Vasey, C. (2006) *The Whey Prescription: The Healing Miracle in Milk, Inner Traditions / Bear & Co.*98.
- 283- Vickovic, D., Czaja, T.P., Gaiani, C., Pedersen, S.J., Ahrné, L. & Hougaard, A.B. (2023) 'The effect of feed formulation on surface composition of powders and wall deposition during spray drying of acidified dairy products', *Powder Technology*, 418. 118297.
- 284- Vickovic, D., Pedersen, S.J., Ahrné, L. & Hougaard, A.B. (2022) 'Effects of lactic acid concentration and spray drying conditions on stickiness of acidified skim milk powder', *International Journal of Dairy Technology*, 1471–0307.12932.
- 285- Vidigal, M.C.T.R., Minim, V.P.R., Ramos, A.M., Ceresino, E.B., Diniz, M.D.M.S., Camilloto, G.P. & Minim, L.A. (2012) 'Effect of whey protein concentrate on texture of fat-free desserts: sensory and instrumental measurements', *Food Science and Technology, SciELO Brasil*, 32, 412–418.
- 286- Vos, B., Crowley, S.V., O'Sullivan, J., Evans-Hurson, R., McSweeney, S., Krüse, J., Rizwan Ahmed, M., Fitzpatrick, D. & O'Mahony, J.A. (2016) 'New insights into the mechanism of rehydration of milk protein concentrate powders determined by Broadband Acoustic Resonance Dissolution Spectroscopy (BARDS)', *Food Hydrocolloids*, 61, 933–945.
- 287- Wang, L., Zhao, S., Liu, Y. & Xiong, S. (2020) 'Quality characteristics and evaluation for sponge cakes made of rice flour', *Journal of Food Processing and Preservation*, 44. e02922.

Références bibliographiques

- 288- Wang, W., Jiang, Y. & Zhou, W. (2013) 'Characteristics of soy sauce powders spray-dried using dairy whey proteins and maltodextrins as drying aids', *Journal of Food Engineering*, 119, 724–730.
- 289- Wani, S.H., Gull, A., Allaie, F. & Safapuri, T.A. (2015) 'Effects of incorporation of whey protein concentrate on physicochemical, texture, and microbial evaluation of developed cookies', *Cogent Food & Agriculture*, 1, 1092406.
- 290- Westergaard, V. (2010) *Milk Powder Technology Evaporation and Spray Drying*. 5th ed., Copenhagen: GEA Niro, 338.
- 291- Woo, M.W. & Bhandari, B. (2013) 'Spray drying for food powder production', in *Handbook of Food Powders*, Elsevier, 29–56.
- 292- Wu, S., Fitzpatrick, J., Cronin, K., Maidannyk, V. & Miao, S. (2020) 'Effects of spraying surfactants in a fluidised bed on the rehydration behaviour of milk protein isolate powder', *Journal of Food Engineering*, 266, 109694.
- 293- Yadav, J.S.S., Yan, S., Pilli, S., Kumar, L., Tyagi, R.D. & Surampalli, R.Y. (2015) 'Cheese whey: A potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides', *Biotechnology Advances*, 33, 756–774.
- 294- Yousefi, S., Emam-Djomeh, Z. & Mousavi, S.M. (2011) 'Effect of carrier type and spray drying on the physicochemical properties of powdered and reconstituted pomegranate juice (*Punica Granatum L.*)', *Journal of Food Science and Technology*, 48, 677–684.
- 295- Yue, S., Jing, W., Yubin, W., Huijuan, Z., Yue, M., Xiaoyan, Z. & Chao, Z. (2018) 'Inlet temperature affects spray drying quality of watermelon powder', *Czech Journal of Food Sciences*, 36, 316–323.
- 296- Zadow, J.G. (ed.) (1992) *Whey and lactose processing*, London ; New York : New York, NY, USA: Elsevier Applied Science ; Sole distributor in the USA and Canada, Elsevier Science Pub. Co.
- 297- Zandona, E., Blažić, M. & Režek Jambrak, A. (2021) 'Whey Utilisation: Sustainable Uses and Environmental Approach', *Food Technology and Biotechnology*, 59, 147–161.
- 298- Zareifard, M.R., Niakousari, M., Shokrollahi, Z. & Javadian, S. (2012) 'A Feasibility Study on the Drying of Lime Juice: The Relationship between the Key Operating Parameters of a Small Laboratory Spray Dryer and Product Quality', *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1896–1906.
- 299- Zhou, X., Hua, X., Huang, L. & Xu, Y. (2019) 'Bio-utilization of cheese manufacturing wastes (cheese whey powder) for bioethanol and specific product (galactonic acid) production via a two-step bioprocess', *Bioresource Technology*, 272, 70–76.
- 300- Zhu, X., Yuan, X., Zhang, Y., Liu, H., Wang, J. & Sun, B. (2022) 'The global concern of food security during the COVID-19 pandemic: Impacts and perspectives on food security', *Food Chemistry*, 370, 130830.
- 301- Zolnere, K. & Ciprovica, I. (2019) 'Lactose hydrolysis in different solids content whey and milk permeates', in, 13th Baltic Conference on Food Science and Technology "FOOD. NUTRITION. WELL-BEING", 35–39.
- 302- Zotta, T., Solieri, L., Iacumin, L., Picozzi, C. & Gullo, M. (2020) 'Valorization of cheese whey using microbial fermentations', *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 2749–2764.

Références bibliographiques

- 303- ZOUARI, A. (2019) Etude physique et biochimique de la poudre de lait de chamelle séchée par le procédé d'atomisation: étude comparative avec le lait de vache., PhD Thesis. Université de Sfax.
- 304- Zouari, A., Briard-Bion, V., Schuck, P., Gaucheron, F., Delaplace, G., Attia, H. & Ayadi, M.A. (2020) 'Changes in physical and biochemical properties of spray dried camel and bovine milk powders.', *LWT*, 128, 109437.
- 305- Zouari, A., Perrone, Í.T., Schuck, P., Gaucheron, F., Dolivet, A., Attia, H. & Ayadi, M.A. (2018) 'Effect of outlet drying temperature and milk fat content on the physicochemical characteristics of spray-dried camel milk powder', *Drying Technology*, 37,1615-1624.

Annexe

Annexe 1.

Tableau 1: caractéristiques de poudre de lait écrème (originale d'Irlande du nord)

Composition	Teneur
Humidité (%)	5.17
cendres (%)	8
taux des protéines (%)	36.6
Matière grasse (%)	1.1
Carbohydrates (%)	49.13
Acidité (%)	0.12
pH	6.5

Annexe 2.

Tableau 2 : caractéristiques de poudre de lactosérum doux (MAYBI, turque)

Composition	Teneur
Humidité (%)	4
Taux de protéine (%)	11-13
Lactose (%)	72-74
Matière grasse (%)	1
Acidité (%)	0.15
pH	6-6.70

Annexe 3.

Dosage des protéines par Bradford

Préparation du réactif de Bradford

- Bleu de Coomassie G-250 (100 mg).
- Ethanol (50 m).
- Acide phosphorique à 85% (100 ml).
- Compléter à 1000 ml avec l'eau distillée.
- Filtrer la solution avec du papier Whatman N°1

Protocole expérimental

Une quantité de 200 μL de réactif de Bradford a été ajoutée à 20 μL de l'échantillon dilué, puis Incuber à l'obscurité et ce après l'homogénéisation de mélange et ce dernier se mettre à une température ambiante pendant 5 min. A l'aide d'un spectrophotomètre, la densité optique des échantillons a été mesurée au lecteur à 595 nm. La concentration en protéines est déterminée à l'aide d'une courbe étalon réalisé avec une solution mère contenant 1 mg/mL de BSA, une série de dilution est préparée. La concentration en protéines est exprimée en mg de protéines /mL.

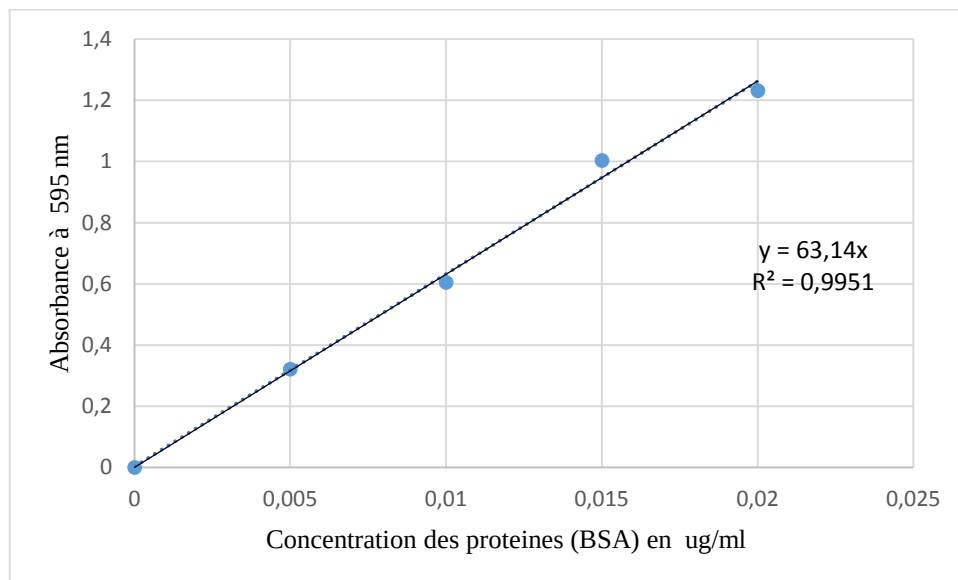


Figure 1: courbe d'etalonnage du dosage des proteines

Annexe 4

La recherche des salmonelles

La recherche des germes de salmonella a nécessité plusieurs opérations qui sont résumés comme suit.

Pré-enrichissement et Enrichissement dans un milieu sélectif à une température sélectif, par la suite l'opération de l'isolement des salmonella réalisé sur un milieu sélectif, et les colonies suspectes ont été déterminé par les méthodes ordinaire.

1- Pré-enrichissement non sélectif

Une quantité de prise d'essai est ajoutée à une quantité d'eau peptonée tamponnée de manière à obtenir une dilution au $1/10^{\text{ème}}$. Globalement il s'agit de l'ajout de 25 g de prise d'essai à 225 ml d'eau peptonée tamponnée avec une bonne homogénéisation qui va aider sur la revitalisation des micro-organisme existant. Incubation de la suspension mère a une température de 37 °C pendant 18 h.

2- Enrichissement sélectif

Dans cette étape consiste de prendre 0.1 mL de milieu précédent à l'aide d'une pipete stérile et de la mettre dans 10 mL de bouillon RVS et de l'incuber à une température de 37 °C pendant 24 h.

3- Isolement

A partir des cultures obtenues dans le milieu auparavant préparer, une goutte de l'échantillon a été pris et ensemercer par le technique strié, suivi par une incubation à une température de 37 °C pendant 24 h, et enfin la recherche des salmonella effectué par ensemencement en surface.

La recherche et dénombrement des staphylocoques à coagulase positive

Cette technique a été utilisée en exploitant le milieu gélosé de Baird-Parker, qui consiste d'ensemencer en surface de gélose cité auparavant, de milieu préparé avec une dillution $1/10^{\text{ème}}$. L'incubation de ce dernier a été effectuée pendant 48 h à une température de 37 °C. En fin la recherche des staphylocoques se réalisé par une méthode d'ensemencement en surface.

Ou

Les colonies caractéristiques sont noires ou grises, brillantes et convexes (1 mm à 1,5 mm de diamètre après 24 h d'incubation et 1,5 mm à 2,5 mm de diamètre après 48 h d'incubation) et sont entourées d'une auréole claire qui peut être partiellement opaque. Après au moins 24 h d'incubation, un anneau opalescent peut apparaître dans cette zone claire immédiatement au contact des colonies.

Les colonies non caractéristiques ont la même taille que les colonies caractéristiques et peuvent présenter l'une des morphologies suivantes :

- colonies noires et brillantes avec ou sans bord blanc étroit ; la zone claire et l'anneau opalescent sont absents ou à peine visibles ;
- colonies grises dépourvues de zone claire.

-
Annexe 05

Fiche de l'analyse sensorielle de cake

Date :

Age :

Genre ;

Conformément à la grille d'évaluation ci-jointe, veuillez remplir le tableau suivant :

La qualité	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Aspect						
Couleur de la Crouste						
Couleur de la mie						
Odeur						
Texture						
Sensation						
Le goût						
Classement						

Tableau : la grille d'évaluations

La qualité	Normes d'évaluation	La note
Aspect	✓ Forme soignée, surface plane et absence de rides, d'affaissements et de fissures. ✓ Forme et surface soignées, avec peu de rides d'effondrements ou de fissures. ✓ Forme et surface irrégulières avec rides, effondrements ou fissures évidents.	8-10 5-7 0-4
Couleur	✓ Surface jaune- or, intérieur jaune lait, couleur uniforme et sans taches. ✓ Surface jaune, intérieur jaune clair, couleur uniforme et quelques taches ✓ Couleur inégale et nombreuses taches	8-10 5-7 0-4
Odeur	✓ odorat pur, sans odeur particulière ✓ Un petit odorat, pas d'odeur particulière ✓ Sans odorat, avec une odeur particulière	8-10 5-7 0-4
Texture	✓ Structure alvéolaire élastique et uniforme et taille des pores régulière. ✓ Structure élastique en nid d'abeille avec quelques pores de grande taille ✓ Structure non uniforme en nid d'abeille avec beaucoup de grands trous	8-10 5-7 0-4
Sensation	✓ Doux et non collant ✓ Un peu collant et dur ✓ Dur, sec, collant et rude	8-10 5-7 0-4
Gout sucré	Très sucré Sucré Moyen Faible	8-10 5.5-7.5 3-5 0-2.5

Annexe 07

Gélatinisation de l'amidon de maïs



Résumé

Le lactosérum est un important coproduit de la technologie fromagère qui connaît une augmentation continue suite à l'importante demande des consommateurs en fromage. En Algérie, ce coproduit est rejeté vers les oueds sans traitement préalable, engendrant un impact polluant important avec des perturbations des écosystèmes et une perte d'ingrédient de haute valeur nutritionnelle.

L'objectif de cette thèse rentre dans le cadre de la valorisation du lactosérum par séchage par atomisation afin de récupérer ses constituants sous forme de poudre et de limiter son impact sur l'environnement.

Pour répondre à cet objectif, nous avons étudié en premier lieu, l'effet de la température de l'air d'entrée et le débit d'alimentation sur la qualité de la poudre, et la détermination des conditions optimales du séchage selon un plan d'expérience à deux facteurs. En second lieu, nous avons étudié l'impact de l'ajout des agents de séchage sur la qualité des poudres obtenues. En troisième partie nous avons étudié l'impact de l'incorporation de la poudre obtenue sur la qualité d'un produit de pâtisserie (cake) en substituant la poudre du lait écrémé par la poudre de lactosérum obtenue.

Nous avons constaté que le débit d'alimentation est le seul paramètre ayant une influence significative sur tous les paramètres de la qualité physicochimique, fonctionnelles et de réhydratation de la poudre du lactosérum. La température de l'air d'entrée et le débit d'alimentation optimaux sont 182 °C et 3.2 L/h. L'utilisation des agents de séchage à différentes concentrations avant le séchage a montré que l'utilisation d'une faible quantité de gélatine (0.5 % v/p) améliore le rendement de séchage de 35.12 à 36.25 %. L'utilisation de maltodextrine et de l'amidon de maïs ont provoqué la diminution du rendement de 35.12 à 19.37 et 18.48 % respectivement. L'utilisation de l'amidon de maïs comme agent de séchage à des concentrations supérieures à 2.5 % p/v n'est pas recommandée, car il augmente le risque de gélification de l'amidon au niveau de l'entrée de la tuyauterie de la tour, qui inhibe l'écoulement libre de liquide et par conséquent une réduction de rendement.

La substitution de la poudre du lait écrémé par la poudre de lactosérum, a amélioré le volume spécifique du cake de 2.96 à 3.66 mL/g. La majorité des caractéristiques physiques et organoleptiques du cake révèlent que le cake contenant 20 % de poudre du lactosérum est meilleur que le cake contrôle. L'incorporation partielle ou totale de la poudre du lactosérum n'a pas modifié les propriétés sensorielles des cakes.

Mots clés : valorisation, Séchage par atomisation, lactosérum en poudre, l'optimisation, température de l'air d'entrée, le débit d'alimentation, agents de séchage, substitution, cake.

Abstract

Whey is an important by-product of cheese-making technology, and its use is growing steadily as a result of high consumer demand for cheese. In Algeria, this by-product is discharged into the wadis without prior treatment, creating a major polluting impact, disrupting ecosystems and resulting in the loss of an ingredient of high nutritional value.

The goal of this thesis is to add value to whey by spray-drying in order to recover its constituents in powder form and limit its impact on the environment.

To meet this objective, we first studied the effect of inlet air temperature and feed rate on powder quality, and the determination of optimum drying conditions using a two-factor experimental design. Secondly, we studied the impact of the addition of drying agents on the quality of the powders obtained.

In the third part we studied the impact of incorporating the powder obtained on the quality of a pastry product (cake) by substituting skimmed milk powder.

We found that the feed rate is the only parameter with a significant influence on all the physicochemical, functional and rehydration quality parameters of the whey powder.

The optimum inlet air temperature and feed rate are 182°C and 3.2 L/h. The use of drying agents at different concentrations before drying showed that the use of a small amount of gelatin (0.5% v/p) improves the drying yield from 35.12 to 36.25%. The use of maltodextrin and corn starch caused the yield decrease from 35.12 to 19.37 and 18.48% respectively. The use of corn starch as a drying agent at concentrations greater than 2.5% w/v is not recommended as it increases the risk of starch gelatinization at the entrance to the tower piping, which inhibits the free flow of liquid and consequently a reduction in yield.

The substitution of skimmed milk powder by whey powder improved the specific volume of the cake. The majority of the physical and organoleptic characteristics of the cake show that the cake containing 20% whey powder is better than the control cake. The partial or total incorporation of whey powder did not alter the properties of the cake.

Keywords: Valorization, spray drying, whey powder, optimizations, inlet air temperature, feed rate, drying agents, substitution, cake.

ملخص

يعتبر مصل الحليب منتجاً ثانوي مهماً لتكنولوجيا الجبن والذي يشهد زيادة مستمرة في أعقاب الطلب الاستهلاكي الكبير على الجبن. في الجزائر، يتم توجيه هذا المنتج الي الوديان دون معالجة مسبقة، مما يسبب تأثيراً ملوثاً كبيراً مع اضطراب في النظام البيئي وفقدان المكونات ذات القيمة الغذائية العالية.

الهدف من هذه الأطروحة هو إضافة قيمة إلى مصل الحليب عن طريق التجفيف بالرذاذ من أجل استعادة مكوناته في شكل مسحوق والحد من تأثيره على البيئة.

ومن اجل الوصول الي هذا الهدف قمنا أولاً بدراسة تأثير درجة حرارة الهواء المستعملة للتجفيف والتدفق على جودة المسحوق، وتحديد ظروف التجفيف الأمثل وفق خطة تجربة ذات عاملين. ثانياً قمنا بدراسة تأثير إضافة عوامل التجفيف على جودة المساحيق المتحصل عليها. وفي الجزء الثالث قمنا بدراسة تأثير دمج المسحوق الناتج على جودة منتج من المرطبات (الكيك) وذلك باستبدال مسحوق الحليب منزوع الدسم بمسحوق مصل الحليب الناتج.

لقد وجدنا أن التدفق هو العامل الوحيد الذي له تأثير كبير على جميع عوامل الجودة الفيزيائية والكيميائية والوظيفية وجودة الإماهة لمسحوق مصل اللبن. درجة حرارة الهواء المستعملة للتجفيف والتدفق الأمثلين هي 182 درجة مئوية و 3.2 لتر/ساعة. أظهر استخدام عوامل التجفيف بتركيزات مختلفة قبل التجفيف أن استخدام كمية صغيرة من الجيلاتين (0.5% حجم/وزن) يحسن إنتاجية التجفيف من 35.12 الى 36.52 % . أدى استخدام المالتوديكترين ونشاء الذرة إلى انخفاض في الإنتاج التجفيف من 35.12 الي 19.37 % ومن 35.12 الي 18.48 % على التوالي. لا ينصح باستخدام نشا الذرة كعامل تجفيف بتركيزات أكبر من 2.5% وزن/حجم لأنه يزيد من استرطابية وتكتل المسحوق.

استبدال مسحوق الحليب منزوع الدسم بمسحوق مصل الحليب أدى إلى تحسين الحجم الكتلي للكعكة. غالبية الخصائص الفيزيائية والحسية للكعكة كشفت أن الكعكة التي تحتوي على 20% من مسحوق مصل الحليب أفضل من كعكة التحكم. لم يؤدي الدمج الجزئي أو الكلي لمسحوق مصل اللبن إلى التغيير خصائص الكعكة

الكلمات المفتاحية: التثمين، التجفيف بالرذاذ، مسحوق مصل الحليب، التحسينات، درجة حرارة الهواء الداخل، معدل التدفق، عوامل التجفيف، الاستبدال، الكيك.