

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique

Université de Blida 1

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Sécurité Agroalimentaire et Assurance Qualité

Filière : Sciences Alimentaires

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Thème :

**Effet du mélange amidon modifié et caséinates sur la rhéologie et les caractéristiques
d'une préparation fomagère sans matière grasse**

Réalisé par :

Mlle. OTMANI Nour elhouda

Mlle. BOUDALI Nesrine

Soutenu le 03/07/2025 devant le jury composé de :

Dr. AOUS K. **MCA** **Université de Blida 1** **Président**

Dr. BENLEMMAN S. **MCB** **Université de Blida 1** **Examinateuse**

Dr. REBZANI F. **MCB** **Université de Blida 1** **Promotrice**

Mme .KOUADRI I. **Doctorante** **Université de Blida 1** **Co-promotrice**

Remerciements :

Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à Madame Dr Rebzani Ferayale et Madame Dr Kouadri Ibtissem pour avoir accepté d'encadrer notre travail de fin d'études. Nous leur sommes particulièrement reconnaissants pour leur orientation précieuse, leur rigueur scientifique, leur disponibilité constante ainsi que pour la confiance qu'elles nous ont témoignée tout au long de ce parcours. Leur accompagnement attentif et bienveillant a grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Mme Aous K., présidente du jury, pour l'honneur qu'elle nous a fait en présidant cette soutenance, ainsi que pour ses remarques pertinentes et enrichissantes.

Nous remercions également Mme Benlemmen S., examinatrice, pour le temps qu'elle a consacré à l'évaluation de notre travail et pour ses observations constructives.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants, encadrants et personnels administratifs du département pour leur accompagnement tout au long de notre formation, ainsi que toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier l'entreprise PROMASIDOR et OKIDS pour nous avoir offert l'opportunité d'effectuer notre stage au sein d'un cadre professionnel riche en apprentissages. Nous exprimons toute notre gratitude à l'ensemble de leurs équipes pour leur accueil chaleureux, leur accompagnement constant et leur précieuse collaboration tout au long de notre expérience.

Nous adressons un remerciement particulier au laboratoire du Professeur Hadjsadok pour avoir mis à notre disposition ses équipements, son encadrement scientifique et son environnement de recherche stimulant, qui ont été d'un apport précieux pour la réalisation expérimentale de ce travail.

Enfin, nous tenons à remercier sincèrement toutes les personnes qui ont, de manière directe ou indirecte, apporté leur aide ou leur soutien tout au long de l'élaboration de ce travail.

Dédicace

À mes parents,

Merci pour votre amour inépuisable, votre patience et votre courage. Vous êtes ma lumière dans les moments sombres, ma force quand je doute. Chaque pas que je fais est guidé par votre foi en moi. Je vous aime plus que les mots ne peuvent le dire.

À mes frères,

Merci d'être ma source de joie, de soutien et de complicité. Grandir à vos côtés est l'un des plus beaux cadeaux de la vie.

À mon grand frère,

Tu es parti trop tôt, mais jamais loin de mon cœur. Ton absence me fait mal, mais ton souvenir m'accompagne chaque jour. Je vis et j'avance aussi pour toi. Tu es et resteras mon exemple, mon protecteur, mon étoile. Je ne t'oublierai jamais.

À Inès, Aya, Hanane et Ahlem,

Merci d'être là, dans les rires comme dans les larmes. Votre présence me rassure, votre amitié me réchauffe. Vous êtes mes sœurs choisies par le cœur. Sans vous, le chemin serait bien plus dur.

Et un grand merci à mon binôme,

pour sa collaboration, sa patience et son engagement tout au long de ce travail. Travailler à tes côtés a été un vrai soutien et un plaisir. Merci pour ta présence et ton sérieux.

Et à moi-même, pour ma force, ma persévérance et le chemin parcouru.

Je suis fière de moi.

À vous tous, je dédie ce travail, avec tout mon amour, toute ma reconnaissance, et une pensée éternelle pour mon frère au ciel.

Nour elhouda

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ceux qui ont toujours été là pour moi, avec amour, patience et soutien.

À mes parents,

Vous êtes la source de ma force. Maman, ton amour infini, ton soutien moral et ta tendresse ont été mon refuge dans les moments difficiles. Papa, ta sagesse, ta foi en moi et tes encouragements silencieux m'ont donné la volonté d'aller toujours plus loin. Merci pour vos sacrifices, pour avoir cru en mes capacités même quand moi je doutais. Ce travail est aussi le vôtre.

À ma chère famille,

À mes frères et sœurs, à mes oncles, tantes et cousins, pour votre présence, vos encouragements et vos prières. Vous avez contribué à ma réussite, chacun à votre manière, et je vous en suis profondément reconnaissante.

À mes amis(es) sincères,

Merci pour les moments de réconfort, les fous rires partagés, les mots d'encouragement et surtout votre patience durant les moments de stress. Votre présence a rendu ce parcours plus léger.

À mes enseignants et encadreurs,

Votre encadrement, vos remarques constructives et vos conseils ont été précieux dans la réalisation de ce travail. Merci pour le partage de vos connaissances et votre disponibilité.

À moi-même,

Pour avoir tenu bon malgré la fatigue, les nuits blanches, les doutes et les sacrifices. Cette étape est une victoire personnelle que je savoure avec fierté.

Nesrine

Effet du mélange amidon modifié et caséinates sur la rhéologie et les caractéristiques d'un produit fromager sans matière grasse

Résumé:

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la substitution de la poudre de lait par un mélange fonctionnel lors de la préparation d'un produit fromager , et ce en traçant une double perspective : amélioration technologique du produit et rentabilité économique de la formulation.La présente étude vise à étudier l'effet d'un mélange fonctionnel constitué d'amidon modifié et de caséinates sur un fromage sans matière grasse .Le défait de cette étude est de répondre au questionnement :comment compenser l'absence de matière grasse dans un produit fromager tout en maintenant ses qualités texturales, rhéologiques et physico-chimiques, en utilisant ce mélange fonctionnel ?

Pour ce faire, des formulations expérimentales ont été élaborées en variant les proportions des deux ingrédients fonctionnels principaux : l'amidon modifié et les caséinates. Les échantillons obtenus ont ensuite été analysés afin d'évaluer leurs propriétés rhéologiques (viscosité, fermeté, élasticité), leurs caractéristiques physico-chimiques (teneur en humidité, synerèse, pH), ainsi que leur acceptabilité sensorielle.

À partir des premiers essais, sept formulations ont été retenues pour la fabrication du produit fini. Parmi celles-ci, trois formulations se sont révélées particulièrement réussies, une a été rejetée, tandis que deux autres ont été jugées acceptables.

Le produit fini obtenu a été une réussite. Grâce à la synergie entre le caséinate et l'amidon modifié, nous avons pu développer une sauce fromagère allégée présentant de bonnes propriétés rhéologiques, une texture stable et une acceptabilité sensorielle satisfaisante.

Mots clés : Fromage allégé, Matière grasse, Amidon modifié ,Caséinates, Propriétés rhéologiques .

Effect of Modified Starch and Caseinates Blend on the Rheology and Characteristics of a Fat-Free Cheese Product

Abstract :

This work is part of the substitution of milk powder by a functional mixture during the preparation of a cheese product, and this by tracing a double perspective: technological improvement of the product and economic profitability of the formulation. The present study aims to study the effect of a functional mixture consisting of modified starch and caseinates on a fat-free cheese. The aim of this study is to answer the question: how to compensate for the absence of fat in a cheese product while maintaining its textural, rheological and physicochemical qualities, by using this functional mixture? .

To achieve this, experimental formulations were prepared using different proportions of the two main functional ingredients: modified starch and caseinates. The resulting samples were analyzed to assess their rheological properties (viscosity, firmness, elasticity), their physico-chemical characteristics (moisture content, syneresis, pH), as well as their sensory acceptability.

Based on preliminary trials, seven formulations were selected for the production of the final product. Among them, three formulations were found to be highly successful, one was rejected, and two were considered acceptable.

The final product was a success. Thanks to the combination of caseinate and modified starch, we obtained a reduced-fat cheese sauce with good rheological properties, a stable texture, and satisfactory sensory acceptability.

Keywords: Low-fat cheese, Fat, Modified starch, Caseinates, Rheological properties.

تأثير مزيج النساء المعدل والكازينات على الخصائص الريولوجية والوظيفية لمنتج جبنة خالٍ من المادة الدهنية

الملخص :

هذا العمل جزء من عملية استبدال مسحوق الحليب بخليط وظيفي أثناء تحضير منتج جبن، وذلك من خلال اتباع منظورين: التحسين التكنولوجي للمنتج والربحية الاقتصادية للتركيبة. تهدف هذه الدراسة إلى دراسة تأثير خليط وظيفي يتكون من نشا معدل وكازينات على جبن خالي الدسم. تهدف هذه الدراسة إلى الإجابة على السؤال التالي: كيف يمكن تعويض نقص الدهون في منتج جبن مع الحفاظ على خصائصه التركيبية والريولوجية والفيزيائية والكيميائية باستخدام هذا الخليط الوظيفي؟

من أجل ذلك، تم إعداد تركيبات تجريبية باستخدام نسب مختلفة من المكونين الوظيفيين الرئيسيين: النساء المعدل والكازينات. ثم خضعت العينات المحضررة لتحليلات مختلفة لتقييم خصائصها الريولوجية (اللزوجة، الصلابة، المرونة)، وخصائصها الفيزيائية والكيميائية (نسبة الرطوبة، الظاهرة الانفصالية "السيئنيريز"، ودرجة الحموضة)، بالإضافة إلى تقييم القبول الحسي.

بناءً على النتائج الأولية، تم اختيار سبع تركيبات لتصنيع المنتج النهائي. من بين هذه التركيبات، تم اعتبار ثلاثة منها ناجحة، في حين تم رفض واحدة، وأعتبرت اثنان مقبولة.

وقد كان المنتج النهائي ناجحاً، إذ أدى الجمع بين الكازينات والنساء المعدل إلى الحصول على صلصة جبنية خالية من الدهون تتميز بخواص ريلوجية جيدة، ولمس مستقر، وقبول حسي مرضٍ.

الكلمات المفتاحية: جبن قليل الدسم، دهون، نشا معدل، كازينات، خصائص ريلوجية

Table des matières

Remerciements

Résumé

Liste d'abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

I. Synthèse bibliographique

Chapitre N°01 : Amidon modifié

| | |
|---|---|
| I.1 Définition | 4 |
| I.2 Structure d'amidon modifié | 4 |
| I.3 Modifications de la structure de l'amidon | 4 |
| I.3.1 Modifications physiques de l'amidon..... | 4 |
| I.3.2 Modification enzymatique de l'amidon..... | 4 |
| I.3.3 Modifications chimiques de l'amidon | 4 |
| I.3.4 Modification par estérification..... | 5 |
| I.4 Les modifications de l'amidon, méthodes et applications | 5 |
| I.4.1 Les amidons prégélatinisés | 5 |
| I.4.2 Les amidons hydrolysés | 5 |
| I.4.3 Dextrinisation..... | 5 |
| I.4.4 Les amidons oxydés | 6 |
| I.5 Utilisation d'amidon modifié en tant que substitut de matière grasse..... | 6 |

Chapitre N°02 : Caséinates

| | |
|---------------------------------------|---|
| II.1 Définition de caséinate | 8 |
| II.2 La structure des caséinates..... | 8 |
| II.3 Les types de caséinates | 8 |
| II.3.1 Sodium caséinate | 8 |

| | |
|--|---|
| II.3.2 Calcium caséinate | 9 |
| II.3.3 Ammonium caséinate | 9 |
| II.3.4 Potassium caséinate | 9 |
| II.3.5 Magnesium caséinate..... | 9 |
| II.4 Utilisation de caséinate en tant que substitut de matière grasse | 9 |
| II.5 Rôle de caséinate dans les émulsions et les formulations alimentaires sans matière grasse | 9 |

Chapitre N°03 : Rhéologie des produits alimentaires

| | |
|---|----|
| III.1 Définition | 11 |
| III.2 Importance de la rhéologie dans les produits alimentaires | 11 |
| III.3 Techniques d'analyse rhéologique couramment utilisées | 11 |
| III.3.1 Viscosimétrie..... | 11 |
| III.3.2 Rhéomètre | 12 |
| III.3.3 Pénétrométrie | 12 |
| III.4 Impact de l'amidon et des protéines sur la rhéologie des sauces | 12 |

II. Partie expérimentale

Chapitre N°01 : Matériel et méthode

| | |
|--|----|
| I.1 Définition | 15 |
| I.2 Démarche expérimentale : Préparation et caractérisation de l'amidon modifié et des caséinates..... | 15 |
| I.2.1 Préparation et caractérisation de la matière première | 15 |
| I.2.2 Diagramme de phases | 15 |
| I.2.2.1 Préparation des solutions mères..... | 15 |
| I.2.2.2 Préparation des mélanges amidon-caséinates | 16 |
| I.2.2.3 Incorporation de la mixture..... | 16 |
| I.3 Analyses physico-chimiques..... | 17 |
| I.3.1 Teneur en humidité | 17 |
| a. Définition..... | 17 |
| b. Objectif..... | 17 |
| c. Matériel et équipements | 17 |

| | |
|--|----|
| d. Procédure expérimentale | 18 |
| e. Calcul de la teneur en humidité | 18 |
| I.3.2 Détermination du Ph | 18 |
| a. Définition..... | 18 |
| b. Objectif..... | 18 |
| c. Matériel et réactifs | 18 |
| d. Procédure expérimentale | 20 |
| I.3.3 Solubilité dans l'eau..... | 20 |
| a. Définition..... | 20 |
| b. Objectif..... | 20 |
| c. Matériel..... | 20 |
| d. Procédure expérimentale | 20 |
| e. Observation attendue | 21 |
| I.3.4 Teneur en matières grasses et en protéines | 21 |
| a. Définition..... | 21 |
| b. Objectif..... | 21 |
| c. Matériel..... | 21 |
| d. Procédure expérimentale | 22 |
| I.3.5 Détermination du degré de substitution (DS) | 22 |
| a. Définition..... | 22 |
| b. Objectif..... | 22 |
| c. réactif | 22 |
| d. Matériel | 22 |
| e. Procédure expérimentale | 23 |
| I.4 Analyse microbiologique | 24 |
| I.4.1 Dénombrement et confirmation des bactéries aérobies mésophiles | 24 |
| I.4.1.1 Matériel nécessaire..... | 24 |
| I.4.1.2 Méthode | 24 |
| I.4.1.3 Caractéristiques des colonies | 24 |
| I.4.1.4 Calcul des résultats | 25 |

| | |
|--|----|
| I.4.1.5 Interprétation des résultats | 25 |
| I.4.2 Dénombrement des coliformes totaux et fécaux..... | 25 |
| I.4.2.1 Matériel nécessaire..... | 25 |
| I.4.2.2 Méthode | 25 |
| I.4.2.4 Dénombrement | 26 |
| I.4.3 Dénombrement et confirmation des colonies d'Escherichia coli | 26 |
| I.4.3.1 Matériel nécessaire..... | 26 |
| I.4.3.2 Méthode | 27 |
| I.4.3.3 Caractéristiques des colonies | 27 |
| I.4.4 Dénombrement et confirmation des Staphylococcus aureus | 27 |
| I.4.4.1 Matériel nécessaire..... | 27 |
| I.4.4.2 Méthode | 27 |
| I.4.4.3 Caractéristiques des colonies | 28 |
| I.4.4.4 Calculs..... | 28 |
| I.4.5 Recherche des Salmonella spp..... | 28 |
| I.4.5.1 Matériel nécessaire..... | 28 |
| I.4.5.2 Méthode | 29 |
| I.4.5.3 Lecture des résultats..... | 29 |
| I.4.6 Dénombrement et confirmation des spores de levures et moisissures..... | 30 |
| I.4.6.1 Matériel nécessaire..... | 30 |
| I.4.6.2 Méthode | 30 |
| I.5 Produit fini | 31 |
| I.5.1 Formulations expérimentales | 32 |
| I.5.2 Méthode de préparation des échantillons | 33 |
| I.5.2.1 Pesée des ingrédients | 33 |
| I.5.2.2 Préparation de la phase liquide | 33 |
| I.5.2.3 Incorporation des agents fonctionnels | 33 |
| I.5.2.4 Ajout des additifs | 33 |
| I.5.2.5 Ajustement du Ph | 33 |
| I.5.2.6 Homogénéisation finale | 33 |

| | |
|---|----|
| I.5.2.7 Conditionnement..... | 34 |
| I.6 Analyse physicochimiques du produit fini | 35 |
| I.6.1 Objectif globale des analyses physico- chimique | 35 |
| I.6.1.1 Extrait sac total | 35 |
| I.6.1.2 Détermination de pH..... | 35 |
| I.6.1.3 Teneur en humidité | 36 |

Chapitre N°02 : Résultat et discussion

| | |
|---|----|
| II.1 Interprétation des résultats d'amidon modifie | 39 |
| II.1.1 Interprétation du pH de l'amidon modifié | 39 |
| II.1.2 Interprétation de taux d'humidité d'amidon modifiée..... | 39 |
| II.1.3 Interprétation de solubilité d'eau d'amidon modifié | 39 |
| II.1.4 Interprétation de degré de substitution d'amidon modifié | 40 |
| II.2 Interprétation des résultats du Caséinate | 41 |
| II.2.1 Interprétation du pH de caséinate | 41 |
| II.2.2 Interprétation de taux d'humidité de caséinate | 41 |
| II.2.3 Interprétation de taux de protéines de caséinate | 41 |
| II.3 Les résultats | 42 |
| II.3.1 Germes aérobies totaux | 43 |
| II.3.2 Coliformes totaux | 43 |
| II.3.3 Coliformes fécaux..... | 44 |
| II.3.4 Escherichia coli | 44 |
| II.3.5 Salmonella spp..... | 46 |
| II.3.6 Levures et moisissures..... | 46 |
| II.3.7 Staphylococcus aureus..... | 47 |
| II.4 Résultats et Interprétation du produit fini..... | 47 |
| II.4.1 Interprétation premier essai | 47 |
| II.4.2 Interprétation deuxième essai | 48 |
| II.4.3 Évaluation sensorielle..... | 52 |
| II.4.4 Résultat de la rhéologie du produit fini | 54 |
| II.4.5 Interprétation des résultats physicochimiques du produit fini..... | 55 |

Conclusion..... 61

Références bibliographiques

Annexe 01

Annexe 02

LISTE DES ABREIVATIONS

Ag NO₃ : Nitrate d'argent

Aw : Activité d'eau

Cu²⁺ : Ions cuivre

=CO : Groupe carbonyle

-COOH : Groupe carboxyle

Fe³⁺ : Ions fer

H Cl-isopropanol : Solution acide dans un solvant organique

Hektoen : Milieu de culture sélectif et différentiel, conçu principalement pour l'isolement et l'identification de Salmonella et Shigella. (Hektoen Enteric Agar)

H₃O⁺ : Ions oxonium

ISO : Organisation nationale de normalisation.

Mg²⁺:Ions magnésium

MKTTn: Müller-Kauffmann Tetrathionate broth with Novobiocin.

mol/L : Concentration molaire/ molarité

N/m² :unité de pression dans le système international

NaOCl : Hypochlorite de sodium

Na OH : Hydroxyde de sodium

PCA : Milieux sélectif pour les bactéries aérobies mésophiles (Plate Count Agar)

pH : Potentiel hydrogène

RVS : Milieu de culture sélectif liquide des Salmonella spp (Rappaport-Vassiliadis soya).

VRBL : Milieux sélectif pour les coliformes (Violet Red Bile Lactose Agar)

XLD : Milieu de culture sélectif et différentiel utilisé principalement pour l'isolement et l'identification de Salmonella spp. Et Shigella spp. (Xylose Lysine Désoxycholate Agar)

LISTES DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 01 : Dessiccateur | 17 |
| Figure 02 : pH-mètre | 19 |
| Figure 03 : Tampons de calibration (pH 4 et 7)..... | 19 |
| Figure 04 : Balance analytique..... | 19 |
| Figure 05 : Appareil FOSS | 21 |
| Figure06 : Thermomix..... | 34 |
| Figure 07 : Résultats de degré de substitution | 41 |
| Figure 08 : Résultats de germe aérobie dans amidon modifié..... | 43 |
| Figure 09 : Résultats de germe aérobie dans Caséinate..... | 43 |
| Figure 10 : Résultats des coliformes totaux dans amidon modifié | 44 |
| Figure 11 : Résultats des coliformes fécaux dans amidon modifié | 44 |
| Figure 12 : Résultats des coliforme fécaux dans Caséinate | 45 |
| Figure 13: Résultats d'Escherichiacoli dans amidon modifié..... | 45 |
| Figure 14 : Résultats d'Escherichiacoli dans Caséinate..... | 46 |
| Figure 15 : Résultats des Salmonella spp dans Caséinate et amidon modifie..... | 46 |
| Figure 16 : Résultats des Staphylococcus aureus dans Caséinate et amidon modifie..... | 47 |
| Figure 17 : Essai 1 du produit fini | 48 |
| Figure 18 : Essai 2 du produit fini | 49 |
| Figure 19 : Essai 3 du produit fini | 49 |
| Figure 20 : Essai 4 du produit fini | 50 |
| Figure 21 : Essai 5 du produit fini | 50 |
| Figure 22 : Essai 6 du produit fini | 51 |
| Figure 23 : Essai 7 du produit fini | 51 |
| Figure 24 : courbe d'écoulement | 54 |
| Figure 25 : Résultat de l'extrait sec total des 7 essais | 56 |
| Figure 26 : Résultat du Ph des 7 essais | 57 |
| Figure 27 : Résultat de l'humidité des 7 essais..... | 58 |

LISTES DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 01 : : présente la composition de base utilisée pour les essais | 16 |
| Tableau 01 : : Essai 1 de la formulation finale de chaque échantillon (en g)..... | 32 |
| Tableau 02 : :Essai 2 de la formulation finale de chaque échantillon (en g)..... | 33 |
| Tableau 03 : Résultats d'analyse physico-chimique de l'amidon modifié..... | 39 |
| Tableau 04: Résultats de degré de substitution..... | 40 |
| Tableau 05 : Résultats d'analyse physico-chimique de caséinate..... | 41 |
| Tableau 06 : Représenté l'ensemble des résultats des analyses microbiologiques effectuées sur l'amidon modifié et caséinates..... | 42 |
| Tableau 07 : Résultat des analyses sensoriels des 7 essais..... | 52 |
| Tableau 08 : Résultat de l'extrait sec total des 7 essais | 55 |
| Tableau 09 : Résultat du pH des 7 essais | 56 |
| Tableau 10 : Résultat d'humidité des 7 essais | 57 |

INTRODUCTION

Introduction

L'évolution des habitudes alimentaires au cours des dernières décennies s'est traduite par une demande croissante pour des produits plus sains, notamment à faible teneur en matières grasses. Cette dynamique découle d'une prise de conscience des effets d'une consommation excessive de lipides, en lien avec l'augmentation des pathologies métaboliques telles que l'obésité, les maladies cardiovasculaires ou le diabète. Ce contexte impose à l'industrie agroalimentaire un défi majeur : développer des produits allégés en matières grasses sans compromettre leurs qualités sensorielles et fonctionnelles. Parmi les produits particulièrement touchés par cette problématique figurent les fromages, produits laitiers très prisés, dont la texture, le goût et la sensation en bouche dépendent largement de la teneur en lipides (Dudez P. et al., 2017).

En effet, les matières grasses jouent un rôle fondamental dans la structure, la saveur, la rétention d'eau et la texture des fromages. La réduction de la teneur en matières grasses dans les fromages entraîne souvent des altérations notables de leurs propriétés sensorielles, de leur stabilité et de leur comportement technologique. Pour limiter ces effets, l'utilisation d'ingrédients fonctionnels tels que les caséinates et les amidons modifiés est explorée.

Cependant, il est important de noter que ces composants ne remplacent pas les lipides sur le plan organoleptique, mais peuvent contribuer à restaurer certaines propriétés physiques et structurales du produit. Les amidons modifiés, obtenus par traitement physique, chimique ou enzymatique de l'amidon natif, sont utilisés pour leurs propriétés technofonctionnelles : épaississement, stabilisation thermique, capacité de rétention d'eau. Leur incorporation dans des matrices allégées vise principalement à mieux structurer la phase aqueuse et améliorer la consistance du produit (Cecil J.E., 1993), sans pour autant imiter la phase grasse.

D'un autre côté, les caséinates, dérivés des protéines du lait, sont reconnus pour leur solubilité, leur pouvoir émulsifiant, leur capacité à former des gels, ainsi que leur contribution à la cohésion des matrices protéiques (Zayas J.F., 2012). Leur interaction avec les amidons peut influencer la texture finale du fromage allégé.

L'objectif de ce travail est donc d'explorer l'impact technologique de ces ingrédients fonctionnels sur les propriétés rhéologiques d'un fromage modèle, en vue de formuler un produit allégé stable et acceptable sur le plan sensoriel. Le travail s'articule en deux grandes parties. Le travail s'articule en deux grandes parties. La première partie est une revue bibliographique structurée en trois chapitres : le premier porte sur les amidons modifiés, le deuxième traite des caséinates, et le troisième s'intéresse à la rhéologie des produits alimentaires. La seconde partie est consacrée à la démarche expérimentale adoptée ainsi qu'à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus.

I. Synthèse Bibliographique

Chapitre I

Amidon modifié

I. Amidon modifié

I.1 Définition

Les amidons modifiés sont des amidons comportant un très petit nombre de groupes de substitution. L'amidon modifié est un amidon qui a été modifié chimiquement, physiquement ou enzymatiquement, afin de modifier ses propriétés fonctionnelles. Les amidons modifiés sont largement utilisés dans les industries alimentaires et pharmaceutiques. (**Abbas et al., 2010**).

Les amidons modifiés sont fabriqués à partir de l'amidon provenant de céréales et de légumes (blé, maïs, pommes de terre ...). Par la suite, ces amidons ont été transformés afin d'acquérir des caractéristiques particulières, comme la capacité d'apporter de la texture et de la structure aux aliments auxquels ils sont ajoutés. (**Stephen , 1995**)

I.2 Structure d'amidon modifié

L'amidon modifié est une forme transformée de l'amidon natif dont la structure a été altérée par des modifications physiques, chimiques ou enzymatiques afin d'améliorer ses propriétés fonctionnelles. L'amidon naturel est constitué de deux polymères de glucose : l'amylose, qui a une structure linéaire avec des liaisons α (1→4), et l'amylopectine, qui est une molécule ramifiée avec des liaisons α (1→4) et des ramifications α (1→6). Lors de la modification, ces structures peuvent être modifiées pour améliorer la solubilité, la viscosité, la résistance thermique ou la stabilité aux variations de pH.

I.3.1 Modifications de la structure de l'amidon

I.3.2 Modifications physiques de l'amidon

Modifient la disposition des granules d'amidon sans dénaturer les liaisons chimiques, par exemple la gélatinisation, l'extrusion ou la pré-gélatinisation, ce qui entraîne une modification de la solubilité et de la texture. (**Sahore A, 2011**)

I.3.3 Modification enzymatique de l'amidon

Employent des enzymes (telles que les amylases, isoamylases et transglucosidases) pour fragmenter ou réorganiser les chaînes glucidiques, ce qui altère la digestibilité et la fonctionnalité de l'amidon. (**Rousselle, et al, 1996**)

I.3.4 Modifications chimiques de l'amidon

Il s'agit d'une combinaison de réactions sélectives ou non qui provoquent une modification de la structure chimique de certaines unités glucosyl des macromolécules d'amidon et de ses dérivés d'hydrolyse. Elles portent sur les fonctions alcooliques primaires et secondaires des unités de glucose (oxydation, estérification, éthérification), la liaison glycosidique et la fonction pseudoaldéhydique (hydrogénéation). (**Sahore , 2011**)

I.3.4. Modification par estérification

L'amidon est éthéré par substitution nucléophile des groupes hydroxyles des unités monomériques de déshydroglucose par des liaisons éther (St-OR). L'amidon peut être divisé en quatre catégories principales : les éthers non ioniques (appelés aussi alkyles), anioniques, cationiques et amphotères. Le Na OH est souvent utilisé comme catalyseur alcalin pour l'initiation de ces réactions chimiques. En déprotonant les groupes hydroxyles aux positions C2, C3 et C6 de l'amidon, ce processus génère des sites nucléophiles (St-O-). Les principales réactions d'étherification sont l'hydroxypropylation, la carboxyméthylation et l'hydroxyéthylation. En outre, d'autres alternatives font appel à des substances telles que l'acide myristique ou l'acrylamide. (**Sharanagat, et al, 2023**)

I.4. Les modifications de l'amidon, méthodes et applications

Par modification, il est possible d'améliorer et de personnaliser les caractéristiques des amidons en fonction des exigences industrielles particulières. Les changements sont répartis en quatre catégories majeures

II.3.1 Les amidons prégélatinisés

Les amidons prégélatinisés font partie de la catégorie des changements physiques. Ces produits, dits instantanés et préparés à froid, nécessitent une viscosité qui se forme sans nécessité de cuisson. On les obtient grâce à un traitement thermique du lait d'amidon, suivi de séchage et de mouture. Le séchage et le traitement thermique peuvent être effectués par un séchage sur tambour, une cuisson-extrusion ou une atomisation. Ce procédé entraîne la perte de la structure granulaire de l'amidon. Tous les amidons, qu'ils soient natifs ou modifiés, peuvent être prégélatinisés et conservent certaines des caractéristiques des amidons originaux. Les conditions de prégélatinisation, en particulier la dimension des particules suite au mouture, peuvent réguler la texture des produits reconstitués.

II.3.2 Les amidons hydrolysés

On procède au traitement chimique ou enzymatique de ces amidons afin de diminuer la dimension des polymères. Ainsi, leur viscosité est diminuée et la solubilité augmentée. On peut utiliser ce genre d'amidon modifié à des concentrations importantes.

Le DE ou équivalent dextrose est utilisé pour mesurer le degré de l'hydrolyse. Le DE évalue la quantité de sucres réducteurs, traduits en dextrose (glucose), pour 100 g d'échantillon sec. La dextrinisation, l'hydrolyse acide ou enzymatique et l'oxydation sont des procédés fréquemment utilisés pour la fabrication d'amidons hydrolysés.

II.3.3 Dextrinisation

Même si le mot « dextrine » est couramment employé pour toutes les dégradations de l'amidon par processus chimique ou enzymatique, il est généralement utilisé uniquement pour ceux issus de la pyroconversion de l'amidon. Il est indéniable que les dextrines sont les premiers amidons modifiés de l'histoire, car leur découverte accidentelle date de 1821 suite au feu d'un entrepôt contenant de l'amidon.

L'amidon acidifié est soumis à un traitement thermique à sec pour la pyroconversion. On acidifie l'amidon en le pulvérisant avec de l'acide chlorhydrique, puis on le séche au-dessous de 12% d'humidité pour les dextrines blanches et 5% pour les dextrines jaunes. La dextrinisation est ensuite effectuée dans un réacteur ou un lit fluidisé à 100-200°C pour une durée de 3-24 heures, en fonction du type de dérivé souhaité. Quand la réaction est terminée. On refroidit le produit avant de le réhumidifier à une humidité de 10%. Durant le processus de dextrinisation, les liaisons 0-1,4 se rompent avant d'être condensées et polymérisées, ce qui conduit à la création de nouvelles liaisons chimiques (α -1,5, α -1,2 ou α -1,3). En fonction des conditions du processus (humidité, température, temps), l'hydrolyse et/ou la polymérisation sont privilégiées. La polymérisation des dextrines blanches est faible, tandis que celle des dextrines jaunes est plus prononcée.

II.3.4 Les amidons oxydés

Cette méthode, qui compte ses premiers brevets au début du 19e siècle, joue un rôle significatif dans les méthodes de transformation. L'utilisation industrielle de l'hypochlorite de sodium (Na O Cl) reste la plus répandue, mais d'autres agents d'oxydation comme les permanganates ou les peroxydes peuvent aussi être employés. L'oxydation est réalisée sur un lait d'amidon, tout comme pour le traitement acide. La réaction est exothermique et il faut maintenir la température entre 30 et 35 °C en régulant l'ajout de l'agent oxydant. La concentration en agent oxydant, le pH (8-10) et la température influencent le degré de réaction. Une fois traités, les amidons subissent un filtrage, un lavage et un séchage.

L'oxydation des groupements hydroxyles est la principale conséquence de cette réaction, suivie par une rupture des liaisons carbone-carbone dans les cycles d'anhydropyranose. Ainsi, une dépolymérisation se produit et entraîne la création de groupements carboxyles (-COOH)

et carbonyles (=CO). L'encombrement spatial de ces groupements restreint la propension à la rétrogradation. Ainsi, les amidons oxydés produisent des gels moins solides que ceux traités par acide. La viscosité des amidons oxydés diminue lorsque la température de gélatinisation diminue, créant ainsi des gels translucides. (**Bauer, et al ,2010**).

I.5. Utilisation d'amidon modifié en tant que substitut de matière grasse

L'amidon modifié est de plus en plus utilisé comme substitut des matières grasses dans l'industrie agroalimentaire en raison de ses propriétés fonctionnelles et économiques. Il permet d'imiter la texture et l'onctuosité des lipides en formant des gels et en améliorant la viscosité, la stabilité et la rétention d'eau des produits. Son utilisation s'étend à divers secteurs, notamment les produits laitiers (yaourts allégés, crèmes glacées, fromages fondus, les sauces fromagères), la boulangerie (pains, gâteaux et biscuits à faible teneur en matières grasses), les produits carnés (saucisses, nuggets et steaks hachés allégés), ainsi que les sauces et émulsions (mayonnaises et vinaigrettes allégées). Il est également utilisé dans les confiseries et desserts pour remplacer partiellement les matières grasses dans les garnitures et crèmes pâtissières. (**Sindic M, 2009**)

Chapitre II

Caséinates

II.3.5 Caséinates

II.1 Définition de caséinate : Le caséinate est un dérivé de la caséine, une protéine principale du lait. Il est obtenu par neutralisation de la caséine acide avec des bases, sont solubilisées partiellement ou totalement selon la nature de la base, généralement du calcium (caséinate de calcium) ou du sodium (caséinate de sodium). (**El-Bakry, Mehta. 2024**).

II.2 La structure des caséinates

Les caséinates s'organisent en micelles très petites (environ 20 nm de diamètre), stabilisées par des interactions hydrophobes. Ces micelles se réarrangent rapidement aux interfaces, ce qui réduit la tension interfaciale et facilite la création d'une surface interphasique.

Les caséinates sont principalement composés de quatre types de caséines : α_1 , α_2 , β et κ dans une proportion de 4:1:4:1 cette composition leur confère des propriétés spécifiques liées à la solubilité, à l'émulsification et à la formation de gels. (**Thomas et al, 2008**).

La structure repose sur celle de la caséine, mais modifiée par l'association avec des cations tels que le calcium, le sodium ou le potassium ce qui influence la stabilité et les propriétés fonctionnelles des caséinates. Puis, la neutralisation des caséinates se réalise à l'aide d'agents alcalins comme la potasse, la soude ou l'ammoniaque. Pour ce faire, la caséine acide, qu'elle soit humide ou séchée, est mélangée à de l'eau à une température de 40 °C afin d'obtenir une concentration solide de 25 % (p/v). Cependant, l'utilisation de caséine acide sèche est moins recommandée, car elle peut produire des caséinates au goût altéré et entraîner des coûts élevés en raison des deux étapes de séchage nécessaires .

La méthode alcaline consiste à ajouter une solution de Na OH (2,5 mol/L) à la suspension de caséine acide, ajustant le pH entre 6,6 et 6,8. Ensuite, le mélange épaisse est chauffé jusqu'à 75 °C dans un système multi-cuves tout en étant vigoureusement agiter. Par la suite, le produit est séché grâce à des sécheurs par atomisation. (**Collectif, 2018**)

Les caséinates présentent une absence de structures secondaires et tertiaires bien définies, ce qui les rend relativement résistants à la dénaturation et à l'agrégation, contrairement à d'autres protéines. Cette stabilité est un atout important dans l'industrie alimentaire, où les produits doivent souvent résister à des traitements thermiques. (**El-Bakry, Mehta. 2024**).

Les caséinates se distinguent par leurs excellentes propriétés technofonctionnelles, qui découlent de leur capacité d'hydratation, de leur caractère amphiphile conférant un pouvoir émulsifiant, et de leur aptitude à chélater divers cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , etc.). Ces caractéristiques leur confèrent un rôle clé en tant qu'agents texturants et antioxydants. En raison de leur structure stable, les caséinates sont particulièrement résistants aux traitements thermiques, ce qui est un avantage pour leur utilisation dans des applications alimentaires nécessitant une exposition à des températures élevées.(12)(**Romain J et al ,2008**).

Les types de caséinates

Il existe plusieurs types de caséinates, différenciés par le type de sel utilisé pour les produire. Voici les principaux

- Sodium caséinate
- Ammonium caséinate
- Potassium caséinate
- Magnesium caséinate (**El-Bakry, Mehta. 2024**).

II.4. Utilisation de caséinate en tant que substitut de matière grasse

Les caséinates sont utilisés comme ingrédient précieux pour de nombreuses applications alimentaires différentes, notamment les produits laitiers tels que la crème glacée, les boissons, les boissons protéinées, les produits de boulangerie, les produits à base de viande hachée et les applications cinématographiques. L'industrie du papier couché (impression de luxe), de la colle (contreplaqué, carton), de la peinture et du ciment (accélération du durcissement) emploie une quantité importante de caséine. Enfin, la fabrication de la laine artificielle a suscité des espoirs, vite contrariés par l'apparition des textiles de synthèse.(**Romain J et al ,2008**).

II.5. Rôle de caséinate dans les émulsions et les formulations alimentaires sans matière grasse

Plus de la moitié des dérivés de caséines sont employés dans la fabrication de fromages d'imitation aux États-Unis. Pour cette utilisation, il est préférable d'utiliser de la caséine présure, mais les sodiums et le calcium conviennent également. Les caséines sont émulsionnées par le chauffage en présence de chélateurs de calcium solubilisés, ce qui permet d'émulsionner le gras végétal ajouté à la préparation. Ces articles présentent une texture et des caractéristiques de fonte similaires à celles du fromage. Cependant, les imperfections gustatives sont courantes.

Ainsi, les caséines sont seulement ajoutées en faible quantité dans les éléments transformés. On utilise la capacité de rétention d'eau exceptionnelle du caséinate de sodium dans les laits fermentés. En ajoutant du lait à faible concentration, il renforce et améliore la texture des yogourts et diminue la synérèse. On utilise également les caséinates de sodium pour émulsionner les graisses végétales afin de fabriquer des blanchisseurs à café. La caséine assure une dispersion homogène, sans flocculation, dans le café grâce à sa stabilité thermique. Les caséinates jouent un rôle essentiel dans la dispersion du gras et les propriétés de foisonnement dans les garnitures à dessert, qu'elles soient liquides ou déshydratées. Le caséinate de sodium joue un rôle crucial dans l'élaboration des crèmes liqueur. En présence d'alcool dans ces produits (environ 15 %), la stabilité de l'émulsion est compromise par la caséinate en concentration supérieure à 3% et les chélateurs de calcium (citrate trisodique). (**Collectif, 2018**)

Chapitre III

**Rhéologie des produits
alimentaires**

III . Rhéologie des produits alimentaires

III.1 Définition

La rhéologie est définie comme « la science qui étudie l'écoulement et la déformation de la matière ». Elle offre une gamme de techniques pour décrire de manière précise les caractéristiques de ces matériaux, qu'ils soient sous forme liquide, solide, pâteuse, etc. Elle nous fournit des instruments et des techniques que nous devons utiliser de la façon la plus adéquate pour obtenir des renseignements pertinents sur les caractéristiques des systèmes alimentaires. (**Guichard ,2012**).

III.2 Importance de la rhéologie dans les produits alimentaires

L'importance de la rhéologie dans les produits alimentaires réside dans son rôle clé pour la conception, la transformation, la qualité et la consommation des aliments. Voici les principaux aspects où elle est cruciale

- Expertise dans l'analyse des produits basée sur les relations structure-propriétés (assurance qualité, modification des propriétés d'un produit vers celles d'un produit « cible », mise en lumière des relations fonctionnelles entre composition, méthode de traitement... et propriétés rhéologiques).
- Calcul de diverses opérations techniques (dimensionnement des tuyaux, sélection des échangeurs thermiques, détermination de la puissance des pompes, ajustement des mélangeurs).
- Examen et supervision de divers processus (modifications de phase, transformations thermomécaniques, phénomènes de gélification).
- Évaluation de la valeur industrielle des constituants et ingrédients (agents épaississants, agents gélifiants, capacité à produire de la mousse, agents émulsifiants...).
- Évaluation instrumentale de la texture. Toutefois, étant donné que les contraintes et déformations sont appliquées de façons très variées lors de la mastication comparativement aux simples déformations utilisées pour la caractérisation rhéologique. (**Guichard ,2012**).

III.3. Techniques d'analyse rhéologique couramment utilisées

Les techniques d'analyse rhéologique permettent d'évaluer les propriétés mécaniques des produits alimentaires, notamment leur viscosité, élasticité, plasticité et comportement à l'écoulement. Voici les principales méthodes utilisées

II.3.1 Viscosimétrie

Toute mesure de viscosité repose sur l'exercice d'un mouvement de cisaillement. Il s'agit toujours de déterminer les relations entre deux mesures : la vitesse de cisaillement (y), et la contrainte de cisaillement (t), qui se réfère à la force de friction appliquée aux couches par unité de surface. La vitesse de cisaillement possède les unités de l'inverse d'une durée (s^{-1}), tandis que la contrainte de cisaillement se mesure en N/m² (ou pascals). La viscosimétrie est basée sur ce genre de cisaillement. Dans les flux laminaires à travers les tuyaux (écoulement de Poiseuille ou cisaillement télescopique), cette déformation est appliquée presque de manière implicite, et constitue donc le fondement du viscosimètre capillaire. En réalité, la majorité des viscosimètres disponibles sur le marché sont de type rotatif : ils possèdent des symétries axiales cylindriques, cône-plateau ou plateaux parallèles.

I. Rhéomètre

Dans ces rhéomètres, le matériau examiné est exposé à un mouvement de cisaillement laminaire constant : les couches distinctes se déplacent sans que la vitesse et la contrainte de cisaillement ne changent au fil du temps. Par conséquent, l'emploi de ces rhéomètres est limité à l'examen des seules substances qui présentent un comportement

Liquide et qui, de ce fait, peuvent suivre un processus d'écoulement continu. Le but expérimental visé étant la détermination de leur rhéogramme. Dans cette catégorie, nous identifierons principalement deux sortes de rhéomètres.

- Les rhéomètres de type Couette où le matériau analysé est soumis à un cisaillement entre deux surfaces solides, l'une fixe et l'autre en mouvement.
- Les rhéomètres de type Poiseuille, qui génèrent un mouvement de cisaillement en appliquant une différence de pression aux extrémités d'un tube cylindrique contenant l'échantillon, ou par l'effet de la gravité.

III.3.3 Pénétrométrie

Ce type d'expérience est fréquemment mené plus que les précédents. Cela est dû à la possibilité d'adopter des approches très variées en fonction des propriétés du matériau à caractériser. Par exemple, si le matériau est un gel léger qui est assez mou et qui se déforme sous son propre poids (comme le fromage fondu), il peut être déposé dans un moule. Les équipements utilisés comprendront des disques ou des cônes de géométries sélectionnées selon le matériau examiné. Les paramètres considérés comme des indicateurs de la structure du système sont généralement la contrainte et la déformation à la rupture, et ils peuvent également servir d'indicateurs de la texture du système. (**Guy, et al ,2014**)

III.4. Impact de l'amidon et des protéines sur la rhéologie des sauces

L'amidon joue un rôle essentiel dans la rhéologie des sauces en agissant comme agent épaississant principal, influençant la viscosité et la texture du système. Sous forme réticulée, il confère aux sauces un comportement rhéofluidifiant, c'est-à-dire une diminution de la viscosité sous l'effet du cisaillement, ainsi qu'une thixotropie, caractérisée par une réduction temporaire de la viscosité sous contrainte. De plus, un seuil d'écoulement doit être atteint pour initier le mouvement du fluide. Les protéines du lait, bien que présentes en moindre quantité, modulent ces propriétés en stabilisant le réseau formé avec l'amidon. Elles influencent également la consistance, la résistance à l'écoulement et la perception sensorielle en bouche en apportant de l'onctuosité. L'interaction entre ces composants détermine ainsi les propriétés rhéologiques finales des sauces, impactant leur stabilité, leur comportement sous agitation et leur texture perçue. (**Guichard ,2012**).

I. Partie expérimentale

Chapitre I

Matériel et méthodes

I.1 Objectif

Ce travail de fin d'étude a pour objectif global d'évaluer l'effet d'un mélange fonctionnel de Caséinate et d'amidon modifié sur les propriétés physico-chimiques, texturales et rhéologiques d'un produit fromager formulé sans matière grasse , le type élaboré ; sauce fromagère . En réponse à la demande croissante de produits allégés et sains, cette étude vise à compenser l'absence de lipides, qui jouent un rôle essentiel dans la texture et la stabilité des produits laitiers, par l'ajout d'ingrédients fonctionnels capables de restaurer la structure et la qualité technologique du produit.

I.2 Démarche expérimentale

Plusieurs formulations ont été élaborées à base de différentes proportions de Caséinate et d'amidon modifié. Les produits obtenus ont été soumis à des analyses physico-chimiques (pH, humidité, teneur en protéines), à des tests de texture et de rhéologie (fermeté, élasticité, viscosité), ainsi qu'à une comparaison avec un produit témoin. L'objectif est d'identifier la combinaison optimale permettant d'obtenir un produit stable, agréable en bouche et techniquement viable. Par ailleurs, cette démarche s'inscrit dans une logique économique, en explorant la possibilité de remplacer les matières grasses par des ingrédients moins coûteux, tout en garantissant une qualité finale acceptable, ce qui représente un avantage stratégique pour l'industrie agroalimentaire. Pour ce faire, Nous avons adopté les etapes suivantes

I.2.1 Préparation et caractérisation de la matière première

La matière première objet de notre étude est l'amidon modifié et des caséinates a été caractérisée par des analyses physico-chimique.

I.2.2 Digramme de phases

I.2.2.1. Préparation des solutions mères

Deux solutions mères ont été préparées selon un protocole rigoureux afin d'assurer leur homogénéité et leur stabilité

a. **Solution d'amidon modifié (2 %)**

Une masse exacte d'amidon a été pesée et progressivement dissoute dans 250 ml d'eau distillée sous agitation continue. La solution a été maintenue sous agitation jusqu'à dissolution complète, puis laissée au repos pendant 24 heures afin d'optimiser l'hydratation des polymères d'amidon.

b. Solution de caséinates (6 %)

La quantité nécessaire de caséinates a été ajoutée à 200 ml d'eau distillée et soumise à une agitation constante jusqu'à l'obtention d'une solution homogène. Après 24 heures de repos, la solution a été centrifugée afin d'éliminer les particules non dissoutes.

Afin d'éviter la contamination microbienne et garantir la stabilité des solutions, une quantité appropriée d'ozidur de sodium a été ajoutée comme agent antimicrobien dans les 2 solution.

I.2.2.2. Préparation des mélanges amidon-caséinates

Parmi les 46 échantillons préparés au cours de la phase expérimentale, sept formulations ont été sélectionnées afin de constituer les essais finaux destinés à l'élaboration du produit fini.

Ces formulations ont été choisies sur la base de leur comportement technologique, leur stabilité et leur texture. Chaque formulation contient un mélange fonctionnel (caséinate + amidon modifié) à une dose fixe de 10 g, tandis que les autres ingrédients sont maintenus constants.

Le choix des concentrations utilisées dans cette étude a été réalisé par tâtonnement, dans le but de couvrir un large éventail d'échantillons et d'optimiser les conditions expérimentales. Ce choix s'appuie sur l'expérience acquise au cours des travaux préliminaires, permettant d'identifier les concentrations les plus adaptées aux objectifs de la recherche.

❖ Le tableau ci-dessous présente la composition de base utilisée pour chacun des essais.

| numero de melange | OSA ml/10ml | NaCn ml/10ml | Eau ml/10ml |
|-------------------|-------------|--------------|-------------|
| 1 | 1 | 9 | 0 |
| 2 | 1 | 8.33 | 0.67 |
| 3 | 1 | 7.5 | 1.5 |
| 4 | 1 | 6.67 | 2.33 |
| 5 | 1 | 5.83 | 3.17 |
| 6 | 1 | 5 | 4 |
| 7 | 1 | 4.17 | 4.83 |
| 8 | 1 | 3.33 | 5.67 |
| 9 | 1 | 2.5 | 6.5 |

| | | | |
|----|---|------|------|
| 10 | 1 | 1.67 | 7.33 |
| 14 | 2 | 3 | 5 |
| 15 | 2 | 1.33 | 6.67 |
| 16 | 3 | 7 | 0 |
| 17 | 3 | 5.33 | 1.67 |
| 18 | 3 | 3.67 | 3.33 |
| 19 | 3 | 2 | 5 |
| 20 | 3 | 0.33 | 6.67 |
| 21 | 4 | 6 | 0 |
| 22 | 4 | 4.33 | 1.67 |
| 23 | 4 | 2.67 | 3.33 |
| 24 | 4 | 1 | 5 |
| 25 | 5 | 5 | 0 |
| 26 | 5 | 4.17 | 0.83 |
| 27 | 5 | 3.33 | 1.67 |
| 28 | 5 | 2.5 | 2.5 |
| 29 | 5 | 1.67 | 3.33 |
| 30 | 5 | 0.83 | 4.17 |
| 31 | | | |
| 32 | 6 | 4 | 0 |
| 33 | 6 | 3.67 | 0.33 |
| 34 | 6 | 3.33 | 0.67 |
| 35 | 6 | 3 | 1 |
| 36 | 6 | 2.67 | 1.33 |
| 37 | 6 | 2.33 | 1.67 |
| 38 | 6 | 2 | 2 |
| 39 | 6 | 1.67 | 2.33 |
| 40 | 6 | 1.33 | 2.67 |
| 41 | 6 | 1 | 3 |
| 42 | 6 | 0.67 | 3.33 |
| 43 | 6 | 0.33 | 3.67 |
| 49 | 7 | 1.33 | 1.67 |
| 50 | 7 | 1 | 2 |
| 51 | 7 | 0.67 | 2.33 |
| 52 | 7 | 0.33 | 2.67 |
| 62 | 8 | 0.5 | 1.5 |

tableau 01 présente la composition de base utilisée pour chacun des essais.

I.2.3. Incorporation de la mixture

Sept formulations ont été préparées en variant les proportions des composés du mélange fonctionnel: l'amidon , le caséinate , ces préparations ont été soumises à des analyses physico-chimiques , à des tests de texture et de rhéologie , et à une évaluation organoleptique.

I.3 Analyses physico-chimiques

I.3.1 Teneur en humidité

a. Définition

L'humidité relative représente le rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air et la quantité maximale que celui-ci peut contenir à une température donnée. Dans ce contexte, la teneur en humidité fait référence à la quantité d'eau présente dans un échantillon d'amidon ou de caséinates (Boudreau & Ménard, 1992).

b. Objectif

Déterminer la teneur en humidité des échantillons d'amidon modifié et de caséinates de sodium, afin d'évaluer leur stabilité et leur aptitude à l'usage technologique.

c. Matériel et équipements

- Amidon modifié
- Caséinates de sodium
- Balance analytique (précision : 0,001 g)
- Capsule en aluminium ou en porcelaine
- Étuve thermostatique (105 ± 2 °C)
- Dessiccateur avec gel de silice comme agent déshydratant.
- Pince métallique ou gants thermiques



Figure n°1 : Dessiccateur.**d . Procédure expérimentale**

1. Peser une capsule vide et propre (m_0).
2. Ajouter environ 5 g d'échantillon (amidon modifié /caséinates) et peser l'ensemble (m_1).
3. Placer la capsule dans l'étuve à 105 ± 2 °C pendant 4 heures.
4. Retirer la capsule, la placer immédiatement dans un dessiccateur et laisser refroidir pendant 30 minutes.
5. Peser la capsule après séchage (m_2).

e . Calcul de la teneur en humidité

$$\text{Humidité'}(\%) = \frac{(m_1 - m_0)}{(m_1 - m_2)} \times 100$$

Où :

- m_0 = Masse de la capsule vide
- m_1 = masse de la capsule + l'échantillon avant séchage
- m_2 = masse de capsule + échantillons après séchage

I.3.2 Détermination du Ph**a. Définition**

Le pH est défini comme l'opposé du logarithme décimal de la concentration des ions oxonium (H_3O^+) en solution aqueuse. Il permet de caractériser l'acidité ou la basicité d'une solution.

Le caractère acide ou basique d'une solution dépend directement la concentration des ions de (H_2O) La mesure du pH permet d'évaluer l'acidité. (Jarrige & Ruckebusch, 1995).

b. Objectif

Évaluer l'acidité des solutions d'amidon modifié et de caséinates de sodium en mesurant leur pH.

c. Matériel et réactifs

- Amidon modifié, caséinates de sodium
- Eau distillée
- pH-mètre



étalonné

Figure n° 2 :pH-mètre

- Tampons de calibration (pH 4 et 7)

**Figure n°3 :Solution tampons de calibration**

- Béchers (50 et 100 ml)
- Agitateur magnétique + barreau aimanté
- Pipettes graduées
- Spatule
- Balance



analytique

Figure n°4 : Balance analytique

d. Procédure expérimentale

- Dissoudre 10 g d'amidon modifié dans 100 ml d'eau distillée. Agiter pendant 30 minutes à température ambiante. Mesurer le pH à l'aide d'un pH-mètre étalonné.
- Répéter la procédure avec 10 g de caséinates de sodium.

I.3.3. Solubilité dans l'eau

a. Définition

La solubilité (S) est la quantité maximale d'une substance pouvant se dissoudre dans un volume donné de solvant. Au-delà de ce seuil, le soluté précipite (Alhalel et al., 2013).

b. Objectif

Évaluer la solubilité de l'amidon modifié (OSA) dans différents solvants : eau froide, eau chaude et éthanol.

c. Matériel

- Amidon OSA
- Eau distillée froide (~25 °C) et chaude (~80 °C)
- Éthanol (95 %)
- Béchers (3)
- Agitateur magnétique ou manuel
- Thermomètre
- Balance analytique

d. Procédure expérimentale

1. Peser 1 g d'amidon OSA.
2. Ajouter l'échantillon dans trois bêchers contenant chacun 50 mL de :
 - Eau froide
 - Eau chaude
 - Éthanol (95 %)
3. Agiter chaque solution pendant 5 minutes.

4. Observer la solubilité (formation de solution claire ou dépôt au fond)

e. Observation attendue

L'amidon OSA est insoluble dans l'éthanol et peut se dissoudre partiellement ou totalement dans l'eau en fonction de la température.

I.3.4 Teneur en matières grasses et en protéines**a. Définition**

La teneur en protéines est exprimée en g/100 g ou en pourcentage, et représente la proportion de protéines contenues dans un produit (**Greenfield, 2007**). La teneur en matières grasses correspond à la quantité de lipides extraits d'un échantillon donné.

b. Objectif

Déterminer les teneurs en protéines et en matières grasses des caséinates de sodium à l'aide de l'appareil FOSS.

c. Matériel

1. Eau distillée
2. Bécher, boîte de Pétri, spatule
3. Pipette graduée
4. Balance analytique
5. Appareil FOSS Analytique



Figure n°5 :Appareil FOSS Analytique

d. Procédure expérimentale

1. Mélanger 15 g de caséinates avec 35 ml d'eau distillée.
2. Agiter jusqu'à obtenir une pâte homogène.
3. Étaler uniformément sur une boîte de Pétri et laisser sécher à température ambiante ou selon les recommandations du fabricant.
4. Une fois sec, analyser l'échantillon avec l'appareil FOSS pour déterminer la teneur en matières grasses et en protéines.

I.3.5. Détermination du degré de substitution (DS)**a. Définition**

Le degré de substitution (DS) est le nombre moyen de groupes fonctionnels introduits par molécule de monomère dans un polymère. Il renseigne sur le niveau de modification chimique subi, notamment dans les biopolymères comme l'amidon (**Carey & Sundberg, 1996**).

b. Objectif

Déterminer le degré de substitution de l'amidon modifié OSA, en vue d'évaluer l'efficacité de la réaction de modification chimique.

c. Réactifs

- HCl-isopropanol (2,5 M)
- Isopropanol (90 %, v/v)
- Nitrate d'argent (Ag NO_3 , 0,1 M)
- Na OH (0,1 M)
- Phénolphthaleine
- Eau distillée

d. Matériel

- Balance analytique
- Béchers (100, 250, 500 mL)
- Erlenmeyer (300 mL)
- Agitateur magnétique
- Filtre + papier filtre

- Burette graduée (50 mL)
- Pipettes et micropipettes
- Plaque chauffante avec agitation
- Thermomètre

e. Procédure expérimentale :

1. Disperser 5 g d'amidon OSA dans 25 ml de HCl-isopropanol (2,5 M). Agiter pendant 30 min.
2. Ajouter 100 ml d'isopropanol (90 %) et agiter 10 min.
3. Filtrer, laver avec l'isopropanol jusqu'à disparition des ions chlorure (test au nitrate d'argent).
4. Redisperger le résidu amidonné dans 300 ml d'eau distillée.
5. Chauffer à 100 °C pendant 20 min.
6. Titrer avec du Na OH (0,1 M) en présence de phénolphthaleine. Noter le volume utilisé.
7. Répéter avec de l'amidon natif comme témoin.

I.4 Analyse microbiologique

I.4.1 Dénombrement et confirmation des bactéries aérobies mésophiles

1.1 Matériel nécessaire

- Milieu PCA (Plate Count Agar)
- Échantillons (eau, aliments, etc.)
- Tubes à essai ou flacons de dilution
- Boîtes de Pétri stériles
- Pipettes stériles
- Incubateur réglé à 30 °C
- Autoclave
- Compteur de colonies ou loupe binoculaire

1.2 Méthode

- Prélever 1 mL de la solution mère à l'aide d'une pipette stérile et le déposer au centre d'une boîte de Pétri.
- Ajouter 15 à 20 mL de milieu PCA fondu et refroidi à 45 °C.
- Homogénéiser et laisser solidifier.
- Incuber à 30 °C pendant 72 heures.
- Ne comptabiliser que les boîtes contenant entre 30 et 300 colonies.
- Préparer une boîte témoin (milieu stérile sans échantillon) pour vérifier la stérilité.

1.3 Caractéristiques des colonies

- Colonies bien définies, rondes, homogènes.
- Les levures ou moisissures peuvent apparaître colorées différemment des bactéries.

1.4 Calcul des résultats

❖ Calcul de la concentration de germes aérobies

Le nombre de germes aérobies par gramme ou par millilitre d'échantillon est calculé en fonction du nombre de colonies observées et de la dilution effectuée.

$$N = V \times (n_1 + 0.1 \times n_2) \sum C \times d_1$$

- ❖ N : nombre de colonies formant unité (UFC) par g ou ml
- ❖ $\sum C$: total des colonies comptées sur les boîtes valides

- ❖ **V** : volume ensemencé (généralement 1 ml)
- ❖ **N₁** : nombre de boîtes à la dilution la plus basse
- ❖ **N₂** : nombre de boîtes à la dilution suivante
- ❖ **D** : dilution correspondant à **n₁**

1.5 Interprétation des résultats

- Résultat élevé : possible contamination microbienne.
- Résultat faible (<10 UFC/g ou ml) : produit peu contaminé.

I.4.2 Dénombrement des coliformes totaux et fécaux

2.1 Matériel nécessaire

- Milieu VRBL (Violet Red Bile Lactose Agar)
- Échantillons
- Tubes, boîtes, pipettes stériles
- Incubateur à 37 °C
- Autoclave

2.2 Méthode

- Prélever deux boîtes de Pétri stériles pour le produit liquide et/ou pour chaque dilution retenue.
- À l'aide d'une pipette stérile, transférer **1 ml** de la dilution appropriée au centre de chaque boîte de Pétri.
- Verser ensuite **15 ml** de milieu **VRBL** (milieu sélectif pour les coliformes), préalablement liquéfié et maintenu à une température comprise entre **44 °C et 47 °C**, dans chaque boîte.
- Mélanger délicatement le contenu en effectuant des mouvements circulaires afin d'assurer une répartition homogène de l'inoculum dans le milieu.
- Laisser solidifier les boîtes sur une surface plane et froide.
- Préparer une boîte témoin contenant uniquement **15 ml** de milieu VRBL (sans échantillon) afin de vérifier la stérilité du milieu.
- Incuber les boîtes à **30 °C** ou **37 °C** pendant **24 à 48 heures**, selon les exigences de l'analyse.

2.3 . Dénombrement

- Après incubation, sélectionner les boîtes contenant entre 10 et 150 colonies pour le comptage. Les résultats sont exprimés en UFC/ml (Unités Formant Colonies par millilitre)

I.4.3 Dénombrement et confirmation des colonies d'Escherichia coli

3.1 Matériel nécessaire

- Milieu VRBL (Violet Red Bile Lactose Agar)
- Échantillons
- Tubes de dilution, pipettes et boîtes de Pétri stériles
- Incubateur à 37 °C
- Autoclave
- Compteur de colonies

3.2 Méthode

- Prélever 25 g d'échantillon (osa ou caséinates), diluer dans 225 ml d'eau peptonée.
- Préparer les dilutions en série.
- Ensemencer 1 ml de dilution sur VRBL.
- Incuber à 37 °C pendant 24 à 48 h.
- Observer et compter les colonies rouges/rosées produisant du gaz.
- Confirmer par test biochimique (fermentation lactose, production d'indole).
- Préparer une boîte témoin.

3.3 Caractéristiques des colonies

- Colonies rouges ou rosées avec présence de bulles (gaz).
- Colonies non fermentantes : blanches ou translucides sans gaz.

I.4.4 Dénombrement et confirmation des Staphylococcus aureus

4.1 Matériel nécessaire

- Balance, homogénéisateur
- Gélose Baird-Parker avec supplément (jaune d'œuf + tellurite)
- Diluant peptoné tamponné

- Bain-marie, incubateur (37 °C)
- Pipettes, tubes stériles
- Tests de confirmation : coagulase, catalase, galerie API

4.2 Méthode

- Diluer 10 g d'échantillon dans 90 ml de diluant → dilution 10^{-1} .
- Réaliser des dilutions décimales (jusqu'à 10^{-4}).
- Ensemencer en surface (0,1 ml) ou en profondeur (1 ml avec gélose fondue).
- Incuber à 37 °C pendant 24 à 48 h.

4.3 Caractéristiques des colonies

- Colonies noires, brillantes, à halo clair (lécithinase).
- Boîtes valides : 15 à 150 colonies.
- **Confirmation (facultative mais recommandée) :** Effectuer un test de coagulase (tube ou latex). Ou un test de catalase + confirmation par galerie API Steph ou PCR si besoin.

4.4 Calcul

❖ Formule classique du dénombrement:

$$N = V \times (n_1 + 0.1 \times n_2) \sum C \times d_1$$

- ❖ **N** = nombre de *Staphylococcus* par g ou ml
- ❖ $\sum C$ = somme des colonies comptées sur deux dilutions successives
- ❖ **V** = volume ensemencé (généralement 1 ml)
- ❖ **n₁, n₂** = nombre de boîtes à chaque dilution
- ❖ **d** = dilution correspondant à la première dilution retenue

I.4.5 Recherche des *Salmonella* spp

5.1 Matériel nécessaire

- Bouillons : RVS (Rappaport-Vassiliadis soya).
- Bouillons : MKTTn (Tétrathionate modifié).
- Milieux : XLD, Hektoen

- Eau peptonée tamponnée
- Boîtes de Pétri, pipettes, tubes stériles
- Incubateur (37–42 °C)

5.2 Méthode

a. Pré-enrichissement

- 25 g ou ml d'échantillon dans 225 ml d'eau peptonée tamponnée (pré-enrichissement non sélectif).
- Homogénéiser (stomacher ou vortex).
- Incuber à 37 °C pendant 18–24 h.

b. Enrichissement sélectif

➤ Après l'incubation en pré-enrichissement

- Prélever 0,1 ml de la culture pour l'inoculer dans 10 ml de bouillon RVS (Rappaport-Vassiliadis Soya).
- Incuber à 42 °C pendant 24 heures.
- Prélever 1 ml de la culture pour l'inoculer dans 10 ml de bouillon MKTTn (Tétrathionate modifié).
- Incuber à 37 °C pendant 24 heures

c. Isolement sur milieux sélectifs

➤ À l'issue de l'étape d'enrichissement

- Ensemencer la culture issue du bouillon RVS sur des boîtes de Pétri contenant le milieu d'isolement sélectif gélose XLD (Xylose Lysine Désoxycholate) de manière à obtenir des colonies bien isolées.
- En parallèle, ensemencer la culture issue du bouillon MKTTn sur des boîtes de Pétri contenant le milieu Hektoen, également sélectif pour les entérobactéries.
- Incuber les boîtes à 37 °C pendant 24 heures.

5.3 Lecture des résultats

➤ Rechercher la présence de colonies typiques

- **Sur gélose XLD** : colonies rouges, avec ou sans centre noir (caractéristique de *Salmonella*).

- Sur gélose Hektoen : colonies vertes à centre noir (typique de *Salmonella*).

I.4.6 Dénombrement et confirmation de levures et moisissures

6.1 Matériel nécessaire

- Milieu de culture gélose Sabouraud avec chloramphénicol (milieu sélectif antifongique).
- Échantillons
- Tubes à essai stériles.
- Boîtes de Pétri stériles.
- Pipettes stériles.
- Homogénéisateur type stomacher.
- Incubateur réglé à 25–28 °C.
- Stérilisateur (autoclave).

6.2 Méthode

a. Préparation des échantillons

- Peser 10 g d'échantillon (ex. : caséinates ou amidon modifié) dans un sac stomacher ou un flacon stérile.
- Ajouter 90 ml de diluant stérile (eau peptonée tamponnée ou solution de Ringer).
- Homogénéiser pendant 1 à 2 minutes au stomacher pour obtenir une dilution 10^{-1} .

b. Dilutions en série

- Réaliser des dilutions décimales successives : 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , etc.
- Transférer 1 ml de la dilution précédente dans 9 ml de diluant stérile à chaque étape, en utilisant une pipette stérile.

c. Ensemencement sur gélose

- Utiliser la gélose Sabouraud avec chloramphénicol, préalablement solidifiée (pour ensemencement en surface) ou fondu à 45 °C (pour ensemencement en profondeur).
- Prélever 0,1 ml de chaque dilution pour un ensemencement en surface, réparti uniformément à l'aide d'un triangle de verre stérile.

- Optionnellement, ensemencer 1 ml en profondeur avec gélose fondue (méthode coulé en boîte).

d. Incubation

- Incuber les boîtes à 25–28 °C, à l'envers, pendant 5 à 7 jours.
- Les boîtes doivent être conservées à l'abri de la lumière pour éviter toute inhibition de la croissance fongique par les UV.

e. Lecture et dénombrement

- Observer et compter les colonies selon leur morphologie :
 - Colonies duveteuses, blanches, beiges ou rosées : moisissures.
 - Colonies rondes, lisses et brillantes : levures.
- Seules les boîtes contenant entre 10 et 150 colonies sont considérées comme valides pour le dénombrement.

f. Calcul du nombre de levures/moisissures

$$N = \sum C / (n_1 + 0,1 \times n_2) \times V \times 1/d$$

Où :

- ❖ N : Nombre moyen d'unités formant colonies (UFC) par gramme ou par millilitre d'échantillon
- ❖ $\sum C$: Somme des colonies dénombrées sur toutes les boîtes retenues
- ❖ n_1 = Nombre de boîtes retenues à la première dilution
- ❖ n_2 = Nombre de boîtes retenues à la dilution suivante
- ❖ V = Volume ensemencé sur chaque boîte (en ml)
- ❖ d = Dilution correspondant à la première dilution retenue

Produit fini

Dans cette partie, nous présentons les produits finis élaborés à l'issue de notre démarche expérimentale. Ces produits ont été formulés à base d'un mélange fonctionnel comprenant des caséinates et de l'amidon modifié et autre ingrédient , dans le but de simuler un produit fromagé allégé en matières grasses. L'objectif était d'évaluer l'effet de ces ingrédients sur

les propriétés finales du produit, notamment la texture, la stabilité, la tenue et l'acceptabilité sensorielle.

Les matières premières utilisées dans la formulation des sauces fromagères sont listées comme suit :

- Amidon modifié
- Caséinate
- Poudre de lait écrémé
- Texturant
- Eau distillée
- Sel de table (Na Cl)
- Arôme naturel fromager
- Acide citrique (ajustement du pH)

I.5.1 Formulations expérimentales

Parmi les 46 échantillons préparés au cours de la phase expérimentale, sept formulations ont été sélectionnées afin de constituer les essais finaux destinés à l'élaboration du produit fini. Ces formulations ont été choisies sur la base de leur comportement technologique, leur stabilité et leur texture. Chaque formulation contient un mélange fonctionnel (caséinate + amidon modifié) à une dose fixe de 10 g, tandis que les autres ingrédients sont maintenus constants. Le tableau ci-dessous présente la composition de base utilisée pour chacun des essais.

I.5.2 Essai 1

Tableau n°1 : Essai 1 de la formulation finale de chaque échantillon (en g).

| Ingrédient | Quantité (g) | Rôle principal |
|----------------------------|--------------|---|
| Eau distillée | 85,00 | Milieu de dispersion |
| Mélange fonctionnel (10 %) | 10,00 | Agents fonctionnels (épaississant, structurant, fibres) |
| Amidon modifié | variable | Épaississant, stabilisant, émulsifiant |
| Caséinates de sodium | variable | Agent structurant et texturant |
| Poudre d'avoine | variable | Fibre fonctionnelle, viscosité, texture |
| Sel | 1,00 | Saveur |
| Arôme naturel fromager | 0,50 | Goût fromager |
| Acide citrique ou lactique | (pH 5,5–6) | Régulation du pH |

Essai 2 :**Tableau n°2 :** Essai 2 de la formulation finale de chaque échantillon (en g)

| Ingédient | Quantité (g) | Rôle |
|------------------------|--------------|----------------------|
| Eau distillée | 63 | Milieu de dispersion |
| Mélange fonctionnel | 10 | Agent fonctionnels |
| Poudre de lait écrémé | 4 | Texteur |
| Texturant | 0,3 | Stabiliser |
| Sel | 1 | Saveur |
| Arôme fromager naturel | 0,5 | Gout |
| Acide citrique | Ph(5,5-6) | Régulation du Ph |

I.5.2 . Méthode de préparation des échantillons**2.1 Pesée des ingrédients**

Tous les ingrédients ont été pesés avec précision à l'aide d'une balance analytique selon les quantités définies dans la formulation finale. Le mélange fonctionnel a été préparé selon les proportions spécifiques à chaque formulation

2.2 Préparation de la phase liquide

Dans un bécher, 63 g d'eau distillée ont été versés et mis sous agitation magnétique modérée. Le texturant (0,3 g) a été progressivement incorporée pour éviter la formation de grumeaux et permettre une bonne hydratation.

2.3 Incorporation des agents fonctionnels

Le mélange fonctionnel spécifique à chaque formulation (10 g) a été ajouté lentement à la phase liquide, suivi de l'ajout de 4 g de poudre de lait écrémé. L'agitation a été maintenue jusqu'à obtention d'un mélange homogène.

2.4 Ajout des additifs

Le sel (1 g) et l'arôme fromager naturel (0,5 g) ont ensuite été ajoutés. L'agitation a continué pendant environ 5 minutes pour assurer une bonne dispersion des composants.

2.5 Ajustement du pH

Le pH du mélange a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre, puis ajusté entre 5,5 et 6 à l'aide d'acide citrique ou lactique dilué, goutte à goutte, tout en surveillant constamment le pH.

2.6 Homogénéisation finale

Une fois tous les ingrédients incorporés, le mélange a été soumis à une agitation plus rapide ou à une homogénéisation à l'aide d'un thermomix à haute vitesse pendant 15 minutes à une température de 80 °C afin d'assurer une texture uniforme.



Figure n°6 : Thermomix

2.7. Conditionnement

Les échantillons ont été immédiatement transférés dans des contenants hermétiques propres, puis stockés à 4 °C jusqu'aux analyses ultérieures.

I.6. L'analyse rhéologique des produits finis

Objectif

L'objectif de cette analyse est d'évaluer les propriétés rhéologiques des produits finis, en l'occurrence des fromages modèles allégés, afin de caractériser leur comportement viscoélastique sous contrainte. L'étude a été réalisée sur sept échantillons différents, correspondant à diverses formulations fonctionnelles. Les mesures ont été effectuées au laboratoire du Dr. Haj Sadouk, au sein du département de chimie des procédés.

I.6.1 Matériel utilisé

- Rhéomètre de type Anton Paar (Physica MCR 302, Allemagne).
- Géométrie : plaques parallèles (diamètre 25 mm, écartement 1 mm)
- Température contrôlée : 25 °C

I.6.1.2Préparation des échantillons

- Les échantillons des 7 essais (E1 à E7) sont prélevés de manière homogène.
- Chaque échantillon est conditionné à température ambiante pendant 30 minutes avant l'analyse pour stabilisation.
- Une petite quantité est déposée au centre de la plaque inférieure du rhéomètre, puis la plaque supérieure est abaissée jusqu'à l'écartement requis.

I.6.1.3Méthode de mesure

- **Test en oscillation (amplitude sweep)**
 - **Objectif :** Déterminer la limite linéaire viscoélastique (LVE).
 - **Conditions :** fréquence constante à 1 Hz, déformation variant de 0,01 % à 100 %.
 - **Paramètres observés :** module de stockage (G'), module de perte (G''), $\tan \delta$.
- **2. Test en fréquence (frequency sweep)**
 - **Objectif :** Étudier le comportement viscoélastique en fonction de la fréquence.
 - **Conditions :** déformation constante dans la zone LVE (par exemple 1 %), fréquence de 0,1 à 10 Hz.
 - **Paramètres observés :** G' , G'' , $\tan \delta$, complex viscosity.
- **3. Test en flux (flow curve)**
 - **Objectif :** Évaluer la viscosité en fonction du cisaillement.
 - **Conditions :** contrainte de cisaillement croissante de 0,1 à 100 s^{-1} .
 - **Paramètre principal :** courbe viscosité vs taux de cisaillement.

I.6.4Nombre d'essais :

L'analyse a été réalisée pour 7 échantillons (E1 à E7), chacun testé individuellement dans les mêmes conditions. le comportement rhéologique du produit formulé a été évalué. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un rhéomètre Anton Paar (Physica MCR 302, Allemagne), équipé d'un système de mesure à plaques parallèles (diamètre de 25 cm, écartement de 1 mm), avec contrôle de la température. Trois mesures ont été effectuées, et la valeur moyenne a été rapportée. Les données expérimentales ont été traitées à l'aide du logiciel Rheoplus

US200. La courbe d'écoulement a été obtenue sur une plage de taux de cisaillement allant de 0,001 à 1 000 s⁻¹.

I.6.1. Analyse physicochimique du produit fini

I.6.1. Objectif globale des analyses physico- chimique

L'objectif principal des analyses physico-chimiques est de vérifier la conformité du produit agroalimentaire fini aux normes de qualité et de sécurité en vigueur. Ces analyses permettent de contrôler différentes caractéristiques du produit (pH, teneur en eau, acidité, matières grasses, etc.) afin de garantir sa stabilité, sa salubrité ainsi que son acceptabilité pour la consommation humaine.

6.1.1 Extrait sac total

a. Définition

La teneur en matière sèche d'un fromage représente la quantité totale de substances restantes après l'élimination complète de l'eau par séchage. Elle s'exprime en pourcentage par rapport à la masse du produit.(Collectif .2018).

b. Méthode

1. Préparer l'échantillon (homogénéiser, broyer si nécessaire).

2. Peser la capsule vide (P_0).

3. Ajouter l'échantillon et peser à nouveau (P_1).

4. Placer dans l'étuve à 103–105 °C pendant 4 à 6 heures.

5. Refroidir dans un dessiccateur pendant 30 minutes.

6. Peser la capsule + résidu sec (P_2).

7.Calculer l'extrait sec total (%) :

$$\text{Extrait sec} = (P_2 - P_0) / (P_1 - P_0) \times 100$$

8. Répéter si nécessaire pour vérifier la masse constante.

6.1.2 Détermination de pH

a. Définition

Le pH d'une solution aqueuse correspond à l'opposé du logarithme décimal de la concentration en ions oxonium (H_3O^+), exprimée en mol/L. Le caractère acide ou basique d'une solution dépend directement de la concentration des ions de H_2O . La mesure du pH permet d'évaluer l'acidité. (Jarrige, Ruckebusch, 1995).

b. Méthode

- Préparation de la solution du produit fini à 10 % d'amidon dans de l'eau distillée
- Peser 10g d'amidon et dissoudre dans 100mL d'eau distillée.
- Agiter à température ambiante pendant 30 minutes jusqu'à dissolution complète.
Mesurer le pH avec un pH-mètre étalonné.

6.1.3. Teneur en humidité**a. Définition**

L'humidité relative de l'air représente le rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air et la quantité maximale que l'air peut contenir à une température donnée. Elle est exprimée en pourcentage (%) et varie en fonction de la température et de la pression de l'air. Détermine la quantité d'eau présente dans l'amidon. (Boudreau, Ménard, 1992).

b. Méthode**b.1 Préparation des échantillons**

- Peser une capsule vide et propre (m_0).
- Ajouter environ 5 g du produit fini dans la capsule et peser l'ensemble (m_1).

b.2 Séchage

- Placer la capsule contenant l'échantillon dans une étuve réglée à 105 ± 2 °C.
- Laisser sécher pendant 4 heures pour l'amidon et pour les caséinates.
- Retirer la capsule à l'aide d'une pince et la placer immédiatement dans un dessicateur pour refroidissement (environ 30 minutes).

b.3 Calculer le pourcentage d'humidité

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

Où :

- m_0 = Masse de la capsule vide
- m_1 = masse de la capsule + l'échantillon avant séchage
- m_2 = masse de capsule + échantillons après séchage

I.7. Protocole d'analyse sensorielle

Une analyse sensorielle a été réalisée afin d'évaluer la qualité organoleptique des sept formulations finales du produit fromager allégé.

L'évaluation a été effectuée par un panel de dégustateurs composé de 07 participants, sélectionnés parmi les étudiants et personnels du laboratoire. Chaque échantillon a été codé de manière anonyme pour garantir l'objectivité des résultats et présenté à température ambiante dans des récipients identiques.

Les dégustateurs ont été invités à évaluer les échantillons selon les critères suivants :

- L'aspect visuel et l'homogénéité,
- La texture en bouche,
- Le goût,
- Une appréciation globale.

L'évaluation a été réalisée à l'aide d'une fiche de notation simple et standardisée. Les résultats ont ensuite été compilés et analysés afin d'identifier les formulations les plus appréciées sur le plan sensoriel

7.1 Fiche d'analyse sensorielle – Évaluation des formulations produit fromagère allégée

Nom du dégustateur : _____ Date : _____

Instructions : Veuillez déguster chaque échantillon et évaluer les critères ci-dessous en cochant la case correspondante selon votre ressenti.

| Échantillons | Aspect visuel / homogénéité | Texture en bouche | Goût | Acceptabilité globale |
|--------------|---|--|--|---|
| Essai 1 | Très mauvais Mauvais Moyen Bon Très bon | Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellent | Désagréable Peu agréable Neutre Agréable Très agréable | Non acceptable Acceptable Appréciée |
| Essai 2 | Très mauvais Mauvais Moyen Bon Très bon | Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellent | Désagréable Peu agréable Neutre Agréable Très agréable | Non acceptable Acceptable Appréciée |
| Essai 3 | Très mauvais Mauvais Moyen Bon Très bon | Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellent | Désagréable Peu agréable Neutre Agréable Très agréable | Non acceptable Acceptable Appréciée |
| Essai 4 | Très mauvais Mauvais Moyen Bon Très bon | Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellent | Désagréable Peu agréable Neutre Agréable Très agréable | Non acceptable Acceptable Appréciée |
| Essai 5 | Très mauvais Mauvais Moyen Bon Très bon | Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellent | Désagréable Peu agréable Neutre Agréable Très agréable | Non acceptable Acceptable Appréciée |
| Essai 6 | Très mauvais Mauvais Moyen Bon Très bon | Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellent | Désagréable Peu agréable Neutre Agréable Très agréable | Non acceptable Acceptable Appréciée |

Remarques du dégustateur :

Chapitre II

Résultats et discussion

II.1 Interprétation des résultats d'amidon modifié

Tableau n⁰ 3 : Résultats d'analyse physico-chimique de l'amidon modifié.

| l'analyse | Ph | Humidité | Solubilité |
|-----------|-----|----------|------------|
| résultat | 3,5 | 0,2% | 80c° |

II.1.1 Interprétation du pH de l'amidon modifié

La valeur de pH obtenue (3,5) est caractéristique d'un amidon modifié acide. Ce résultat confirme la nature du traitement subi par l'échantillon et met en évidence les effets de la modification chimique sur les propriétés physico-chimiques de l'amidon (Singh et al., 2007).

II.1.2 Interprétation de taux d'humidité d'amidon modifié

Le taux d'humidité de 0,2 % observé dans l'amidon modifié reflète un produit très sec et bien stabilisé, apte à une conservation prolongée. Ce résultat est indicatif d'un traitement de séchage efficace et peut être considéré comme un atout qualitatif, notamment pour les applications nécessitant une faible teneur en eau. (**Jacobs, Delcour. 1998**), une faible teneur en eau est essentielle pour stabiliser la poudre d'amidon modifié, éviter l'agglomération et préserver les qualités fonctionnelles.

I.1.3. Interprétation de solubilité d'eau d'amidon modifié

La solubilité accrue à 80 °C traduit une bonne gélatinisation, qui correspond à la rupture des granules d'amidon et la libération des chaînes d'amylose et d'amylopectine (**Tester et al., 2004**). La formation d'une solution visqueuse est cruciale pour des applications où l'amidon joue un rôle épaisissant, comme dans les industries alimentaires et pharmaceutiques (**Tharanathan, 2005**). Ce comportement confirme l'utilité de cet amidon modifié dans les formulations nécessitant une texture spécifique.

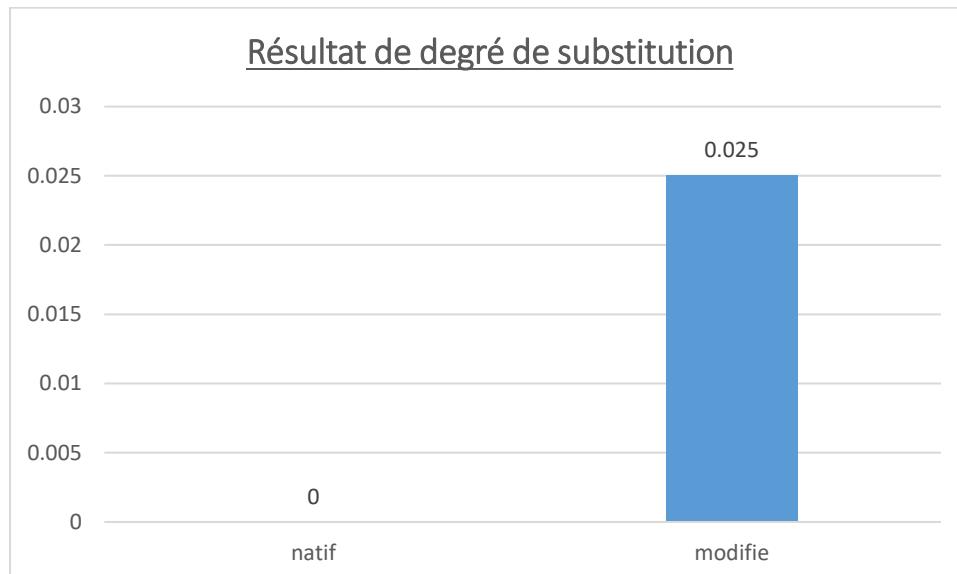
I.1.4. Interprétation de degré de substitution d'amidon modifié

Tableau n° 4 : Résultats de degré de substitution.

| Amidon | natif | modifié |
|----------|-------|---------|
| Résultat | 0 | 0,025 |

Interprétation

L'amidon natif a un degré de substitution (DS) nul, ce qui indique qu'il n'a subi aucune transformation chimique. Par contre, l'amidon modifié présente un degré de substitution (DS) de 0,025, signalant l'ajout de groupements acétyle à la structure glucidique. Cette analyse valide l'efficacité du processus de modification et son influence sur la structure de l'amidon.

**Figure n°7 :** Résultats de degré de substitution.**II.2 Interprétation des résultats du Caséinate****Tableau n° 5 :** Résultats d'analyse physico-chimique de caséinate.

| Analyse | ph | Humidité | protéine | MG |
|----------|-----|----------|----------|------|
| Résultat | 6,7 | 0,06 % | 78,56% | 0.77 |

II.2.1 Interprétation du pH de caséinate

Le pH mesuré de 6,7 indique que les caséinates analysés présentent une bonne stabilité chimique et sont conformes aux normes de qualité pour une utilisation dans des applications alimentaires ou nutritionnelles. Cette valeur confirme une neutralisation efficace lors de leur fabrication et reflète un produit fonctionnellement adapté à l'incorporation dans divers systèmes dispersés.

II.2.2 Interprétation de taux d'humidité de caséinate

Le taux d'humidité de 0,06 % mesuré dans l'échantillon de caséinates révèle un produit extrêmement sec, ce qui est favorable pour la conservation et l'innocuité microbiologique (Walstra et al., 2006). Ce résultat témoigne d'un processus de séchage très efficace et peut représenter un atout dans certaines formulations exigeantes, à condition que les propriétés fonctionnelles soient préservées.

II.2.3 Interprétation de taux de protéines de caséinate

Le taux de protéines de 78.56% est nettement en dessous des normes habituelles pour les caséinates alimentaires, ce qui soulève des questions quant à la qualité de la matière première ou du procédé de fabrication. Le taux de protéines de 78.56% est nettement en dessous des normes habituelles pour les caséinates alimentaires, ce qui soulève des questions quant à la qualité de la matière première ou du procédé de fabrication. Le taux de protéines de 78.56% est nettement en dessous des normes habituelles pour les caséinates alimentaires, ce qui soulève des questions quant à la qualité de la matière première ou du procédé de fabrication.

Les analyses microbiologiques des échantillons d'amidon modifié et de caséinates ont été réalisées conformément aux normes ISO spécifiques mentionnées dans le protocole expérimental

Tableau n°6 : Représente l'ensemble des résultats des analyses microbiologiques effectuées sur l'amidon modifié et caséinates

| Germes | Témoin sans ajout | Amidon modifié | Caséinates |
|------------------------|-------------------|----------------|------------|
| Germes aérobies totaux | Absents | Absents | Absents |
| Coliformes totaux | Absent | Absents | Absents |
| Coliforme fécaux | Absents | Absents | Absents |
| Escherichia coli | Absents | Absents | Absents |
| Salmonella spp | Absents | Absents | Absents |
| Levures et moisissures | Absents | Absents | Absents |
| Staphylococcus aureus | Absents | Absents | Absents |

II.2. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau ci-dessous

II.2.1 Germes aérobies totaux

Selon la norme ISO 4833-1:2013 – énumération par méthode pour-plate à 30 °C

Résultat : Absents dans tous les échantillons.

Interprétation : L'absence de germes aérobies totaux témoigne d'une bonne hygiène au cours des étapes de production, de manipulation et de stockage. Cela indique qu'aucune contamination microbiologique générale n'a été détectée.

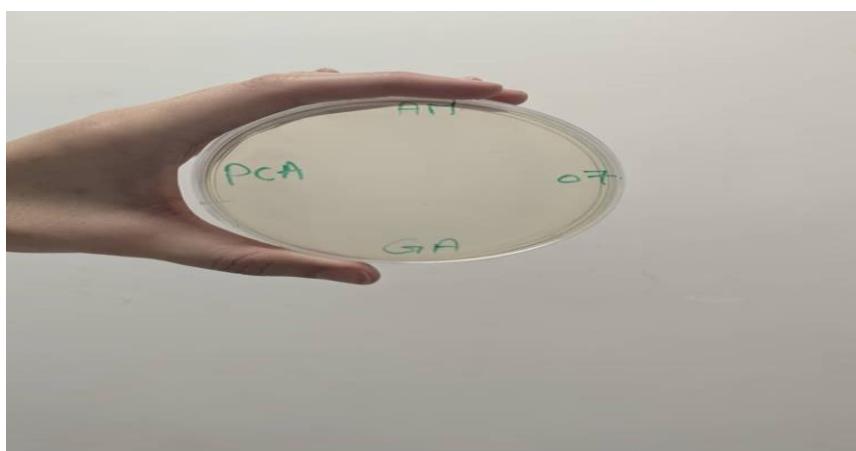


Figure n° 08 : Représente les résultats de germe aéробie dans amidon modifié.

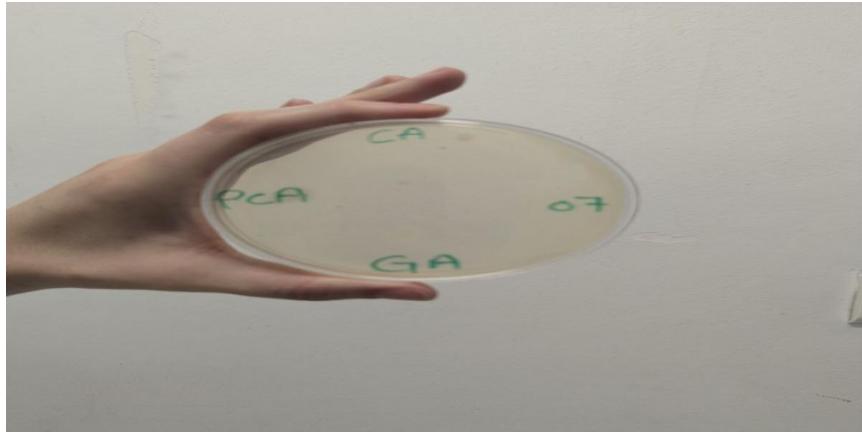


Figure n°09 : Représente les résultats de germe aérobiose dans Caséinate.

II.2.2 Coliformes totaux :

Selon la norme ISO 4832:2006 – énumération par technique de dénombrement de colonies

Résultat : Absents dans tous les échantillons.

Interprétation : Les coliformes totaux sont des indicateurs de contamination environnementale. Leur absence suggère une bonne maîtrise de l'hygiène dans l'environnement de production.

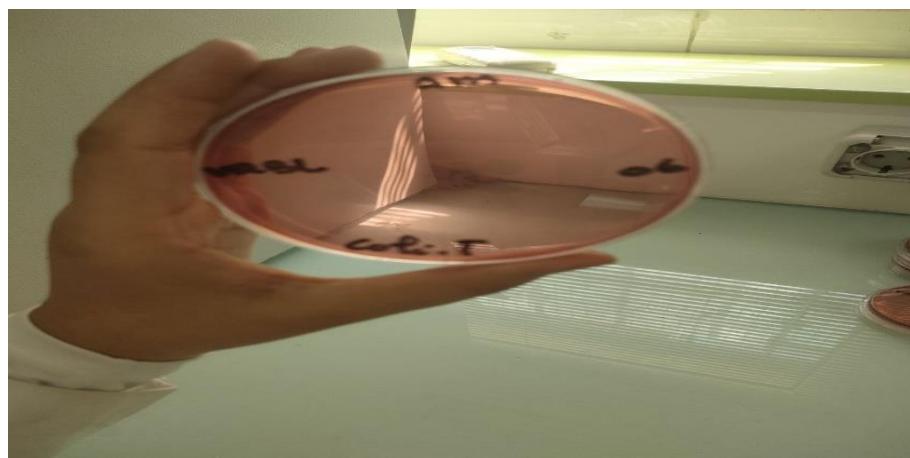


Figure n°10 : Représenter les coliformes totaux dans amidon modifié.

II.2.3 Coliformes fécaux :

Norme : ISO 4832:2006 (avec mentions spécifiques aux coliformes thermotolérants ou fécaux)

Résultat : Absents dans tous les échantillons.

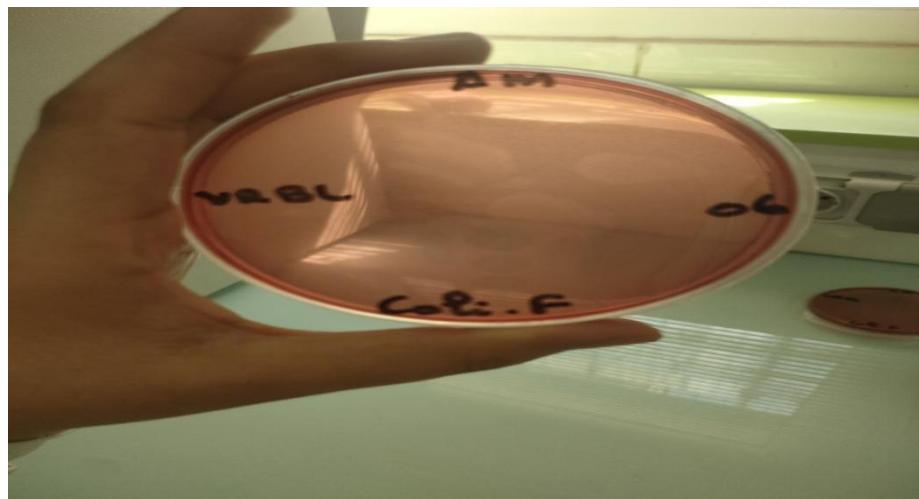


Figure n°11 : Représenter les coliformes fécaux dans amidon modifié.

Interprétation : L'absence de coliformes fécaux indique une excellente maîtrise des sources potentielles de contamination d'origine fécale, un critère essentiel pour la sécurité sanitaire des aliments.

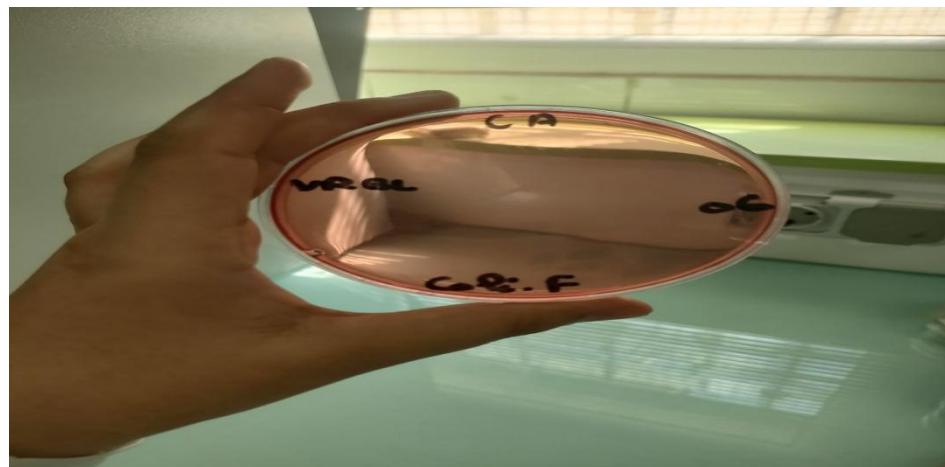


Figure n°12 : Représenter les coliformes fécaux dans Caséinate

II.2.4 Escherichia coli :

Norme : ISO 6888-1 / ISO 16649-2 – méthodes d’identification ou comptage

Résultat : Absents dans tous les échantillons.

Interprétation : *E. coli* est un indicateur spécifique de contamination fécale récente. Son absence renforce la conformité des échantillons aux normes de sécurité microbiologique.



Figure n°13 : Représenter Escherichia **coli** dans amidon modifié.



Figure n°14 : Représenter Escherichia **coli** dans Caséinate.

II.2.5 Salmonella spp

Résultat : Absents dans tous les échantillons.

Interprétation : *Salmonella* est un pathogène majeur d’origine alimentaire. Son absence est indispensable pour garantir la salubrité des produits.

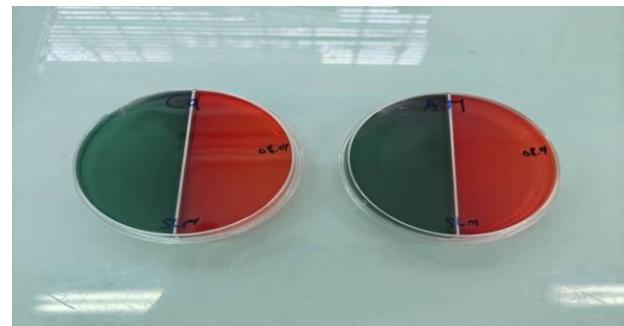


Figure n°15 : Représenter *Salmonella* spp dans Caséinate et amidon modifie.

II.2.6 Levures et moisissures

Norme : ISO 21527-1:2008 Microbiologie des aliments :Méthode horizontale pour le dénombrement des levures et moisissures :Partie 1 : Dénombrement dans les produits à faible activité de l'eau ($aw \leq 0,95$)

Résultat : Absentes dans tous les échantillons.

Interprétation : L'absence des levures et moisissures suggère une faible activité de l'eau dans les produits et une bonne conservation, limitant ainsi les risques d'altération.

II.2.7 *Staphylococcus aureus*

Norme : ISO 6579-1:2017 – méthode d'enrichissement et détection / ISO 6888-1:1999 – énumération selon la technique MPN ou par colonies coagulase-positives

Résultat : Absent dans tous les échantillons.

Interprétation : Pathogène souvent transmis par contact humain, *S. aureus* est un indicateur d'hygiène du personnel et des surfaces. Son absence démontre une bonne application des bonnes pratiques d'hygiène.

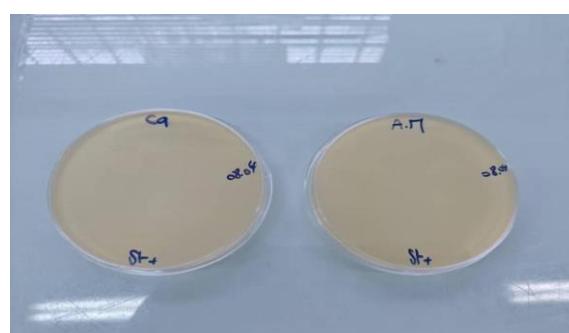


Figure n°16 : Représenter *Staphylococcus aureus* dans Caséinate et amidon modifie.

Conclusion globale

L'ensemble des analyses microbiologiques réalisées sur les échantillons d'amidon modifié, de caséinates, ainsi que sur le témoin sans ajout, révèle l'absence totale des germes pathogènes et indicateurs recherchés. Ces résultats traduisent une excellente qualité microbiologique des produits, témoignant : du respect rigoureux des bonnes pratiques de fabrication (BPF), d'une hygiène maîtrisée et d'une conservation appropriée des échantillons.

Ainsi, les produits analysés peuvent être considérés comme sûrs sur le plan microbiologique, ne présentant aucun signe de contamination.

II.3. Résultats et Interprétation du produit fini

II.3.1 Interprétation premier essai

L'analyse globale des résultats montre que la stabilité et la texture finale de la sauce fromagère allégée dépendent fortement de l'équilibre entre les différents composants. Certaines formulations, notamment celles contenant de faible proportions ont abouti à une consistance trop liquide, traduisant un réseau insuffisamment structuré pour retenir l'eau et assurer une bonne cohésion du mélange.

À l'inverse, les échantillons intégrant des proportions modérées à élevées des ingrédients ont permis d'obtenir une texture plus homogène, stable, et proche de celle attendue.

Ces résultats confirment ainsi l'importance d'un dosage optimisé en ingrédients fonctionnels pour substituer efficacement la matière grasse, tout en maintenant les propriétés technologiques et sensorielles du produit final.

II.3.2 Interprétation deuxième essai

L'ensemble des essais menés sur la préparation fromagère sans matière grasse a permis d'évaluer la stabilité physique, la texture, ainsi que les propriétés sensorielles des produits finis. Sur les sept essais, six ont montré une texture homogène et stable, tandis qu'un seule (essai 1) a présenté une séparation de phase visible.

Essai 1

Le produit montre une séparation de phase marquée, traduisant un manque de cohésion dans la matrice. Ce déséquilibre pourrait être dû à une insuffisance d'agents stabilisants (amidon modifié ou caséinates), nécessaires pour assurer l'homogénéité des systèmes sans matière grasse.



Figure n°17 : Essai 1 du produit fini

Essai 2

Texture fluide mais stable, visuellement homogène. L'équilibre entre les composants est bien ajusté. Ce résultat suggère une stabilité globale du système.



Figure n°18 : Essai 2 du produit fini.

Essai 3

Produit final bien structuré, sans séparation. La proportion des ingrédients semble favoriser la stabilité du système.



Figure n°19 : Essai 3 du produit fini.

Essai 4

Texture lisse et compacte. L’interaction entre épaississants et agents structurants semble optimale, assurant une tenue agréable du produit en bouche.



Figure n°20 : Essai 4 du produit fini.

Essai 5

Texture légèrement plus ferme. Bien que stable, le produit peut paraître plus pâteux, ce qui pourrait affecter l’acceptabilité sensorielle.



Figure n°21 : Essai 5 du produit fini.

Essai 6

Bonne homogénéité et texture souple. Le système est équilibré et montre une bonne stabilité



Figure n°22 : Essai 6 du produit fini

Essai 7

Texture légère et homogène. L'association des composants semble permettre de maintenir la stabilité sans altérer la légèreté, ce qui est avantageux du point de vue sensoriel.



Figure n°23 : Essai 7 du produit fini

II.3.3. Évaluation sensorielle :

Tableau n°7 : Résultat des analyses sensoriels des 7 essais.

| Formulation | Aspect Visual / homogénéité | Texture en bouche | Goût | Acceptabilité globale |
|----------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Essai 1 | Séparation de phase visible | Liquide, sensation de liquéfaction | Désagréable, peu prononcé | Faible formulation non satisfaisante |
| Essai 2 | Homogène | Onctueuse, sans grumeaux | Doux et neutre | Bonne formulation appréciée |
| Essai 3 | Assez homogène | Correcte | Moyennement agréable | Acceptable |
| Essai 4 | Homogène | Texture lisse et agréable | Goût léger, équilibré | Bonne formulation appréciée |
| Essai 5 | Homogène | Légèrement pâteuse | Goût correct | Moyenne légèrement moins stable |
| Essai 6 | Très homogène | Agréable, bien structurée | Doux, facile à associer | Bonne formulation appréciée |

i. Interprétation

Essais 2, 4 et 6 ont été les plus appréciés, avec une texture agréable, un goût doux et une bonne homogénéité. Essai 1 a été clairement rejeté en raison de sa séparation de phase, de sa texture liquide et d'un goût peu agréable. Essais 3, 5 et 7 sont acceptables, mais avec quelques réserves, notamment une texture plus pâteuse pour l'essai 5 et un goût moins prononcé pour l'essai 3.

ii. Conclusion

Les résultats mettent en évidence l'importance d'un équilibre optimal entre les protéines fonctionnelles, les agents épaisseurs et les stabilisants pour assurer la stabilité et la qualité sensorielle.

Une seule formulation essai 1 a échoué en raison d'un déséquilibre de composition, tandis que plusieurs formulations notamment essais 2, 4 et 6 offrent des performances intéressantes et une bonne acceptabilité globale.

iii. Perspectives

Au regard des résultats obtenus, plusieurs axes de recherche et de développement peuvent être envisagés afin de consolider et d'optimiser la formulation de produits fromagers sans matière grasse :

iii.1 Affinage des formulations

Les formulations jugées satisfaisantes pourraient faire l'objet d'une optimisation fine, en ajustant les proportions des agents texturants et des protéines fonctionnelles, dans le but d'améliorer encore la stabilité, la texture et la sensation en bouche, sans compromettre les propriétés nutritionnelles.

iii.2 Amélioration du profil sensoriel

Des travaux complémentaires pourraient viser à enrichir le profil organoleptique des formulations, notamment par l'ajout d'arômes naturels ou d'extraits protéiques spécifiques, afin de compenser la baisse d'intensité gustative fréquemment observée en l'absence de matière grasse.

iii.3 Études de stabilité à long terme

Il serait pertinent de conduire des tests de stabilité sur des périodes prolongées (température ambiante, réfrigération), afin d'évaluer l'évolution des propriétés physico-chimiques et microbiologiques des produits dans le temps.

II.3.3 Résultat de la rhéologie du produit fini

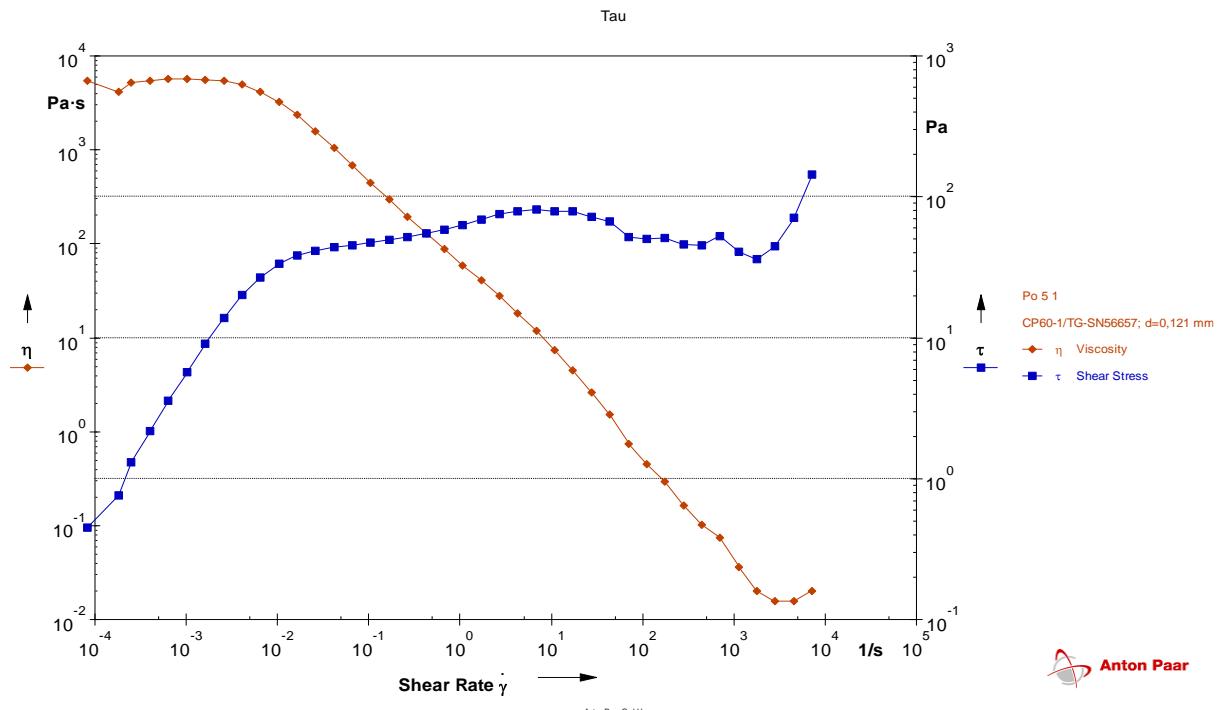


Figure n°24 : courbe d'écoulement

L'analyse rhéologique montre que notre préparation fromagère sans matière grasse présente un comportement pseudoplastique : la viscosité (η , exprimée en Pascal-seconde, Pa·s) diminue nettement avec l'augmentation du taux de cisaillement (γ , exprimé en s^{-1}). La viscosité passe d'environ 180 Pa·s à 0,1 s^{-1} à moins de 5 Pa·s à 100 s^{-1} . Cela signifie que le produit est épais au repos, mais devient plus fluide lorsqu'il est soumis à un cisaillement croissant. Ce comportement, typique des produits alimentaires texturés, est particulièrement utile pour compenser l'absence de matière grasse, en assurant une texture crémeuse en bouche et une bonne aptitude au traitement.

La contrainte de cisaillement (τ , exprimée en Pascal, Pa) augmente avec le taux de cisaillement jusqu'à environ 35 Pa, puis montre un léger plateau, ce qui indique une structure interne souple mais résistante, assurée par des agents structurants intégrés dans la formulation.

Ce profil rhéologique est conforme aux caractéristiques attendues pour une préparation allégée ou sans matière grasse, qui doit rester stable au repostout en étant facile à traiter.

II.3.4. Interprétation des résultats physicochimiques du produit fini

Tableau n °8 : Résultat de l'extrait sec total des 7 essais .

| Essai | Résultat |
|-------|----------|
| E1 | 9.88% |
| E2 | 8.17% |
| E3 | 7.72% |
| E4 | 7.10% |
| E5 | 7.96% |
| E6 | 7.73% |
| E7 | 7.64% |

i. Interprétation

L'extrait sec total (EST) représente la fraction non aqueuse d'un produit, soit la matière restante après évaporation de l'eau. Ce paramètre est lié à la concentration en matière, influençant directement la texture, la consistance ainsi que la stabilité du produit fini.

i.1 Analyse comparative

- **Essai 1** présente la teneur la plus élevée en extrait sec (9,88 %). Cette concentration plus importante peut être à l'origine d'une texture plus dense ou plus épaisse. Toutefois, en l'absence d'un équilibre adéquat entre les composants, elle peut aussi induire une instabilité, comme le confirme l'observation de séparation de phase constatée pour E1.
- **Essai 4**, avec une teneur minimale en extrait sec (7,10 %), pourrait présenter une texture plus fluide ou légère, accompagnée d'un risque de manque de cohésion ou de tenue.
- Les essais **E2 à E7** affichent des valeurs relativement proches, comprises entre 7,64 % et 8,17 %. Cette homogénéité suggère une meilleure cohérence texturale et une stabilité accrue des formulations correspondantes.

i.2 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la majorité des essais présentent une teneur en extrait sec comprise entre **7,10 % et 8,17 %**, une plage favorable à l'obtention d'une texture homogène et stable.

Seul l'Essai 1 se distingue par une valeur nettement plus élevée, corrélée à une instabilité

visuelle manifeste (séparation de phase), mettant en évidence l'importance de l'équilibre de la formule

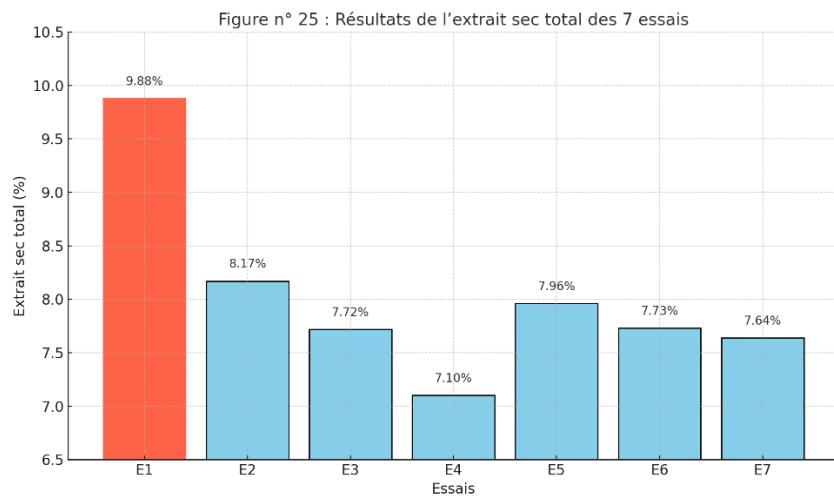


Figure n° 25 : Résultat de l'extrait sec total des 7 essais

Tableau n°9 : Résultat du pH des 7 essais.

| Essai | <u>résultat</u> |
|-------|-----------------|
| E1 | 6.41 |
| E2 | 6.63 |
| E3 | 6.74 |
| E4 | 6.70 |
| E5 | 6.72 |
| E6 | 3.37 |
| E7 | 6.74 |

ii. Interprétation

- **Échantillons E1 à E5 et E7 :**

Les valeurs de pH comprises entre **6,41** et **6,74** indiquent une plage faiblement acide à quasi neutre, généralement conforme aux exigences des formulations alimentaires.

Cette constance témoigne d'une bonne maîtrise du procédé de formulation et d'une absence d'anomalies significatives.

- **Échantillon E6 :**

Le pH mesuré est de **3,37**, révélant une acidité excessive. Une telle valeur peut résulter d'une quantité anormalement élevée d'acide citrique, potentiellement introduite par erreur ou en raison d'un dosage mal calibré. Cette hypothèse est cohérente avec le profil acide observé.

Il est nécessaire de vérifier les étapes de formulation et de contrôler les ajouts d'acidifiants, pour confirmer cette origine.

Conclusion

Les résultats montrent une bonne homogénéité du pH pour l'ensemble des échantillons, à l'exception de l'échantillon E6, dont l'acidité anormalement élevée pourrait être due à un excès d'acide citrique.

Cette non-conformité nécessite une analyse approfondie du processus de formulation et un réexamen des dosages avant toute validation.

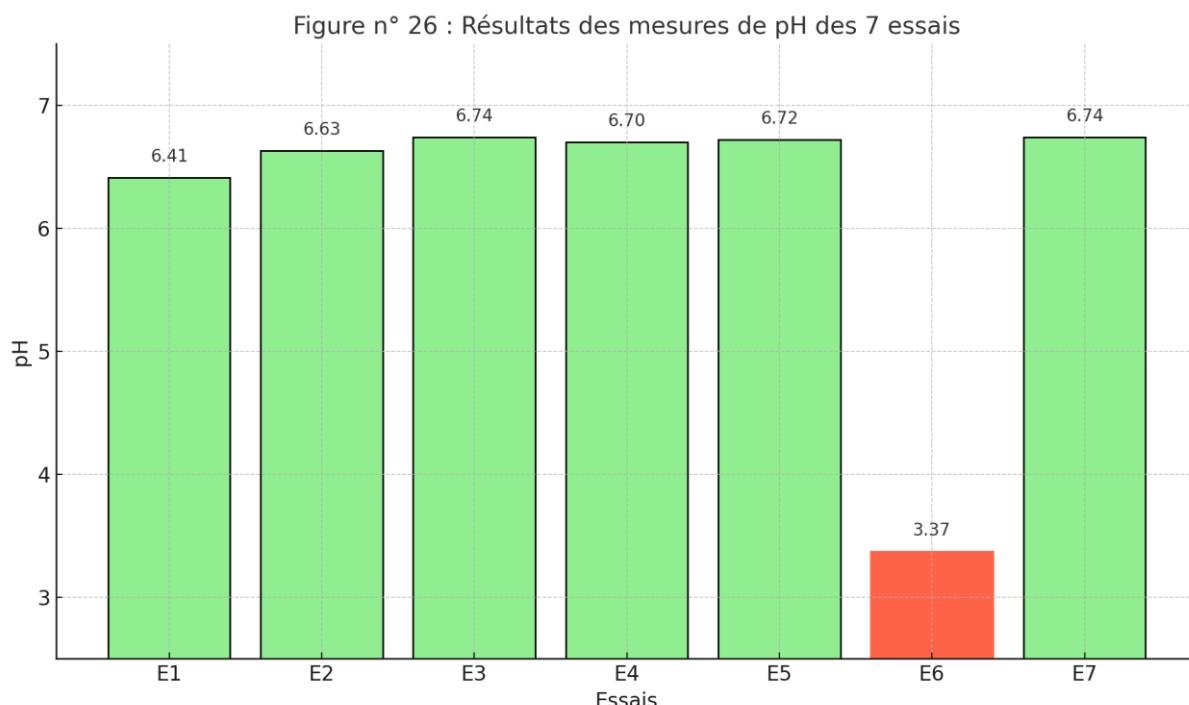


Figure 26 : Résultat du pH des 7 essais

Tableau n°10 : Résultat d'humidité des 7 essais

| Essai | Résultat |
|-------|----------|
| E1 | 90.12% |
| E2 | 91.83% |
| E3 | 92.28% |
| E4 | 92.90% |
| E5 | 92.04% |
| E6 | 92.27% |
| E7 | 92.36% |

iii Interprétation

Les résultats d'humidité, déduits à partir des extraits secs totaux, indiquent une teneur en eau élevée, allant de **90,12 % à 92,90 %.**

Une humidité élevée contribue à conférer à la sauce une texture onctueuse, fluide et légère, ce qui est généralement apprécié d'un point de vue sensoriel et fonctionnel .

Conclusion

La teneur en humidité mesurée est conforme aux attentes.

Toutefois, cette forte proportion d'eau implique :

- La mise en œuvre de conditions de conservation rigoureuses pour limiter les risques microbiologiques,
- Ainsi que le contrôle de la stabilité de la formulation, afin d'éviter toute séparation de phase ou modification indésirable de la texture au cours du stockage.

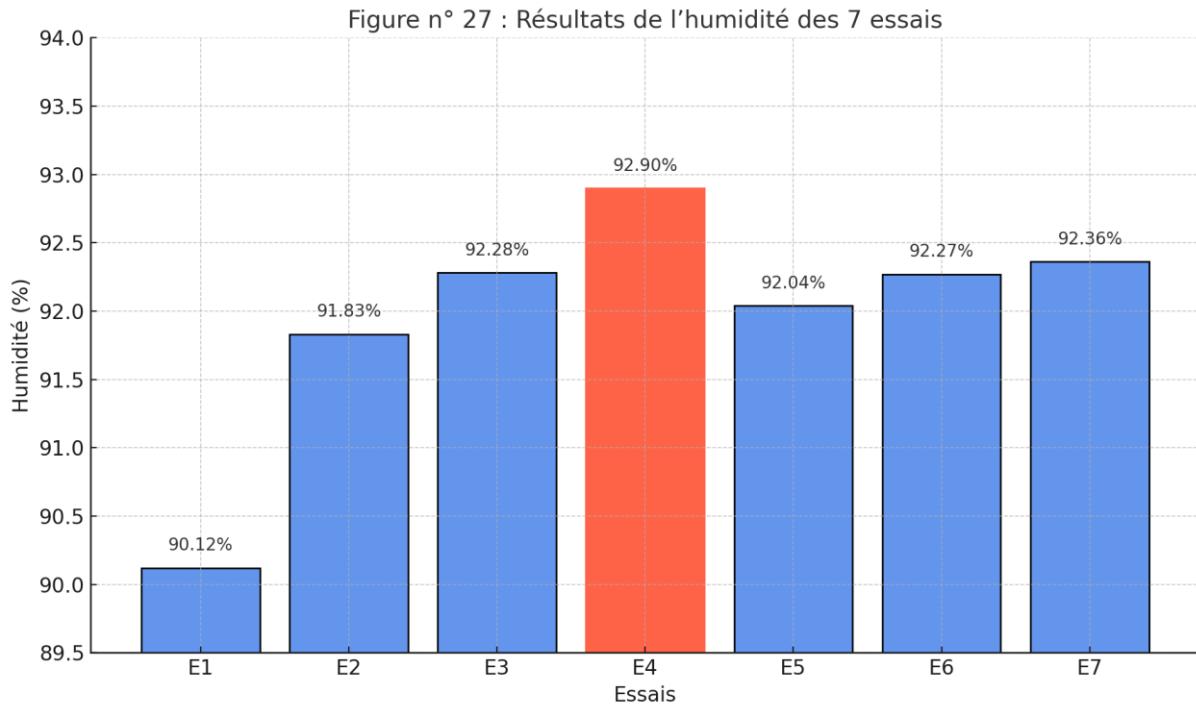


Figure 27 : Résultat de l'humidité des 7 essais

Conclusion

Conclusion

Conclusion

Le développement de produits fromagers sans matière grasse constitue une orientation stratégique majeure pour l'industrie agroalimentaire, dans un contexte où les consommateurs recherchent de plus en plus des aliments sains, équilibrés et pauvres en matières grasses, sans pour autant compromettre le plaisir gustatif ni la qualité des produits. Cependant, la suppression de la matière grasse, ingrédient clé dans la structure et les caractéristiques sensorielles des fromages, entraîne souvent une perte de texture, de saveur, de stabilité et d'acceptabilité globale du produit fini. Il devient donc nécessaire d'identifier des substituts technologiques capables de reproduire les fonctions essentielles de la matière grasse dans ces matrices complexes.

Dans cette optique, l'association de l'amidon modifié et des caséinates offre une solution technologique innovante. L'amidon modifié, grâce à sa capacité de rétention d'eau, d'épaississement et de formation de gels, contribue à restaurer la consistance et la stabilité du produit. De son côté, le caséinate, en tant que protéine fonctionnelle issue du lait, améliore la cohésion de la matrice, apporte une structure homogène et joue un rôle important dans l'émulsification et la stabilisation du réseau fromager. Leur synergie permet donc de créer un environnement fonctionnel proche de celui qui procurait la matière grasse, tout en répondant aux exigences nutritionnelles et sensorielles.

Les résultats obtenus ont mis en évidence que les formulations contenant le mélange fonctionnel (caséinate–amidon modifié), en particulier celles correspondant aux essais 2, 4 et 6, présentaient une texture satisfaisante, une stabilité améliorée, une bonne rétention d'eau ainsi qu'une appréciation sensorielle favorable. Ces résultats confirment le potentiel technologique de cette combinaison en tant que substitut à la matière grasse. Ce mélange d'ingrédients constitue ainsi une alternative technologique et économique intéressante, permettant de remplacer les lipides tout en maintenant des propriétés proches de celles d'un fromage classique. Cette approche répond aux attentes actuelles des consommateurs en matière de santé, sans compromettre la qualité globale du produit.

D'un point de vue économique, ce mélange présente également de nombreux avantages. Il permet non seulement de réduire les coûts de production en remplaçant un ingrédient coûteux comme la matière grasse laitière, mais aussi de valoriser des ingrédients disponibles localement ou issus de coproduits, tels que les dérivés protéiques du lait. Cette approche s'inscrit dans une

Conclusion

logique de durabilité, de rentabilité industrielle, et d'adaptation à la demande croissante en produits laitiers allégés et fonctionnels.

En conclusion, l'étude de l'effet du mélange amidon modifié / caséinates sur un fromage sans matière grasse ouvre des perspectives prometteuses pour la formulation de produits novateurs, équilibrés et techniquement viables. Elle constitue une étape importante vers la conception de fromages allégés alliant qualité nutritionnelle, performance technologique et compétitivité économique.

Pour approfondir cette étude, plusieurs axes de travail peuvent être envisagés. Tout d'abord, l'optimisation des proportions entre l'amidon modifié, les caséinates et les autres ingrédients permettrait d'affiner les propriétés texturales, rhéologiques et sensorielles du produit fini. Ensuite, l'exploration d'autres agents fonctionnels, tels que les fibres alimentaires (comme l'inuline ou la pectine), les protéines végétales (ex. : soja, pois) ou des hydrocolloïdes (gomme xanthane, carraghénane), pourrait contribuer à améliorer à la fois la texture, la stabilité et la valeur nutritionnelle du fromage allégé. Il serait également utile de mener une étude de stabilité sur le long terme, en analysant l'évolution du pH, de la synerèse, de la couleur et de la qualité microbiologique durant la conservation. Sur le plan sensoriel, des tests auprès d'un panel plus large et diversifié (consommateurs non experts) pourraient affiner la formulation en fonction des attentes réelles du marché. Enfin, une transposition à l'échelle pilote ou semi-industrielle devrait être envisagée pour évaluer la faisabilité du processus de production, les coûts réels, et les adaptations nécessaires en conditions industrielles. Ces perspectives s'inscrivent dans une dynamique d'innovation pour développer des produits laitiers allégés alliant qualité, nutrition, accessibilité et durabilité.

**Références
bibliographiques**

Référence bibliographique

Référence bibliographique :

DUDEZ P, FRANOIS M, RAIFFAUD C. Transformer les produits laitiers frais à la ferme : 3e édition mise à jour. Educagri Editions ; 2017. 128 p.

Boudreau A, Ménard G. Le Blé : éléments fondamentaux et transformation. Presses Université Laval ; 1992. 466 p.

Cecil JE. Transformation de l'amidon à petite et moyenne échelle. Food & Agriculture Org.; 1993. 348 p.

Zayas JF. Functionality of Proteins in Food. Springer Science & Business Media; 2012. 383 p.

COUARRAZE G, GROSSIORD JL, HUANG N. Initiation à la rhéologie : Bases théoriques et applications expérimentales. Tec & doc; 2014. 327 p.

Abbas KA, K. Khalil S, Meor Hussin AS. Modified Starches and Their Usages in Selected Food Products: A Review Study. J Agric Sci. 18 mai 2010;2(2):p90.

Stephen AM. Food Polysaccharides and Their Applications. CRC Press ; 1995. 676 p.

Sahore A. Propriétés physico-chimiques et fonctionnelles des tubercules et des amidons d'igname (Dioscorea). Editions Publibook ; 2011. 154 p.

Rousselle P, Robert Y, Crosnier JC. La pomme de terre : Production, amélioration, ennemis et maladies, utilisations. Editions Quae; 1996. 676 p.

Sharanagat VS, Saxena DC, Kumar K, Kumar Y. Starch: Advances in Modifications, Technologies and Applications. Springer Nature ; 2023. 486 p.

Bauer WJ, Badoud R, Löliger J. Science et technologie des aliments : principes de chimie des constituants et de technologie des procédés. EPFL Press ; 2010. 734 p.

Sindic M. Valorisation de l'amidon de blé : Incidences des modalités de culture sur les propriétés technofonctionnelles. Presses Agronomiques de Gembloux ; 2009. 76 p.

El-Bakry M, Mehta BM. Casein: Structural Properties, Uses, Health Benefits and Nutraceutical Applications. Elsevier ; 2024. 427 p.

Thomas C, Romain J, Gérard B. Fondements physicochimiques de la technologie laitière. Lavoisier ; 2008. 179 p.

Guichard E. Texture et flaveur des aliments : Vers une conception maîtrisée. Educagri Editions ; 2012. 302 p.

Référence bibliographique

Guy C, Jean-Louis G, Nicolas H. Initiation à la rhéologie (4^e Éd.) : Bases théoriques et applications expérimentales. Lavoisier ; 2014. 327 p.

Collectif C. Science et technologie du lait. Presses de l'Université Laval ; 2018. 546 p.

Romain J, Thomas C, Michel M, Pierre S, Gérard B. Les produits laitiers (2e ed.). Lavoisier ; 2008. 201 p.

Boudreau A, Ménard G. Le Blé : éléments fondamentaux et transformation. Presses Université Laval ; 1992. 466 p.

Jarrire R, Ruckebusch Y. Nutrition des ruminants domestiques : Ingestion et digestion. Editions Quae ; 1995. 932 p.

Alhalel T, Fréret J, Garrido G, Lacroix A. Physique-Chimie Tle S Spécifique et spécialité : Exercices résolus (Physique et Chimie) - Terminale S. Hatier ; 2013. 548 p.

Greenfield H. Données sur la composition des aliments : Production, gestion et utilisation. Food & Agriculture Org ; 2007. 328 p.

Carey FA, Sundberg RJ. Chimie organique avancée : Structures moléculaires et mécanismes réactionnels. De Boeck Supérieur ; 1996. 844 p.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

Annexe

Annexe 01

Présentation de l'entreprise Promasidor Djazaïr :

1. Historique

Promasidor a été fondée en 1979 par Robert Rose, qui, après avoir quitté le Royaume-Uni en 1957 pour s'installer au Zimbabwe, poursuivit son rêve africain. En tant que directeur d'Allie Lyons Africa pendant plus de 20 ans, il parcourut l'Afrique et acquit une connaissance approfondie de l'industrie alimentaire du continent. Il constata en particulier le manque de lait, un produit nutritif que les pays développés tiennent pour acquis. C'est de cette observation qu'a émergé l'idée et le début de l'aventure de Promasidor. En observant les avancées rapides de la technologie de fabrication du lait en poudre, Robert Rose identifia une opportunité : offrir du lait en poudre de qualité, conditionné en petites quantités dans des sachets individuels. Il découvrit également que remplacer la graisse animale du lait par de la graisse végétale permettait de prolonger sa durée de conservation. Cela signifiait qu'il était désormais possible de distribuer du lait en poudre à travers l'immense continent africain, rendant ainsi ce produit abordable pour la population locale.

Cette vision donna naissance à un concept novateur : la vente de lait en poudre en sachets. En 1979, Promasidor lança la marque Cowbell en République Démocratique du Congo (alors appelée Zaïre). Aujourd'hui, Cowbell est disponible dans la plupart des pays africains.

Promasidor Djazaïr est une entreprise agroalimentaire opérant en Algérie depuis 2002.

Promasidor Djazaïr est connue pour ses marques telles que Loya (lait en poudre), Twisco (chocolat en poudre) et Amila (jus). En 2006, l'entreprise a élargi sa gamme de produits en lançant le bouillon Onga, disponible en plusieurs saveurs, dont poulet, bœuf, mouton et "djouez". En 2016, Promasidor Djazaïr a acquis Priplait Fromagerie, la société commercialisant la marque Le Berbère, spécialisée dans les fromages fondus et les préparations fromagères. Cette acquisition visait à développer le potentiel de la marque Le Berbère en s'appuyant sur le savoir-faire de Promasidor Djazaïr, tout en préservant les emplois des 300 salariés de Priplait.



Annexe 01

Aujourd'hui, Promasidor Djazaïr dispose de trois centres de distribution couvrant les régions Centre, Est et Ouest de l'Algérie, assurant une couverture de plus de 30 000 points de vente à travers le pays.

L'entreprise offre une gamme diversifiée de produits alimentaires et de boissons, visant à satisfaire les besoins des consommateurs algériens leur produit sont:

Loya : Lait entier en poudre enrichi en Forvitacfx98z, un mélange de cinq vitamines essentielles pour une bonne santé. Disponible en divers formats adaptés aux besoins des consommateurs.

Cowbell : Préparation fromagère à la texture onctueuse, offrant une saveur douce et gourmande. Idéale pour toute la famille.

Le Berbère : Fromage au goût doux et à la texture crémeuse, parfait pour enrichir vos plats quotidiens.

Boissons :

Twisco : Boisson chocolatée en poudre, fabriquée à partir de cacao de haute qualité, offrant une délicieuse énergie pour bien commencer la journée.

Amila : Boisson en poudre aux saveurs fruitées, disponible en formats pratiques, apportant joie et fraîcheur au quotidien.

Promacafé : Café instantané de haute qualité, mélange de cafés Robusta et Arabica 100% purs, offrant une expérience caféinée revitalisante à tout moment.

Promasidor Djazair s'engage à offrir des produits de qualité supérieure, conformes aux normes en vigueur. En 2018, des analyses en laboratoire ont confirmé la conformité de leurs produits, assurant ainsi aux consommateurs des produits sûrs et fiables.

2. Infrastructure et Équipements :

L'entreprise Promasidor dispose d'une infrastructure moderne et bien organisée, répondant aux normes internationales de l'industrie agroalimentaire. Ses installations sont conçues pour optimiser la productivité tout en garantissant des conditions d'hygiène et de sécurité strictes. L'ensemble des équipements est régulièrement entretenu et mis à jour afin de suivre l'évolution technologique et les exigences réglementaires.

Annexe 01

2.1. Locaux et installations générales :

- **Bâtiments industriels** : Promasidor possède des unités de production spacieuses, bien ventilées, avec des zones de circulation distinctes pour les matières premières, la production et les produits finis.
- **Zones de stockage** : Des entrepôts spécialisés sont aménagés pour le stockage des matières premières (lait en poudre, additifs, emballages) et des produits finis. Ils sont équipés de systèmes de contrôle de température et d'humidité.
- **Laboratoires de contrôle qualité** : L'entreprise dispose de laboratoires physico-chimiques et microbiologiques modernes, dédiés à l'analyse des produits à chaque étape de la fabrication.

2.2. Équipements de production :

- **Lignes de mélange** : Équipements automatisés permettant le dosage et le mélange homogène des ingrédients (lait, vitamines, minéraux, etc.).
- **Turbines et homogénéisateurs** : Utilisés pour garantir la stabilité et la texture des produits.
- **Tours de séchage** (dans le cas de la fabrication de poudres) : Pour transformer les mélanges liquides en poudre par atomisation.
- **Machines de conditionnement** : Automates pour le remplissage, le scellage et l'étiquetage des produits dans différents formats (sachets, boîtes, pots...).

2.3. Équipements de contrôle et d'hygiène :

- **Systèmes de filtration d'air** : Présents dans les zones de production sensibles afin de prévenir toute contamination.
- **Stations de lavage et désinfection** : Pour assurer le nettoyage des équipements entre chaque cycle de production.
- **Contrôle automatisé des paramètres** : Température, humidité, pression, pH, tous surveillés en temps réel via un système centralisé.

2.4. Moyens logistiques :

- **Véhicules de transport** : Camions équipés pour la livraison des produits finis dans des conditions de conservation optimales.
- **Système de gestion des flux** : Logiciel de traçabilité et de suivi des lots depuis la réception des matières premières jusqu'à la distribution.

3. Localisation :

- **siège régional** : pour la zone Nord-Ouest algérienne.
- **Adresse** : Zone d'activité de Guerrouaou, Route de Boufarik.

Annexe 01

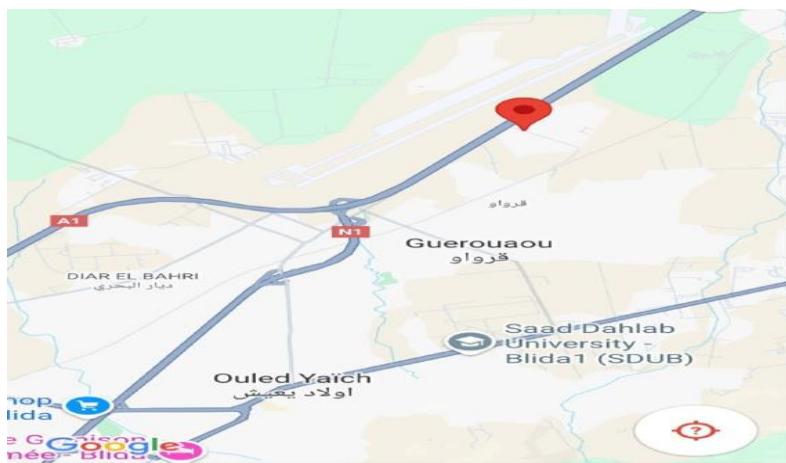
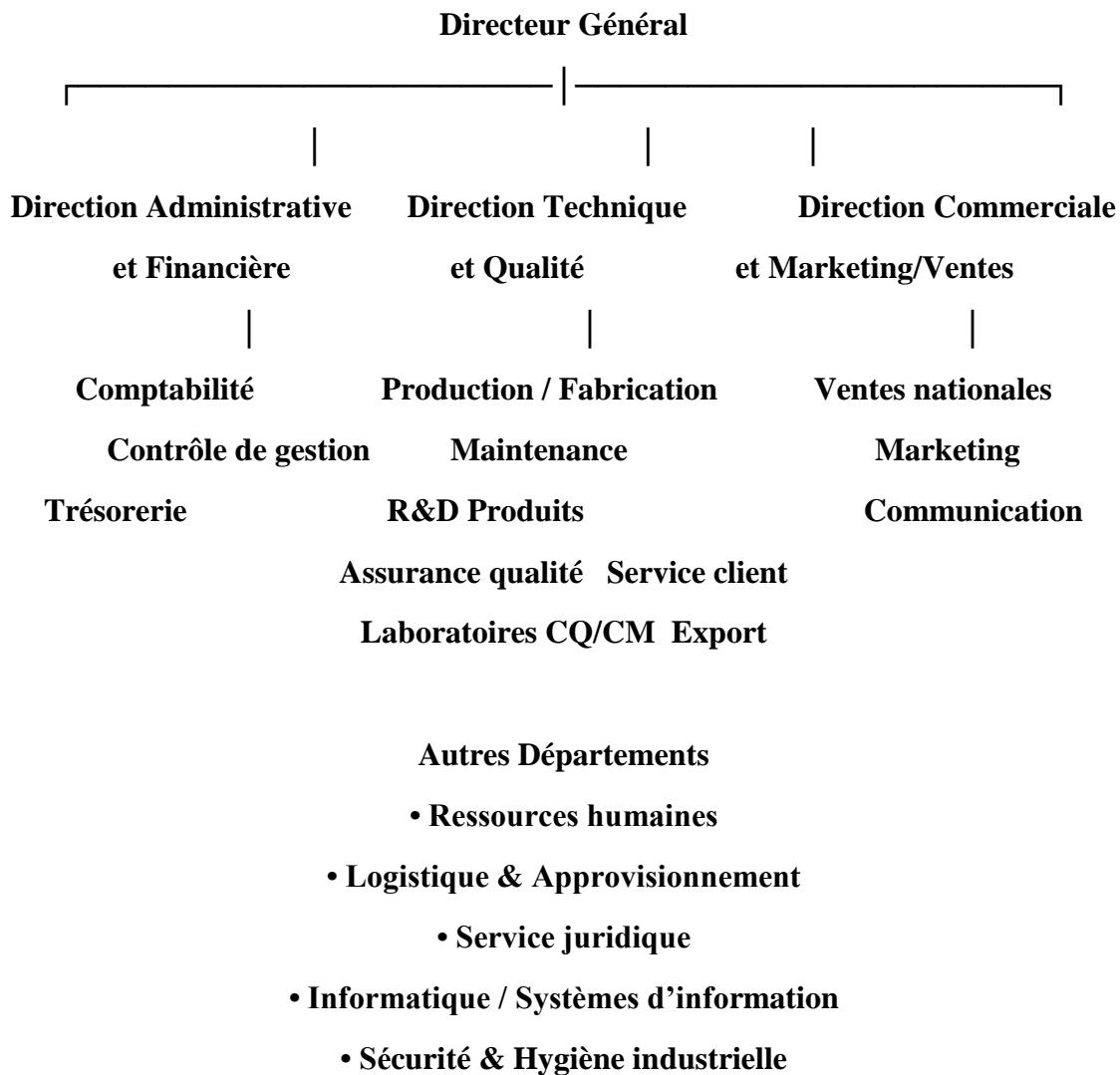


Figure : Localisation de l'entreprise Promasidor Djazaïr (maps, 2025).

4. Organigramme Général de Promasidor :



Annexe 02

Matériel non biologique utilisé dans le cadre expérimental :



Figure 1 : cuillère spatule en inox

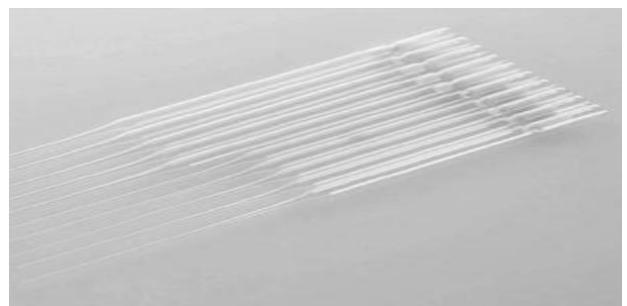


Figure 2 : Pipette pasteur stérile



Figure 3 : Agitateur magnétique



Figure 4 : Centrifugeuse



Figure 5 : Produits de célébration de ph



Figure 6 : pH mètre

Annexe 02

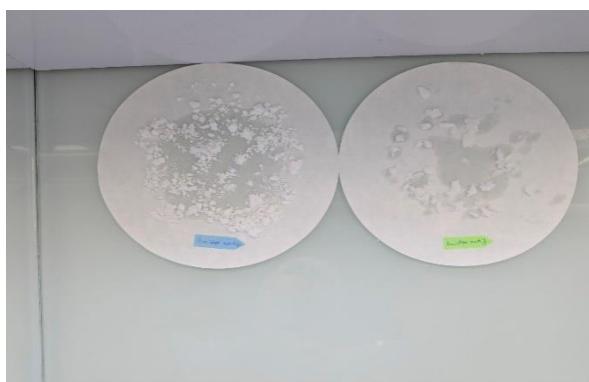


Figure 7 :Papier filtre



Figure 8 : Boite pitre



Figure 10 :Potentiomètre uv

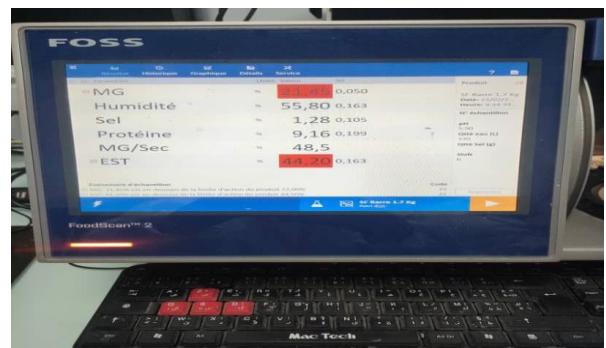


Figure 11 :Appareil FOSS

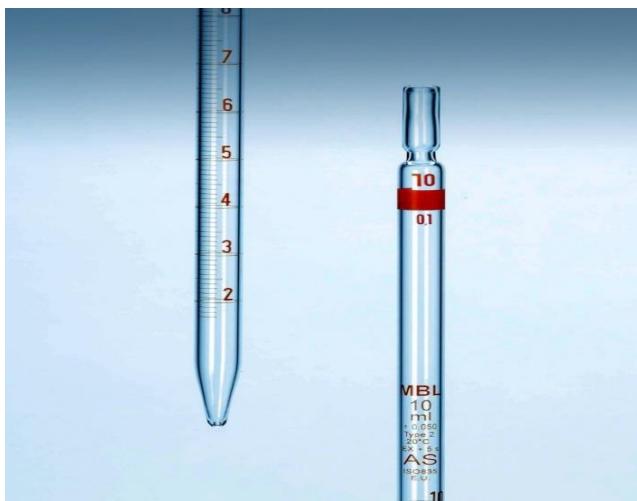


Figure 12 : Pipette gradué



Figure 13 : Pro-pipette

Annexe 02



Figure 14 : Portoir des tubes



Figure 15 : Balance

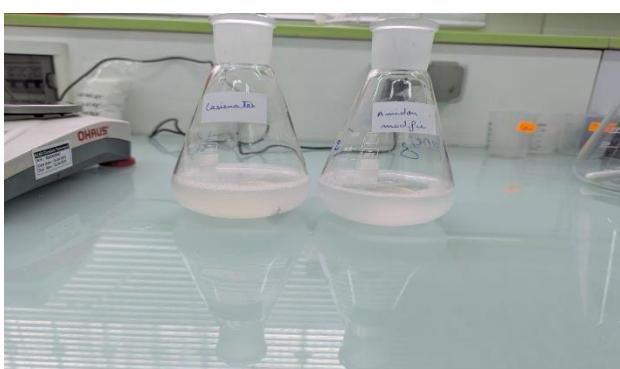


Figure 16 : Erlenmeyer

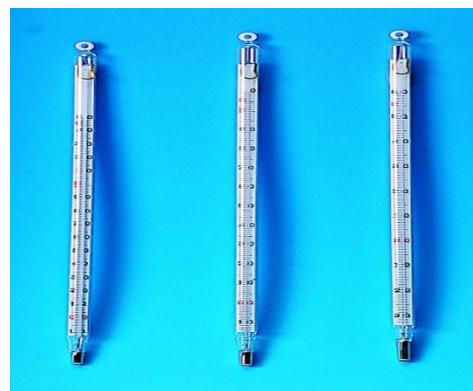


Figure 17 : Thermomètre



Figure 18 : Iso-AMYL ALCOHOL

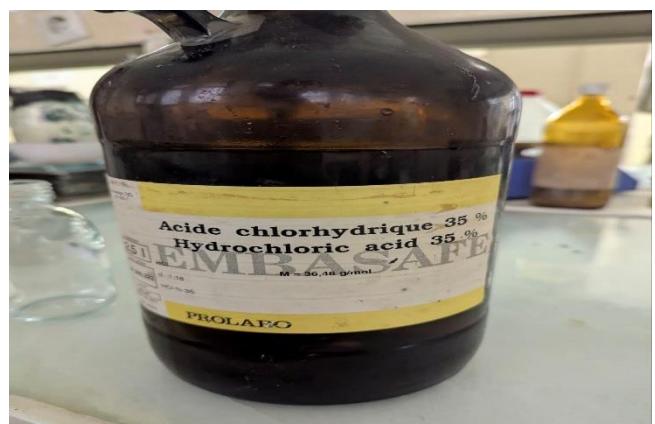


Figure 19 : Acide chlorydrique 35%

Annexe 02



Figure 20 : Etuve



Figure 21 : Bec bunsen



Figure 22 : Bain – marie



Figure 23 : Bécher



Figure 24 : Pissette



Figure 25 : Auto-clave

Annexe 02



Figure 26 : Thermomix



Figure 27 : Gomme xanthane



Figure 28 : Sel de table



Figure 29 : Source de fibre



Figure 30 : Poudre de lait



Figure 31 : Amidon modifié



Figure 32 : Caséinate de sodium

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique

Université de Blida 1

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Sécurité Agroalimentaire et Assurance Qualité

Filière : Sciences Alimentaires

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Thème :

**Effet du mélange amidon modifié et caséinates sur la rhéologie et les caractéristiques
d'une préparation fomagère sans matière grasse**

Réalisé par :

Mlle. OTMANI Nour elhouda

Mlle. BOUDALI Nesrine

Soutenu le 03/07/2025 devant le jury composé de :

Dr. AOUS K.

MCA

Université de Blida 1

Président

Dr. BENLEMMAN S.

MCB

Université de Blida 1

Examinateuse

Dr. REBZANI F.

MCB

Université de Blida 1

Promotrice

Mme .KOUADRI I.

Doctorante

Université de Blida 1

Co-promotrice