

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Alimentaires



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de master académique en Sciences Alimentaires

Spécialité : Agroalimentaire et contrôle de qualité

Thème

**Valorisation du pain rassis : étude comparative des méthodes
D'extraction d'amidon**

Réalisé par :

M^{lle} CHOUARBI Anya

&

M^{lle} TOUMI Nadjat

Membres du jury :

Président	BENGANA Mohamed	MCB	UMMTO
Examinatrice	BENTAYEB Saida	MCB	UMMTO
Encadrante	CHENAH May	MCA	UMMTO

Année universitaire : 2024-2025

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu, qui nous a donné le courage, la patience et la persistance durant toutes ces longues années d'études et nous avoir guidées jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent particulièrement à notre promotrice Mme CHENAH May pour avoir encadré ce travail, Merci pour votre disponibilité, vos conseils, et vos encouragements durant la période de la réalisation de ce travail.

Ce fut un véritable plaisir de travailler à vos côtés.

Nos sincères remerciements s'adressent aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.

A M.BENGANA Mohamed qui fait l'honneur de présider le jury et à Mme BENTYEB Saida qui a accepté d'être examinatrice de ce mémoire.

Un grand merci à tous nos enseignants du département des sciences alimentaires pour tout le savoir qu'ils ont donné durant notre cursus universitaire.

Nous tenons à exprimer ici toute notre reconnaissance aux ingénieurs de labo, spécifiquement Mme BOUAZZOUNI Khadidja et Mme CHAOUCHI Damia, pour leur soutien, leur disponibilité sans faille, ainsi qu'à l'ensemble du personnel du laboratoire de l'université Mouloud Mammeri-bastos- pour leur coopération.

Enfin, nous remercions nos familles, nos proches et amis pour leurs soutiens et leurs patiences durant la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents, dont l'amour inconditionnel et le soutien constant ont été fondations de mon parcours académique.

*A ma seule et unique sœur Syla
dont le soutien indéfectible et l'exemple inspirant m'ont guidée tout au long de mon
parcours.*

à mes deux frères

*Tarik, qui nous a quittés trop tôt et dont la mémoire demeure à jamais dans nos cœurs, et
Mouloud, dont la présence et l'encouragement sont d'une grande importance pour moi*

A ma famille,

*Qui m'a toujours encouragée à poursuivre mes rêves et à croire en moi, je vous remercie pour
votre présence réconfortante et vos précieux conseils.*

Je souhaite également exprimer ma gratitude à mes amis, Anis, Nesrine, Ania, Kaissa,

Thanina, Nadjat, Hadjer, Messad, Amine

*qui ont partagé avec moi les joies et les défis de cette aventure. Votre camaraderie et votre
encouragement ont été d'une grande aide tout au long de ce travail.*

Je souhaite tout particulièrement dédier ce travail à mon binôme Nadjat et à sa famille.

*A toutes les personnes qui ont contribué à mon cheminement, merci pour votre soutien
indéfectible*

Any

Dédicaces

À la mémoire de mon père, mon exemple de force et d'honneur, tu es parti trop tôt, laissant derrière toi un vide immense, mais ton amour, ta rigueur, et les valeurs que tu m'as transmises résonnent encore en moi à chaque étape de ma vie. C'est ton regard exigeant mais rempli de fierté que j'imagine chaque fois que je doute. Ce mémoire, je l'écris avec ton courage.

*Qu'il soit un hommage modeste mais sincère à ce que tu as semé en moi : la persévérance,
L'humilité et le sens du devoir.*

Repose en paix, Papa.

À ma tendre maman, douce étoile de mon ciel, ton absence m'a appris la douleur, mais ton amour m'a appris à résister. Tu étais ce cœur discret, cette main invisible qui caressait mes peurs même quand tu n'étais plus là. C'est à toi que je pense quand je ressens la fatigue, à ton sourire silencieux quand je célèbre une victoire. Tu m'as appris à donner sans attendre et à croire en moi quand tout semblait s'écrouler. Ce travail n'est pas seulement un diplôme, c'est une promesse : celle de continuer à te rendre fière, même depuis l'autre monde.

Repose en paix, maman.

À mes frères : Hakim, Ahmed et Walid mes protecteurs et à mes sœurs : Chabha, Sabrina, Hassina et Raziqa, mes confidentes, vous avez été mes forces silencieuses, mes épaules invisibles dans les tempêtes, mes premières sources de courage et de tendresse. Dans vos regards, j'ai puisé de la confiance, dans votre amour discret mais profond, j'ai trouvé la paix dont j'avais besoin pour continuer. Merci pour vos encouragements, votre patience, vos prières, vos gestes simples mais essentiels. Merci d'avoir toujours été là, même à distance, toujours dans mon cœur, je vous aime fort. À ma belle-sœur Lilia, tu as été une sœur, une amie, une présence douce et un soutien précieux. Merci pour ton écoute, ta patience et ta tendresse.

À mes petits trésors, mes nièces et neveux, vous rires m'ont apporté la lumière quand tout semblait sombre, vos câlins ont adouci ma fatigue, et vos regards innocents m'ont rappelé pourquoi il fallait continuer, toujours.

À vous, mes précieuses amies, Hadjila, Djouher, Kahina, Fatima, Assma, Amina, Messad et Hadjer, dans chaque moment de solitude, vous avez été ma présence. Dans chaque épreuve, vous avez été ma lumière. Vos messages, vos sourires, vos attentions ont souvent dit plus que mille discours. Merci d'avoir partagé mes doutes sans jamais les juger mes larmes sans jamais fuir, et mes réussites comme si elles étaient les vôtres.

À toi, ma précieuse binôme Anya, tu as été bien plus qu'une coéquipière : une alliée, une confidente, une sœur d'âme dans ce long chemin d'étude. Ensemble, on a affronté les défis et on a partagé les doutes, merci pour ta patience, ton écoute, et ta présence indéfectible.

Nadjat

liste des abréviations	
liste des figures	
liste des tableaux	
Introduction.....	1

Synthèse Bibliographique

Chapitre I: État des lieux sur le gaspillage alimentaire

I. Gaspillage et pertes alimentaires dans le monde	3
I.1. Définition et distinction entre perte et gaspillage alimentaire	3
I.2. Statistiques globales sur le gaspillage et les pertes alimentaires dans le monde	3
I.2.1. Statistiques sur le gaspillage alimentaire dans le monde	3
I.2.2. Statistiques sur les pertes alimentaires dans le monde	5
I.3. Impact économique et environnementale du gaspillage alimentaire	5
I.3.1. Impact économique.....	6
I.3.2. Impact environnemental	6
I.4. Production du pain dans le monde	7
I.5. Gaspillage du pain en Algérie	7
I.5.1. Etude locale et statistiques sur le gaspillage du pain en Algérie	8
I.6. Initiative de lutte contre le gaspillage du pain en Algérie.....	9

Chapitre II: Technologie de panification

II.1. Technologie du pain	10
II.2. Ingrédients du pain	10
II.2.1. Farine	10
II.2.2. Agents de fermentation	11
II.2.3. Eau	11
II.2.4. Sel	12
II.3. Composition nutritionnelle du pain.....	12
II.4. Types du pain.....	12
II.4.1. Pains typiques en Algérie.....	13

II.5. Préparation du pain	13
II.5.1. Pétrissage	13
II.5.2. Pointage.....	13
II.5.3. Formage	14
II.5.4. Apprêt	14
II.5.5. Cuisson.....	14
II.6. Rassisement du pain	15
II.7. Rétrogradation de l'amidon	15
II.7.1. Redistribution de l'eau à l'intérieur du pain.....	16

Chapitre III: Amidon et propriétés

III. Amidon	17
III.1. Composition chimique de l'amidon	17
III.1.1. Amylose.....	17
III.1.2. Amylopectine.....	18
III.2. Sources d'amidon	18
III.3. Propriétés physicochimiques de l'amidon	19
III.3.1. Gonflement et solubilité.....	19
III.3.2. Gélatinisation et rétrogradation.....	20
III.3.3. Propriétés de collage	21
III.4. Propriétés rhéologiques	21
III.5. Application de l'amidon	22
III.5.1. Industrie alimentaire	22
III.5.2. Industrie pharmaceutique.....	23
III.5.3. Industrie du papier, textile et autres.....	23

Partie Expérimentale

Matériel et Méthodes

Introduction.....	Erreur ! Le signet n'est pas défini.
IV. Matériel et méthodes.....	24
IV.1. Matériel	24
IV.1.1. Matériel biologique.....	24

IV.1.2. Matériel non biologique.....	24
IV.2. Méthodes.....	24
IV.2.1. Préparation de la poudre du pain rassis	24
IV.3. Méthodes d'extraction de l'amidon.....	25
IV.4. Analyses physico-chimiques de la suspension avant et après alcalinisation	27
IV.4.1. Mesures effectuées avant et après alcalinisation.....	28
IV.4.2. Analyses après alcalinisation	29
IV.5. Analyses physico-chimiques de la pureté de l'amidon extrait lyophilisé.....	30
IV.6. Analyses des propriétés fonctionnelles des amidons extraits	35
IV.7. Analyses structurales des amidons extraits	40
IV.8. Application culinaire à base de pain rassis	42
IV.9. Analyse statistique.....	45

Résultats et Discussion

V. Résultats et discussion.....	46
V.1. Résultats des analyses physico-chimiques de la suspension avant et après alcalinisation	46
V.2. Résultats des analyses physico-chimiques de la suspension après alcalinisation	48
V.3. Résultats des analyses physico-chimiques de la pureté de l'amidon extrait lyophilisé	49
V.4. Résultats des analyses des propriétés fonctionnelles des amidons extraits.....	52
V.5. Résultats des analyses structurales des amidons extraits.....	60
V.5.1. Résultats de l'analyse par spectroscopie à transformée de Fourier	60
V.5.2. Résultats de la DRX.....	62
V.6. Résultats de la préparation culinaire.....	65
Conclusion	68

Références bibliographiques

Annexes

Résumé

°B : Degré Brix

°C : Celsius

µg/ mL : Microgramme par millilitre

ANOVA : Analyses de la Variance

BSA : Sérum Albumine Bovine

CMG : Concentration Minimale de Gélification

CP : Centipoise

CRE : Capacité de Rétention d'Eau

CRH : Capacité de Rétention d'Huile

DO : Densité Optique

DP : Degré de

DRX : Diffraction aux Rayons X

EC : Extraction aqueuse à Chaud

ETA : Extraction aqueuse à Température Ambiante

FAO : Food and Agriculture Organization

FTIR : Spectroscopie à transformée de Fourier

IC : Indice de Compressibilité

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne kHz : Kilohertz

M : Molarité

m/v : Masse sur le volume

ml : Millilitre

MO : Extraction assistée par micro-ondes

MVA : Masse Volumique Apparente

MVT : Masse Volumique Tassée

Na₂CO₃ : Carbonate de sodium

NaCl : chlorure de sodium

NaOH : Hydroxyde de sodium

NTU : Unités de turbidité Néphélométriques

pH : Potentiel d'Hydrogène

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

RS3 : Amidon résistant type 3

TSS : Total soluble solide

US : Extraction assistée par ultrasons

W : Watt

Figure 1: Distinction entre pertes et gaspillages dans la chaîne agroalimentaire.	3
Figure 2: Comportement de l'amidon pendant le rassissement du pain.....	15
Figure 3: Structure chimique de l'amylose	17
Figure 4: Modèle de la structure en grappe de l'amylopectine : (1) régions amorphes. (2) régions cristallines (a) et structure chimique de l'amylopectine (b)	18
Figure 5: Comportement d'un amidon lors de la cuisson et du refroidissement.....	22
Figure 6: Différentes applications de l'amidon dans le secteur alimentaire	23
Figure 7: Diagramme global du protocole expérimental de l'extraction de l'amidon du pain.....	26
Figure 8: Résumé graphique du dispositif expérimental	27
Figure 9: Synthèse graphique des paramètres de pureté évalués sur les amidons extraits	34
Figure 10: Synthèse graphique des paramètres des propriétés fonctionnelles.....	40
Figure 11: Fiche de dégustation.....	44
Figure 12: résultats de l'analyse spectroscopique FTIR des amidons issus du pain rassis selon quatre procédés d'extraction.....	61
Figure 13: Spectres de diffraction des rayons X des amidons extraits du pain rassis par différentes méthodes	63

Tableau 1: Estimation du gaspillage alimentaire mondiale en 2022	4
Tableau 2: Différents types de farines de blé en fonction du taux de cendre	10
Tableau 3: Composition moyenne en amidon de différentes origines végétales	19
Tableau 4: Résultats des analyses physico-chimiques après alcalinisation	46
Tableau 5: Résultats des analyses physico-chimique après alcalinisation	48
Tableau 6: Résultats des analyses de la pureté de l'amidon extrait	50
Tableau 7 : résultats des propriétés fonctionnelles de l'amidon extrait du pain rassis.....	53
Tableau 8: indices de cristallinité des amidons extraits de pain rassis selon différentes méthodes d'extraction	64
Tableau 9: Résultats de dégustation de la préparation culinaire	65

Introduction

Introduction

Le gaspillage alimentaire est un enjeu préoccupant qui interpelle les consciences collectives face à la nécessité de gérer durablement les ressources. Chaque année, d'importantes quantités de nourriture sont gaspillées, créant un paradoxe saisissant dans un monde où des millions de personnes souffrent encore de la faim **(PNUE, 2024)**.

Selon le rapport sur l'indice du gaspillage alimentaire 2024 du Programme des Nations Unies pour l'Environnement **(PNUE)**, environ 1,05 milliard de tonnes de nourriture ont été gaspillées en 2022, soit une moyenne stupéfiante de 132 kilogrammes par habitant **(PNUE, 2024)**.

Parmi les produits concernés par ce fléau, le pain, en tant qu'aliment de base à forte valeur symbolique dans de nombreuses cultures méditerranéennes, fait pourtant partie des produits les plus gaspillés, en particulier dans les pays arabes du pourtour méditerranéen **(Capone et al., 2016)**.

En Algérie, les habitudes de consommation et le faible coût du pain favorisent son achat excessif, ce qui en fait l'un des produits les plus fréquemment jetés. Le gaspillage du pain atteint des proportions alarmantes, avec des pertes financières estimées à plus de 15 milliards de dinars algériens **(AND, 2022)**. Ce pain gaspillé, souvent perçu comme une ressource gaspillée sans valeur, constitue en réalité une ressource riche en potentiel. Loin d'être un simple produit périmé, il conserve une grande partie de ses composants nutritifs et fonctionnels. Sa transformation, plutôt que son élimination, s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire visant à minimiser le gaspillage et à maximiser l'utilisation des ressources.

La valorisation du pain rassis représente ainsi une approche innovante pour réduire l'empreinte écologique de la production alimentaire, tout en développant de nouveaux produits à valeur ajoutée, dans cette perspective, l'extraction de composants fonctionnels issus de ce sous-produit représente une voie prometteuse pour leur réutilisation dans diverses applications industrielles. Au cœur de la structure du pain se trouve l'amidon, un polysaccharide complexe qui constitue une source majeure d'énergie dans l'alimentation humaine. Cette molécule, composée d'amylose et d'amylopectine, joue un rôle important dans les propriétés fonctionnelles du pain : texture, gélatinisation, rétrogradation et rétention d'eau **(van Rooyen et al., 2023)**.

L'extraction de l'amidon à partir du pain rassis offre une stratégie prometteuse pour convertir une ressource gaspillée en une ressource fonctionnelle. Ce processus permet d'obtenir un amidon purifié, réutilisable dans plusieurs secteurs industriels, notamment l'agroalimentaire, la pharmaceutique et la cosmétique. Les méthodes d'extraction disponibles, allant des procédés classiques aux techniques innovantes, influencent fortement la qualité et les propriétés de l'amidon obtenu, en raison des mécanismes physico-chimiques mis en jeu.

Afin de valoriser une ressource souvent gaspillée, le pain rassis, cette étude s'est intéressée à l'optimisation de l'extraction d'un composé à fort potentiel, l'amidon, en comparant l'efficacité de quatre méthodes d'extraction : l'extraction à l'eau à température ambiante, l'extraction à l'eau chaude, l'extraction assistée par ultrasons et l'extraction assistée par micro-ondes.

L'évaluation portera sur la pureté de l'amidon extrait, ainsi que sur ses propriétés physico-chimiques, fonctionnelles et structurales. Une application culinaire directe du pain rassis a également été tentée, dans l'optique de créer un produit alimentaire à partir de cette matière première revalorisée.

Synthèse Bibliographique

Chapitre I
État des lieux sur le
gaspillage alimentaire

I. Gaspillage et pertes alimentaires dans le monde

I.1. Définition et distinction entre perte et gaspillage alimentaire

Le gaspillage alimentaire fait référence à « toute nourriture destinée à la consommation humaine qui, à une étape de la chaîne alimentaire, est perdue, jetée, dégradée » (Velmuradova, 2022). Il fait référence à des causes comportementales souvent volontaires, révélant des décisions humaines.

Une perte alimentaire résulte d'un ensemble de facteurs involontaires liés aux procédés agricoles (comme la récolte ou le tri), ou à des limitations techniques telles que le stockage, l'infrastructure ou l'emballage, autrement dit, les pertes alimentaires sont principalement liées à des facteurs techniques ou structurels tout au long de la chaîne de production, tandis que le gaspillage découle de choix décisionnels, comme les politiques de distribution ou les habitudes de consommation (Darrieu, 2016).

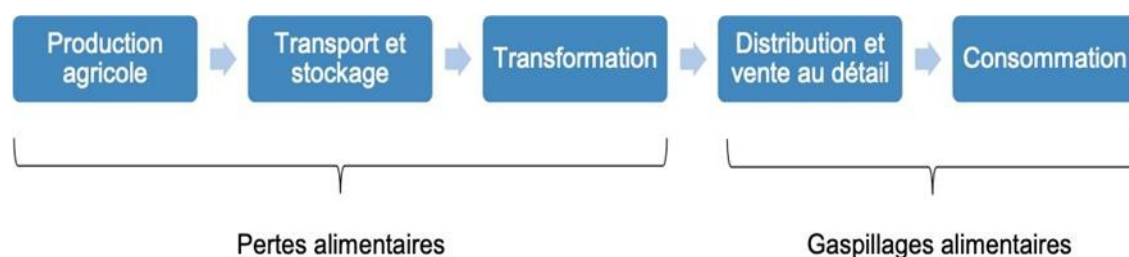


Figure 1: Distinction entre pertes et gaspillages dans la chaîne agroalimentaire (Darrieu, 2016).

I.2. Statistiques globales sur le gaspillage et les pertes alimentaires dans le monde

I.2.1. Statistiques sur le gaspillage alimentaire dans le monde

En 2022, le monde a gaspillé 1,05 milliard de tonnes de nourriture, cela représente 19 % de la nourriture disponible pour les consommateurs, au niveau du commerce de détail, des services alimentaires et des ménages. Cela s'ajoute aux 13 % de nourriture perdue dans le monde, de la post-récolte jusqu'à la vente au détail (PNUE, 2024).

L'analyse des données du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) en 2024 révèle une estimation préoccupante du gaspillage alimentaire mondial en 2022, le tableau I met en lumière la répartition de ce gaspillage à travers différents secteurs de la chaîne alimentaire.

Tableau 1: Estimation du gaspillage alimentaire mondiale en 2022 (PNUE, 2024)

Secteurs	Moyen mondial de gaspillage (kg/ habitant/ an)	Gaspillage total en 2022 (en millions de tonnes)	Taux (%)
Ménages	79	631	60
Services alimentaires	36	290	28
Vente au détail	17	131	12
Total	132	1052	100

Il apparaît clairement que le secteur des ménages est le principal contributeur au gaspillage alimentaire à l'échelle mondiale. En effet, la moyenne mondiale de gaspillage au niveau des foyers s'élève à 79 kg par habitant et par an avec une part de 60%.

Le secteur services alimentaires, comprenant les restaurants, les cantines et autres établissements similaires, arrive en deuxième position avec une moyenne de 36 kg gaspillés par habitant et par an, soit 290 millions de tonnes au total, ce qui représente 28% du gaspillage mondial.

Enfin, le secteur de la vente au détail, incluant les supermarchés et les commerces alimentaires, est responsable d'un gaspillage moyen de 17kg par habitant et par an, totalisant 131 millions de tonnes et représentant 12% du gaspillage global.

En considérant l'ensemble de ces secteurs, la moyenne mondiale de gaspillage alimentaire atteint 132 kg par habitant et par an, ce qui se traduit par un chiffre impressionnant de 1052 millions de tonnes de nourriture gaspillée à l'échelle mondiale en 2022. Cependant, ce gaspillage n'est pas réparti de manière uniforme à travers le monde. Selon le rapport du PNUE (2024), il est particulièrement important dans plusieurs pays d'Afrique comme le Nigeria, la Tanzanie ou la République démocratique du Congo, ainsi qu'au Moyen-Orient (Arabie Saoudite, Liban), avec des moyennes comprises entre 100 et 190 kg par personne et par an. En volume total, la Chine et l'Inde comptent aussi parmi les plus gros contributeurs mondiaux.

Face à ces chiffres alarmants, des actions urgentes à tous les niveaux sont indispensables. Diminuer ce gaspillage est essentiel pour limiter ses conséquences néfastes sur l'économie, la société et la planète (PNUE, 2024).

I.2.2. Statistiques sur les pertes alimentaires dans le monde

Les statistiques montrent que les pertes alimentaires sont réparties de manière inégale selon les régions, l'Asie du Sud-Est, l'Afrique Subsaharienne et l'Asie centrale et du Sud sont les régions les plus touchées, avec respectivement 45 %, 42% et 39 % des pertes alimentaires mondiales. L'Europe et l'Amérique du Nord représentent 34% et 30% des pertes alimentaires mondiales (PNUE, 2024), en termes de quantité :

- Asie du Sud-Est : 520 millions de tonnes
- Chine : 260 millions de tonnes
- Inde : 230 millions de tonnes
- États-Unis : 140 millions de tonnes
- Europe : 100 millions de tonnes
- États-Unis : 140 millions de tonnes
- Europe : 100 millions de tonnes

En Afrique du Nord, l'Algérie est également concernée par les pertes alimentaires. Selon une étude du Centre de Recherche en Économie Appliquée pour le Développement (CREAD, 2018), ces pertes surviennent à différents stades de la chaîne d'approvisionnement, notamment lors des étapes de production, de récolte, de stockage, de transformation et de distribution. Le rapport souligne que ces pertes sont principalement dues à des pratiques agricoles inadaptées, à des techniques de récolte peu performantes, à des infrastructures de stockage insuffisantes, ainsi qu'à une faible capacité de transformation locale. Toutefois, le rapport insiste également sur l'insuffisance de données quantitatives fiables permettant d'évaluer avec précision l'ampleur réelle de ces pertes. Cette absence de données consolidées constitue un obstacle à la mise en place de politiques publiques efficaces de réduction des pertes alimentaires.

I.3. Impact économique et environnementale du gaspillage alimentaire

Le gaspillage alimentaire est un problème à plusieurs échelles avec des conséquences environnementales, sociales et économiques étroitement liées. En d'autres termes, la réduction du gaspillage alimentaire peut réduire les impacts environnementaux et économiser les ressources appartenant aux populations les plus vulnérables et marginalisées (Read & Muth, 2021).

L'impact environnemental et économique du gaspillage alimentaire est une préoccupation croissante, d'autant plus que le changement climatique aggrave l'insécurité alimentaire. Malgré les perturbations de la production alimentaire, de grandes quantités de nourriture sont gaspillées à différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement (IFDI, 2024).

I.3.1. Impact économique

Le gaspillage alimentaire engendre des pertes économiques considérables, estimées à 1000 milliards de dollars par an à l'échelle mondiale. Environ 394 milliards de dollars sont directement attribués à la nourriture gaspillée, auxquels s'ajoutent des coûts indirects tels que 150 milliards de dollars liés à des problèmes de santé provoqués par une mauvaise répartition et une qualité inégale des ressources alimentaires, ces dépenses concernent principalement les maladies liées à une mauvaise alimentation, comme l'obésité ou les carences, qui sont amplifiées par le gaspillage et la mauvaise gestion des ressources. Le reste de cette estimation correspond à des coûts indirects moins visibles, mais tout aussi significatifs, liés aux impacts environnementaux, sociaux et économiques globaux du gaspillage. De plus, le gaspillage alimentaire contribue à l'augmentation des prix des produits alimentaires, et impose un fardeau économique aux entreprises, gouvernements et ménages, nécessitant des investissements dans la gestion des déchets et des politiques de réduction. Limiter ce gaspillage est fondamental pour réduire les pertes économiques et promouvoir un système alimentaire plus durable (IFDI, 2024).

I.3.2. Impact environnemental

La production des aliments qui ne seront pas consommés entraîne irrémédiablement la production de gaz à effet de serre, directement par la chaîne d'approvisionnement elle-même et indirectement par les infrastructures d'élimination des déchets (Schneider, 2013).

Selon une étude de la Commission européenne, une réduction du gaspillage alimentaire de 20 % entre 2016 et 2025 signifierait une baisse des émissions de carbone de 44 Mt de CO₂ (Masson *et al.*, 2016).

En outre, à cause des aliments non consommés, les impacts environnementaux comprennent d'importantes émissions de gaz à effet de serre (8 à 10 % des émissions mondiales), le gaspillage de l'eau (un quart de l'utilisation mondiale d'eau douce) et la dégradation des terres (28 % des terres agricoles) (IFDI, 2024).

I.4. Production du pain dans le monde

La production mondiale de pain et de petits pains était estimée à environ 90,8 millions de tonnes selon **Capone et al. (2016)**. Cette production aurait connu une augmentation d'environ 10 %, notamment en raison de la croissance démographique mondiale et de la hausse de la consommation de pain en Chine et en Extrême-Orient. On peut ainsi estimer la production à environ 100 millions de tonnes ces dernières années (**Kumar & Longhurst, 2022**).

I.5. Gaspillage du pain en Algérie

Le pain, aliment de base dans la culture alimentaire algérienne, fait malheureusement l'objet d'un gaspillage massif. Ce gaspillage a des conséquences économiques importantes, notamment en raison de la dépendance de l'Algérie aux importations de blé. Chaque baguette jetée représente une perte de ressources précieuses dans un contexte marqué par des défis liés à l'approvisionnement en céréales (**Negm & ElZein, 2024**). Les principales raisons de ce gaspillage sont le prix réglementé auquel le pain est vendu aux consommateurs depuis 1996 (7,50 DZD pour une baguette de 250 g), ainsi que la mauvaise qualité du pain (l'utilisation d'additifs, pétrissage intensif) qui accélère son rassisement et le rend impropre au stockage à long terme (**Negm & ElZein, 2024**).

Environ 600 tonnes de pain sont gaspillés sur l'ensemble du territoire national. Ce qui est l'équivalent d'un milliard de baguettes jetées chaque année pour les Algériens. Ce chiffre frappant ressort d'une enquête menée par l'Agence National des Déchets (AND), sur la base d'un suivi quotidien, sans toutefois tenir compte des quantités rapportées dans les points de collecte tels que les boulangeries, les restaurants, les fast-foods, les hôpitaux, etc. Selon un rapport du ministère de l'intérieur, plus d'un million de kilogrammes de pain ont été gaspillés entre le 13 avril et le 2 mai 2021, sur l'ensemble du territoire national, soit l'équivalent de quatre millions de baguettes gaspillées en l'espace de 20 jours seulement (**Negm & ElZein, 2024**).

Ce gaspillage est accentué par l'absence de culture de la consommation responsable, ce qui complique la gestion des déchets alimentaires. Sans compter que le pain, fabriqué à partir de blé importé en devises étrangères, représente une perte sèche pour le pays (**Hocine & Sebbache, 2018**). Cependant, le pain jeté a aussi permis de créer des emplois informels : des jeunes le collectent dans les décharges publiques pour le revendre aux éleveurs de bétail et de volaille.

I.5.1. Etude locale et statistiques sur le gaspillage du pain en Algérie

En Algérie, le pain figure parmi les produits alimentaires les plus concernés par le gaspillage. Selon une enquête menée par l'Agence Nationale des Déchets (AND) en 2021-2022 auprès de 303 familles dans 9 wilayas, 14 % des achats alimentaires concernent le pain, dont 18 % ne sont pas consommés. Cela représente en moyenne 7,13 kg de pain jeté par personne par an, soit environ 29 baguettes de 250 g par individu. Extrapolée à l'échelle nationale, cette tendance correspond à 227 906 tonnes de pain gaspillées chaque année, soit environ 914 millions de baguettes, ce qui équivaut à près de 5 % de la production nationale. Le gaspillage moyen par ménage est estimé à 505 pains par an, le phénomène s'accroît particulièrement durant le mois de Ramadan, période de forte consommation. Toujours selon l'AND, environ 50 millions de pains sont produits chaque jour pendant ce mois, dont près de 2,1 % ne sont pas consommés, soit plus d'un million de pains gaspillés quotidiennement. L'étude souligne également que 63 % des familles interrogées ne conservent pas le pain non consommé au-delà d'une semaine, révélant un manque d'habitudes de conservation ou de valorisation du pain à domicile (AND, 2022).

Ces constats sont corroborés par les données du ministère du Commerce, rapportées par **Benabdallah & Boudour (2022)**, durant les douze premiers jours du Ramadan 2021 (du 13 au 24 avril), 535 tonnes de pain ont été gaspillées au niveau national, soit 2 139 884 baguettes, ce qui représente une moyenne de 45 tonnes par jour, ou 178 323 pains quotidiens. Ce gaspillage correspond à une perte financière estimée à 20 millions de dinars algériens sur cette courte période.

D'un point de vue plus global, **Negm & ElZein (2024)** soulignent que le pain est particulièrement vulnérable au gaspillage en raison de sa forte disponibilité, de son faible coût dû à la subvention, et de l'absence de pratiques de conservation domestique. Malgré les efforts de sensibilisation menés localement, les quantités gaspillées restent élevées, notamment durant les périodes de surconsommation comme le Ramadan. Un rapport du ministère de l'Intérieur, relayé par les auteurs, indique que le phénomène persiste dans de nombreuses wilayas, en dépit des mesures de suivi et de coordination mises en place par les autorités locales.

L'ensemble de ces données met en évidence l'ampleur et la complexité du gaspillage du pain en Algérie, et souligne l'urgence d'adopter des stratégies concrètes de sensibilisation, d'éducation à la consommation responsable et de valorisation des invendus.

I.6. Initiative de lutte contre le gaspillage du pain en Algérie

Pour lutter contre le gaspillage du pain en Algérie, plusieurs initiatives se sont développées ces dernières années. Parmi elles :

- Des collectes de pain invendu sont organisées pour le recycler en alimentation animale ou en compostage (**JNE, 2022**).
- Des campagnes de sensibilisation ont été mises en place, visant à encourager les citoyens à adopter une consommation plus responsable et à réduire les excès (**Le Courrier d'Algérie, 2021**).
- Certaines boulangeries ont également pris des mesures en diminuant leur production quotidienne pour éviter les surplus non vendus (**Algérie360, 2023**).
- À l'échelle locale, certaines directions de l'environnement, en collaboration avec NetCom, ont distribué des livrets de recettes anti-gaspillage à base de pain rassis, afin d'encourager les ménages à réutiliser le pain au lieu de le jeter (**El Watan, 2021**).
- Le ministère du Commerce et l'AND ont également diffusé des SMS de sensibilisation auprès des citoyens, tels que « *Le pain est un bienfait, n'en faites pas une malédiction* » ou « *Évitons le gaspillage alimentaire pour réduire nos déchets et protéger notre environnement* ». Ces messages ont été complétés par des spots télévisés pendant le mois de Ramadan (**JNE, 2022**).

Ces efforts montrent la volonté collective de combattre un gaspillage qui impacte à la fois l'économie et l'environnement.

Chapitre II

Technologie de panification

II.1. Technologie du pain

Selon le Journal Officiel de la République Algérienne (**JORA, 1991**), le pain est défini comme le produit de la cuisson dans un four, selon les règles d'hygiène et de sécurité, d'une pâte pétrie composée de farine de blé tendre, d'eau potable, de sel, de levure ou de levain, et éventuellement d'adjuvants autorisés. Le pain a une texture unique et se compose de deux couches distinctes, une "croûte" extérieure dure qui entoure la « mie » intérieure, molle et poreuse (**Chen et al., 1997**).

II.2. Ingrédients du pain

II.2.1. Farine

La farine est la principale matière première dans la fabrication du pain, car elle module les caractéristiques spécifiques des produits de boulangerie. Parmi les farines de céréales, celle du blé (essentiellement le blé tendre) est unique dans sa capacité à former une pâte panifiable lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau. Sa composition spécifique est très importante en raison de son influence majeure sur la fermentation, ainsi que sur la structure physique de la pâte et du pain final (**Bossou, 2022**). Il existe six types de farines de blé, présentés dans le tableau II.

Tableau 2: Différents types de farines de blé en fonction du taux de cendre (Godon, 1991)

Types de farines	Dénomination	Taux de cendre de la farine (% de matières sèches)
Farines blanches	Type 45	< 0,5
	Type 55	0,5 à 0,60
	Type 65	0,62 à 0,75
Farines bises	Type 80	0,75 à 0,90
	Type 110	1 à 1,20
Farines complètes	Type 150	> 1,40

La farine de blé la plus commercialisée est le type 55, correspondant à un taux de cendres compris entre 0,5 et 0,6 %, soit un résidu minéral de 0,5 à 0,6 g après incinération de 100 g de farine sèche (**Godon, 1991**).

Les Utilisations des types de farine sont comme suit :

- Type 45 : pâtisserie
- Type 55 : pains blancs, pâtes à tarte, pizzas
- Type 65 : pains spéciaux, certaines pizzas
- Type 80 : pains spéciaux, farine semi-complète
- Type 110 : pains bis et complets
- Type 150 : pain intégral au son

II.2.2. Agents de fermentation

- **Levure de boulangerie**

La levure de boulangerie (*saccharomyces cerevisiae*) est un champignon microscopique unicellulaire, capable de vivre selon deux modes de respiration : en présence d'oxygène (respiration aérobie), elle produit de l'eau, du dioxyde de carbone et de l'énergie ; en absence d'air (fermentation anaérobie), elle génère de l'alcool éthylique, du dioxyde de carbone et de l'énergie (Bossou, 2022).

Cette levure métabolise les sucres fermentescibles (glucose, fructose, saccharose et maltose) en conditions anaérobies, produisant du dioxyde de carbone qui agit comme agent de levée et améliore le volume de la pâte (Bossou, 2022).

- **Levain**

Le levain est une pâte composée de farine de blé (tendre) ou/et de seigle et d'eau, soumise à une fermentation naturelle acidifiante grâce à des levures (sauvages) et des bactéries lactiques. C'est un agent naturel dont l'activité fermentescible (notamment lactique) est significative pour assurer le développement, l'acidification et la levée du pain (Bossou, 2022).

II.2.3. Eau

L'eau est indispensable à la préparation de la pâte. Elle en assure la fluidité, provoque le gonflement des grains d'amidon, l'assouplissement du gluten, et permet l'activité des levures. Elle est nécessaire à la dissolution du sel et des sucres, à la dispersion des cellules de levure, à l'hydrolyse de l'amidon et du saccharose, ainsi qu'à la gélatinisation de l'amidon lors de la cuisson. Elle active également les enzymes et favorise la formation de nouveaux liens entre les macromolécules présentes dans la farine, influençant ainsi les propriétés rhéologiques de la pâte (Bossou, 2022).

II.2.4. Sel

Le sel, ingrédient courant en panification, fait partie intégrante de la pâte. Il agit comme inhibiteur des activités enzymatiques, ralentit l'action des oxydases, et joue un rôle important dans le goût. Le sel utilisé est du chlorure de sodium (NaCl), incorporé dès le début du pétrissage. Son taux d'addition recommandé est de 2 g pour 100 g de farine. Le sel a également une fonction technologique importante dans la production du pain (**Bossou, 2022**).

L'ion sodium est responsable de la perception salée, mais il améliore aussi la perception du goût sucré et peut atténuer certaines saveurs désagréables (amertume, goût métallique, etc.) (**Crucean, 2019**).

II.3. Composition nutritionnelle du pain

Le pain constitue un aliment de base dans de nombreuses cultures, mais sa composition nutritionnelle reste parfois sous-estimée (**Saulnier et al., 2014**).

En moyenne, 100 grammes de pain blanc apportent environ :

- 8,4 g de protéines,
- 2,7 g de fibres alimentaires,
- 1,9 g de lipides,
- Et environ 49,3 g de glucides, principalement sous forme d'amidon, un glucide complexe à digestion lente (**Cauvain, 1998 ; Roy, 2022**).

Ces éléments nutritionnels varient selon le type de pain (complet, blanc, aux céréales...), la farine utilisée, ainsi que les ingrédients additionnels (sel, sucre, matières grasses, etc.) (**Saulnier et al., 2014**).

II.4. Types du pain

Il existe une grande diversité de pains consommés dans le monde. Parmi eux, on peut citer : le pain azyne, le pain à pâte aigre, le pain français, le pain brun et complet, le pain au germe de blé, le pain à haute teneur en protéines, le pain à haute teneur en fibres, le pain multicéréales, le pain à grains tendres, le pain multicéréales ethnique, ou encore le pain minceur (**Carocho et al., 2020**).

Cette diversité témoigne des nombreuses tentatives de l'humanité pour adapter le pain aux besoins nutritionnels, culturels et religieux, en montrant comment cet aliment de base a traversé les époques, influencé les sociétés et participé aux enjeux de santé (**Carocho et al., 2020**).

II.4.1. Pains typiques en Algérie

Selon le Journal Officiel de la République Algérienne (**JORA, 1991**), on distingue :

- Le pain courant,
- Le pain courant amélioré,
- Les pains spéciaux.

Parmi ces derniers figurent : le pain viennois dit « scoubidou » et « mahonnais », le pain viennois dit « sanhoudj », le pain de semoule, le pain d'orge, le pain de mie et le pain brioché.

II.5. Préparation du pain

II.5.1. Pétrissage

C'est l'étape la plus importante du processus de fabrication du pain. Elle est considérée comme l'étape clé permettant d'obtenir une pâte lisse, homogène, tenace et viscoélastique (**Bossou, 2022**).

Il s'agit de mélanger les ingrédients en une pâte quasi homogène, de développer le réseau glutineux et d'incorporer de l'air à la pâte. Lors du mélange des ingrédients, la farine absorbe l'eau, faisant gonfler les grains d'amidon. L'énergie mécanique du pétrissage permet alors aux protéines insolubles (gliadines et gluténines) de se lier entre elles via un réarrangement des ponts disulfures intra- et intermoléculaires. Il se forme alors un réseau glutineux, complexé avec les lipides de la farine et certains glucides, emprisonnant les grains d'amidon et les bulles d'air (**Jourdren, 2019**).

II.5.2. Pointage

Le pointage correspond à la première fermentation, durant laquelle la pâte est laissée en masse pendant quelques minutes à une heure et demie.

Il est plus long lorsque la pâte est douce (fortement hydratée), sans additif (comme l'acide ascorbique), avec peu de levure ou après un pétrissage raccourci. Durant cette étape, trois phénomènes majeurs se produisent :

- Les propriétés rhéologiques de la pâte évoluent.
- Le métabolisme fermentaire prend le relais après consommation de l'oxygène piégé, entraînant la pousse de la pâte.
- Des composés volatils et précurseurs d'arômes (comme les acides lactique et acétique) sont formés, donnant la flaveur caractéristique des pains au levain (**Bossou, 2022**).

II.5.3. Formage

Le formage consiste à diviser la pâte en pâtons de poids égal, interrompant ainsi la première fermentation. Cela garantit une régularité du poids pour la vente. Cependant, cette opération mécanique, rapide et parfois brutale, peut altérer la structure développée auparavant. C'est pourquoi un boulage est généralement réalisé pour reconstituer cette structure (**Bossou, 2022**).

II.5.4. Apprêt

C'est la deuxième période de fermentation qui débute dès que le pâton est façonné et se termine à la mise au four. Durant l'apprêt, les pains sont maintenus dans une étuve sans subir aucun traitement mécanique. On optimise la fermentation en maintenant une température constante de 24-25 °C, ce qui garantit une humidité ambiante élevée des pâtons. En effet, durant cette phase, il est nécessaire d'éviter le dessèchement en surface des pâtons (croûtage), car celui-ci gêne leur bon développement. A ce stade, les levures jouent pleinement leur rôle d'agent de levée par métabolisme des sucres libérés par l'amidon. La levure fonctionne alors selon le mode fermentaire et génère ainsi du gaz carbonique et de l'alcool (**Bossou, 2022**).

II.5.5. Cuisson

La cuisson consiste à fixer la structure de la pâte, préalablement établie au cours du pétrissage et la fermentation, par son exposition à une haute température (environ 250°C). Au cours de l'étape de la cuisson, une série de transformations physiques, chimiques et biochimiques se produisent simultanément aboutissant au pain. Les principales transformations sont l'expansion de volume du produit, la perte d'eau par évaporation, la formation d'une structure alvéolaire plus ou moins développée, la dénaturation des protéines, la gélatinisation de l'amidon, le brunissement non enzymatique (réaction de Maillard) responsable de la couleur et de l'odeur du produit fini et puis tout ce qui concerne la formation de la croûte (la réticulation des protéines, la fusion des cristaux de graisse, la rupture des cellules gazeuses et parfois la fragmentation des parois cellulaires) (**Bossou, 2022**).

II.6. Rassisement du pain

Le rassisement est un phénomène regroupant tous les changements qui apparaissent dans le pain après la cuisson. Il se manifeste par l'apparition de modifications organoleptiques désagréables, résultant d'un certain nombre d'altérations dans la croûte et la mie : la croûte perd sa croustillance, devient souple, molle et tenace, alors que la mie devient plus terne, moins élastique, et tend à s'émietter (Crucean, 2019).

Le rassisement est un phénomène complexe dans lequel de nombreux constituants et mécanismes interviennent. La rétrogradation de l'amidon et la redistribution de l'eau à l'intérieur du pain sont reconnues comme les facteurs les plus importants de ce processus. Un second phénomène est lié au transfert d'eau de la mie vers la croûte plus sèche (Crucean, 2019).

II.7. Rétrogradation de l'amidon

Le phénomène de rétrogradation de l'amidon est initié lors de la phase de refroidissement du pain. Il implique une réassociation des molécules d'amidon, principalement l'amylose, qui ont été expulsées de la matrice granulaire durant le chauffage. Ces chaînes linéaires diffusent et s'agrègent de façon aléatoire en une structure de gel cristallin externe. D'autre part, les chaînes ramifiées d'amylopectine au sein des granules se remplissent et interagissent, induisant une augmentation progressive de la rigidité de l'ensemble (Crucean, 2019).

Dans le pain rassis, l'amidon passe de la structure amorphe, acquise à la cuisson, à une structure cristalline. C'est un phénomène réversible, au moins partiellement : le chauffage de l'amidon rétrogradé entraîne à nouveau un passage de l'état cristallin à l'état amorphe. La rétrogradation s'accélère à des températures comprises entre 0 et 5°C et lorsque les concentrations en amidon sont élevées, par conséquent, pour ralentir le rassisement, il est préférable de ne pas conserver le pain au réfrigérateur.

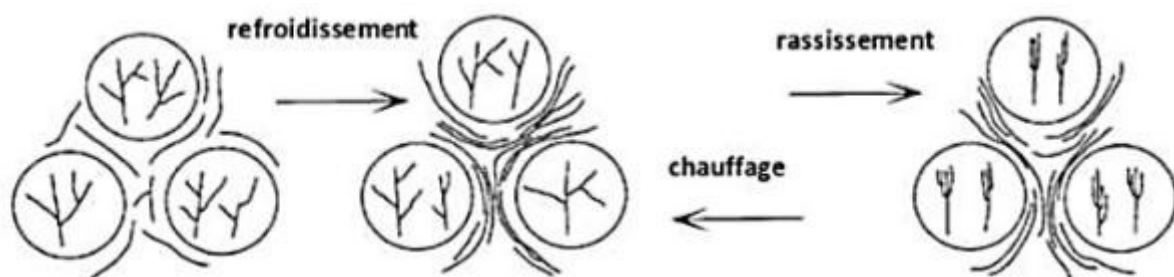


Figure 2: Comportement de l'amidon pendant le rassisement du pain (Crucean, 2019)

Il semblerait que, la rétrogradation de l'amylose, qui se produit dans les premières heures qui suivent la cuisson, soit responsable de la structuration de la mie et n'intervienne pas dans le rassissement du pain. En revanche, la recristallisation des chaînes latérales courtes de l'amylopectine, processus beaucoup plus lent (plusieurs jours ou semaines), jouerait un rôle majeur dans le rassissement à long terme du pain. L'affermissement de la mie survient après la rétrogradation de l'amylopectine, l'eau quitte la matrice de la mie pour se lier aux cristaux d'amylopectine en formation. Cette migration de l'eau hors de la mie et son piégeage par les cristaux entraînent une perte de souplesse et une rigidification de la structure globale (Crucean, 2019).

II.7.1. Redistribution de l'eau à l'intérieur du pain

Lors du refroidissement et du stockage, l'eau intervient dans les modifications suivantes de la matrice pain : assèchement, équilibrage de l'humidité entre la mie et la croûte, et redistribution de l'humidité entre les composants du pain.

L'assèchement du pain n'explique pas complètement le rassissement, par contre il peut accélérer les réactions qui le conduisent. Le pain avec sa croûte durcit bien plus vite que celui sans croûte cela explique que l'humidité de la mie se déplace vers la croûte. Ce phénomène modifie la structure de l'amidon (l'amylopectine), ce qui est la cause principale du rassissement du pain.

L'autre facteur qui peut affecter le rassissement du pain est le transfert d'humidité d'un constituant de la mie à l'autre. L'eau est un plastifiant, ce qui rend les composants du pain plus flexibles. Ainsi, à mesure que l'eau est éliminée (du gluten ou de l'amidon ou des deux), la fermeté de la mie augmente. En général, l'eau qui est liée aux chaînes de gluten et qui assure une texture initiale « tendre » se fait progressivement piégée dans l'amylopectine recristallisée au cours du stockage. Cela induit une déshydratation de la matrice et en particulier des chaînes de gluten et au final un durcissement de la mie. En conclusion, l'eau qui joue un rôle plastifiant va être piégée dans les cristaux d'amylopectine, dans la croûte ou va quitter le produit. Cette baisse de la quantité d'eau libre va induire un durcissement de la mie (Crucean, 2019).

Chapitre III

Amidon et propriétés

III. Amidon

L'amidon est un polysaccharide d'origine végétale qui constitue la principale réserve glucidique des plantes supérieures. Présent dans tous les organes végétaux, l'amidon natif se concentre préférentiellement dans les graines de céréales (blé, avoine, maïs...), de légumineuses (pois, fèves...), dans les fruits (bananes) et dans les parties souterraines (pommes de terre, rhizomes de manioc, etc.) (Boursier, 2005).

III.1. Composition chimique de l'amidon

L'amidon est constitué majoritairement d'une fraction glucidique (98 à 99%) et d'une fraction non glucidique mineure (1 à 2%). Cette dernière, malgré sa présence en faible quantité, ne doit pas être négligée, car elle modifie les propriétés fonctionnelles, en particulier la présence des lipides.

L'amidon est un homopolymère d'unité D-glucose, ces dernières sont liées majoritairement (95 à 96 %) par des liaisons de type α (1,4) et dans une moindre mesure (4 à 5%) par des liaisons de type α (1,6). L'amidon est composé de deux polymères de structure primaire différente : l'amylose, molécule essentiellement linéaire et l'amylopectine, molécule ramifiée. Selon l'origine botanique, les teneurs en amylose et en amylopectine varient respectivement de 20 à 30% et de 70 à 80% pour les amidons standards. Cependant, quelques espèces d'amidon peuvent contenir moins de 1% d'amylose (maïs cireux ou waxy) ou entre 45 à 80% d'amylose (amylomaïs) (Bahrani, 2013).

III.1.1. Amylose

L'amylose est une macromolécule de structure linéaire constituée d'unités α -D- glucose liées par des liaisons α (1-4). Elle se compose de chaînes dont le degré de polymérisation varie selon l'origine botanique, entre 500 et 6000 unités glucose. La structure chimique de l'amylose est représentée dans la figure 3.

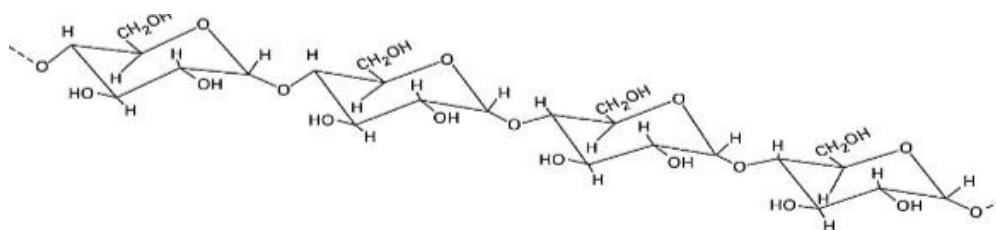


Figure 3: Structure chimique de l'amylose (Bahrani, 2013)

L'amylose est capable de former des complexes d'inclusion avec diverses molécules organiques ou minérales : iode, acides gras libres, lipides monoacylés, et certaines molécules aromatiques (Bahrani, 2013).

III.1.2. Amylopectine

L'amylopectine est une macromolécule de structure ramifiée. Elle est formée par la polymérisation d'un seul monomère D-glucose, lié principalement par des liaisons α (1-4) et des liaisons α (1-6) à l'origine des ramifications, ces dernières représentent environ 5 à 6% du nombre total de liaisons. Les ramifications constituant la macromolécule d'amylopectine se répartissent en chaînes A, internes ou externes, avec un degré de polymérisation moyen (DP= 15-20) et en chaînes B internes avec un degré de polymérisation d'environ 45.

La masse moléculaire moyenne de l'amylopectine est assez élevée, les valeurs les plus souvent citées dans la littérature se situent entre 107 et 108 g/mole. Le haut degré de ramification de l'amylopectine ne lui permet pas de rétrograder rapidement comme dans le cas de l'amylose. Cependant, on attribue à l'amylopectine la propriété de pouvoir gélifier très lentement (Bahrani, 2013). La structure chimique et les régions amorphes et cristallines de l'amylopectine sont représentées dans la figure 4.

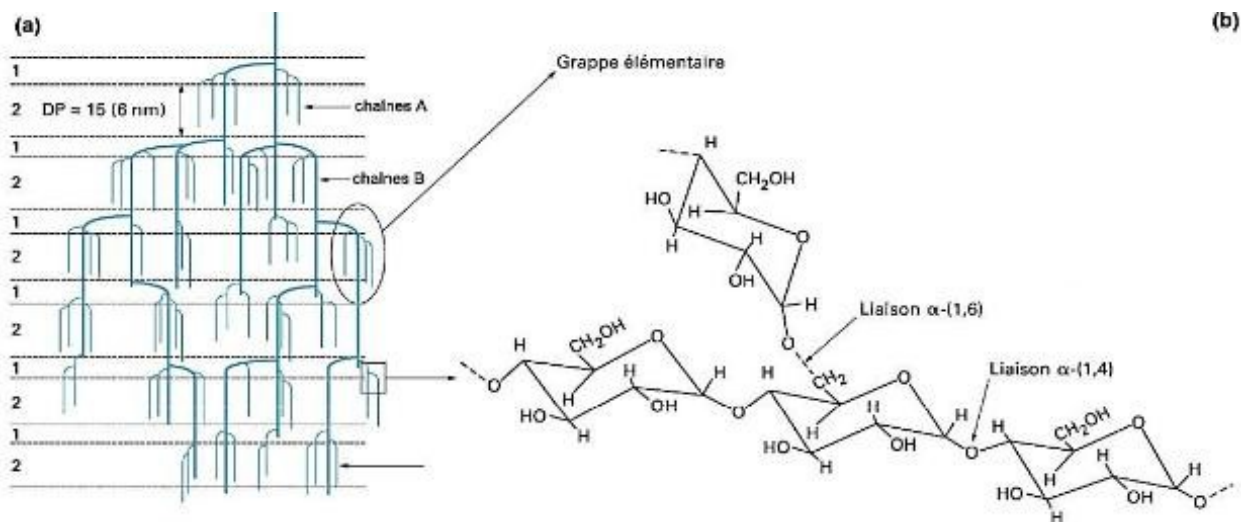


Figure 4: Modèle de la structure en grappe de l'amylopectine : (1) régions amorphes. (2) régions cristallines (a) et structure chimique de l'amylopectine (b) (Bahrani, 2013)

III.2. Sources d'amidon

Il existe plusieurs sources d'amidon qui varient selon l'origine végétale, présentées dans le tableau 3 :

Tableau 3: Composition moyenne en amidon de différentes origines végétales

Origine végétale	Forme de l'amidon	Teneur moyenne en amidon (%)	Teneur moyenne en amylose dans la fraction amidon (%)
Blé	Lenticulaire, rond	60-70	20-26
Maïs	Angulaire, polyédrique	62-72	24-28
Maïs cireux	Angulaire, polyédrique	62-72	<1
Pois	Réniforme	30-40	50-80
Riz	Polyédrique	70	10-20
Pomme de terre	Ellipsoïdale	10-20	20-28
Manioc	Rond, tronqué	70-74	15-20

III.3. Propriétés physicochimiques de l'amidon

III.3.1. Gonflement et solubilité

L'amidon natif est insoluble dans l'eau froide (à des températures inférieures à 50 °C) et n'absorbe qu'une quantité limitée d'eau, ce qui est principalement attribué aux liaisons hydrogènes et à la structure cristalline. Les granules d'amidon présentent une faible capacité de gonflement à basse température, qui augmente progressivement avec l'augmentation de la température, cela peut être dû à l'affaiblissement progressif de l'interaction entre les molécules d'amidon avec l'augmentation de la température, ce qui entraîne une augmentation du degré de gonflement.

Lorsque l'amidon est chauffé en présence d'un excès d'eau, il peut absorber suffisamment d'eau donc il gonfle, ce processus est appelé gonflement de l'amidon, il comprend deux étapes :

✓ L'hydratation des granules d'amidon :

Se produit généralement en dessous de la température de gélatinisation qui se situe généralement entre 55°C et 85°C selon l'origine de l'amidon et augmente légèrement le diamètre des granules. Au cours de cette étape, les molécules d'eau se diffusent à l'intérieur du

granule d'amidon et pénètrent dans les régions amorphes, formant de nouvelles liaisons hydrogènes avec les polymères d'amidon. Cela rend le granule d'amidon mou et fragile, ce qui le fait gonfler dans l'eau, entraînant la lixiviation de l'amylose du granule gonflé et augmentant ainsi la viscosité de la suspension d'amidon (**Mounir et al., 2024**).

✓ **La phase irréversible :**

Se produit à des températures supérieures à la température de gélatinisation, où l'on observe une augmentation évidente du diamètre des granules et de la viscosité de la suspension.

L'action combinée du chauffage et du cisaillement décompose la structure cristalline, entraînant une perte de biréfringence. Cela augmente l'affinité entre les polymères d'amidon et les molécules d'eau, améliorant l'absorption d'eau et la solubilisation de l'amidon. Un chauffage supplémentaire augmente le gonflement et les granules commencent à se rompre. De plus, les liaisons hydrogènes entre les polymères d'amidon sont rompues et les molécules d'eau forment de nouvelles liaisons hydrogènes avec les groupes hydroxyles exposés dans l'amylose et l'amylopectine ce qui augmente le pouvoir gonflant des granules d'amidon (**Gul et al., 2021**). Simultanément, les polymères d'amidon (amylose et amylopectine) sont lessivés des granules gonflés, ce qui entraîne une augmentation significative de la viscosité de la suspension d'amidon et forme finalement une pâte d'amidon (**Mounir et al., 2024**).

Les propriétés de gonflement varient considérablement en fonction de la source botanique de l'amidon, de la teneur en amylose et du type de cristal (type A, B ou C) (**Mounir et al., 2024**).

III.3.2. Gélatinisation et rétrogradation

La gélatinisation est connue comme une transition de phase (d'un état amorphe à un état caoutchouteux) ou un effondrement de l'ordre moléculaire au sein du granule d'amidon, impliquant une dissolution complète des polymères d'amidon (amylose et amylopectine) et une rupture physique du granule d'amidon, se produit par chauffage des granules d'amidon dans un excès d'eau, qui agit comme un plastifiant (**Mounir et al., 2024**).

La température de gélatinisation varie entre 55 et 80 °C, selon le type d'amidon. La gélatinisation est déclenchée lorsque l'eau se diffuse à l'intérieur du granule pour hydrater les régions amorphes, puis se propage aux régions cristallines, où les granules sont décomposés par l'absorption d'eau. Cela entraîne une perte de leur structure cristalline et de leur biréfringence, ce qui permet leur gonflement et la lixiviation de l'amylose.

La rétrogradation dépend de la source botanique de l'amidon ; les amidons provenant des céréales rétrogradent généralement plus lentement, avec un degré de rétrogradation moindre que les amidons provenant des tubercules et des racines. Cela peut être attribué à de nombreux facteurs, tels que la structure intrinsèque de l'amylopectine, le rapport amylose/amylopectine et la teneur en lipides (**Gul et al., 2021**).

III.3.3. Propriétés de collage

Le collage est le processus qui se produit après, ou en parallèle avec, la gélatinisation de l'amidon lors d'un chauffage continu dans un excès d'eau. Cela implique un gonflement supplémentaire, la rupture des granules gonflés et une lixiviation accrue des molécules d'amidon libérées, formant une pâte viscoélastique. Une pâte d'amidon chaude est un système à deux phases :

- Une phase continue : contient des molécules d'amidon dissoutes ou partiellement dissoutes (principalement amylose et d'amylopectine de faible poids moléculaire) (**Mounir et al., 2024**).
- Une phase discontinue : composée de granules gonflés et de fragments de granules (ayant perdu une partie de leur contenu en amylose/amylopectine).

La viscosité est la caractéristique la plus importante de la pâte d'amidon, car elle détermine les applications de l'amidon dans différentes industries (exp : une pâte à haute viscosité est utilisée pour les applications d'épaississement dans l'industrie alimentaire (**Gul et al., 2021**)).

III.4. Propriétés rhéologiques

Les propriétés rhéologiques reflètent le comportement de l'amidon lorsqu'il est soumis à des forces de déformation et de cisaillement. Ces propriétés jouent un rôle important dans les différentes applications de l'amidon, notamment la viscosité, la texture, la résistance au cisaillement et la tendance à la rétrogradation. Parmi les propriétés rhéologiques, la viscosité est la plus importante, car l'amidon est généralement utilisé comme agent épaississant dans les applications alimentaires. La viscosité de la pâte d'amidon reflète la capacité d'épaississement de l'amidon pour différentes applications, ainsi que la stabilité des produits alimentaires et leur acceptabilité par les consommateurs.

Les propriétés rhéologiques de l'amidon dépendent de plusieurs paramètres, tels que la

source d'amidon, les propriétés de l'amidon natif, les conditions de transformation appliquées (par exemple, la température, le temps et le cisaillement) et la présence de composants non amyliques (par exemple, les lipides et les protéines) (Mounir *et al.*, 2024). Le comportement de l'amidon lors de la cuisson et du refroidissement est représenté dans la figure 5.

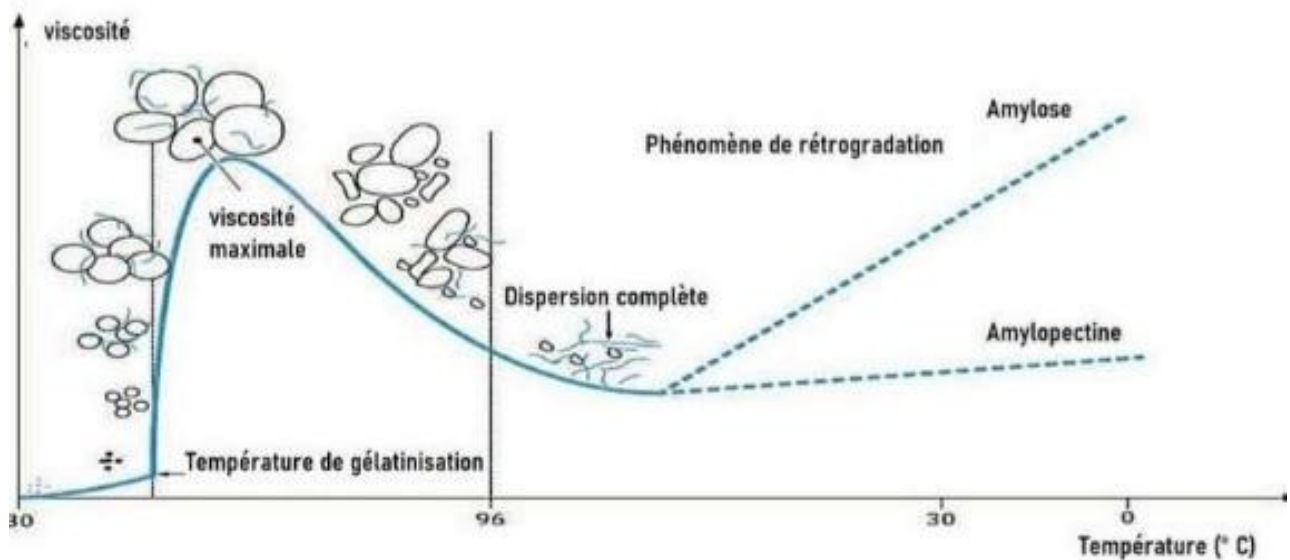


Figure 5: Comportement d'un amidon lors de la cuisson et du refroidissement (Bahrani, 2013).

III.5. Application de l'amidon

III.5.1. Industrie alimentaire

L'amidon joue un rôle important dans l'industrie alimentaire. Il présente de nombreux effets fonctionnels et intervient dans une large gamme d'aliments. Dans les applications alimentaires, l'amidon est utilisé comme agent épaississant, gélifiant et émulsifiant, et il peut créer de nouvelles textures et améliorer la sensation en bouche, figure 6 (Mounir *et al.*, 2024).



Figure 6: Différentes applications de l'amidon dans le secteur alimentaire (Mounir et al., 2024)

III.5.2. Industrie pharmaceutique

La large utilisation de l'amidon sous une forme native ou modifiée en tant qu'excipient pharmaceutique est essentiellement due à ses caractéristiques physiques et fonctionnelles. Par exemple, l'amidon natif possède certaines caractéristiques importantes qui le rendent intéressant pour une application en tant qu'excipient pharmaceutique, telles que sa blancheur, sa douceur et son onctuosité, sa capacité à être moulé et ses propriétés de gélification et de viscosité.

L'amidon natif est généralement utilisé pour la production de gélules, de comprimés et de granulés. Les excipients à base d'amidon présentent de nombreux avantages pour l'industrie pharmaceutique, notamment la réduction des coûts de production, la sécurité et un produit de meilleure qualité (Mounir et al., 2024).

III.5.3. Industrie du papier, textile et autres

Récemment, en raison des préoccupations croissantes concernant les ressources en gaz naturel et en pétrole, l'amidon a été étudié pour la production de biocarburant ou d'éthanol. En outre, les applications possibles telles que le développement de films d'emballage biodégradables à réduire la dépendance à l'égard du plastique pétrochimique pour l'emballage, réduisant ainsi l'impact environnemental des progrès technologiques. De même, dans l'industrie du textile et du papier, l'amidon est largement utilisé à des fins multiples (Makroo et al., 2021).

Partie Expérimentale

Matériel et Méthodes

L'objectif de ce travail est d'extraire l'amidon à partir du pain rassis en utilisant quatre méthodes différentes, afin de comparer le degré de pureté ainsi que les propriétés fonctionnelles de l'amidon extrait. Cette démarche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, en valorisant un produit gaspillé souvent négligé en une matière première exploitable dans divers secteurs, notamment l'agroalimentaire et l'industrie. L'ensemble des expériences a été réalisé dans les laboratoires de microbiologie, de physico-chimie de la Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, laboratoire de chimie - Hasnaoua et CRAPC de Bejaïa.

IV. Matériel et méthodes

IV.1. Matériel

IV.1.1. Matériel biologique

Le pain rassis utilisé dans cette étude a été collecté dans plusieurs localités de la wilaya de Tizi-Ouzou, notamment à Béni Douala, Boghni, Draâ El Mizan, ainsi qu'à la cité universitaire de Tamda. Après la collecte, les échantillons ont été triés afin d'éliminer les corps étrangers ou parties détériorées, puis broyés et conservés jusqu'à leur utilisation pour les différentes étapes de traitement et d'analyse.

IV.1.2. Matériel non biologique

Le matériel, les appareils, la verrerie et les produits utilisés dans cette étude sont répertoriés dans l'Annexe I.

IV.2. Méthodes

IV.2.1. Préparation de la poudre du pain rassis

Après la collecte, le pain rassis a été laissé à température ambiante afin de renforcer son dessèchement naturel et d'obtenir une texture plus homogène, facilitant ainsi le broyage. Il a ensuite été broyé à l'aide d'un moulin électrique domestique servant de broyeur de type mixeur, permettant d'obtenir une poudre de texture fine. Cette dernière a été tamisée afin d'éliminer les particules trop grossières, puis stockée dans des bocaux en verre hermétiquement fermés, à température ambiante, à l'abri de la lumière et de l'humidité.

IV.3. Méthodes d'extraction de l'amidon

✓ Extraction aqueuse à température ambiante

Quarante grammes de poudre de pain rassis ont été dispersés dans 400 ml d'eau distillée à température ambiante (ratio 1 :10, m/v). Le pH de la suspension a été ajusté à 10 à l'aide d'une solution de NaOH 0,1 M, puis le mélange a été agité pendant 30 minutes à l'aide d'une table agitante. La suspension obtenue a été filtrée quatre fois à l'aide d'un tissu de type mousseline. Le filtrat a ensuite été laissé à décanter, puis le surnageant a été éliminé. Le culot contenant l'amidon a été lavé à l'eau distillée jusqu'à obtention d'un pH neutre (~7). L'amidon purifié a finalement été lyophilisé, puis conservé dans des flacons hermétiques à température ambiante, à l'abri de la lumière et de l'humidité.

✓ Extraction aqueuse à chaud

Cette méthode repose sur le même protocole que l'extraction à température ambiante, à la différence près que l'eau distillée a été préalablement chauffée à 70 °C avant d'être utilisée pour disperser la poudre de pain rassis (40 g dans 400 mL, ratio 1 :10, m/v). La température a été maintenue à 70 °C pendant toute la durée de l'agitation, soit 30 minutes. Les étapes de filtration, de lavage et de lyophilisation ont ensuite été réalisées de la même manière que pour la méthode précédente.

✓ Extraction assistée par ultrasons

Le mélange constitué de 40 g de poudre de pain rassis et de 400 mL d'eau distillée a été soumis à un traitement par ultrasons à 40 kHz pendant 10 minutes. Après cette étape, le pH du mélange a été ajusté à 10 à l'aide d'une solution de NaOH 0,1 M. Les étapes de filtration, de lavage et de lyophilisation ont été effectuées selon le même protocole que celui décrit pour l'extraction aqueuse (ETA).

✓ Extraction assistée par micro-ondes

Quarante grammes de poudre de pain rassis ont été mélangés à 400 ml d'eau distillée (Ratio 1:10, m/v), puis le mélange a été exposé à un rayonnement micro-ondes à une puissance de 300 W pendant 3 minutes. Par la suite, le pH de la suspension a été ajusté à 10 à l'aide d'une solution de NaOH 0,1 M. Le mélange a ensuite été agité pendant 30 minutes à l'aide d'une table d'agitation. Les étapes de filtration, de lavage et de lyophilisation ont été effectuées selon le même protocole que celui décrit pour l'extraction aqueuse (ETA).

40g de poudre du pain rassis + 400 ml d'eau distillé

Traitement spécifique selon la méthode :

- ✓ ETA
- ✓ EC (70°C)
- ✓ US (40 kHz pdt 10 min)
- ✓ MO (300W pdt 3min)

Analyses physico-chimiques avant alcalinisation :

- ✓ pH
- ✓ Densité
- ✓ Temps de décantation

Mélange

Ajuster le pH à 10 avec NaOH à 0,1 M

Analyses physico-chimiques après alcalinisation :

- ✓ pH
- ✓ Densité
- ✓ Temps de décantation
- ✓ Temps de décantation de l'amidon
- ✓ Degré Brix
- ✓ Turbidité

Agitation pendant 30 min

Quatre filtrations à l'aide de la tissu mousseline

Décantations

Elimination du surnageant

Culot

Plusieurs lavages avec l'eau distillée pour obtenir un pH~ 07

Amidon purifié

Lyophilisation

Figure 7: Diagramme global du protocole expérimental de l'extraction de l'amidon du pain rassis et des analyses associées réalisées avant et après alcalinisation

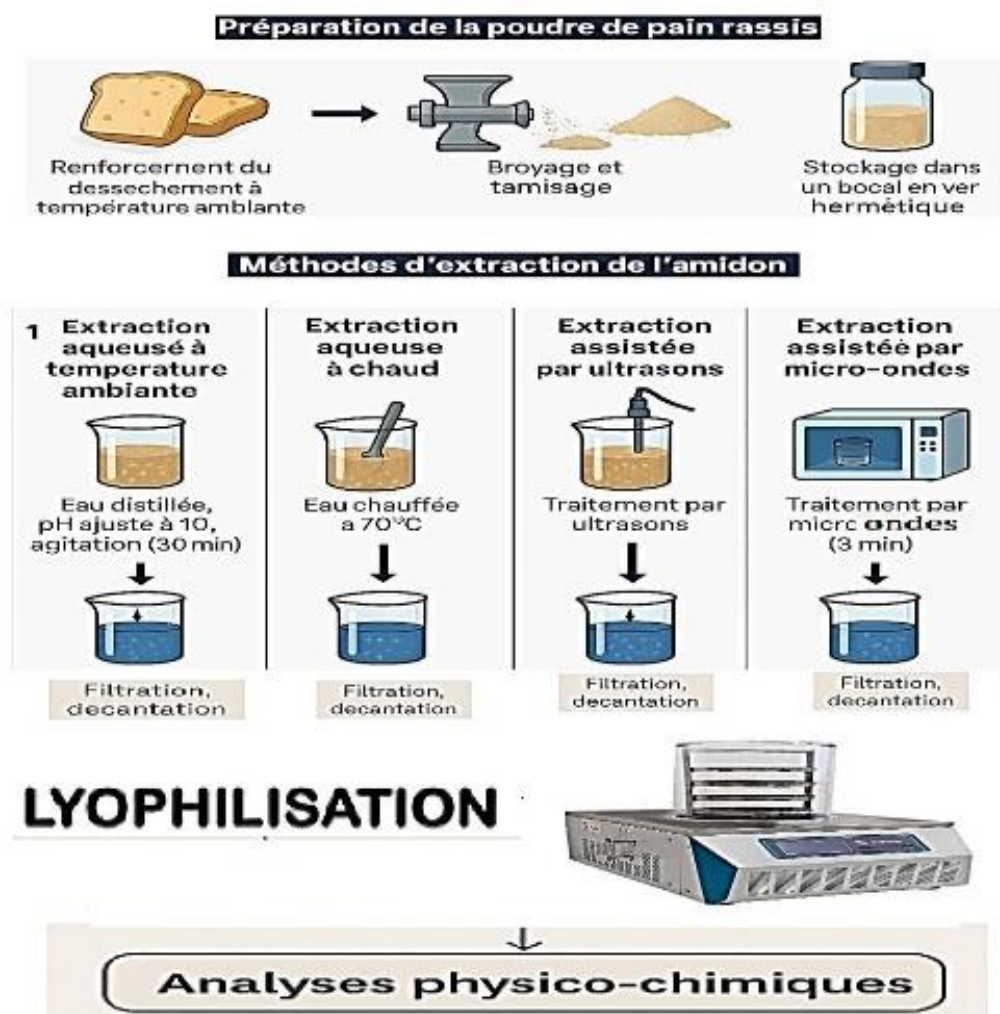


Figure 8: Résumé graphique du dispositif expérimental

IV.4. Analyses physico-chimiques de la suspension avant et après alcalinisation

Afin d'évaluer l'effet du traitement alcalin sur les suspensions obtenues à partir du pain rassis, plusieurs paramètres physico-chimiques ont été suivis à deux étapes distinctes du protocole : avant et après l'alcalinisation. Trois paramètres communs ont été mesurés aux deux étapes, à savoir le pH, la densité et le temps de décantation de la suspension. Après l'alcalinisation, des analyses complémentaires ont été ajoutées afin de mieux caractériser l'évolution des propriétés du mélange. Il s'agit du degré Brix, du temps de décantation spécifique de l'amidon (séparé de la suspension globale) ainsi que de la turbidité. Ces paramètres additionnels, spécifiques à l'étape post-alcaline, permettent d'approfondir l'évaluation de la qualité de l'extraction et de la séparation de l'amidon.

IV.4.1. Mesures effectuées avant et après alcalinisation

- **pH de la solution**

- a) **Principe**

Le pH est une mesure de l'acidité ou de la basicité d'une solution, basée sur la concentration en ions hydronium (H_3O^+) dans la solution. Il est mesuré en utilisant un pH-mètre, qui compare le potentiel électrique d'une électrode sensible aux ions hydronium avec celui d'une électrode de référence (Estrada-León et al., 2016).

- b) **Mode opératoire**

Étalonnage du pH-mètre :

- ✓ Utiliser des solutions tampons de pH 4 et pH 7 pour ajuster le pH-mètre.
- ✓ S'assurer que le pH-mètre est bien calibré avant chaque série de mesures.

Mesure du pH :

- ✓ Plonger l'électrode du pH-mètre dans la solution d'extraction
- ✓ Prendre les lectures en triplicités pour chaque essai.
- ✓ Vérifier que la température de l'échantillon est stable et proche de celle des solutions tampons utilisées pour l'étalonnage.

- **Densité**

- a) **Principe**

La densité est généralement mesurée à l'aide d'un densimètre. En raison de l'indisponibilité de cet appareil au laboratoire, une méthode alternative a été utilisée, reposant sur l'utilisation d'un pycnomètre. Le pycnomètre est un récipient en verre de volume connu, permettant de déterminer la densité d'un liquide par comparaison des masses du pycnomètre vide, rempli d'eau distillée, puis rempli de l'échantillon (Nguyen Van, 2019).

- b) **Mode opératoire**

- ✓ Peser le pycnomètre vide (M_0).
- ✓ Le remplir d'eau distillée, puis peser (M_2).
- ✓ Le remplir de la solution d'extraction, puis peser (M_1).

Calculer la densité selon la formule :

$$\text{Densité} = \frac{M_1 - M_0}{M_2 - M_0}$$

- **Temps de décantation**

- a) **Principe**

Le temps de décantation est un indicateur de la stabilité et la solubilité d'une suspension et de la capacité des particules à se séparer sous l'effet de la gravité. Une suspension instable décante rapidement, alors qu'une suspension stable reste homogène plus longtemps. Cette mesure permet donc d'évaluer indirectement la taille des particules, leur densité relative, ainsi que la viscosité du milieu. Elle est souvent utilisée pour comparer l'efficacité de procédés de dispersion, de désintégration ou de prétraitement (Raghavan, Bhattacharya, & Venkatesh, 2018 ; Liu et al., 2009).

- b) **Mode opératoire**

- ✓ Les suspensions ont été préparées selon les quatre méthodes d'extraction, puis ajustées à un pH de 10 à l'aide d'une solution de NaOH 0,1 M.
- ✓ Chaque suspension a été agitée doucement afin d'obtenir un mélange homogène.
- ✓ Le chronomètre a été déclenché immédiatement après l'arrêt de l'agitation.
- ✓ Le temps nécessaire à l'apparition d'un surnageant clair et à la formation d'un dépôt visible de particules au fond du bécher a été enregistré.
- ✓ L'expérience a été répétée au moins trois fois pour chaque condition, et la moyenne des temps de décantation a été calculée.

IV.4.2. Analyses après alcalinisation

- **Indice de réfractométrie**

- a) **Principe**

L'indice de réfractométrie permet de mesurer la teneur en solides solubles (Total Soluble Solids – TSS), exprimée en degrés Brix (°Brix). Le principe repose sur la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse une solution : plus la concentration en solutés est élevée, plus l'indice de réfraction augmente. Le degré Brix correspond au pourcentage en masse de saccharose dans une solution aqueuse à 20 °C, mais il est également utilisé comme indicateur

général de la concentration en matières dissoutes (**Cheikhi et al., 2019**).

b) Mode opératoire

- ✓ Une goutte de la solution a été placée sur la surface de prisme du réfractomètre préalablement nettoyée et séchée avec de l'eau distillée.
- ✓ Le couvercle a été rabattu pour obtenir une couche uniforme de liquide.
- ✓ En orientant le réfractomètre vers une source lumineuse, deux zones de clarté apparaissent ; la limite entre ces zones indique la valeur du degré Brix sur l'échelle.
- ✓ La lecture a été réalisée à température ambiante, en tripliqua.

• **Turbidité**

a) Principe

La turbidité exprime la quantité de particules en suspension (matières colloïdales ou insolubles) qui diffusent la lumière. Elle constitue un indicateur indirect de la propreté, de la dispersion et de la stabilité colloïdale d'une solution. Elle est mesurée à l'aide d'un turbidimètre, qui envoie un faisceau lumineux à travers l'échantillon et détecte la lumière diffusée à 90° (**ISO 7027**).

b) Mode opératoire

- ✓ L'échantillon avant filtration a été versé dans une cuvette propre et transparente.
- ✓ La cuvette a été insérée dans la cellule de mesure du turbidimètre.
- ✓ L'échelle de mesure a été ajustée pour obtenir une lecture stable et précise.
- ✓ Les résultats ont été exprimés en NTU (Nephelometric Turbidity Units), après lecture directe sur l'écran de l'appareil.

IV.5. Analyses physico-chimiques de la pureté de l'amidon extrait lyophilisé

• **Teneur en eau (matière sèche)**

a) Principe

La matière sèche est déterminée par dessiccation de l'échantillon à 105°C jusqu'à masse constante. Cette méthode permet d'évaluer l'humidité résiduelle et de déduire le pourcentage de matière sèche (**Audigié et al., 1982**).

b) Mode opératoire

- ✓ Peser 5 g de poudre d'amidon dans des creusets en aluminium.
- ✓ Placer les creusets dans une étuve réglée à 105°C pendant 24h.
- ✓ Après dessiccation, peser les creusets

c) Expression des résultats

La teneur en eau (%) du matériel végétal est donnée par la formule suivante :

$$\text{Teneur en eau (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_0} \times 100$$

Dont :

P_0 : masse du creuset vide (g)

P_1 : masse du creuset + échantillon avant séchage (g) P_2 : masse du creuset + échantillon après séchage (g)

A partir de la teneur en eau, on détermine le taux de la matière sèche qui est donné par la formule suivante :

$$\text{Taux de matière sèche (\%)} = 100 - \text{teneur en eau (\%)}$$

➤ Taux de cendre

a) Principe

Le principe consiste en une incinération de la poudre d'amidon dans un four à moufle, dans des creusets en porcelaine, à une température de 550°C. L'opération est terminée lorsque la couleur des résidus devient blanc grisâtre, puis blanche après refroidissement (**Audigié et al., 1982**).

b) Mode opératoire

- ✓ Peser à vide les creusets en porcelaine (masse notée M_0).
- ✓ Introduire 1 g d'amidon dans chaque creuset, puis les peser (masse M_1).
- ✓ Placer les creusets dans un four à moufle réglé à 550°C pendant 4 heures.
- ✓ Après refroidissement dans un dessiccateur, peser les creusets contenant les cendres (masse M_2).

c) Expression des résultats

Les résultats sont exprimés selon la formule suivante :

$$\text{TC}(\%) = \frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} \times 100$$

➤ Taux de Fibre**a) Principe**

L'analyse des fibres consiste en une hydrolyse acide puis basique de la matière, ce qui permet de solubiliser les composés non fibreux (**ISO 5498, 1981**).

b) Mode opératoire

- ✓ Préparer deux solutions : H₂ SO₄ à 1,25 % et KOH à 1,25 %.
- ✓ Introduire 1 g de poudre d'amidon lyophilisé dans un creuset, puis ajouter 150 ml de H₂ SO₄ (1,25 %).
- ✓ Chauffer à 40°C pendant 30 min.
- ✓ Vidanger l'acide et laver trois fois avec 30 ml d'eau distillée tiède, puis une fois avec 30 ml d'eau froide.
- ✓ Rincer trois fois avec 25 ml d'acétone.
- ✓ Sécher à 105°C pendant 1 h, puis peser
- ✓ Incinérer à 550°C pendant 4 h, puis refroidir et peser à nouveau.

c) Expression des résultats

La teneur des fibres brutes est calculée par la formule présentée ci-dessous :

$$\text{Taux de fibre } (\%) = (M_2 - M_3) \times 100$$

Dont :

M₂ : poids de la poudre à la sortie de l'étuve.

M₃ : poids de la poudre à la sortie du four (fibres seulement).

➤ **Taux de matière grasse**

a) Principe

La matière grasse est extraite par le solvant organique (Hexane), dans un appareil de type Soxhlet, le solvant est ensuite évaporé, et le résidu gras est quantifié gravimétriquement (ISO 659, 2009).

b) Mode opératoire

- ✓ Introduire 5 g de poudre d'amidon dans un papier filtre, puis placer celui-ci dans l'extracteur Soxhlet.
- ✓ Peser le ballon vide (P₁).
- ✓ Verser 250 ml d'hexane dans un ballon vide
- ✓ Réaliser l'extraction pendant 5 heures à 70°C.
- ✓ Après extraction, évaporer l'hexane puis sécher le ballon à 37°C pendant 24 h
- ✓ Peser le ballon contenant les lipides extraits (masse P₂).

c) Expression des résultats

Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$\text{Taux de matière grasse (\%)} = \frac{P_1}{P_2} \times 100$$

➤ **Taux de protéines**

a) Principe

La méthode de biuret est une technique de dosage des protéines reposant sur la coloration bleu-violet qui apparaît en milieu alcalin entre les composés possédant deux ou plusieurs liaisons peptidiques -CO-NH- (dont le biuret NH₂-CO-NH-CO-NH₂), tels que les peptides, les protéines, les ions cuivriques, les acides aminés aromatiques et le Folin Ciocalteu. La méthode est très sensible (Lowry et al., 1951).

b) Mode opératoire

- Réactif A : Na₂ CO₃ à 2% dans du NaOH à 0,1N ;
- Réactif B : Sulfate de cuivre pentahydraté à 0,5% dans du tartre de K et de Na à 1% ;

- Réactif C : 50 ml de réactif A+1 ml de réactif B ;
- Réactif D : Réactif de Folin-Ciocalteu dilué de moitié avec de l'eau distillée
- Extrait salin d'amidon : 1 g d'amidon est dilué dans 100 ml d'une solution de NaCl à 2% utiliser le filtrat obtenu à l'aide de papier filtre ;
- Solution mère de BSA (Sérum Albumine Bovine) ;
- ✓ Préparer une gamme étalon de différentes concentrations (0- 40-80-120-160-200 µg/ml).
- ✓ Utiliser la formule suivante : $C_1V_1=C_2V_2$ pour les dilutions
- ✓ Dans chaque tube (échantillon ou étalon), pipeter 0,6 ml de solution
- ✓ Ajouter 3 ml du réactif C, agiter, puis ajouter 0,3 ml du réactif D et remuer
- ✓ Incuber à l'obscurité durant 30 min.
- ✓ Mesurer l'absorbance à 750 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, contre un témoin contenant tous les réactifs sauf la protéine,
- ✓ Tracer la courbe d'étalonnage (DO en fonction de la concentration). Elle doit être linéaire.
- ✓ Reporter la DO des échantillons sur la courbe pour obtenir leur concentration en protéines (%).

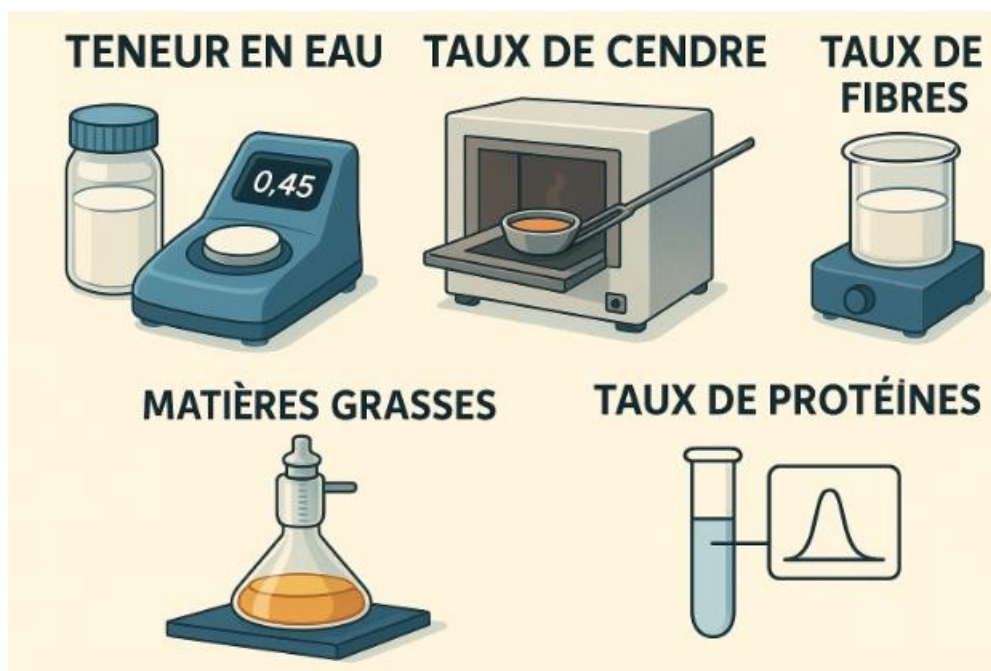


Figure 9: Synthèse graphique des paramètres de pureté évalués sur les amidons extraits

IV.6. Analyses des propriétés fonctionnelles des amidons extraits

➤ Dosage de l'amylose

a) Principe

Cette méthode repose sur la formation d'un complexe coloré bleu entre l'amylose et l'iode en milieu acide. L'amidon est d'abord solubilisé et gélatinisé dans une solution alcaline (NaOH), puis neutralisé à l'aide d'un acide acétique avant addition de l'iode. L'absorbance du complexe est ensuite mesurée par spectrophotométrie à 620 nm. Le dosage de l'amylose est estimé par extrapolation à partir d'une courbe d'étalonnage (**Juliano, 1971**). Il est important de noter que cette méthode ne permet de quantifier que la fraction d'amylose soluble dans les conditions d'analyse. Une partie de l'amylose peut rester non extraite, en particulier si elle a rétrogradé ou est engagée dans des complexes avec d'autres macromolécules. Ainsi, les résultats obtenus reflètent une estimation minimale de la teneur réelle en amylose. Pour une meilleure interprétation, les valeurs ont été comparées à un amidon commercial (Maïzena), utilisé comme référence, permettant une évaluation relative du taux d'amylose des échantillons. Afin d'estimer une valeur plus représentative de l'amylose total, une correction a été appliquée en supposant que l'amylose soluble représente en moyenne 80 % de l'amylose totale. La teneur corrigée a été obtenue en divisant les valeurs mesurées par 0,8.

b) Mode opératoire

Préparation de la solution standard d'amidon (Maïzena commerciale) :

- ✓ Peser 100 mg d'amidon commercial (Maïzena) dans un bécher.
- ✓ Ajouter 1 ml d'éthanol à 95 %.
- ✓ Ajouter ensuite 9 ml de NaOH 1 N.
- ✓ Chauffer dans un bain-marie bouillant pendant 15 minutes pour gélatiniser complètement l'amidon avec agitation.
- ✓ Laisser refroidir à température ambiante.
- ✓ Transférer la solution dans une fiole jaugée de 100 ml et ajuster au trait avec de l'eau distillée.
- ✓ Bien homogénéiser.

Préparation de la gamme étalon :

- ✓ Prélever 1, 2, 3, 4 et 5 ml de la solution standard précédemment préparée.
- ✓ Transférer chaque volume dans des fioles jaugées de 100 ml (protégées de la lumière

avec du papier aluminium).

- ✓ Ajouter 1 ml d'acide acétique 1 N dans chaque fiole pour neutraliser le NaOH.
- ✓ Ajouter ensuite 2 ml de solution d'iode à 0,2 %.
- ✓ Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait.
- ✓ Homogénéiser et laisser réagir dans l'obscurité pendant 20 minutes.
- ✓ Mesurer l'absorbance à 620 nm contre un témoin contenant tous les réactifs sauf amidon.

Préparation des échantillons à doser :

- ✓ Prélever 100 mg d'échantillon d'amidon extrait.
- ✓ Répéter les mêmes étapes que pour la solution

c) Calcul

- ✓ Tracer la courbe d'étalonnage (absorbance/concentration en µg/ml).
- ✓ Lire la concentration de l'échantillon sur cette courbe.
- ✓ Calculer le pourcentage d'amylose dans l'amidon en fonction de la dilution effectuée.

La teneur en amylopectine a été calculée à l'aide de l'équation suivante expliquée par **Torruco- Uco et al. (2006)**.

$$\text{Taux d'amylopectine} = (100 - \% \text{d'amylose})$$

➤ Viscosité

a) Principe

La méthode repose sur la chute d'une bille dans une solution d'amidon. Lorsqu'elle atteint une vitesse constante, le temps qu'elle met à parcourir une distance donnée est mesuré. En appliquant la loi de Stokes, la viscosité dynamique du fluide est calculée à partir du temps de chute, de la densité de la bille et de celle du liquide (**Steffe, 1996**).

Préparation de la solution d'amidon :

- ✓ Pesez 1 g d'amidon.
- ✓ Diluez dans 100 ml d'eau distillée pour obtenir une solution à 1 % (m/v).
- ✓ Mélangez au vortex ou à l'agitateur magnétique pendant 30 minutes pour homogénéiser.

- ✓ Laissez reposer 15 minutes à température ambiante pour éliminer les bulles.

b) Mode opératoire

- ✓ Remplir le tube du viscosimètre avec la solution d'amidon préparée (éviter les bulles).
- ✓ Insérer délicatement la bille dans le tube.
- ✓ Laisser la bille atteindre une vitesse constante.
- ✓ Chronométrer le temps de chute entre deux repères définis (généralement 10 ou 20 cm selon l'appareil).
- ✓ Refaire la mesure au moins 3 fois et calculer la moyenne.
- ✓ Noter la température du liquide (à faire idéalement à 25 °C).

Calcul selon la formule :

$$\mu = K \times (\rho_1 - \rho_2) \times t$$

Dont :

μ : la viscosité dynamique du fluide

K : la constante du viscosimètre (35 cas de bille métallique)

ρ_1 : la masse volumique de la bille métallique (8.02 g/ml)

ρ : la masse volumique du liquide en g/ml

t : temps de chute en minutes

➤ **Angle de repos**

a) Principe

Cette analyse permet d'évaluer la fluidité ou la coulabilité de l'amidon en poudre. Un angle de repos faible indique une bonne fluidité, tandis qu'un angle élevé suggère une poudre plus cohésive et donc plus difficile à manipuler (Sharma et al., 2024).

b) Mode opératoire

- ✓ Peser 100 g d'amidon en poudre.
- ✓ Verser doucement la poudre dans un entonnoir fixé à une hauteur constante, sur une surface plane, jusqu'à formation d'un cône naturel de poudre.

Mesurer :

- ✓ La hauteur (h) du cône.
- ✓ Le rayon de la base (r) du cône.

Calculer l'angle de repos (θ) à l'aide de la formule suivante :

$$\tan \theta = \frac{h}{r}$$

➤ **Masse volumique apparente et tassée**

a) **Principe**

Ces paramètres permettent d'évaluer la densité de l'amidon en poudre, sous forme libre (apparente) ou après tassement. Cela renseigne sur la compressibilité de la poudre et son comportement en mélange ou en stockage (Sharma et al., 2024).

b) **Mode opératoire**

Masse volumique apparente :

- ✓ Peser 5 g d'amidon en poudre.
- ✓ Verser doucement la poudre dans l'éprouvette graduée sans tapoter ni secouer.
- ✓ Lire le volume occupé par la poudre
- ✓ Appliquer la formule :

$$\rho \text{ apparente} = \frac{m}{v}$$

Masse volumique tassée

- ✓ Peser 5 g d'amidon en poudre.
- ✓ Verser dans une éprouvette de 50 ml.
- ✓ Tapoter verticalement l'éprouvette (chute de 2–3 cm) jusqu'à stabilisation du volume
- ✓ Lire le nouveau volume
- ✓ Appliquer la même formule que ci-dessus.

➤ **Indice de compressibilité (Carr Index)**

a) **Principe**

L'indice de compressibilité (ou Carr Index) permet d'estimer la capacité de la poudre à se tasser. Plus il est élevé, plus la poudre est cohésive et difficile à manipuler (Sharma et al.,

2024).

$$\text{carr index} = \frac{\rho \text{ tassée} - \rho \text{ apparente}}{\rho \text{ tassée}}$$

➤ **Pouvoir gonflant (Water Absorption Capacity)**

a) **Principe**

Cette analyse permet d'évaluer la capacité de l'amidon à absorber l'eau et à gonfler lorsqu'il est chauffé. Elle renseigne sur le comportement à la gélatinisation (**Sharma et al., 2024**).

b) **Mode opératoire**

- ✓ Peser 1 g d'amidon (W1).
- ✓ Ajouter 25 ml d'eau distillée.
- ✓ Chauffer à 80°C pendant 30 min sous agitation continue.
- ✓ Laisser refroidir, puis centrifuger à 5000×g pendant 20 min.
- ✓ Peser le précipité (W2).

Calculer à l'aide de la formule suivante :

$$\text{pouvoir gonflant(g/g)} = W1$$

➤ **Capacité de rétention de l'huile**

a) **Principe**

Similaire au pouvoir gonflant, cette méthode mesure la capacité de l'amidon à retenir l'huile après chauffage. Cela reflète ses propriétés fonctionnelles en milieu lipidique (**Sharma et al., 2024**).

b) **Mode opératoire**

- ✓ Peser 1 g d'amidon (W1).
- ✓ Ajouter 25 ml d'huile de tournesol.
- ✓ Chauffer à 80°C pendant 30 min sous agitation continue.
- ✓ Laisser refroidir, puis centrifuger à 5000×g pendant 20 min.

Peser le précipité (W2). Calculer comme précédemment :

$$\text{capacité de rétention d'huile (g/g)} = \frac{W2 - W1}{W1}$$

➤ **Concentration minimale de gélification**

a) Principe

La concentration minimale de gélification (CMG) correspond à la plus faible concentration d'amidon nécessaire pour former un gel stable après chauffage et refroidissement (Sharma *et al.*, 2024).

b) Mode opératoire

- ✓ Préparer une série de solutions d'amidon de 2 à 30 % (p/v)
- ✓ Verser chaque solution dans un tube à essai.
- ✓ Chauffer à 90°C pendant 30 min sous agitation douce.
- ✓ Laisser refroidir à température ambiante.
- ✓ Retourner doucement les tubes. La CMG est la plus faible concentration pour laquelle le gel ne coule pas.

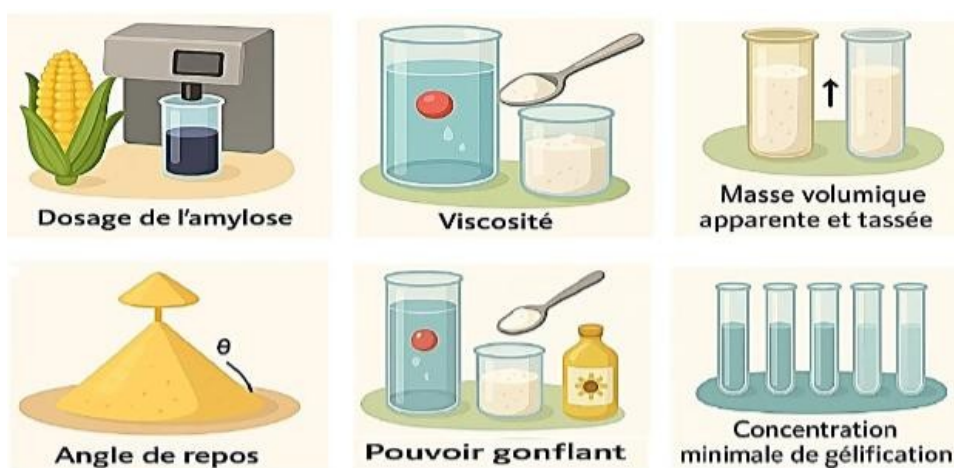


Figure 10: Synthèse graphique des paramètres des propriétés fonctionnelles

IV.7. Analyses structurales des amidons extraits

Analyse par spectroscopie à transformée de Fourier (FTIR) (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

a) Principe

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) permet d'identifier les groupes fonctionnels présents dans les matériaux organiques à partir de l'absorption des rayonnements infrarouges par les liaisons chimiques. Le mode ATR permet d'analyser directement les poudres sans préparation, en utilisant une réflexion interne atténuée à travers un cristal (**Morillo, 2022**).

b) Mode opératoire

- ✓ Allumer l'appareil FTIR (IRAffinity-1S, Shimadzu).
- ✓ Nettoyer le cristal ATR avec de l'éthanol.
- ✓ Déposer directement une petite quantité de poudre d'amidon sur le cristal.
- ✓ Abaisser le bras de pression pour assurer un bon contact.
- ✓ Lancer l'analyse sur la plage de 4000 à 400 cm^{-1} , avec 24 scans et une résolution de 4 cm^{-1} .
- ✓ Une fois l'analyse terminée, nettoyer le cristal avec de l'éthanol avant de passer à l'échantillon suivant.

➤ **Analyse par diffraction aux rayons X (DRX)**

a) Principe

La diffraction des rayons X (DRX) permet d'analyser la structure cristalline des matériaux solides, y compris les amidons. Lorsqu'un faisceau de rayons X est dirigé sur un échantillon de poudre, les plans cristallins diffractent les rayons selon la loi de Bragg. L'intensité des pics diffractés, enregistrée en fonction de l'angle de diffraction (2θ), permet de déterminer la nature et le degré de cristallinité de l'amidon. Cette méthode est particulièrement utile pour comparer les modifications structurales induites par des traitements physiques ou chimiques sur l'amidon (**Jagadeesan, 2020**).

b) Mode opératoire

- ✓ Utiliser une poudre d'amidon lyophilisée et homogène.
- ✓ Déposer la poudre dans le porte-échantillon du diffractomètre à rayons X, en tassant légèrement sans créer de fissures.

Régler les paramètres de balayage :

- Plage d'angle (2θ) : 5° à 40°
- Pas de balayage : $0,02^\circ$
- Temps par pas : 1–2 secondes
- Rayonnement : Cu $K\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$)
- ✓ Lancer le balayage et enregistrer le diffractogramme.
- ✓ Identifier les pics caractéristiques
- ✓ Calculer éventuellement l'indice de cristallinité à partir de l'aire des pics cristallins et amorphes.

$$\text{Cr I} = ((I_{002} - I_{AM}) / I_{002}) \times 100$$

I_{002} : Intensité maximale du pic de diffraction du plan 002 I_{AM} : Intensité diffusée par la phase amorphe de l'échantillon

IV.8. Application culinaire à base de pain rassis

Dans le cadre de la valorisation du pain rassis, une application culinaire originale a été développée sous forme de chips. Trois formulations expérimentales ont été élaborées et soumises à une évaluation sensorielle par un panel non entraîné. Pour évaluer leur potentiel d'acceptabilité, ces formulations ont été comparées à un produit commercial similaire. Afin de garantir l'objectivité des réponses, tous les échantillons y compris le produit de référence ont été présentés sous des codes anonymes, sans indication de leur nature ou origine.

N.B : Les formulations exactes ne sont pas divulguées dans le présent mémoire pour des raisons de confidentialité, en lien avec une procédure de valorisation potentielle par brevet.

➤ Évaluation sensorielle

Une analyse sensorielle a été conduite auprès d'un panel composé d'enseignants, étudiants et administrateurs non entraîné ($n = 51$), afin d'évaluer les qualités organoleptiques des trois formulations. Les critères étudiés portaient sur l'aspect visuel, l'odeur, la croustillance, goût salé, goût général, texture en bouche et après goût. L'évaluation s'est faite à l'aide d'une échelle hédonique à 5 points.

Chaque panéliste reçoit les échantillons de formulation anonyme (chaque échantillon est codé par un code d'une lettre : A, B, C et D). Les échantillons sont présentés de manière

homogène ; tous les facteurs extrinsèques aux échantillons (quantité présentée, contenant...) sont homogènes. Entre chaque dégustation, le dégustateur doit se rincer la bouche avec de l'eau potable afin d'éliminer le goût résiduel de l'échantillon précédent. La disposition des dégustateurs a été faite de façon qu'il n'y ait pas de communication entre les dégustateurs.

FICHE DE DÉGUSTATION SENSORIELLE CHIPS

Nom / Prénom :

Date :

Âge :

Genre : Homme Femme

Fréquence de consommation de chips : Jamais Rarement Parfois Souvent

Critère	A	B	C	D	Description des extrémités de l'échelle
Aspect visuel					1 : Couleur terne, chips brûlées, tachées ou trop grasses, forme irrégulière ou cassée 2 : Légèrement trop foncée ou grasse, quelques défauts visibles 3 : Couleur correcte, forme acceptable, aspect moyen mais sans défaut majeur 4 : Belle couleur dorée, bonne uniformité de forme, peu de défauts 5 : Parfaitement dorées, aspect appétissant, homogène, bien formées
Odeur					1 : Odeur désagréable (rance, vieille huile) 2 : Odeur faible ou légèrement douteuse 3 : Odeur correcte mais peu matraquée 4 : Odeur agréable, caractéristique des chips 5 : Odeur fraîche, intense, appétissante et typique
Croustillance					1 : Molle, pâteuse, aucun croquant 2 : Légèrement croustillante, mais texture molle dominante 3 : Croustillance moyenne, acceptable 4 : Bonne croustillance, agréable en bouche 5 : Très croustillante, croquant net, agréable, sonore

1

Goût salé					1 : Trop salé ou pas salé du tout, désagréable 2 : Mal équilibré (soit trop peu, soit trop salé) 3 : Goût salé modéré, équilibré mais peu expressif 4 : Bien salé, agréable en bouche 5 : Parfaitement équilibré, le sel sublime le goût sans dominer
Goût général					1 : Désagréable, amer, trop gras ou goût d'huile vieille 2 : Faible intensité de goût, peu plaisant 3 : Goût correct mais peu marqué 4 : Bon goût, plaisant et typique 5 : Excellent goût, riche, équilibré, très plaisant
Texture en bouche					1 : Pâteuse, collante, grasse 2 : Trop grasse, fond mal en bouche 3 : Moyenne, acceptable mais pas idéale 4 : Bonne texture, agréable à mâcher 5 : Texture sèche, légère, fondante, agréable
Après-goût					1 : Mauvaise arrière-goût (amer, gras, persistant) 2 : Arrière-goût un peu désagréable 3 : Neutre ou discret 4 : Agréable, disparaît rapidement 5 : Très plaisant

Commentaires libres (ce que vous avez aimé ou non, suggestions, etc.) :

.....

2

Figure 11: Fiche de dégustation

IV.9. Analyse statistique

Les résultats des analyses physicochimiques ont été comparés par l'analyse de la variance (ANOVA) avec un seuil de signification $\alpha = 0,05$ à l'aide du logiciel SPSS Version 23.

Résultats et Discussion

V. Résultats et discussion

V.1. Résultats des analyses physico-chimiques de la suspension avant et après alcalinisation

Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées avant et après alcalinisation sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4: Résultats des analyses physico-chimiques après alcalinisation

Méthodes		pH	Densité	Temps de décantation (min)
Avant alcalinisation	ETA	5,97±0,01 ^{ab}	1,05 ±0,01 ^a	1,15±0,06 ^c
	EC	5,97 ±0,02 ^{ab}	1,06 ±0,02 ^a	1,31 ±0,15 ^c
	US	5,99 ±0 ^a	1,06 ±0 ^a	4,38 ±0,13 ^a
	MO	5,99 ±0 ^a	1,06 ±0 ^a	3,68 ±0,58 ^b
p-value		0,04	0,802	<0,001
Après alcalinisation (pH ciblé =10)	ETA	7,73±0,93 ^a	1,00 ±0 ^b	6,23 ±1,12 ^b
	EC	7,83±0,27 ^a	1,01 ±0,01 ^a	13,44 ±1,22 ^a
	US	8,35±0,23 ^a	1,00±0 ^b	6,88 ± 2,59 ^b
	MO	8,37±0,17 ^a	1,01 ±0 ^a	4,78 ± 0,49 ^b
p-value		0,332	0,006	0,001

L'analyse du tableau IV montrent une variation des valeurs moyennes du pH, de la densité et du temps de décantation entre les deux conditions (avant et après alcalinisation) de la suspension pain rassis/ eau distillée, obtenue par quatre méthodes d'extraction : à température ambiante (ETA), eau chaude (EC), ultrasons (US) et micro-ondes (MO).

Le pH de la suspension avant alcalinisation varie de 5,94 pour la méthode MO à 5,99 pour la méthode US, et une moyenne de 5,97 pour les deux méthodes ETA et EC, ce qui indique un pH légèrement acide pour les quatre méthodes mais après alcalinisation le pH varie de 7,73 pour la méthode ETA à 8,37 pour la méthode MO, ceci montre le passage à un milieu plus basique grâce à l'ajout de NaOH. Le pH de la suspension est un paramètre important car il donne une indication sur l'acidité globale de la matrice avant tout traitement chimique. Ce pH initial peut influencer la solubilité de certains constituants, l'efficacité de l'extraction de

l'amidon, ainsi que la stabilité de la suspension (**Lee et al., 2009**). On observe qu'avant alcalinisation le pH varie très peu entre les méthodes ce qui pourrait être lié à la présence d'acides organiques issus de la dégradation du pain rassis, cependant après l'ajout de NaOH, le pH augmente de façon significative, ce passage à un milieu plus basique favorise la purification de l'amidon en modifiant les charges de surface des particules et en facilitant la séparation des phases (**Liu et al., 2009**). Les résultats de l'analyse statistique montrent une différence significative entre les méthodes d'extraction avant alcalinisation ($P=0,04$) et aucune différence significative entre les méthodes après alcalinisation ($P = 0,332$).

La densité des suspensions avant alcalinisation varie de 1,05 (ETA) à 1,06 pour le reste des méthodes mais après alcalinisation la densité des suspensions diminue légèrement, avec des valeurs comprises entre 1,00 (ETA, US) et 1,01 (EC, MO). La densité de la suspension est un paramètre important car elle reflète la quantité totale de matière dissoute en suspension, elle donne une indication sur la concentration en solides (amidon, protéines, fibres, etc.) ce qui peut montrer l'efficacité de l'extraction et la séparation de l'amidon par décantation ou filtration. (**Rudolph, 2012**). On observe qu'avant l'extraction, la densité des suspensions est similaire (environ 1,06) pour toutes les méthodes d'extraction. Cela montre que la quantité totale de substances dissoutes dans l'eau distillée reste la même, peu importe la méthode employée. Ces résultats sont consolidés avec les résultats de l'analyse statistique qui montrent l'absence d'effet significatif entre les différentes méthodes. Après alcalinisation, une légère diminution de la densité a été observée, avec des valeurs comprises entre 1,00 (ETA, US) et 1,01 (EC, MO). Les résultats de l'analyse statistique montrent une différence significative entre les méthodes, faisant ressortir deux groupes homogènes « groupe a » qui englobe les méthodes EC et MO, et « groupe b » englobant ETA et US. Cela peut être dû à l'ajout d'une solution de NaOH, qui favorise la précipitation de certaines substances, telles que les protéines ou d'autres impuretés solubles. Cela correspond également à l'effet de purification partielle, dans lequel les impuretés solubles sont neutralisées, précipitées puis éliminées de la phase liquide mesurée (**Benhura & Chingwaru, 2016**).

Le temps de décantation des solutés (particules) varie entre 1,15min (ETA) et 4,38min (US). Après alcalinisation, ce temps augmente globalement, atteignant des valeurs comprises entre 4,78 min (MO) et 13,44 min (EC). Le temps de décantation correspond à la capacité des particules d'amidon à se séparer du mélange sous l'effet de la gravité. Après alcalinisation on observe une augmentation du temps de décantation. Cela pourrait s'expliquer par le fait que l'ajout de NaOH modifie les charges de surface des particules en suspension ce qui favorise

leur dispersion et stabilise la suspension colloïdale aussi bien que certaines impuretés soient précipitées (Liu *et al.*, 2009). La suspension restante met davantage de temps à se séparer en phases, car les particules sédimentent plus lentement. Les résultats de l'analyse statistique montrent une différence significative avant et après alcalinisation entre les différentes méthodes, faisant ressortir trois groupes homogènes avant alcalinisation « groupe a » pour la méthode US, et « groupe b » pour la méthode MO et « groupe c » qui englobe les méthodes ETA et EC, et deux groupes homogènes après alcalinisation « groupe a » pour la méthode EC et « groupe b » qui englobe les méthodes ETA, US et MO. En comparant chaque méthode avant et après alcalinisation, on constate une augmentation nette du temps de décantation pour toutes les méthodes, particulièrement pour EC (de 1,31 à 13,44 min) et US (de 4,38 à 6,88 min). Cette tendance confirme l'influence du traitement alcalin sur la stabilité des suspensions d'amidon et l'efficacité de la séparation des phases. Ces observations sont cohérentes avec les travaux de Benhura & Chingwaru (2016), qui ont montré que l'alcalinisation favorise la purification de l'amidon par précipitation des protéines et impuretés solubles.

V.2. Résultats des analyses physico-chimiques de la suspension après alcalinisation

Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur la suspension après alcalinisation sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5: Résultats des analyses physico-chimique après alcalinisation

Méthodes	Turbidité (NTU)	Degré Brix (°B)	Temps de décantation de l'amidon (min)
ETA	1 ±0 ^a	1,53 ±0,12 ^b	37,58 ±0,72 ^b
EC	1 ±0 ^a	1,63 ±0,25 ^b	40,34 ±0,98 ^{ab}
US	1 ±0 ^a	1,33 ±0,23 ^b	33,07 ±0,95 ^c
MO	1 ±0 ^a	2,00 ±0,00 ^a	42,58 ±2,58 ^a
P-value	NS	0,012	0,001

NS : non significatif

Les résultats de la turbidité présentent une valeur moyenne de 1 NTU pour toutes les méthodes d'extraction. Selon Hoover (2001), une turbidité supérieure à 1 NTU indique la présence de fines particules non décantées, traduisant une séparation incomplète. Ainsi, malgré l'alcalinisation, les extraits demeurent légèrement troubles, probablement en raison de fines particules d'amidon ou d'impuretés résiduelles. La turbidité indique la quantité de particules en suspension, une turbidité élevée indique une suspension trouble, donc une extraction efficace

mais une séparation incomplète (**Hoover, 2001**). Les résultats de l'analyse statistique montrent l'absence d'effet significatif entre les différentes méthodes.

En ce qui concerne le degré Brix, il varie de 1,53 à 2,00, avec des valeurs généralement plus élevées pour l'extraction par micro-ondes (MO), ceci peut être dû à une meilleure solubilisation de certains composés sous l'effet des micro-ondes ou à une hydrolyse partielle de l'amidon en sucres solubles (**Zhang, Li, & Chen, 2011**), il se pourrait que les autres méthodes extraient moins de matières solubles. Les résultats de l'analyse statistique montrent une différence significative entre les différentes méthodes, faisant ressortir deux groupes homogènes « groupe a » pour la méthode MO et « groupe b » qui englobe les méthodes ETA, EC et US.

Le temps de décantation de l'amidon correspond à la capacité des particules d'amidon à se séparer du mélange sous l'effet de la gravité. Le temps de décantation de l'amidon varie entre 33,07 min (US), 37,58 min (ETA), 40,34 min (EC) et 42,58 min (MO). Après lavage et neutralisation, Le temps de décantation varie selon la méthode d'extraction. L'amidon obtenu par ultrasons (US) présente un temps de décantation plus court, traduisant une meilleure stabilité de la suspension. À l'inverse, l'amidon extrait par micro-ondes (MO) montre un temps de décantation plus long, indiquant une sédimentation plus lente et donc une suspension moins stable. Les amidons obtenus par les méthodes à eau à température ambiante (ETA) et à eau chaude (EC) présentent des valeurs intermédiaires, correspondant à une stabilité moyenne, Ces différences peuvent être attribuées aux effets physiques des traitements : les ultrasons fragmentent les granules d'amidon, réduisant leur taille et améliorant leur dispersion, tandis que les micro-ondes entraînent une gélatinisation partielle qui favorise l'agglomération des particules et ralentit leur décantation (**Liu et al., 2009**). Les résultats de l'analyse statistique montrent une différence significative entre les différentes méthodes, faisant ressortir quatre groupes homogènes « groupe a » pour la méthode MO et « groupe b » pour la méthode ETA, « groupe c » pour la méthode US, « groupe ab » pour la méthode EC.

V.3. Résultats des analyses physico-chimiques de la pureté de l'amidon extrait lyophilisé

Les résultats des analyses de la pureté effectuées sur l'amidon extrait du pain rassis sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6: Résultats des analyses de la pureté de l'amidon extrait

Méthodes	Humidité	Cendres	Lipides	Protéines	Fibres
ETA	6,12±2,04 ^a	0,11±0,1 ^a	9,00±9	1,75±0,14 ^a	0 ^a
EC	5,10±1,02 ^a	0,18±0,01 ^a	0	1,21±0,46 ^b	0 ^a
US	6,89±1,39 ^a	0,18±0,01 ^a	0	1,42±0,015 ^{ab}	0 ^a
MO	4,59±0,51 ^a	0,16±0,01 ^a	0	0,64±0,07 ^c	0 ^a
P-value	0,241	0,350	ND	0,003	ND

ND : non déterminé

L'humidité est un indicateur de pureté qui est important pour la stabilité de l'amidon et son aptitude au stockage, une humidité élevée peut favoriser la prolifération microbienne et l'altération enzymatique (**Abdullah et al., 2000**).

Les résultats montrent une variation notable du taux d'humidité selon la méthode d'extraction utilisée. L'amidon obtenu par extraction assistée par micro-ondes présente la teneur en humidité la plus faible ($4,59 \pm 0,51$ %), tandis que celui extrait par ultrasons affiche la valeur la plus élevée ($6,89 \pm 1,39$ %). Les méthodes à l'eau chaude et à l'eau à température ambiante donnent des taux intermédiaires, respectivement de $5,10 \pm 1,02$ % et $6,12 \pm 2,04$ %. L'analyse statistique indique qu'il n'y a pas de différence significative entre ces valeurs ($P = 0,241$), bien qu'une tendance à la diminution de l'humidité soit observée avec les techniques thermiques (eau chaude, micro-ondes).

Ces différences peuvent être attribuées à l'efficacité des étapes de lavage et, surtout, à la lyophilisation, qui reste le principal procédé de déshydratation. Une lyophilisation mal contrôlée peut entraîner une humidité résiduelle variable, affectant la stabilité du produit final.

Selon les normes commerciales, l'humidité de l'amidon alimentaire commercial ne doit pas dépasser 14 %, afin de garantir une bonne conservation, prévenir la croissance microbienne et prolonger la durée de stockage. Les taux observés dans cette étude sont donc largement inférieurs à cette limite, ce qui confirme la qualité des amidons extraits en termes de stabilité et de conservation.

Les résultats de dosage des lipides montrent une absence totale de matière grasse dans les amidons extraits par les méthodes EC, US et MO, alors qu'une valeur anormalement élevée de $9,00 \pm 9,00$ % a été enregistrée pour l'ETA. Ce résultat est probablement dû à une erreur de

manipulation ou de contamination, car il contraste fortement avec les autres méthodes et présente un écart-type aussi élevé que la moyenne, ce qui témoigne d'une grande dispersion des valeurs.

Il est connu que les amidons de céréales contiennent des lipides intrinsèques (principalement des lysophospholipides), souvent complexés avec l'amylose à l'intérieur du grain (**Favier, 1989**). Ces complexes sont difficilement solubles à froid. L'extraction à température ambiante semble donc inefficace pour rompre ces liaisons, d'où leur possible persistance. À l'inverse, les méthodes à l'eau chaude, par ultrasons ou micro-ondes permettent une dissociation des complexes amylose-lipide et une meilleure élimination des lipides pendant le lavage.

Le chauffage généré par les micro-ondes ou l'eau chaude peut dénaturer ou solubiliser les lipides, facilitant ainsi leur séparation de l'amidon. Les micro-ondes, en particulier, assurent un chauffage rapide et uniforme, augmentant l'efficacité de cette séparation. De leur côté, les ultrasons agissent par le phénomène de cavitation, créant des microbulles qui implosent, libérant ainsi des forces de cisaillement intenses. Ces forces contribuent à désintégrer les structures cellulaires et à libérer les lipides associés à l'amidon (**Zhou et al., 2023**).

En ce qui concerne l'analyse statistique, elle n'a pas pu être réalisée pour les lipides. En effet, les valeurs étaient nulles dans toutes les répétitions sauf une (ETA), rendant l'écart-type nul pour la majorité des méthodes. Cette situation empêche l'utilisation des tests d'ANOVA, qui nécessitent une certaine variabilité des données pour être valides. Il est donc préférable de commenter ces résultats de manière descriptive.

Les résultats des protéines montrent une variation selon la méthode d'extraction. L'amidon extrait par ETA présente la concentration la plus élevée ($1,75 \pm 0,14$ %), suivi par l'ultrason (US) avec $1,42 \pm 0,015$ %, l'eau chaude (EC) avec $1,21 \pm 0,46$ %, et les micro-ondes (MO) qui affichent la valeur la plus faible ($0,64 \pm 0,07$ %). Ces résultats indiquent que l'extraction assistée par micro-ondes est la plus efficace pour éliminer les protéines résiduelles, ce qui témoigne d'une meilleure purification.

L'analyse statistique montre une différence significative entre les méthodes ($P = 0,003$), confirmant l'impact des procédés utilisés sur l'efficacité de la déprotéinisation. L'étape d'alcalinisation à pH 10 joue un rôle central dans la solubilisation des protéines, facilitant leur séparation de la matrice amidonique (**Ben Rejeb et al., 2024**). Par ailleurs, le chauffage rapide

et ciblé induit par les micro-ondes provoque une dénaturation structurale des protéines, réduisant leur affinité pour l'amidon et facilitant leur élimination (Ting-ting et al., 2013). L'eau chaude produit un effet similaire mais de moindre intensité. Quant aux ultrasons, ils agissent par cavitation, générant des forces mécaniques capables de rompre les liaisons protéines amidon (Du et al., 2022). À l'inverse, l'extraction à température ambiante ne fournit pas l'énergie nécessaire à une dénaturation suffisante, expliquant la présence plus élevée de protéines dans l'amidon extrait par cette méthode.

Concernant les fibres alimentaires, aucune trace n'a été détectée dans les amidons extraits, quelle que soit la méthode utilisée. Ce résultat indique que l'ensemble du procédé, notamment l'alcalinisation, les étapes de filtration et les lavages répétés a été extrêmement efficace pour éliminer les composants fibreux présents dans la matière première.

Du fait de l'absence totale de fibres dans toutes les répétitions, l'analyse statistique n'a pas pu être réalisée (ND). En effet, un écart-type nul n'empêche l'utilisation des tests statistiques comme l'ANOVA, car aucune variation n'est observée entre les échantillons.

V.4. Résultats des analyses des propriétés fonctionnelles des amidons extraits

Les résultats des analyses des propriétés fonctionnelles effectuées sur l'amidon extrait du pain rassis sont présentés dans le tableau 7.

Tableau 7 : résultats des propriétés fonctionnelles de l'amidon extrait du pain rassis

Méthodes	Amylose soluble (%)	Amylose soluble corrigé (%)	Amylopectine (%)	Amylopectine corrigé (%)	Viscosité (cp)	Angle de repos °	Masse volumiques apparente (KG/m ³)	Masse volumique tassé (Kg/m ³)	Indice de compressibilité (%)	CRE (g/g)	CRH (g/g)	Concentration minimale de
ETA	9,65 ±0,07 ^b	12,06 ±0,08 ^b	87,94 ±0,08 ^b	87,94 ±0,08 ^b	18,27 ±0,61 ^a	32,85 ±1,4 ^b	370,33±13,50 ^b	476±0,00 ^a	22,20± 2,84 ^{ab}	4,69± 0,47 ^a	2,75±0,81 ^a	6,0 ±0,0
EC	4,29 ±0,76 ^c	5,36 ± 0,95 ^c	94,64 ±0,95 ^a	94,64 ±0,95 ^a	18,39 ±0,73 ^a	38,16 ±0,92 ^a	312,33±9,50 ^d	416±0,00 ^c	24,92±2,28 ^b	3,60± 1,22 ^a	3,51±0,48 ^a	6,0 ±0,0
US	11,60 ±0,38 ^a	14,50 ±0,47 ^a	85,50 ±0,47 ^c	85,50 ±0,47 ^c	16,92 ±0,24 ^a	38,06 ±1,03 ^a	344,66±12,01 ^c	422±10,39 ^b	18,29±2,58 ^a	4,0±1,04 ^a	3,55±0,40 ^a	4,0 ±0,0
MO	9,46 ±0,76 ^b	11,82 ±0,95 ^b	88,18 ±0,95 ^b	88,18 ±0,95 ^b	17,29 ±2,57 ^a	33,60 ±2,47 ^b	394,66±9,23 ^a	476±0,00 ^a	17,09±1,94 ^a	4,71±0,28 ^a	3,53±0,30 ^a	2,0 ±0,0
P-value	0,001	0,001	0,001	0,001	0,514	0,003	0,001	0,001	0,028	0,353	0,258	NI

L'amylose est la composante linéaire de l'amidon. Sa présence joue un rôle déterminant dans les propriétés fonctionnelles telles que la gélatinisation, la rétrogradation (durcissement du pain rassis) et la digestibilité de l'amidon. En général, plus la teneur en amylose est élevée, plus l'amidon a tendance à former des gels fermes et à être digéré lentement (**Wang et al., 2024**).

Les résultats montrent des variations notables du taux d'amylose selon la méthode utilisée : $11,60 \pm 0,38$ % pour les ultrasons (US), $9,65 \pm 0,07$ % pour l'extraction à température ambiante (ETA), $9,46 \pm 0,76$ % pour les micro-ondes (MO), et $4,29 \pm 0,76$ % pour l'eau chaude (EC).

Les ultrasons génèrent des ondes de pression induisant la cavitation, c'est-à-dire la formation puis l'implosion de microbulles. Cette implosion libère une énergie localement très intense, capable de rompre les liaisons au sein des chaînes ramifiées d'amylopectine, libérant ainsi davantage d'amylose. Cette action rend l'amylose plus accessible et plus soluble (**Wei et al., 2021**).

L'extraction à température ambiante, étant une méthode douce sans apport énergétique significatif, ne modifie pas la structure de l'amidon. La teneur en amylose obtenue reflète donc la part naturellement soluble ou faiblement liée dans le pain rassis. En l'absence de chaleur ou de force mécanique intense, l'amylose piégée dans la structure de l'amylopectine reste peu libérée.

Les micro-ondes provoquent un échauffement rapide de l'eau contenue dans l'échantillon, ce qui peut entraîner une gélatinisation partielle des granules d'amidon, avec lixiviation (libération) d'amylose. Cependant, un traitement trop intense ou prolongé peut aussi provoquer la dégradation thermique de l'amylose, réduisant sa solubilité. Ceci pourrait expliquer pourquoi la teneur en amylose soluble obtenue n'est pas la plus élevée, malgré l'apport énergétique important (**Zhong et al., 2021**).

L'eau chaude, de son côté, permet un gonflement des granules et la sortie d'une partie de l'amylose. Toutefois, une température modérée peut ne pas être suffisante pour libérer toute l'amylose, ou bien favoriser la rétrogradation ou des interactions amylose-amylopectine rendant l'amylose moins soluble (**Montgomery & Senti, 1958**).

L'analyse statistique révèle une différence significative entre les méthodes, répartissant les données en trois groupes homogènes, groupe a : US, groupe b : ETA et MO et groupe c :

EC.

Quant à l'amylopectine, composant majoritaire de l'amidon, est responsable de la structure granulaire, de la viscosité, de la stabilité thermique et de la capacité de gélification des produits contenant de l'amidon (**Bertoft, 2017**). Les taux mesurés sont les suivants : $95,71 \pm 0,07$ % pour l'eau chaude (EC), $90,54 \pm 0,76$ % pour les micro-ondes (MO), $90,35 \pm 0,07$ % pour ETA, $88,40 \pm 0,38$ % pour US.

L'eau chaude permet de gonfler les granules sans dénaturer excessivement les chaînes ramifiées, ce qui favorise la préservation de l'amylopectine. Cette intégrité structurelle se traduit par une meilleure viscosité et stabilité fonctionnelle.

Le traitement par micro-ondes, bien qu'efficace pour extraire l'amidon, peut entraîner une certaine dépolymérisation de l'amylopectine, en raison de l'intensité thermique. Des ruptures de liaisons glycosidiques peuvent survenir, réduisant la taille moléculaire. Cependant, cet effet reste moins prononcé que pour les ultrasons, ce qui explique une teneur en amylopectine modérément altérée (**Zhong et al., 2021**).

La méthode ETA, peu agressive, préserve globalement la structure de l'amylopectine. Les différences légères observées par rapport à EC peuvent s'expliquer par une extraction moins efficace ou par la persistance de composants liés au pain (ex : protéines) pouvant interférer avec la quantification.

Les ultrasons, en revanche, exercent un effet mécanique puissant. La cavitation génère des forces de cisaillement suffisantes pour rompre les chaînes ramifiées, ce qui entraîne une dégradation partielle de l'amylopectine. Certains fragments peuvent être convertis en amylose ou devenir non détectables dans la méthode utilisée (**Chan et al., 2021**). Cela explique la teneur en amylopectine la plus faible avec cette méthode, cohérente avec la forte teneur en amylose observée.

L'analyse statistique indique également une différence significative entre les méthodes, réparties en trois groupes homogènes : groupe a : EC, groupe b : ETA et MO et groupe c : US

Pour le paramètre de la viscosité de l'amidon extrait, les résultats varient de 16,93 Cp (US) à 18,40 cP (EC). Il s'agit d'une propriété rhéologique essentielle qui reflète la capacité de l'amidon à épaissir les solutions et à former des gels, ce qui est déterminant pour ses applications comme agent texturant ou stabilisant dans l'industrie alimentaire (**Ratnayake &**

Jackson, 2008 ; Eliasson, 2004).

Les méthodes EC et ETA présentent les valeurs de viscosité les plus élevées, suggérant une préservation de l'intégrité granulaire et de la structure polymérique de l'amidon. En effet, la méthode EC pourrait favoriser une gélatinisation modérée, entraînant le gonflement des granules et une libération contrôlée d'amylose, contribuant ainsi à l'épaississement. La méthode ETA, plus douce, permettrait quant à elle de maintenir l'intégrité des granules, qui peuvent interagir efficacement avec l'eau sans dégradation excessive.

En revanche, les viscosités les plus faibles, observées avec les méthodes US (16,93 cP) et MO (17,30 cP), peuvent s'expliquer par une dégradation partielle des chaînes d'amidon (amylopectine notamment) et une désorganisation de la structure granulaire, réduisant leur capacité à retenir l'eau et à créer un réseau visqueux.

L'analyse statistique montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les différentes méthodes ($P = 0,514$), ce qui indique que, malgré les variations observées, l'effet des techniques d'extraction sur la viscosité reste limité.

L'angle de repos des amidons extraits varie de $32,85^\circ$ (ETA) à $38,76^\circ$ (EC). Les valeurs les plus élevées sont observées avec les méthodes EC ($38,76^\circ$) et US ($38,06^\circ$), tandis que les plus faibles concernent ETA ($32,85^\circ$) et MO ($33,60^\circ$).

L'angle de repos est un paramètre clé pour évaluer l'écoulement des poudres, reflétant la cohésion ou le frottement inter particulaire. Les matériaux d'amidon plus collants ou agglomérés présentent généralement un angle de repos plus élevé que ceux constitués de particules lisses et non adhésives (**Nadaf et al., 2021**).

Les valeurs élevées obtenues pour EC et US pourraient être attribuées, respectivement, à une gélatinisation partielle favorisant l'adhérence entre granules (EC), et à une agglomération des particules ou une rugosité accrue causée par la cavitation ultrasonique (US), qui augmente le frottement (**Chemat et al., 2017**).

À l'inverse, les méthodes ETA et MO semblent mieux préserver la régularité granulaire et une surface plus lisse, favorisant ainsi un meilleur écoulement (**Wei, Li & Zhu, 2025**).

Ces résultats sont confirmés par l'analyse statistique, qui met en évidence une différence significative entre les méthodes, distinguant deux groupes homogènes : le groupe a (US, EC) et le groupe b (ETA, MO).

La masse volumique apparente (MVA) des amidons extraits varie de 312 kg/m³ (EC) à 394,67 kg/m³ (MO). Les valeurs les plus élevées, obtenues pour la méthode (MO), suggèrent la présence de particules plus denses, possiblement en raison d'une légère compaction interne ou d'une réduction de la porosité des granules sous l'effet de l'énergie micro-ondes (**Zhang & Li, 2018**). La méthode ETA, qui présente également une MVA relativement élevée, pourrait préserver la morphologie native des granules, facilitant un empilement efficace. À l'inverse, les valeurs plus faibles obtenues pour EC et US (ultrasons) indiquent une structure moins favorable à une organisation régulière. L'extraction à l'eau chaude pourrait entraîner un gonflement des granules, augmentant leur volume sans densification réelle (**Liu et al., 2019**), tandis que les ultrasons, par leur effet de cavitation, peuvent fragmenter ou déformer les particules, rendant l'empilement irrégulier (**Chemat et al., 2017**). Ces observations sont en accord avec celles de **Ganesan et al. (2008)**, qui ont signalé des MVA comprises entre 300 et 400 kg/m³ pour diverses poudres alimentaires.

La masse volumique tassée (MVT) se situe entre 416 kg/m³ (EC et US) et 476 kg/m³ (MO et ETA). Les valeurs les plus élevées pour MO et ETA traduisent une meilleure aptitude des particules à se tasser sous l'effet d'un compactage mécanique, ce qui peut être lié à une forme plus régulière ou à une surface lisse favorisant l'empilement. Cela renforce l'hypothèse d'un agencement plus efficace des granules, préservé ou légèrement densifié par ces méthodes. À l'opposé, les plus faibles MVT obtenues avec EC et US révèlent une structure interne moins propice au tassement. Le gonflement thermique des granules par EC ou la discontinuité des particules induite par les ultrasons pourraient limiter la densité finale du lit de poudre. Ces résultats corroborent les plages rapportées par **Patel et al. (2009)**, qui ont indiqué des MVT comprises entre 410 et 480 kg/m³ pour des amidons natifs et modifiés. Les résultats de l'analyse statistique pour les deux paramètres MVT et MVA montrent une différence significative entre les différentes méthodes, faisant ressortir pour MVT trois groupes homogènes « groupe a » pour la méthode ETA et MO, « groupe b » pour la méthode US, « groupe c » pour la méthode EC, et pour MVA quatre groupes homogènes « groupe a » pour la méthode MO, « groupe b » pour la méthode ETA, « groupe c » pour la méthode US et « groupe d » pour la méthode EC.

Pour l'indice de compressibilité des amidons extraits, il varie entre 17,09 % (MO) et 24,92 % (EC). Les amidons extraits par MO (17,09 ± 1,94 %) et US (18,29 ± 3,58 %) présentent les indices les plus faibles, traduisant une meilleure coulabilité et une moindre tendance à la compression. À l'inverse, l'EC (24,92 ± 2,28 %) et l'ETA (22,20 ± 2,84 %) donnent des indices

plus élevés, indiquant une poudre plus cohésive et plus compressible.

L'indice de compressibilité (ou indice de Carr) est un indicateur essentiel de la fluidité des poudres : un indice faible (< 20 %) traduit une bonne fluidité tandis qu'un indice élevé (>23%) indique une mauvaise fluidité et une forte tendance au tassement (Carr, 1965 ; Fayed & Otten, 2001). Il dépend de la taille, de la forme, de la rugosité des particules et de leur cohésion. Les indices plus faibles observés pour MO et US peuvent s'expliquer par la formation de particules plus régulières ou moins agrégées, favorisant un meilleur écoulement et limitant les forces de friction inter particulaire (Zhang & Li, 2018 ; Chemat et al., 2017). À l'inverse, l'EC pourrait provoquer un gonflement partiel des granules ou leur agglomération, ce qui augmente la friction et réduit la fluidité (Liu et al., 2019). L'ETA, méthode douce, peut conserver des caractéristiques de forme ou de distribution de taille qui ne favorisent pas un écoulement optimal (Ganesan et al., 2008). Les résultats de l'analyse statistique montrent une différence significative entre les différentes méthodes, faisant ressortir trois groupes homogènes « groupe a » qui englobe les méthodes MO et US, « groupe b » pour la méthode EC, « groupe ab » pour la méthode ETA.

En ce qui concerne la Capacité de Rétention d'Eau (CRE) de l'amidon, les résultats varient de 3,60 g/g (pour l'EC) à 4,71 g/g (pour le MO), l'amidon extrait par MO présente la CRE la plus élevée, suivi de près par l'extraction ETA avec 4,69 g/g. Les méthodes EC et US ont montré des CRE plus faibles, respectivement 3,60 g/g et 4,00 g/g. La CRE constitue une propriété fonctionnelle majeure de l'amidon, car elle influe directement sur la texture, la consistance et la stabilité des produits alimentaires. Elle traduit la quantité d'eau que l'amidon peut absorber et retenir, et dépend essentiellement de la présence de groupes hydroxyles formant des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau, ainsi que de la structure granulaire, de la porosité et du degré de cristallinité des granules (Cao et al., 2023). La méthode MO marque la CRE la plus élevée que ETA et EC, ceci est due à la désorganisation partielle des granules d'amidon et à la rupture des liaisons hydrogènes internes, qui exposent ainsi les molécules d'eau à un plus grand nombre de groupes hydrophiles. Les résultats semblent assez similaires avec ceux rapportés par Zhu (2015) qui a trouvé que le traitement MO améliore la CRE de l'amidon augmentant ainsi son aptitude à retenir l'eau. Quant à l'extraction ETA, sa haute CRE pourrait indiquer que cette méthode préserve mieux l'intégrité des granules d'amidon et leur capacité naturelle à gonfler en présence d'eau sans subir de dégradation excessive. L'amidon natif possède une capacité intrinsèque à absorber l'eau, et une méthode d'extraction douce pourrait maintenir cette propriété (Singh et al., 2004).

Enfin les méthodes EC et US ont donné une CRE plus faible que la méthode MO et ETA. Cela pourrait s'expliquer par une gélatinisation excessive (EC) ou un endommagement important de la structure granulaire (US) entraînant la lixiviation de l'amylose et une désorganisation rendant le réseau moins apte à retenir l'eau (**Jane et al., 1999 ; Copeland et al., 2009**). Malgré toutes ces observations de CRE qui sont différentes entre les méthodes, l'analyse statistique montre l'absence d'effet significatif entre les différentes méthodes, avec une P-value de 0,353.

Les résultats de la Capacité de Rétention d'Huile (CRH) de l'amidon varient de 2,75 g/g pour l'ETA à 3,55 g/g pour l'US. La CRH est une propriété fonctionnelle importante de l'amidon, car elle reflète sa capacité à interagir avec les lipides, influençant ainsi la texture et la rétention des saveurs dans les formulations alimentaires (**Yadav Prakruthi et al., 2025**). Une CRH élevée indique une plus grande affinité de l'amidon pour les composants hydrophobes, souvent liée à une surface hydrophobe plus accessible ou à des modifications de la structure granulaire. Des résultats similaires ont été rapportés par **Jamalabadi et al. (2019)**, qui ont observé une augmentation de l'absorption d'huile de l'amidon de blé de 1,74 % à 4,67 % après 30 minutes de traitement par ultrasons. Cette augmentation peut s'expliquer par la formation de microfissures et l'augmentation de la surface spécifique des granules d'amidon, favorisant l'interaction avec les lipides, comme l'ont décrit **Sujka & Jamroz (2017)**. En revanche, l'extraction ETA, étant une méthode plus douce, pourrait préserver l'intégrité structurale de l'amidon, limitant l'exposition des sites hydrophobes et entraînant ainsi une CRH plus faible. L'analyse statistique montre l'absence d'effet significatif entre les différentes méthodes, avec une P-value de 0,258.

Les résultats de la Concentration Minimale de Gélification (CMG) des amidons varient de 2 % pour la méthode MO à 6 % pour les méthodes ETA et EC. L'amidon extrait par MO présente la plus faible CMG (2 %), suivi de celui obtenu par US (4 %), tandis que les méthodes ETA et EC nécessitent une concentration plus élevée (6 %) pour former un gel stable. La CMG correspond à la plus faible concentration en amidon permettant la formation d'un gel solide dans un tube inversé, et reflète donc la capacité gélifiante de l'amidon (**Stephen et al., 2006**). Plus la CMG est faible, meilleure est la capacité de l'amidon à former un gel, ce qui est un critère important dans les applications alimentaires (**Mohamad Yazid et al., 2019**). La méthode MO, grâce à un chauffage rapide et homogène, favorise la rupture des granules et la libération d'amylose, ce qui abaisse la température de gélatinisation et améliore la formation du réseau tridimensionnel du gel (**Zhou et al., 2018**). Ce résultat (2 %)

est comparable à celui de l'amidon de maïs cireux, réputé pour sa richesse en amylopectine et sa grande aptitude à gélifier à faible concentration (Mohamad Yazid *et al.*, 2019). L'amidon extrait par US montre également une bonne capacité gélifiante (CMG de 4 %), meilleure que celle de la pomme de terre (20 %) et équivalente ou supérieure à celle du tapioca (6 %). En revanche, les méthodes classiques (ETA et EC) donnent une CMG de 6 %, ce qui reste acceptable, mais traduit une efficacité moindre dans la modification de la structure granulaire, probablement en raison d'une libération plus limitée d'amylose ou d'une rétrogradation plus rapide. Il est important de noter que l'analyse statistique n'a pas pu être réalisée pour ce paramètre, car les valeurs mesurées étaient identiques entre les répétitions pour chaque méthode. L'absence de variabilité empêche le calcul d'une P-value via l'ANOVA, ce qui rend l'interprétation statistique inapplicable dans ce cas.

V.5. Résultats des analyses structurales des amidons extraits

V.5.1. Résultats de l'analyse par spectroscopie à transformée de Fourier

Les résultats des analyses par spectroscopie à transformée de Fourier sur l'amidon extrait du pain rassis sont présentés dans la Figure 12.

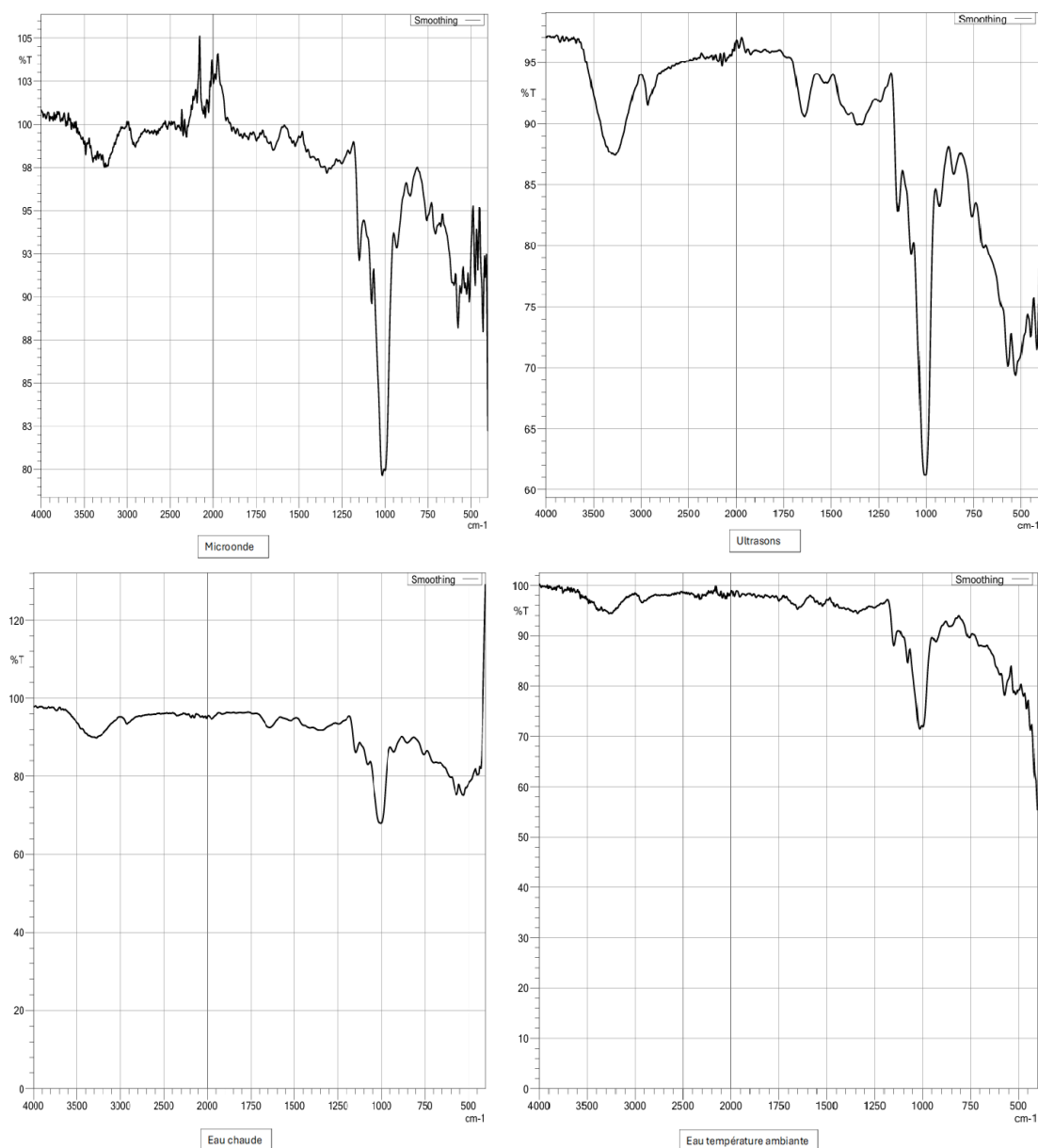


Figure 12: résultats de l'analyse spectroscopique FTIR des amidons issus du pain rassis selon quatre procédés d'extraction

Les spectres FTIR couvrent la gamme de 4000 à 500 cm^{-1} , avec plusieurs bandes caractéristiques visibles pour chaque échantillon :

- ✓ Une large bande entre 3200–3400 cm^{-1} correspondant à la vibration de liaison O–H, liée aux groupes hydroxyles et à l'eau liée.
- ✓ Une bande distincte autour de 2920–2930 cm^{-1} , associée à la vibration C–H des chaînes glucidiques (**Mano et al., 2003**).
- ✓ Un pic observé autour de 1640–1650 cm^{-1} , indiquant la présence d'eau absorbée ou piégée dans la structure amorphe (**Flores-Morales et al., 2012**).

- ✓ Dans la région $1000\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$, la bande la plus intense, liée aux liaisons C–O–C et C–O, essentielle pour la structure des polymères glucidiques (amylose/amylopectine) (**Bento et al., 2019**).

Les spectres FTIR des amidons extraits par micro-ondes, ultrasons, eau à température ambiante et à température chaude révèlent des bandes caractéristiques typiques des polysaccharides, confirmant la présence de l'amidon. Tous les échantillons présentent une bande large entre $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$ liée aux vibrations O–H due aux liaisons hydrogènes et qui démontrent l'hydrophilie ; son élargissement est plus marqué dans les échantillons d'amidon extraits par ultrasons et eau chaude démontrant ainsi une désorganisation structurale prononcée. La bande autour de 2920 cm^{-1} (C–H) et celle entre $1000\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ (C–O et C–O–C) confirment la présence glucidique. Entre $1000\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ toutes les courbes (micro-ondes, ultrasons, eau chaude, température ambiante) présentent un pic intense et bien défini et à 2920 cm^{-1} la bande caractéristique des groupes C–H est présente de façon constante sur tous les spectres FTIR. Cette bande reste fine, sans atténuation, déplacement ni élargissement significatif. La bande à $1640\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$, est plus marquée dans la méthode par ultrasons et eau chaude, ce qui montre une teneur plus élevée en eau liée. Ces observations sont en cohérence avec des travaux récents sur des amidons d'origine alternative tels que la mangue, le lotus ou le marron, où les traitements physiques micro-ondes et ultrasons n'ont pas induit de nouvelles liaisons chimiques mais ont modifié l'ordre moléculaire (**Wang et al., 2020 ; Panghal et al., 2024**). Ainsi, l'analyse FTIR confirme que les modifications observées sont essentiellement physiques, affectant l'organisation structurale des granules d'amidon sans altérer leur composition chimique de base.

V.5.2. Résultats de la DRX

Les résultats des analyses de la Diffraction des rayons X sur l'amidon extrait du pain rassis sont présentés dans le Figure 13.

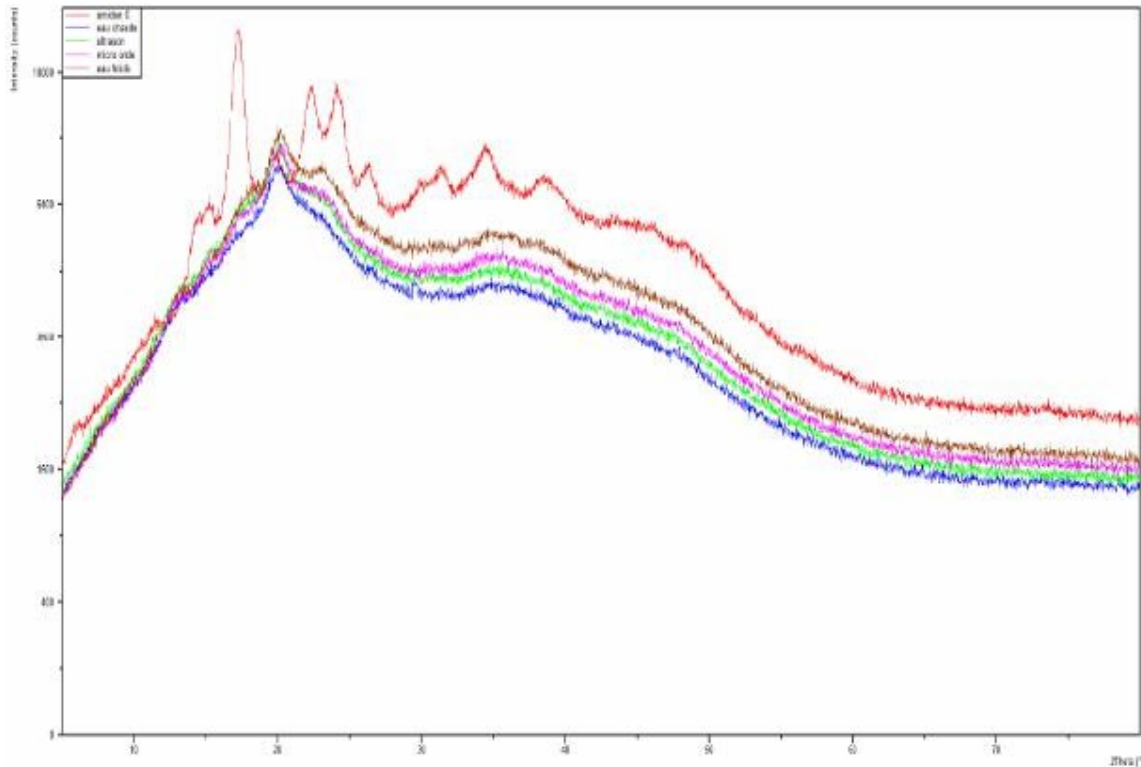


Figure 13: Spectres de diffraction des rayons X des amidons extraits du pain rassis par différentes méthodes

La cristallinité de l'amidon observée par DRX provient essentiellement des zones ordonnées de l'amylopectine. L'amylose, molécule linéaire et moins organisée, contribue peu ou pas aux signaux DRX. L'amidon commercial, probablement, montre une structure très cristalline, ce qui suggère une forte proportion d'amylopectine bien organisée (**Wang et al., 2023**). À l'inverse, les ultrasons induisent des forces de cavitation capables de rompre les liaisons intermoléculaires, (**Bernardo et al., 2018**). Tandis que les micro-ondes, par un échauffement rapide et interne, fragmentent les granules d'amidon et désorganisent les chaînes. (**Li et al., 2020**). Cette désorganisation progressive observée dans les amidons extraits par ultrasons et micro-ondes est cohérente avec les travaux menés sur les amidons de taro ou d'igname soumis à des procédés analogues (**Martins et al., 2020 ; Hu et al., 2021**), où une diminution sensible de la cristallinité par rapport à l'amidon natif est régulièrement rapportée après traitement ultrasonique.

Le traitement à l'eau chaude, a provoqué la gélatinisation (destruction de la cristallinité initiale), mais n'a pas permis une rétrogradation, ce qui explique la faiblesse de ses signaux cristallins (**Donmez et al., 2021**). La rétrogradation nécessite en effet du temps, du froid, et de l'humidité pour permettre à l'amylopectine de se réorganiser.

Les cinq profils DRX analysés révèlent que la méthode d'extraction a une influence majeure sur la cristallinité des amidons. L'amidon commercial présente une structure cristalline nette car il est isolé et standardisé, probablement par voie industrielle. L'amidon extrait à l'eau froide, méthode douce, conserve une partie de la cristallinité naturelle de l'amylopectine. En revanche, les traitements physiques (ultrasons, micro-ondes) déstructurent les granules, ce qui diminue la cristallinité mais peut améliorer d'autres propriétés. L'eau chaude, souvent utilisée pour la gélatinisation, détruit presque totalement l'organisation cristalline en libérant des chaînes libres, mais sans permettre leur réorganisation (rétrogradation). La recristallisation n'est pas enregistrée à l'issue du chauffage, en l'absence de conditions de rétrogradation (froid, humidité prolongée) (Zhang et al., 2025).

La cristallinité de l'amidon joue un rôle déterminant dans ses propriétés fonctionnelles. Un amidon très cristallin (comme celui du commerce ou celui extrait à l'eau froide) aura une digestibilité plus lente, une meilleure stabilité thermique et une faible solubilité dans l'eau (Magallanes- Cruz et al., 2017), ce qui est recherché pour des applications comme les films bioactifs, les emballages comestibles ou les épaississants. En revanche, les amidons désorganisés (ultrasons, micro-ondes) sont plus solubles, plus digestibles (meilleure accessibilité enzymatique) et peuvent présenter un intérêt pour la libération rapide de composés bioactifs, les applications alimentaires instantanées, ou la fabrication de gels rapidement réhydratables (Wang et al., 2020). L'amidon extrait à l'eau chaude, peu cristallin et peu soluble, pourrait convenir à des formulations où l'on cherche une viscosité élevée à chaud, mais une stabilité modérée à froid. Enfin, la capacité à rétrograder (recristalliser) a aussi une influence directe sur la formation d'amidon résistant (RS3), ce qui affecte ses effets nutritionnels (Rostamabadi et al., 2024).

Tableau 8: indices de cristallinité des amidons extraits de pain rassis selon différentes méthodes d'extraction

Amidons extraits	IC (%)
Amidon commercial	63,1
Eau à température ambiante	48,8
Micro-ondes	47,3
Ultrasons	44,7
Eau chaude	43,0

L'indice de cristallinité (IC), calculé par la méthode de Segal à partir des profils DRX, a permis de différencier clairement les amidons selon le traitement d'extraction. L'amidon commercial présente un IC élevé (63,1 %), caractéristique d'une structure hautement cristalline, alors que les micro-ondes (47,3 %) et les ultrasons (44,7 %) ont réduit la cristallinité, ce qui témoigne d'une perturbation structurale favorable à la solubilisation et à la gélification. L'eau chaude montre l'IC le plus faible (43 %), ce qui suggère un début de gélatinisation sans rétrogradation complète. Ces données sont en cohérence avec les concentrations minimales de gélification mesurées expérimentalement. Le lien entre la structure cristalline et la fonctionnalité est ainsi confirmé, appuyant l'utilisation ciblée de chaque amidon en fonction des applications technologiques souhaitées (Farooq et Yu, 2024).

V.6. Résultats de la préparation culinaire

Tableau 9: Résultats de dégustation de la préparation culinaire

Critères	A	B	C	D
Aspect visuel	3,84±1,05	3,84±1,05	3,00±1,42	2,94±1,22
Odeur	2,82±1,09	3,5±1,19	3,51±1,27	3,32±1,26
Croustillance	2,96±0,94	3,42±0,93	4,03±1,08	3,05±1,17
Goût salé	3,23±1,19	3,11±1,04	2,80±1,44	3,32±1,23
Goût général	3,13±0,97	3,32±1,13	3,07±1,36	3,34±1,29
Texture en bouche	3,36±1,20	3,61±1,12	3,5±1,22	3,55±1,14
Après gout	3,42±0,91	3,46±1,07	3,17±1,36	3,34±1,31

Selon la norme ISO 5492 (2008), l'analyse sensorielle est définie comme étant « l'examen des propriétés organoleptiques d'un produit par les organes des sens ». Grâce à ses cinq sens (vue, ouïe, odorat, goût, toucher), l'être humain devient un instrument d'analyse permettant d'évaluer des produits alimentaires. La fiche de dégustation permet de transformer ces perceptions subjectives en données objectivables, exploitables statistiquement (Watts et al., 1989).

✓ Aspect visuel

L'aspect visuel est la première impression visuelle d'un produit, influencée par la couleur, la forme ou la brillance (Inderbitzin & Roth-Kahrom, 2020). A et B affichent un bon aspect visuel (3,84 ± 1,05), tandis que C et D sont moins appréciés visuellement, ce qui pourrait influencer la perception globale.

✓ Odeur

L'odeur est un facteur clé de la flaveur, c'est-à-dire la combinaison du goût et des arômes (**Gouronnec, 2000**). L'odeur la moins appréciée est celle de A ($2,82 \pm 1,09$), alors que B et C obtiennent des notes similaires autour de 3,5.

✓ Croustillance

La croustillance est une sensation sensorielle complexe, à la fois tactile et auditive (**Dacremont, 1992**). Le produit C se distingue avec la meilleure croustillance ($4,03 \pm 1,08$), ce qui est cohérent avec sa nature commerciale, suivie de B ($3,42 \pm 0,93$). A et D ont des valeurs plus modestes.

✓ Goût salé

Le goût salé est dû à la détection des ions sodium et influence fortement l'acceptabilité globale (**Brondel et al., 2013**). D semble présenter le meilleur équilibre salé ($3,32 \pm 1,23$), tandis que C est perçue comme trop peu salée ($2,80 \pm 1,44$).

✓ Goût général

Le goût général résume l'ensemble des sensations gustatives et aromatiques, y compris les perceptions rétro-nasales et les sensations trigéminales (**Brondel et al., 2013**). B et D sont légèrement mieux notées que les autres.

✓ Texture en bouche

La texture regroupe toutes les sensations mécaniques ressenties en bouche (**Gerard et al., 2019**). Elle est globalement bien perçue pour toutes les formulations, B se démarquant légèrement.

✓ Après-goût

L'après-goût est la persistance des sensations après ingestion (**Sulmont-Rossé & Chambaron, 2011**). B obtient la note la plus élevée ($3,46 \pm 1,07$), suivie de A et D, avec un score plus faible pour C.

La formulation C, issue du commerce, montre de bonnes performances en matière de croustillance, ce qui est attendu pour un produit industriel optimisé. Toutefois, ses scores plus faibles en goût salé, aspect visuel et homogénéité des réponses suggèrent qu'elle n'a pas

surpassé toutes les formulations expérimentales.

En comparaison, les formulations B et D, issues du laboratoire, ont obtenu des scores sensoriels globalement équilibrés, notamment en goût général, texture et après-goût. Ces résultats montrent que des alternatives développées en laboratoire peuvent rivaliser sur plusieurs plans avec les produits commerciaux, tout en permettant des ajustements ciblés selon les préférences des consommateurs.

En somme, les résultats sensoriels mettent en évidence le bon potentiel des formulations développées, en particulier la B, qui obtient des appréciations globales très satisfaisantes sur plusieurs critères. Ces formulations, issues d'un ingrédient alternatif élaboré au laboratoire, se comparent de manière compétitive à un produit commercial de référence (C), notamment sur des aspects comme la texture, l'arrière-goût et la croustillance.

Au-delà des qualités organoleptiques, ces résultats soulignent aussi l'intérêt de ce type de produit, s'inscrivant dans une démarche de revalorisation d'un sous-produit alimentaire, et offrant ainsi une alternative originale et responsable dans un contexte de lutte contre le gaspillage.

Ce travail constitue une étape préliminaire dans la valorisation de coproduits alimentaires à travers le développement de formulations innovantes. Les analyses nutritionnelles détaillées, la stabilité des produits dans le temps, ainsi que l'évaluation sensorielle à plus grande échelle restent à approfondir. Il convient également de noter que les formulations exactes n'ont pas été divulguées, car elles s'inscrivent dans le cadre d'un projet de valorisation en cours à visée entrepreneuriale, nécessitant le respect d'une confidentialité stratégique.

Conclusion

Conclusion

Cette recherche s'inscrit dans une problématique mondiale : celle du gaspillage alimentaire, et en particulier du pain rassis, souvent destiné à la poubelle. Face à ce constat, le travail a visé à transformer ce qui est perçu comme un produit gaspillé en une ressource à valeur ajoutée, à travers la valorisation de l'amidon extrait de pain rassis.

L'étude a permis de mettre en évidence l'impact notable des différentes méthodes d'extraction sur les propriétés de l'amidon. Que ce soit l'eau à température ambiante, l'eau chaude, les ultrasons ou les micro-ondes, chaque technique a modifié de façon spécifique la structure et les caractéristiques de l'amidon extrait.

La méthode par micro-ondes s'est distinguée par sa capacité à fournir un amidon de grande pureté, notamment en termes de faible teneur en protéines, tout en présentant une excellente aptitude à la gélification. Ce profil suggère un potentiel intéressant pour des applications nécessitant la formation de gels, notamment dans l'agroalimentaire.

L'extraction assistée par ultrasons a également montré un intérêt particulier, en produisant un amidon riche en amylose soluble. L'amylose, composant linéaire de l'amidon, joue un rôle clé dans la texture et la stabilité des produits, notamment face à la rétrogradation. Ce type d'amidon pourrait convenir à des formulations spécifiques nécessitant un certain comportement au vieillissement.

Les différences observées dans les propriétés fonctionnelles telles que la capacité de rétention d'eau, la viscosité, l'angle de repos ou encore la masse volumique confirment que le choix de la méthode d'extraction doit être guidé par les applications finales envisagées. Chaque technique confère à l'amidon un profil particulier pouvant répondre aux exigences de divers secteurs.

Au-delà de l'aspect technologique, ce travail illustre le potentiel de l'innovation dans la lutte contre le gaspillage alimentaire. En valorisant le pain rassis, il contribue à une démarche d'économie circulaire, où les pertes deviennent des opportunités, et les produits gaspillés, des ressources.

Les perspectives de cette étude ouvrent plusieurs pistes :

- Approfondir la compréhension des interactions entre les procédés d'extraction et la structure de l'amidon ;
- Explorer de nouvelles applications de cet amidon valorisé dans les

domaines alimentaires ou non alimentaires ;

- Étudier la faisabilité technico-économique et environnementale d'un passage à l'échelle industrielle.

Enfin, cette étude propose une première approche structurée et comparative des méthodes d'extraction de l'amidon à partir du pain rassis, révélant leur influence déterminante sur ses propriétés fonctionnelles. Elle ouvre ainsi des perspectives concrètes pour valoriser des ressources alimentaires sous-estimées, et contribuer à une économie circulaire et durable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Agence Nationale des Déchets (AND). (2022). *Rapports annuels*. <https://and.dz/rapports/>
2. Audigié, C., Dupont, G., & Zonszain, F. (1982). *Principes des méthodes d'analyse biochimique*. Paris : Dunod
3. Abdullah, N., Nawawi, A., & Othman, I. (2000). Fungal spoilage of starch-based foods in relation to its water activity (aw). *Journal of Stored Products Research*, 36(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0022-474X\(99\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0022-474X(99)00026-0)
4. Algérie360. (2023). *Gaspillage du pain pendant Ramadan : les autorités communiquent des chiffres alarmants*.
5. Benhura, M. A. N., & Chingwaru, W. (2016). *Characterization of rice starch and protein obtained by a fast alkaline extraction method*. *Food Chemistry*, 191, 828–835.
6. Bento, J. A. C., Ferreira, K. C., Oliveira, A. L. M. D., Lião, L. M., Caliari, M., & Júnior, M. S. S. (2019). *Extraction, characterization and technological properties of white garland-lily starch*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 422–428.
7. Bernardo, C. O., Ascheri, J. L. R., Chávez, D. W. H., & Carvalho, C. W. P. (2018). Ultrasound assisted extraction of yam (*Dioscorea bulbifera*) starch: Effect on morphology and functional properties. *Starch - Stärke*, 70(1–2), 1700185.
8. Brondel, L., Jacquin, A., Meillon, S., & Pénicaud, L. (2013). Le goût : Physiologie, rôles et dysfonctionnements. *Nutrition Clinique et Métabolisme*, 27(3), 123–133.
9. Bahrani, S. A. (2013). *Modification des propriétés physico-chimiques de l'amidon par procédés hydrothermiques : Contribution à l'étude des transferts couplés chaleur-masse*
10. Ben Rejeb, I., Baraketi, S., Charfi, I., Khwaldia, K., Gargouri, M. (2024). Valorization of bread waste, a nonconventional feedstock for starch extraction using different methods: A comparative study. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 9(3), Article 14851498. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00572-6>
11. Bertoft, E. (2017). Understanding starch structure: Recent progress. *Agronomy*, 7(3), 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030056>
12. Bossou, T. K. (2022). *Caractéristiques de production et de sécurité sanitaire du pain—Une revue*. *European Scientific Journal ESJ*, 18(8), 129157. <https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n8p129>
13. Boursier, B. (2005). *Amidons natifs et amidons modifiés alimentaires*. *Agroalimentaire*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-f4690>

14. Benabdallah, A. Y., & Boudour, R. (2022). Smart collection of waste bread in Algeria using the Internet of Things. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(6), 9483–9486. <https://doi.org/10.48084/etasr.5280>
15. Carr, R. L. (1965). Evaluating flow properties of solids. *Chemical Engineering*, 72(2), 163–168.
16. Centre de Recherche en Économie Appliquée pour le Développement (CREAD). (2018). *Revue stratégique de la sécurité alimentaire et nutritionnelle en Algérie*.
17. Carochio, M., Morales, P., Ciudad-Mulero, M., Fernández-Ruiz, V., Ferreira, E., Heleno, S., Rodrigues, P., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2020). *Comparison of different bread types: Chemical and physical parameters. Food Chemistry*, 310, 125954. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125954>
18. Cauvain, S. P. (1998). Improving the control of staling in frozen bakery products. *Trends in Food Science & Technology*, 9(2), 56–61. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00003-X)
19. Chan, C.-H., Wu, R.-G., & Shao, Y.-Y. (2021). *The effects of ultrasonic treatment on physicochemical properties and in vitro digestibility of semigelatinized high amylose maize starch. Food Hydrocolloids*, 119, 106831. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106831>
20. Chen, P. L., Long, Z., Ruan, R., & Labuza, T. P. (1997). Nuclear magnetic resonance studies of water mobility in bread during storage. *LWT – Food Science and Technology*, 30(2), 178–183. <https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0163>
21. Cheikhi, L., Bouallala, M., & Iddou, A. (2019). Caractéristiques physico-chimiques et biochimiques de quelques variétés de dattes consommées dans la région d'Aoulef (Adrar) (N° 04).
22. Crucean, D. (2019). Intérêt du chlorure de choline pour la réduction du sel dans le pain Relations structure-propriétés et acceptabilité sociétale [Thèse de doctorat, Université de Lorraine]. ORBi. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/240232>
23. Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products: Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
24. Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009). Form and function of starch. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1527–1534.

<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.09.016>

25. Capone, R., El Bilali, H., Debs, P., Bottalico, F., Cardone, G., Berjan, S., Elmenofi, G. A. G., Abouabdillah, A., Charbel, L., Ali Arous, S., & Sassi, K. (2016). Bread and bakery products waste in selected Mediterranean Arab countries. *American Journal of Food and Nutrition*, 4(2), 40–50. <https://doi.org/10.12691/ajfn-4-2-2>
26. Cao, Y., Li, S., Wang, T., Zhang, P., Li, F., & Li, F. (2023). Influence of various chemical modifications on the physicochemical, thermal, and gelling properties of tuber starches. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 1476–1487
27. Du, B., Jeepipalli, S. P. K., & Xu, B. (2022). Critical review on alterations in physicochemical properties and molecular structure of natural polysaccharides upon ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 90, 106170. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106170>
28. Dacremont, C. (1992). Contribution to the characterization of three French textural descriptors: Croustillant (crispy), craquant (crackle) and croquant (crunchy) by acoustic and sensory studies [*Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure de Biologie Appliquée à la Nutrition et à l'Alimentation*].
29. Darrieu, J. (2016). Solutions pour réduire le gaspillage alimentaire dans les épiceries du [Sherbrooke] [Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke]. <https://core.ac.uk/download/pdf/51341597.pdf>
30. Donmez, D., Pinho, L., Patel, B., Desam, P., & Campanella, O. H. (2021). Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: Starch gelatinization and retrogradation. *Current Opinion in Food Science*, 39, 79–93. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.12.018>
31. Eliasson, A. C. (2004). *Starch in food: Structure, function and applications*. CRC Press
32. El Watan. (2021). NetCom affirme un recul dans le gaspillage du pain. <https://elwatan-dz.com/netcom-laffirme-recul-dans-le-gaspillage-du-pain>
33. Estrada-León, R. J., Ríos-Soberanis, C. R., Betancur-Ancona, D., & Chel-Guerrero, L. (2016). Determination of some physicochemical and rheological properties of starches and flours from different sources. *International Journal of Biological Macromolecules*
34. Favier, J.-C. (1989). Valeur nutritive et comportement des céréales au cours de leurs transformations. In : *Céréales en régions chaudes* (p. 285-297). Paris : J. Libbey Eurotext.
35. Farooq, M. A., & Yu, J. (2024). Recent advances in physical processing techniques to enhance the resistant starch content in foods: A review. *Foods*, 13(17), 2770. <https://doi.org/10.3390/foods13172770>

36. Fayed, M. E., & Otten, L. (Eds.). (2001). Handbook of powder science and technology (3rd ed.). CRC Press.
37. Flores-Morales, A., Jiménez-Estrada, M., & Mora-Escobedo, R. (2012). Determination of the structural changes by FT-IR, Raman, and CP/MAS ¹³C NMR spectroscopy on retrograded starch of maize tortillas. *Carbohydrate Polymers*, 87(1), 61–68.
38. Ganesan, V., Rosentrater, K. A., & Muthukumarappan, K. (2008). Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders—A review with implications for DDGS. *Biosystems Engineering*, 101(4), 425–435.
39. Godon, B., & Willm, C. (Eds.). (1991). Composition biochimique des céréales : Grains d'avoine, blé, maïs, orge, seigle, triticale (pp. 77–94). Paris : Lavoisier / INRA
40. Godon, B., & Willm, C. (1991). Les industries de première transformation des céréales. Lavoisier.
41. Gerard, M., Yoel, M., Hamid, M., Benjamin, M., Alexis, M., Suzie, M., Olivia, M., & Elie, M. (2019). Perception de textures en bouche : Une approche biomimétique.
42. Gouronnet, A.-M. (2000). Mesure des odeurs par analyse sensorielle ou « Olfactométrie ». *Pollution atmosphérique. Climat, santé, société*, 168, 583–598.
43. Gul, K., Mir, N. A., Yousuf, B., Allai, F. M., & Sharma, S. (2021). Starch: An overview. In A Gani & B. A. Ashwar (Eds.), *Food biopolymers: Structural, functional and nutraceutical properties* (pp. 3–17). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27061-2_1
44. Hu, A., Chen, X., Wang, W., Li, L., Zhou, Y., Zhi, W., & Zheng, J. (2021). Properties and structure of modified taro starch: Comparison of ultrasound and malic acid treatments. *Starch - Stärke*, 73(9–10), 2000252. <https://doi.org/10.1002/star.202000252>
45. Hocine, M., & Sebbache, L. (2018). La ressource alimentaire pain et ses déchets à l'aune de l'intelligence territoriale par économie sociale et circulaire : Cas d'ElHarrach dans la banlieue est-algéroise. *Revue d'Économie & de Gestion*, 2(2),
46. Hoover, R. (2001). Composition, Molecular Structure, and Physicochemical Properties of Tuber and Root Starches: A Review. *Carbohydrate Polymers*, 45(3), 253–267.
47. IFDI (Institute for Development Impact). (2024). Environmental and economic impact of food wastage. <https://i4di.org/wp-content/uploads/2024/12/Final-Waste-Impact.pdf>
48. Inderbitzin, J., & Roth-Kahrom, L. (2020). Principes de base de l'analyse sensorielle (p.

- 339).
49. International Organization for Standardization (ISO). (1981). ISO 5498:1981 Agricultural food products — Determination of crude fibre content — General method. ISO.
 50. ISO. (2009). ISO 659:2009 – Oilseeds — Determination of oil content (Reference method). <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/43169/289b47f792d8499b805d1cf092cc0da4/ISO-659-2009.pdf>
 51. International Organization for Standardization (ISO). (2008). ISO 5492:2008 – Sensory analysis – Vocabulary. ISO. <https://www.iso.org/fr/standard/38051.html>
 52. International Organization for Standardization (ISO). (2016). ISO 7027-1:2016 – Water quality – Determination of turbidity – Part 1: Quantitative methods. ISO.
 53. Jagadeesan, S., Govindaraju, I., & Mazumder, N. (2020). An insight into the ultrastructural and physiochemical characterization of potato starch: A review. *American Journal of Potato Research*, 97, 464–476.
 54. Jamalabadi, E. N., Shekarchizadeh, H., Kadivar, M., & Farhoosh, R. (2019). The influence of bath and probe sonication on the physicochemical and microstructural properties of wheat starch. *Food Science & Nutrition*, 7(4), 1427–1436.
 55. Jane, J., Kasemsuwan, T., Leas, S., Walker, N. J., & Inglett, G. E. (1999). *International Journal of Biological Macromolecules*, 25(1-3), 115–125.
 56. Jourden, S. (2019). Le processus oral, une étape clé à l'origine des propriétés sensorielles de texture et d'arôme du pain : Quels sont les rôles de sa structure et de sa déstructuration bouche sur les dynamiques de perceptions ?
 57. Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire. (1991).
 58. Journalistes pour la Nature et l'Écologie (JNE). (2022, avril 29). Algérie : gaspillage alimentaire et valorisation du pain invendu. <https://www.jne-asso.org/2022/04/29/algerie-gaspillage-alimentaire-et-nuisances-sonores>
 59. Juliano, B. O. (1971). A simplified assay for milled-rice amylose. *Cereal Science Today*, 16(10), 334–340.
 60. Kumar, A., & Longhurst, P. (2022). Valorisation of Bread Waste as a Resource: A Review. *Molecules*, 27(23), 8410. <https://doi.org/10.3390/molecules27238410>
 61. Le Courrier d'Algérie. (2021, avril 24). Le gaspillage du pain : quatre tonnes de baguettes jetées durant la première semaine de Ramadhan. <https://lecourrier-dalgerie.com/le-gaspillage-du-pain-quatre-tonnes-de-baguettes-jetees-durant-la->

premiere-semaine-de- ramadhan

62. Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265–275. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)52451-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52451-6)
63. Lee, J. H., Han, J.-A., & Lim, S.-T. (2009). Effect of pH on aqueous structure of maize starches analyzed by HPSEC-MALLS-RI system. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1935–1939.
64. Liu, H., Guo, X., Li, Y., & Liu, Q. (2019). Effect of thermal- mechanical treatment on physical properties of rice and wheat starches. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(1), 70–78.
65. Liu, H., Xie, F., Yu, L., Chen, L., & Li, L. (2009). Thermal processing of starch-based polymers. *Progress in Polymer Science*, 34(12), 1348–1368
66. Magallanes- Cruz, P. A., Flores- Silva, P. C., & Bello- Perez, L. A. (2017). Starch structure influences its digestibility: A review. *Journal of Food Science*, 82(9), 2016–2023.
67. Mano, J. F., Koniarova, D., Reis, R. L., Azure, C., & Gualtar, C. (2003). Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blends with potential biomedical applicability. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 14(2), 127–135
68. Makroo, H. A., Naqash, S., Saxena, J., Sharma, S., Majid, D., & Dar, B. N. (2021). Recovery and characteristics of starches from unconventional sources and their potential applications: A review. *Applied Food Research*, 1(1), 100001. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100000>
69. Masson, L., Fauchon, M., Aït-Ameur, O., Al-Ghorbani, M., Candelier, F., Al-Muhtaseb, A., & C. (2016). Effects of high-energy ball milling on the structural, thermal, and functional properties of high-amylose maize starch. *Carbohydrate Polymers*, 137, 581–589.
70. Mounir, S., Ghandour, A., Shatta, A., & Farid, E. (2024). Starch. In S. P. Bangar, K. Sunooj, & A. K. Siroha (Eds.), *Starch* (1re éd., pp. 1–46). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781032655598-1>
71. Martins, A., Beninca, C., Bet, C. D., Bisinella, R. Z. B., de Oliveira, C. S., Hornung, P.S., & Schnitzler, E. (2020). Ultrasonic modification of purple taro starch (*Colocasia esculenta* B. Tini): Structural, physicochemical and thermal properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142, 819–828.

72. Mohamad Yazid, N. S., Abdullah, N., & Muhammad, N. (2019, July). Comparison of chemical, functional and morphological characteristics of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) (J33) seed starch and commercial native starches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 269(1), Article 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/269/1/012031>
73. Morillo, C. (2022). Quantitative analysis of powdered solids with FTIR-ATR.
74. Montgomery, E. M., & Senti, F. R. (1958). Separation of amylose from amylopectin of starch by an extraction-dimentation procedure. *Journal of Polymer Science*, 28, 1–8.
75. Nadaf, S. J., Kumar, S., & Sharma, M. (2021). Mung bean (*Vigna radiata*) porous starch for solubility and dissolution enhancement of poorly soluble drug by solid dispersion. *International Journal of Biological Macromolecules*, 168, 337–348.
76. for solubility and dissolution enhancement of poorly soluble drug by solid dispersion. *International Journal of Biological Macromolecules*, 168, 337–348.
77. Negm, A. M., & ElZein, Z. (Eds.). (2024). *Integration of Core Sustainable Development Goals in Rural Areas: Current Practices of Water, Energy, Food, Climate Change, and Ecosystems* (1^{re} éd.). Springer (Earth and Environmental Sciences Library). <https://doi.org/10.1007/978-3-031-60149-1>
78. Nguyen Van, T. (2019). Density determination by pycnometer [Travail universitaire, Université de Bratislava, Faculté des sciences physiques].
79. Panghal, A., Kumar, R., Bishnoi, P., Rana, D., & Chhikara, N. (2024). Impact of ultrasonication on physicochemical, morphological, thermal, pasting, and pasta quality attributes of black wheat starch. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(7), 4470–4478.
80. Patel, M., Naik, S. N., & Chaurasia, S. P. (2009). Characterization of modified maize starch powder for pharmaceutical use. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 68, 1000–1005.
81. Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). (2024). *Food Waste Index Report 2024: Think Eat Save – Tracking progress to halve global food waste* (No. 193). PNUE. <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/45230>
82. Ratnayake, W. S., & Jackson, D. S. (2008). A new insight into the gelatinization of starch. *Journal of Food Science*, 73(1), R1–R10.
83. Rostamabadi, H., Demirkesen, I., Mert, B., Barua, S., Colussi, R., Frasson, S. F., & Falsafi, S. R. (2024). Starch digestibility: How single, double, and multiple modifications change nutritional attributes of starch? *Food Frontiers*, 5(4), 1410–1444

84. Read, Q. D., & Muth, M. K. (2021). Cost-effectiveness of four food waste interventions: Is food waste reduction a “win-win?” *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105448. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105448>
85. Roustel, S. (2024). Amidons. *Techniques de l'Ingénieur*, (Réf. FPR370).
86. Roy, C. (2022). Quelles valorisations alimentaires et non alimentaires des rebuts de la filière pain ? Enquêtes et analyses des déterminants territoriaux de mise en œuvre
87. Raghavan, R., Bhattacharya, S., & Venkatesh, K. (2018). Sedimentation behavior and stability of food dispersions: A review. *Food Hydrocolloids*, 81, 203–217. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.039>
88. Rudolph, C. (2012). Structure and functionality of modified starches for food applications. *Starch/Stärke*, 64(8), 643–649.
89. Saulnier, L., Micard, V., & Della Valle, G. (2014). Structure du pain et index glycémique. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 49(2), 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.cnd.2014.01.004>
90. Sharma, M., Bains, A., Dhull, S. B., Chawla, P., Göksen, G., & Ali, N. (2024). Extraction, characterization, and utilization of mung bean starch as an edible coating material for papaya fruit shelf-life enhancement. *Food Science & Nutrition*, 12(7), 5188–5200.
91. Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Singh, S., & Dhillon, B. S. (2004). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*, 86(1), 1–16.
92. Steffe, J. F. (1996). *Rheological methods in food process engineering* (2^e éd.). Freeman Press.
93. Sujka, M., & Jamroz, J. (2017). Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 68, 264–274.
94. Sulmont-Rossé, C., & Chambaron, S. (2011). *Mesurer le goût. Quand la mémoire s'en mêle*. Éditions Quae.
95. Schneider, F. (2013). Review of food waste prevention on an international level. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management*, 166(4), 187–203. <https://doi.org/10.1680/warm.13.00016>
96. Stephen, A. M., Phillips, G. O., & Williams, P. A. (Eds.). (2006). *Food polysaccharides and their applications* (2^e éd.). CRC Press
97. Ting-ting, L., Chun-chun, S., & Wang, D. (2013). Microwave-assisted extraction and

characterization of potato starchT

98. Torruco- Uco, J. G., Chel- Guerrero, L. A., & Betancur- Ancona, D. (2006). Isolation and molecular characterization of makal (*Xanthosoma yucatanensis*) starch. *Starch - Stärke*,58(6), 300–307.
99. van Rooyen, J., Simsek, S., Oyeyinka, S. A., & Manley, M. (2023). Wheat starch structure– function relationship in breadmaking: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(3), 2292–2309.
100. Velmuradova, M. (2022). Gaspillage alimentaire à la consommation dans la restauration collective scolaire en France : Comportements, facteurs, interventions. RSL.Wang, B., Xu, J., Guo, D., Long, C., Zhang, Z., Cheng, Y., ... & He, X. (2023). Research on the relationship between the amylopectin structure and the physicochemical properties of starch extracted from glutinous rice. *Foods*, 12(3), 460. <https://doi.org/10.3390/foods12030460>
101. Wang, M., Wu, Y., Liu, Y., & Ouyang, J. (2020). Effect of ultrasonic and microwave dual-treatment on the physicochemical properties of chestnut starch. *Polymers*, 12(8), 1718. <https://doi.org/10.3390/polym12081718>
102. Wang, X., et al. (2024). Evaluation of amylose content: Structural and functional properties, analytical techniques, and future prospects. *Food Chemistry: X*, 24, 101830. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101830>
103. Watts, B. M., Ylimaki, G. L., & Jeffery, L. E. (1989). Méthode de base pour l'évaluation sensorielle des aliments. Centre de recherches pour le développement international (CRDI).
104. Wei, B., Pu, Q., Wu, C., Zou, J., & Xu, B. (2021). Degradation mechanism of amylopectin under ultrasonic irradiation. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.054>
105. Wei, L., & Zhu, F. (2025). Microwave-induced structural and functional changes in small granule starch. *Carbohydrate Polymers*, 320, 121093.
106. Wang, B., Xu, J., Guo, D., Long, C., Zhang, Z., Cheng, Y., ... & He, X. (2023). Research on the relationship between the amylopectin structure and the physicochemical properties of starch extracted from glutinous rice. *Foods*, 12(3), 460. <https://doi.org/10.3390/foods12030460>
107. Yadav Prakruthi, L., Krishnan, H., Medha, T., Kumarakuru, K., Kumari, P. V., Challa, S., Alavilli, H., Kaushik, D., Hashem, A., Alotaibi, N. H., Avila-Quezada, G. D., Abd_Allah, E. F., Kumar, M., & Reddy, C. K. (2025). Enhancing starch properties through dual modification: Ultrasonication and acetic acid treatment of non- conventional starches.

- Ultrasonics Sonochemistry, 115, 107301.
- 108.Zhang, B., & Li, X. (2018). Effects of microwave treatment on the physicochemical properties of wheat starch. *Food Hydrocolloids*, 77, 10–16.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.006>
- 109.Zhang, S., Wu, W., Zhu, J., Wu, J., Gan, Z., Deng, H., ... & Liao, L. (2025). Multi-scale structural evolution during simulated gelatinization process of sweet potato starch by heat moisture treatment. *Food Chemistry: X*, 25,102123.
<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102123>
- 110.Zhang, H., Li, J., &Chen, Y. (2011). Effect of microwave treatment on the physicochemical properties of starch. *Food Chemistry*, 128(3), 665–670. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.080>
- 111.Zhong, Y., Tian, Y., Liu, X., Ding, L., Kirkensgaard, J. J. K., Hebelstrup, K., Putaux,J.-L., & Blennow, A. (2021). Influence of microwave treatment on the structure and functionality of pure amylose and amylopectin systems. *Food Hydrocolloids*, 119, Article 106856. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106856>
- 112.Zhou, J., Ma, X., & ; Li, X. (2018). Effect of microwave treatment on the gelatinization and retrogradation properties of corn starch. *Food Hydrocolloids*.
- 113.Zhu, F. (2015). Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 122, 456–480
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.10.063>
- 114.Zou, B., Yan, X., & Li, H. (2018). Students' perspectives on using online sources and apps for EFL learning in the mobile-assisted language learning context. In B. Zou & M. Thomas (Eds.), *Handbook of Research on Integrating Technology into Contemporary Language Learning and Teaching* (pp. 328–344).
- 115.Zhou, Y., Wang, M., Wang, L., Liu, L., Wu, Y., & Ouyang, J. (2023). Comparison of the effect of ultrasound and microwave on the functional properties and in vitro digestibility of normal maize starch and potato starch. *Journal of Food Process Engineering*, 46(2), e14222. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14222>

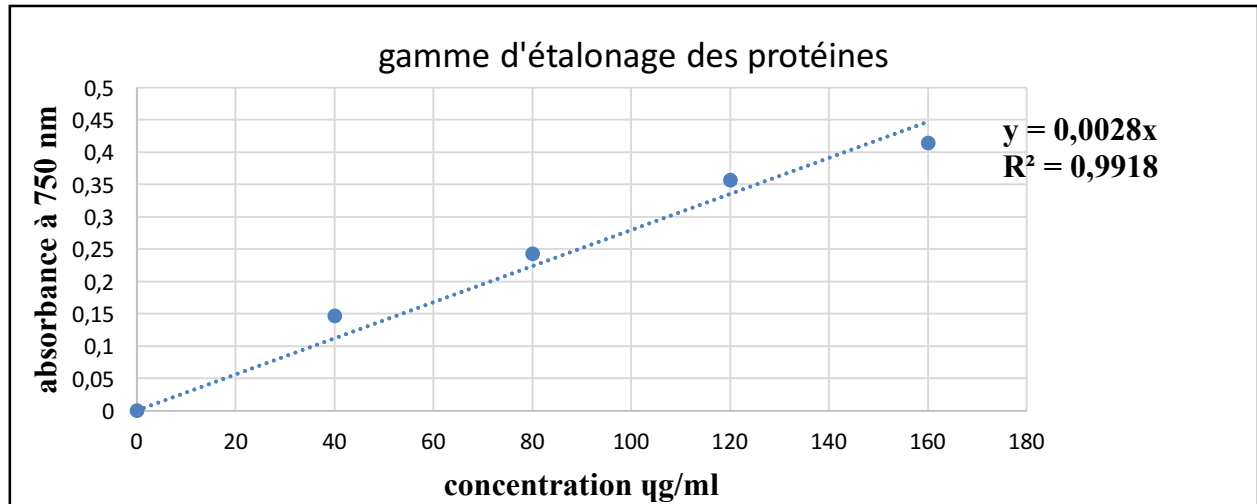
Annexes

Annexes

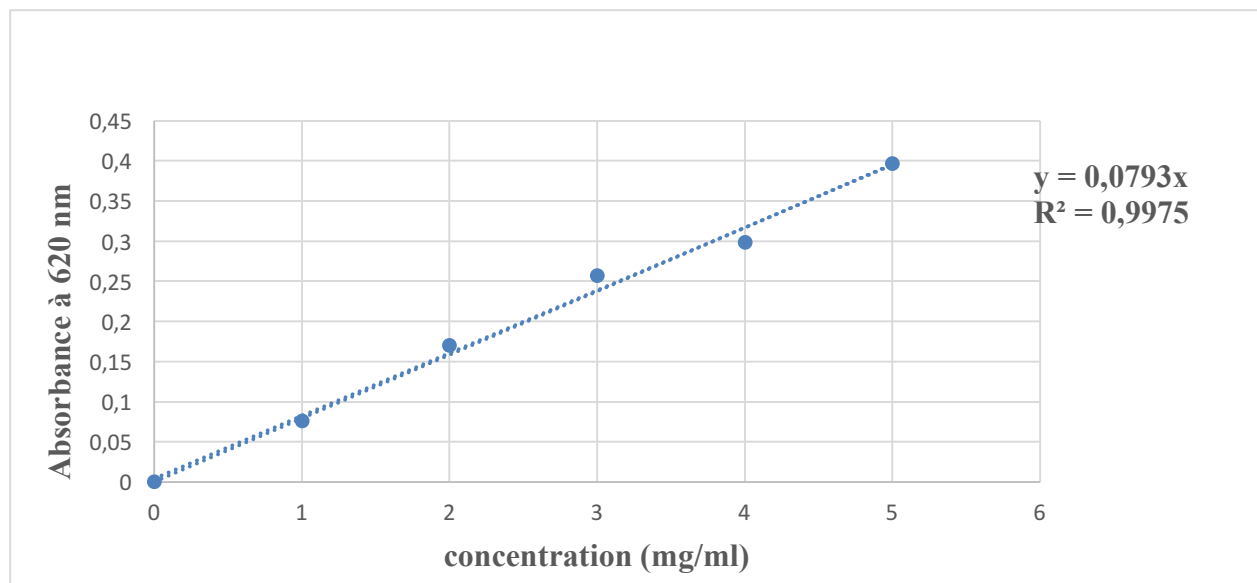
Annexe I : inventaire du matériel, des appareils, de la verrerie des produits

Matériels et appareils	Verreries	Produits
Etuve	Bécher	Eau distillée
Balance analytique	Tubes à essai	Hexane
Four à moufle	Burette graduée 500ml	Folin-Ciocalteu
Soxhlet		Carbonate de sodium à 2%
Spectrophotomètre UV-VISIBLE		Sulfate de cuivre penta hydraté
Micropipettes (1000 10 500)		Sulfate de cuivre pentahydraté à 0.5%
Agitateur magnétique		Tartrate double de potassium et sodium à 1%
Barreau magnétique		Hydroxyde de sodium 0.1M
pH-mètre		Chlorure de sodium
Balance de précision		BSA
Réfractomètre		
Plaque chauffante		
Autoclave		
Dessiccateur		
Boites de Pétri		
Creusets en porcelaine		
Papier filtre		
Portoir		
Spatule		
Flacons ECBU		
Gants stériles		
Lamelles		
Pissette		
Masque chirurgical		
Tissu mousseline		

Annexe II : Courbes d'étalonnage des protéines et de l'amylose



Courbe d'étalonnage des protéines



Courbe d'étalonnage de l'amylose

Résumé

Le gaspillage alimentaire est un défi mondial majeur, et la valorisation des produits gaspillés, comme le pain rassis, est une stratégie essentielle pour y remédier. Cette étude vise à extraire l'amidon de pain rassis en utilisant quatre techniques : l'extraction aqueuse à température ambiante (ETA), l'extraction aqueuse chaude (EC), l'extraction assistée par ultrasons (US) et l'extraction assistée par micro-ondes (MO). L'étude a évalué les propriétés physico-chimiques, fonctionnelles et structurales des amidons extraits. Les résultats montrent que l'extraction par micro-ondes (MO) produit l'amidon le plus pur, avec les plus faibles taux d'humidité et de protéines, et une absence totale de lipides. De plus, cette méthode offre la plus faible concentration minimale de gélification et une excellente capacité de rétention d'eau. L'extraction par ultrasons (US) présente un bon compromis, avec une forte capacité de rétention d'huile et une teneur élevée en amylose soluble. En comparaison, les méthodes classiques (EC et ETA) donnent une pureté moindre, mais préservent une viscosité plus élevée. En conclusion, la méthode par micro-ondes est la plus prometteuse pour obtenir un amidon de haute qualité, adapté à des applications fonctionnelles exigeantes

Mots clés : Pain rassis, Gaspillage, Amidon, Extraction, Pureté, Valorisation.

Abstract

Food waste is a major global challenge, and the recovery of wasted products, such as stale bread, is an essential strategy for addressing it. This study aims to extract starch from stale bread using four techniques: aqueous extraction at room temperature (ETA), hot aqueous extraction (EC), ultrasound-assisted extraction (US) and microwave-assisted extraction (MO). The study evaluated the physicochemical, functional and structural properties of the extracted starches. The results show that microwave extraction (MO) produces the purest starch, with the lowest moisture and protein content and a total absence of lipids. In addition, this method offers the lowest minimum gelatinisation concentration and excellent water retention capacity. Ultrasound-assisted extraction (US) offers a good compromise, with high oil retention capacity and high soluble amylose content. In comparison, conventional methods (EC and ETA) produce lower purity but preserve higher viscosity. In conclusion, the microwave method is the most promising for obtaining high-quality starch suitable for demanding functional applications.

Keywords: stale bread, waste, starch, extraction, purity, recovery.

ملخص

يعد هدر الطعام تحديًا عالميًا كبيرًا، ويعد الاستعادة من المنتجات المهذرة، مثل الخبز البائت، استراتيجية أساسية لمعالجته. تهدف هذه الدراسة إلى استخلاص النشا من الخبز البائت باستخدام أربع تقنيات: الاستخلاص المائي في درجة حرارة الغرفة (ETA) والاستخلاص المائي الساخن (EC)، والاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية (US)، والاستخلاص بمساعدة الميكروويف (MO). قيمت الدراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية والوظيفية والهيكلية للنشويات المستخرجة. أظهرت النتائج أن الاستخراج بالميكروويف (MO) ينتج النشا الأنقى، مع أقل معدلات رطوبة وبروتينات، وغياب تام للدهون. بالإضافة إلى ذلك، توفر هذه الطريقة أقل تركيز للهلامية وقدرة ممتازة على الاحتفاظ بالماء. يعتبر الاستخراج بالموجات فوق الصوتية (US) حلًا وسطًا جيدًا، مع قدرة عالية على الاحتفاظ بالزيت ومحتوى عالٍ من الأميلوز القابل للذوبان. بالمقارنة، توفر الطرق التقليدية (ETA و EC) نقاءً أقل، ولكنها تحافظ على لزوجة أعلى. في الختام، تعتبر طريقة الميكروويف هي الأكثر واعدة للحصول على نشا عالي الجودة، مناسب للتطبيقات الوظيفية الصعبة.

الكلمات المفتاحية: الخبز البائت، الهدر، النشا، الاستخلاص، النقاء، الاستعادة