

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DES SCIENCES
AGRONOMIQUES

N° : 13/ DSA/VCDPGR/2025



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE
FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES
OPTION : PRODUCTION VEGETALE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

ACHOUCHE Maroua
HADJ HAFSI Soumia

Intitulé

**Production du quinoa comme compléments alimentaires pour
personnes souffrant des maladies cœliaque**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr TORCHIT Nadir	MCB	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Président
Dr LALLOUCHE Bahia	MCA	Université Med BOUDIAF - M'SILA	Promotrice
Dr HADJ KOUIDER Boubakr	MCA	Université Med BOUDIAF - M'SILA	Co-Promoteur
Dr TELLACHE Slimane	MAA	Université Med BOUDIAF- M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire nous remerciant **ALLAH** qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude et appréciation au promoteur de ce mémoire : **Dr LALLOUCHE B., MCA.**, et au Co-promoteur **Dr HADJ KOUIDER B., MCA .**, au département d'agronomie, Université Mohamed Boudiaf de M'sila pour avoir acceptés de diriger ce travail, pour leur patience, encouragements, orientations et leurs conseils précieux.

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury **Mr TELLCH S** enseignant chercheur au département des Sciences Agronomiques Université Med. Boudiaf de M'sila et **Dr TORCHIT** enseignant chercheur au département des Sciences Agronomiques, Université Med. Boudiaf de M'sila de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, de nous consacrer du temps et de porter leur jugement expert sur ce modeste travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à l'ingénieur de la serre monsieur **BEN YAHIA** pour son aide pratique et sa disponibilité durant notre préparation de ce travail.

Nous remercions également l'équipe de laboratoire de département des sciences agronomiques, Université de Med. Boudiaf pour leur disponibilité, leur patience, et surtout leurs conseils qui nous ont aidés alimenter notre réflexion.

Nous souhaitons également d'adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos parents pour leur soutien et leur patience et à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Louange à Allah, par Sa grâce les bonnes choses s'accomplissent, et grâce à Lui, la réussite est écrite. Je Le remercie pour la force, la patience et pour chaque épreuve traversée avec Sa miséricorde et Son assistance.

À mon cher père, celui qui m'a appris la persévérance et le sens du travail. Merci pour ta confiance, ton soutien, et ton amour rassurant.

À ma chère maman, source de tendresse et lumière de mon cœur, tes prières ont été mon refuge et mon soutien. Chaque réussite que j'atteins est le fruit de ton amour et de tes invocations.

À mon mari, compagnon de route, merci pour ta patience, ton appui constant et ta compréhension dans les moments les plus difficiles... tu as été un véritable pilier.

À ma fille YASMINE, ma petite princesse, la prunelle de mes yeux. Malgré son jeune âge, elle m'a donné l'une des plus grandes motivations. Je prie Dieu de la préserver et de faire d'elle une lumière dans ma vie et la plus belle des bénédictions.

À mes frères et ma sœur MERIEME, mon refuge après Dieu, et la chaleur irremplaçable de ma famille. Merci pour chaque mot réconfortant et chaque geste de soutien.

À mon beau-père et ma belle-mère, ainsi qu'à toute ma seconde famille, merci pour vos cœurs généreux et votre soutien sincère qui ont été pour moi une force précieuse dans ce parcours.

SOUMIA

Dédicace

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

C'est en Lui que nous plaçons notre confiance, et c'est à Lui que nous remettons toute chose. De Lui seul nous tirons la force et la persévérance.

À celle dont les prières ont illuminé mes pas dans l'obscurité de l'effort, à celle qui a transformé sa patience en un pont sur lequel j'ai marché jusqu'à ce moment, à celle qui a veillé mes nuits, m'a porté dans son cœur à chaque étape de mon parcours, à celle que les mots ne pourront jamais remercier à sa juste valeur...

À ma chère mère, source infinie de tendresse et refuge de l'âme, je dédie ce travail humblement, fruit d'un chemin parcouru grâce à Allah, puis à tes prières sincères.

À celui qui m'a appris que le chemin vers la réussite n'est pas pavé de facilité, mais de volonté, à celui dont le silence cache l'effort, dont la force réside dans le don discret, à mon cher père, exemple de persévérance et de dignité, je dédie ce modeste travail en reconnaissance de tout ce que tu as semé en moi.

À mes frères et sœurs, vous êtes les battements de mon cœur, les piliers solides de mon équilibre. Dans chaque moment de doute, vous étiez là : par un mot, un sourire, ou un simple regard qui parle au cœur. Votre présence a été un refuge, votre soutien une force.

Ce travail vous est dédié, car chaque réussite que je vis porte l'empreinte de votre amour.

À mes amis et camarades de route, ceux qui ont partagé les difficultés et les espoirs du parcours universitaire, je vous dédie ces pages, empreintes de nos souvenirs communs.

Et à tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, par un mot, un conseil, une prière sincère, à ceux qui ont cru en moi quand je doutais de moi-même, cette réalisation est aussi la vôtre.

Et enfin, Louange à Allah, par Sa grâce les bienfaits s'accomplissent et les efforts aboutissent. Je Lui demande d'accepter ce travail et de le rendre bénéfique, pour moi, et pour les autres. Car Il est le seul à accorder la réussite.

MAROUA

المخلص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة إمكانية اعتماد نبات الكينوا (*Chenopodium quinoa Willd.*) كمكمل غذائي موجه خصيصاً للأشخاص المصابين بمرض السيلياك، وذلك نظراً لخلوه الطبيعي من الغلوتين وغناه بالعناصر الغذائية الأساسية. وقد تم الجمع بين دراسة نظرية معمقة وجانب تجريبي تطبيقي. في الجزء النظري، تطرقت المذكرة إلى التعريف بمرض السيلياك، وهو اضطراب مناعي ذاتي مزمن يصيب الأمعاء الدقيقة نتيجة استهلاك الغلوتين لدى أشخاص ذوي استعداد وراثي. كما تم استعراض أعراض المرض ومضاعفاته وآليات علاجه، والتي تعتمد حصرياً على اتباع نظام غذائي صارم خالٍ من الغلوتين. من جهة أخرى، تناولت الدراسة الخصائص الغذائية للكينوا، حيث بينت أنه مصدر غني بالبروتينات الكاملة، الألياف، المعادن (كالحديد، الكالسيوم والمغنيسيوم) والفيتمينات) خاصة B وE، مما يجعله خياراً غذائياً مثاليًا لتعويض النقص الغذائي لدى المصابين بالسيلياك. أما في الشق التطبيقي، فقد تمت زراعة الكينوا داخل بيت بلاستيكي في ظروف مناخية محلية، تلتها تحاليل فيزيائية وكيميائية (الغلوتين والمواد المعدنية) وقد أظهرت النتائج قدرة للنبات على التكيف مع البيئة، إلى جانب قيم غذائية معتبرة تؤكد إمكانية استعماله كمكمل صحي فعال. في الختام، توصلت الدراسة إلى أن إدراج الكينوا في النظام الغذائي للمرضى المصابين بالسيلياك يمثل حلاً غذائياً فعالاً وآمناً، كما يُوصى بتوسيع زراعته محلياً وتعزيز سلاسل إنتاجه لتسهيل توفره وتعميم استخدامه.

الكلمات المفتاحية: الكنوا الغلوتين، العناصر المعدنية، مرض السيلياك، مكمل غذائي

Abstract

This note aims to investigate the possibility of adopting quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as a dietary supplement specifically for people with Celiac disease, due to its naturally gluten-free and rich in essential nutrients. A combination of an in-depth theoretical study in-depth theoretical study was combined with an applied experimental aspect. In the theoretical part, the memo touched on the definition of Celiac disease, a chronic autoimmune disorder of the small intestine caused by the consumption of gluten in people with a genetic predisposition. It also reviewed the symptoms, complications and treatment mechanisms of the disease. which relies exclusively on following a strict gluten-free diet. The study also addressed the nutritional properties of quinoa, showing that it is a rich source of complete proteins, fiber, minerals (such as iron, calcium and magnesium) and vitamins (especially B and E), making it an ideal food choice to compensate for nutritional deficiencies in celiacs. Quinoa was grown in a greenhouse under microclimatic conditions, followed by physical and chemical analyses (gluten and mineral substances). The results showed good adaptability of the plant to the environment, as well as significant nutritional values that confirm its potential use as an effective health supplement. In conclusion, the study concluded that the inclusion of quinoa in the diet of patients with celiac disease is an effective and safe dietary solution, and it is recommended to expand its cultivation locally and strengthen its production chains to facilitate its availability and popularization.

Keywords: Quinoa, Gluten, Minerals, Celiac disease, Dietary supplement

Résumé

La présente note vise à étudier la possibilité d'adopter le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) comme complément alimentaire spécifiquement destiné aux personnes atteintes de la maladie cœliaque. Comme complément alimentaire spécifiquement destiné aux personnes atteintes de la maladie cœliaque, car il est naturellement exempt de gluten et riche en nutriments essentiels. Le quinoa est naturellement exempt de gluten et riche en nutriments essentiels. Combinaison d'une étude théorique Une étude théorique approfondie a été combinée à un aspect expérimental appliqué. Dans la partie théorique, la note aborde la définition de la maladie cœliaque La maladie cœliaque est une affection auto-immune chronique de l'intestin grêle causée par la consommation de gluten chez les personnes ayant une prédisposition génétique. Elle passe également en revue les symptômes, les complications et les mécanismes de traitement de la maladie. Le traitement de la maladie de cœliaque est basé exclusivement sur un régime strict sans gluten. D'autre part, l'étude s'est intéressée aux propriétés nutritionnelles du quinoa Le quinoa est une source riche en protéines complètes, en fibres, en minéraux (comme le fer, le calcium et le magnésium) et en vitamines. et le magnésium) et de vitamines (notamment B et E), ce qui en fait un choix alimentaire idéal pour compenser les carences nutritionnelles chez les personnes atteintes de la maladie cœliaque. En ce qui concerne l'aspect appliqué, le quinoa a été cultivé sous serre dans des conditions microclimatiques, suivi d'analyses physico-chimiques (analyse du gluten et des minéraux). Les résultats ont montré une bonne adaptabilité de la plante à l'environnement, ainsi que des valeurs nutritionnelles significatives qui confirment son utilisation potentielle en tant que complément de santé efficace. En conclusion, l'étude a conclu que l'inclusion du quinoa dans le régime alimentaire des patients atteints de la maladie cœliaque est une solution diététique efficace et sûre, et il est recommandé d'étendre sa culture locale et de renforcer ses chaînes de production pour faciliter sa disponibilité et sa popularisation.

Mots-clés : Quinoa, Gluten, Minéraux, Minéraux, Maladie cœliaque, Complément alimentaire

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

RESUME

TABLE DE MATIERE

LISTE DES ABVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

CHAPITRE I LA MALADIE COELIAQUE

1.1 Définition et prévalence	30
1.1.1. Est-ce que la maladie cœliaque est génétique ?	18
1.1.2 Maladie auto-immune affectant l'intestin grêle	19
1.1.3 Fréquence dans le monde et groupes à risque	19
1.2 Physiopathologie	20
1.2.1 Effets de la consommation de gluten sur l'organisme des personnes atteintes	21
1.2.2. Réaction immunitaire et lésions intestinales	21
1.3 Symptômes et complications	22
1.3.1 Troubles digestifs (diarrhée ·ballonnements ·douleurs abdominales)	24
1.3.2 Carences nutritionnelles (fer, calcium, vitamines)	24
1.3.3 Risques à long terme (ostéoporose, retard de croissance chez l'enfant)	24
1.4 Est-il possible de guérir de la maladie cœliaque ? Traitement et régime sans gluten	25
1.4.1 Suppression totale du gluten de l'alimentation	25
1.4.2 Difficultés d'accès aux produits sans gluten et leur coût.	26
1.4.3 Besoin d'alternatives nutritives et accessibles	26

CHAPITRE II: LE QUINOA: UNE ALTERNATIVE NUTRECTIONNELLE

2.1 Origine et culture du quinoa	27
2.2 Histoire et pays producteurs	29
2.3 Culture du quinoa en Algérie	30
2.4 Conditions climatiques et variétés cultivées.	30
2.5 Composition nutritionnelle	31
2.5.1 Protéines et acides aminés essentiels	32
2.5.2 Fibres et impact sur la digestion	33
2.5.3 Minéraux et vitamines (fer, calcium, magnésium, vitamine B)	33
2.6 Absence de gluten et digestibilité	35
2.7 Études prouvant son innocuité pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque	35
2.8 Comparaison avec d'autres céréales sans gluten (riz, maïs, sarrasin)	36
2.9 Avantages et limites	37
2.10 Facteurs pouvant limiter son adoption (coût, accessibilité, goût)	38

CHAPITRE III : PRODUCTION ET TRANSFORMATION DU QUINOA EN COMPLEMENTS ALIMENTAIRE

3.1 Étapes de la production	40
3.2 Récolte et nettoyage	50
3.4 Élimination des saponines (composés amers)	50
3.5 Techniques de transformation	51
3.5.1 Farine de quinoa	51
3.5.2 Flocons et extrusions	51
3.5.3 Boissons et barres énergétiques à base de quinoa	52
3.6 Enrichissement et amélioration du produit	52
3.6.1 Ajout de vitamines et minéraux	52
3.6.2 Associations avec d'autres aliments (graines, légumineuses)	53
3.7 Études existantes sur les produits dérivés du quinoa	53
3.8 Produits disponibles sur le marché	53
3.9 Retours des consommateurs et acceptabilité	53

CHAPITRE V : MATÉRIELS ET MÉTHODES

4.1. Objectif	55
4.2. Lieu de l'expérimentation	55
4.3. Caractéristiques physico-chimiques du sol et données climatiques	55
4.4. Méthode d'étude	55
4.5. Échantillonnage	56
4.6. Les paramètres étudiés	57
4.6.1. Taux de gluten	57
4.6.2. Dosage des éléments nutritif	58

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Analyses physico-chimiques et technologiques	59
5.1.1. Test du gluten humide et sec de la farine du quinoa	59
5.1.3. Composition en éléments minéraux de la farine de quinoa	60
5.1.3.1. La teneur en sodium (Na)	61
5.1.3.2. Teneur en magnésium (Mg)	61
5.1.3.3. Teneur en silicium (Si)	62
5.1.3.4. Teneur en phosphore (P)	62
5.1.3.5. Teneur en soufre (S)	63
5.1.3.6. Teneur en potassium (K)	63
5.1.3.7. Teneur en calcium (Ca)	64
5.1.3.8. Teneur en manganèse (Mn)	64
5.1.3.9. Teneur en fer (Fe)	64
5.1.3.10. Teneur en Strontium (Sr)	65
5.1.3.11. Teneur en cuivre (Cu)	65
5.1.3.12. Teneur en Zinc (Zn)	66

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

LISTE DES ABVIATIONS

RSG	Régimes Sans Gluten
MC	Maladie Cœliaque
GFD	Gluten-Free Diet
TG2	Transglutaminase Tissulaire
HLA-DQ2	Human Leukocyte Antigen - DQ2 Types associés à la MC
HLA-DQ8	Human Leukocyte Antigen – DQ8 Types associés à la MC
AGCC	Acides Gras à Chaîne Courte
PNNS	Programme National Nutrition Santé
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
ITDAS	Institut technique pour le développement agricole de la saharienne
INRAA	Institut national de recherche agronomique d'Algérie
ITGC	Institut Technique des Grandes Cultures
INRF	Institut national de recherche forestière
IFN- γ	Tumor Necrosis Factor alpha
IL-4	nterleukine 4
nm	Micro gramme
TXRF	Total Reflection X-Ray Fluorescence

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1	Taux de séroprévalence de la maladie cœliaque dans le monde selon les pays ayant rapporté des données	21
Figure 1.2	Physiopathologie de la maladie cœliaque (Sollid et <i>al.</i> , 2013)	23
Figure 2.1	variétés cultivées (Mena., 2022)	31
Figure 4.1	Stade de semis	44
Figure 4.2	Stade de récolte des graines	44
Figure 4.3	Stade de maturation et de récolte des graines	45
Figure 4.4	Échantillonnage des graines	46
Figure 4.5	Préparation de la pâte	47
Figure 4.6	Élimination de l'amidon	47
Figure 4.7	Tubes à essai	48
Figure 4.8	La lecture sur le spectrophotomètre	49
Figure 5.1	La teneur en éléments nutritifs au niveau des graines de quinoa	54

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Teneurs en macronutriments du quinoa et d'autres aliments (pour 100 grammes de poids sec) Koziol (1992)	32
Tableau 2.2	Teneurs en acides aminés essentiels du quinoa et d'autres espèces cultivées au regard des valeurs recommandées par la FAO pour les enfants de 3 à 10 ans (en grammes pour 100 grammes de protéines).	33
Tableau 2.3	Teneurs en sels minéraux du quinoa et d'autres aliments (en milligrammes pour 100 grammes de poids sec) Koziol (1992)	34
Tableau 2.4	Teneur en vitamines du quinoa et de certaines céréales(en mg/100 gr de poids sec) Koziol (1992)	35
Tableau 5.1	Composition physico-chimiques et technologiques	59

INTRODUCTION

D'après le Programme National Nutrition Santé (PNNS) 2011-2015, le terme « nutrition » englobe l'ensemble des éléments liés à l'alimentation tels que les nutriments, les aliments, ainsi que les facteurs sociaux, culturels, économiques, sensoriels et cognitifs influençant les comportements alimentaires mais aussi l'activité physique. La nutrition, selon cette approche, représente donc un équilibre entre les apports issus de l'alimentation et les dépenses énergétiques liées à l'activité physique. Souvent, l'obésité est citée comme la principale conséquence des déséquilibres nutritionnels. Toutefois, elle ne doit pas occulter d'autres maladies chroniques à forte prévalence, pour lesquelles la nutrition joue un rôle de plus en plus reconnu, soit en tant que facteur protecteur, soit comme facteur de risque. Parmi ces pathologies figurent notamment les cancers, les maladies cardiovasculaires, l'ostéoporose et le diabète de type 2 (**Boulaud et al., 2015**).

Les maladies chroniques sont des affections de longue durée, non transmissibles et, dans la majorité des cas, évitables. Elles représentent la principale cause de mortalité à l'échelle mondiale et engendrent un lourd fardeau économique et social. Parmi ces maladies, on retrouve notamment l'obésité, le diabète, les maladies cardiovasculaires, certains cancers, les maladies bucco-dentaires et l'ostéoporose. L'adoption d'un mode de vie sain, incluant une alimentation équilibrée et une activité physique régulière, joue un rôle essentiel dans la réduction du risque de développement de ces pathologies. Par ailleurs, dans les pays à faibles revenus, la faim et la malnutrition demeurent des problèmes majeurs, causant des troubles physiques et mentaux, voire la mort. Toutefois, ces mêmes pays observent une hausse inquiétante des maladies chroniques, conséquence directe de l'évolution rapide des régimes alimentaires et des modes de vie, en particulier chez certaines populations. Ainsi, garantir un accès sécurisé et suffisant à une alimentation de qualité est primordial, non seulement pour lutter contre les carences nutritionnelles, mais aussi pour prévenir les maladies chroniques.

L'impact des régimes alimentaires sur la santé digestive est aujourd'hui bien documenté, notamment à travers leur influence sur la composition et la diversité du microbiote intestinal. Des études comparatives entre différentes populations ont mis en évidence que les individus consommant une alimentation traditionnelle, riche en fibres, en aliments végétaux et en produits fermentés – comme les Bédouins ou les adolescents égyptiens – possèdent un microbiote

intestinal plus diversifié, avec une prédominance de bactéries bénéfiques comme celles du genre *Prevotella*, associées à une production accrue d'acides gras à chaîne courte (AGCC), essentiels au bon fonctionnement de l'intestin. En revanche, les régimes occidentaux modernes, souvent riches en sucres, en graisses saturées et en aliments transformés, entraînent une réduction de la diversité microbienne et favorisent des entérotypes comme *Bacteroides*, moins favorables à la santé digestive et liés à des profils métaboliques pro-inflammatoires. Ces déséquilibres peuvent non seulement altérer la digestion, mais aussi affaiblir la barrière intestinale, favoriser l'inflammation chronique, et contribuer au développement de maladies digestives et cardiométaboliques. Ainsi, le régime alimentaire constitue un levier fondamental dans la prévention et la gestion des troubles digestifs, en agissant directement sur l'écosystème intestinal. Une alimentation saine, riche en fibres et en produits peu transformés, favorise une meilleure santé digestive par le biais d'un microbiote équilibré (Carillo, 2018).

La maladie cœliaque constitue un véritable problème de santé publique en raison des restrictions alimentaires strictes qu'elle impose. Le quinoa représente un complément alimentaire idéal pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque (FAO, 2013). En effet, il est naturellement exempt de gluten, ce qui en fait une alternative sûre aux céréales traditionnelles comme le blé, l'orge ou le seigle. Sa richesse nutritionnelle est également remarquable : il contient des protéines complètes avec tous les acides aminés essentiels, ainsi que des fibres, des vitamines (notamment B et E) et des minéraux tels que le fer, le calcium et le magnésium. Ces nutriments sont souvent déficitaires chez les cœliaques en raison de troubles d'absorption intestinale. Ainsi, le quinoa permet non seulement de diversifier l'alimentation sans gluten, mais aussi de compenser les carences nutritionnelles fréquemment observées chez ces patients (Vega-Galvez et al., 2010 ; Elsohaimy et al., 2015).

Le quinoa se distingue des autres céréales sans gluten par sa richesse nutritionnelle et son absence naturelle de gluten. Il est particulièrement riche en protéines de haute qualité, contenant tous les acides aminés essentiels, ainsi qu'en vitamines, minéraux et antioxydants.

En plus de ses graines, ses jeunes feuilles sont comestibles et peuvent contenir jusqu'à 33 % de protéines sur matière sèche (Bazile et al., 2015 ; Chenine et Sahli, 2020). Les grains et la farine de quinoa sont utilisés dans divers produits de boulangerie, et leur association avec des légumineuses améliore la valeur nutritionnelle des repas (Chenine et Sahli, 2020).

Un autre atout du quinoa est la faible teneur de ses protéines en prolamines (gliadine, hordéine), principales responsables du gluten, qui provoquent des réactions auto-immunes chez les patients cœliaques. Cela fait du quinoa une alternative saine pour les personnes intolérantes au gluten (**Fairbanks et al., 1989**).

Les extraits issus du quinoa peuvent être valorisés aussi bien dans des formulations alimentaires que dans des compléments nutritionnels. Ces compléments peuvent se présenter sous forme d'extraits purs, tels qu'une huile raffinée éventuellement enrichie en fraction insaponifiable, ou sous forme galénique comme des gélules ou des capsules molles. Selon la formulation, la teneur en extrait de quinoa peut varier entre 10 % et 100 % du poids total du complément ((**Bazile et al., 2015**)).

Dans l'objectif d'offrir des solutions nutritionnelles adaptées aux personnes atteintes de la maladie cœliaque, l'exploration d'aliments naturellement sans gluten et riches en nutriments est primordiale. Le quinoa, pseudo-céréale originaire des Andes, attire un intérêt croissant en tant qu'aliment fonctionnel. Grâce à sa richesse en protéines complètes, en acides aminés essentiels et en micronutriments, et surtout à son absence naturelle de gluten, il représente une alternative nutritionnelle précieuse pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque. Intégré dans des produits comme les barres nutritionnelles ou sous forme de compléments alimentaires, le quinoa peut répondre aux besoins spécifiques de cette population vulnérable (**Vega-Galvez et al., 2010**).

L'analyse sensorielle désigne un ensemble de méthodes permettant d'évaluer les caractéristiques organoleptiques d'un produit, telles que le goût, l'odorat, la vue, le toucher et l'ouïe, afin de quantifier les perceptions humaines. Elle aide à traduire les préférences des consommateurs en propriétés mesurables d'un produit (**Lefebvre et Bassereau, 2003**). Le quinoa, riche en protéines de haute qualité représentant environ 17 % de sa composition, contient principalement des globulines 11S et des albumines 2S. Sa digestibilité et ses propriétés fonctionnelles peuvent être optimisées par des méthodes de modification, élargissant ainsi son utilisation dans les produits végétaux (**Cui et al., 2023**).

CHAPITRE I : LA MALADIE COELIAQUE

1.1. Définition et prévalence

Le terme « cœliaque » provient étymologiquement du mot latin *cœliacus*, lui-même dérivé du grec *koiliakos*, issu de *koilia* qui signifie littéralement « abdomen ». Ainsi, le mot fait directement référence à la localisation abdominale des symptômes. Il existe également une différence orthographique selon les régions anglophones : aux États-Unis, on utilise l'orthographe « *celiac* », tandis qu'au Royaume-Uni, on écrit « *cœliac* » (**Thompson, 2008**). La maladie cœliaque est définie comme une entéropathie auto-immune chronique déclenchée par l'ingestion de gluten chez des individus génétiquement prédisposés (**Matuchansky et al., 1999 ; Lamireau et Clouzeau, 2008**). Elle se manifeste par une atrophie de la muqueuse du grêle proximal, une lésion qui tend à régresser suite à l'élimination alimentaire du gluten contenu dans le blé, ainsi que des prolamines apparentées présentes dans d'autres céréales toxiques telles que le seigle et l'orge (**Clot et al., 2001 ; Mouterde et al., 2008**).

1.1.2. Est-ce que la maladie cœliaque est génétique ?

La maladie cœliaque est aujourd'hui reconnue comme un problème majeur de santé publique à l'échelle mondiale. Initialement rapportée principalement dans les pays à population majoritairement caucasienne, elle est désormais identifiée dans de nombreuses régions du globe (**Singh et al., 2018**). Bien que la prévalence mondiale exacte demeure incertaine, les estimations actuelles suggèrent qu'au moins 0,30 % de la population serait atteinte, soit environ 200 000 individus, dont seulement 50 000 auraient reçu un diagnostic formel. La fréquence de la maladie est en constante augmentation (**Schlienger, 2020**). Sur le plan clinique, la forme symptomatique de la maladie cœliaque apparaît fréquemment chez le nourrisson ou l'enfant, bien qu'environ 20 % des cas soient diagnostiqués après l'âge de 60 ans (**Schlienger, 2020**). Sur le plan sérologique, les études indiquent que la séroprévalence est la plus élevée en Asie (1,8 %) et la plus faible en Afrique (1,1 %) (**Lionetti et Catassi, 2014**).

Cette différence peut s'expliquer, entre autres, par la plus faible fréquence démographique de l'haplogroupe HLA-DQ2 ainsi qu'une consommation de blé moindre en Afrique subsaharienne comparativement à l'Afrique du Nord.

1.1.3 Maladie auto-immune affectant l'intestin grêle

La maladie cœliaque est une entéropathie auto-immune chronique provoquée par une intolérance permanente au gluten chez les individus génétiquement prédisposés. Elle affecte principalement l'intestin grêle en provoquant une atrophie des villosités intestinales, ce qui entraîne une malabsorption des nutriments essentiels (**Fasano & Catassi, 2012**). Cette réponse auto-immune est déclenchée par la consommation de gluten, une protéine présente dans le blé, l'orge et le seigle. L'activation immunitaire est en grande partie liée à la présence des gènes HLA-DQ2 ou HLA-DQ8, retrouvés chez plus de 95 % des patients (**Lebwohl et al., 2018**).

Le seul traitement efficace actuellement consiste en un régime strict sans gluten, permettant la régénération de la muqueuse intestinale et la disparition progressive des symptômes (**Wgo, 2016**).

1.1.4 Fréquence dans le monde et groupes à risque

La maladie cœliaque constitue aujourd'hui un problème de santé publique majeur à l'échelle mondiale. Bien qu'elle ait été initialement décrite chez des populations à majorité caucasienne, elle est désormais rapportée dans diverses régions du monde, y compris dans des pays non occidentaux (**Singh et al., 2018**).

La prévalence mondiale exacte de la maladie demeure incertaine. Toutefois, les estimations suggèrent qu'au moins 0,30 % de la population serait atteinte, ce qui correspond à environ 200 000 personnes, dont seulement 50 000 auraient reçu un diagnostic formel. De plus, la prévalence est en constante augmentation à l'échelle mondiale (**Schlienger, 2020**).

Les études de séroprévalence indiquent que la fréquence la plus élevée est observée en Asie (1,8 %), tandis que l'Afrique affiche la plus faible séroprévalence estimée à 1,1 %. Cette variation géographique pourrait s'expliquer par la prévalence plus faible des haplotypes HLA-DQ2 ainsi qu'une consommation réduite de blé en Afrique subsaharienne, comparée à l'Afrique du Nord (**Lionetti et Catassi, 2014**). Concernant les groupes à risque, la forme symptomatique touche le plus souvent le nourrisson et l'enfant, mais 20 % des cas sont diagnostiqués après 60 ans, ce qui souligne la nécessité d'un dépistage à tout âge (**Schlienger, 2020**).

Par ailleurs, les personnes présentant des antécédents familiaux, les porteurs des allèles HLA-DQ2 et HLA-DQ8, ainsi que celles atteintes de maladies auto-immunes (telles que le diabète de type 1 ou les thyroïdites auto-immunes) sont considérées comme particulièrement à risque (**Figure 1**).

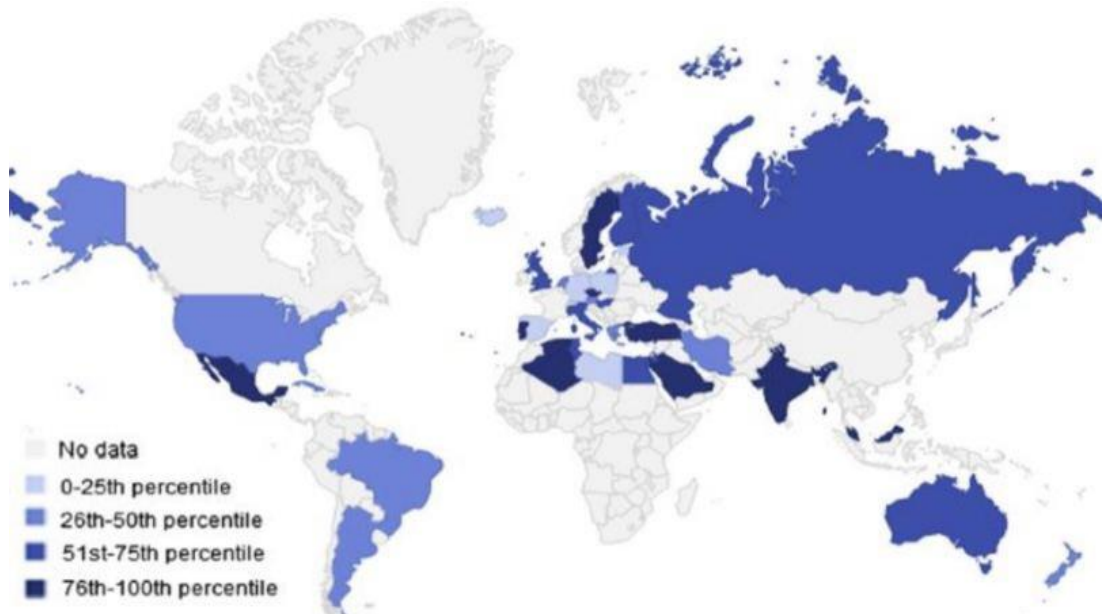


Figure 1.1 : Taux de séroprévalence de la maladie cœliaque dans le monde selon les pays ayant rapporté des données.

Les taux de prévalence sont classés en quatre groupes de percentiles, allant de 0,2 % à 8,5 %, du 0–25e percentile (gris clair) au 76–100e percentile (noir foncé). Les pays avec les taux les plus bas ont une prévalence entre 0,2 % et 0,8 %, tandis que les plus élevés vont de 2,1 % à 8,5 % (**Singh et al., 2018**).

1.2 Physiopathologie

La maladie cœliaque est une entéropathie auto-immune chronique induite par la consommation de gluten chez les individus génétiquement prédisposés. Plus de 90 % des patients expriment le génotype HLA-DQ2, tandis que 5 à 10 % présentent le HLA-DQ8. Cependant, cette prédisposition génétique est présente chez environ 30 à 40 % de la population générale, ce qui indique l'implication de facteurs environnementaux et immunologiques dans la pathogenèse (**Green et Cellier, 2007 ; Dube et al., 2005**).

Le gluten, composé de gliadine et de gluténine, contient des fragments peptidiques riches en proline et glutamine qui résistent à la digestion. Ces fragments atteignent l'épithélium intestinal où ils sont désamidés par la transglutaminase tissulaire (TG2), ce qui augmente leur affinité pour les molécules HLA-DQ2/DQ8 à la surface des cellules présentatrices d'antigènes **(Di Sabatino et al., 2012)**.

1.2.1 Effets de la consommation de gluten sur l'organisme des personnes atteintes

Chez les personnes atteintes, la consommation de gluten provoque une série de réactions pathologiques. Les peptides de gliadine désamidés traversent la muqueuse intestinale, interagissent avec la TG2, et sont présentés au système immunitaire via les molécules HLA-DQ2/DQ8.

Cette activation entraîne une réponse inflammatoire chronique qui altère la fonction intestinale, provoque des troubles digestifs (diarrhée, douleurs abdominales, ballonnements) et empêche l'absorption correcte des nutriments, menant à des carences (fer, calcium, vitamines) et à un retard de croissance chez l'enfant **(Green et Cellier, 2007)**.

L'introduction précoce (avant 3 mois) ou tardive (après 7 mois) du gluten, ainsi que certaines infections virales (rotavirus, adénovirus), peuvent également augmenter la perméabilité intestinale et favoriser l'activation du système immunitaire, aggravant ainsi la maladie **(Dube et al., 2005 ; Szajewska et al., 2012)**.

1.2.2. Réaction immunitaire et lésions intestinales

La réponse immunitaire dans la maladie cœliaque est médiée par les lymphocytes T CD4+ qui reconnaissent les peptides de gliadine désamidés présentés par les cellules présentatrices d'antigènes. Ces lymphocytes produisent des cytokines inflammatoires telles que l'interféron- γ (IFN- γ), l'interleukine-4 (IL-4) et le facteur de nécrose tumorale alpha (TNF- α), qui provoquent une atrophie des villosités intestinales, une hyperplasie des cryptes et une infiltration de lymphocytes intraépithéliaux **(Di Sabatino et al., 2012)**.

Cette inflammation chronique endommage la structure de l'intestin grêle, ce qui compromet sa capacité d'absorption et peut conduire à des manifestations systémiques : fatigue,

anémie, ostéoporose, troubles neurologiques, voire des complications malignes dans les cas sévères et non traités.

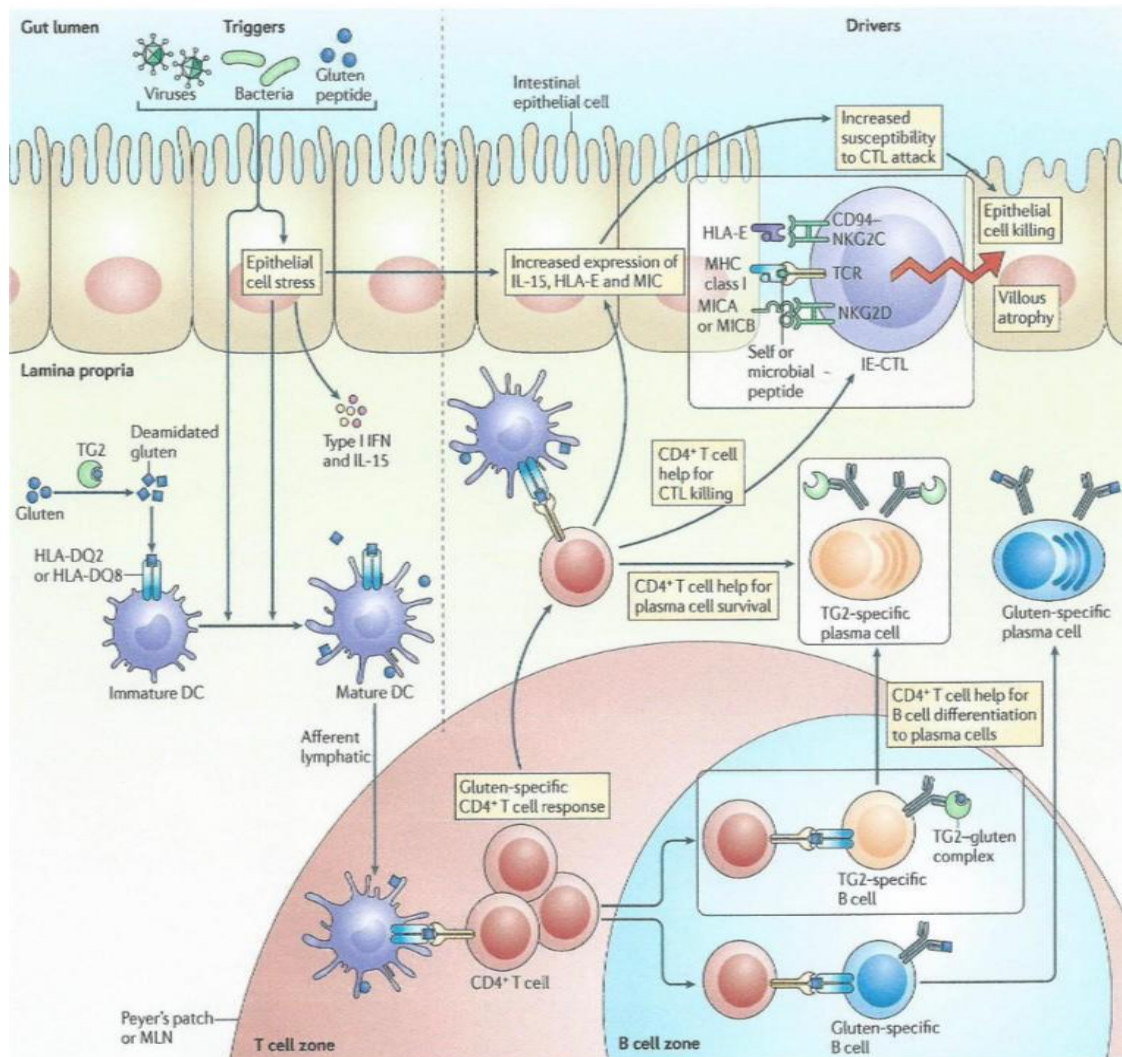


Figure 1.2 : Physiopathologie de la maladie cœliaque (Sollid *et al.*, 2013).

1.3 Symptômes et complications

1.3.1. Les Symptômes de la Maladie Cœliaque

La maladie cœliaque est une entéropathie chronique auto-immune induite par l'ingestion du gluten chez les sujets génétiquement prédisposés. Historiquement considérée comme une affection rare de la petite enfance, elle est désormais reconnue comme une maladie systémique fréquente, touchant tous les âges de la vie (**Rampertab *et al.*, 2012**).

Dans sa forme classique, elle débute chez le nourrisson quelques semaines après l'introduction du gluten dans l'alimentation. Elle se manifeste par :

Diarrhée chronique avec des selles abondantes en « bouse de vache ».

Anorexie, apathie.

Météorisme abdominal.

Signes de dénutrition (fonte musculaire, perte du tissu adipeux).

Cassure de la courbe pondérale et ralentissement de la croissance staturale.

Les formes atypiques ou frustes sont aujourd'hui plus fréquentes. Elles se manifestent par des symptômes digestifs modérés ou des signes extra-digestifs, notamment (**Bousquet, 2015**) :

Selles irrégulières, constipation chronique.

Douleurs abdominales récidivantes.

Prise de poids médiocre, appétit diminué.

Retard de croissance, retard pubertaire, aménorrhée.

Fatigue chronique.

Anémie ferriprive réfractaire.

Douleurs osseuses, fractures sur ostéopénie.

Aphthose buccale, hypoplasie de l'émail dentaire.

Éruption herpétiforme.

Transaminases élevées.

1.3.2. Les Complications de la Maladie Cœliaque

La maladie cœliaque non diagnostiquée ou mal traitée peut entraîner de nombreuses complications multisystémiques (**Bower et al., 2007**) :

Complications liées à la malabsorption :

Ostéopénie/ostéoporose.

Retard de croissance chez l'enfant.

Anémie, carences en fer, calcium, vitamines A, D, E et K.

Complications obstétricales (Catassi et Fasano, 2008) :

Infertilité.

Avortements spontanés.

Retard de croissance intra-utérin.

Complications neurologiques et psychiatriques :

Épilepsie avec calcifications cérébrales (50–80%).

Ataxie (13–16%).

Dépression (≈10%), neuropathies périphériques, démence, myopathies.

Complications malignes

Lymphomes non hodgkiniens (surtout intestinaux) (**Egan et al., 1996**).

Carcinomes épithéliaux, adénocarcinomes (**Pennazio, 2005 ; Jadoul, 2006**).

Duodéno-jéjuno-iléite ulcéreuse, sprue collagène (**Tkoub, 2008**).

1.3.1 Troubles digestifs (diarrhée ·ballonnements ·douleurs abdominales)

Ces manifestations sont typiques dans les formes classiques et parfois présentes dans les formes atypiques :

Diarrhée chronique (**Rampertab et al., 2012**).

Météorisme abdominal (ballonnements).

Douleurs abdominales récidivantes (**Bousquet, 2015**).

1.3.2 Carences nutritionnelles (fer, calcium, vitamines)

La malabsorption intestinale liée à l'atteinte de la muqueuse duodénale cause plusieurs carences (**Bousquet, 2015**) :

Fer : anémie ferriprive réfractaire

Calcium et vitamine D : ostéopénie, douleurs osseuses, fractures.

Vitamines liposolubles (A, D, E, K) : hémorragies, atteintes osseuses, troubles neurologiques.

1.3.3 Risques à long terme (ostéoporose, retard de croissance chez l'enfant)

Sans traitement (régime strict sans gluten), la maladie cœliaque expose à des complications chroniques :

Ostéoporose / ostéopénie : due à une malabsorption prolongée du calcium et de la vitamine D (**Bower et al., 2007**).

Retard de croissance staturo-pondérale chez l'enfant : fréquent dans les formes pédiatriques non traitées (**Rampertab et al., 2012**).

1.4 Est-il possible de guérir de la maladie cœliaque ? Traitement et régime sans gluten

La maladie cœliaque est une affection auto-immune chronique déclenchée par l'ingestion de gluten chez les individus génétiquement prédisposés. À ce jour, aucune guérison définitive n'est possible, et le seul traitement reconnu est un régime strict sans gluten à vie, capable de faire disparaître les symptômes, restaurer les lésions intestinales et prévenir les complications à long terme (**Matuchansky et al., 2004 ; Megiorni et al., 2009**).

1.4.1 Suppression totale du gluten de l'alimentation

Le régime sans gluten représente la pierre angulaire du traitement. Il ne doit être instauré qu'après un diagnostic clair, car sa rigueur implique des changements alimentaires majeurs (**Williamson et March, 2002 ; Jadoul, 2006 ; Pietzak, 2005**).

Le gluten est présent dans le blé, le seigle et l'orge : ces céréales, ainsi que tous les produits qui en dérivent, doivent être éliminés de l'alimentation. Cela comprend les pains, les pâtes, les pâtisseries, les plats industriels et même certains condiments (**Schmitz, 2007**).

Certains aliments comme le riz, le maïs, les légumineuses, les produits laitiers, les viandes, les poissons, les huiles sont naturellement sans gluten et permettent de maintenir un régime varié et équilibré (**Schmitz, 2007**).

Quant à l'avoine, longtemps considérée toxique, plusieurs études ont démontré qu'elle est généralement bien tolérée lorsqu'elle est exempte de contamination croisée (**Hoffenberg et al., 2000 ; Thompson, 2008**).

En cas de carences nutritionnelles, des suppléments de fer, calcium, ou vitamines peuvent être nécessaires au début du traitement (**Baillargeon, 2006**). Les produits laitiers sont parfois à éviter temporairement si un déficit en lactase secondaire est présent (**Srinivasan et al., 1999**).

L'objectif est double : corriger les signes cliniques, biologiques et histologiques et réduire le risque de complications telles que l'ostéopénie ou les lymphomes intestinaux (**Matuchansky et al., 2004 ; Megiorni et al., 2009**).

1.4.2 Difficultés d'accès aux produits sans gluten et leur coût.

L'un des défis majeurs du régime sans gluten est le coût élevé et l'accès limité aux produits certifiés sans gluten, notamment dans les pays à ressources limitées. Les produits transformés sans gluten peuvent être jusqu'à deux à trois fois plus chers que leurs équivalents contenant du gluten. Cela peut constituer un fardeau économique pour les patients (**Thompson, 2008**).

De plus, la lecture attentive des étiquettes alimentaires devient indispensable pour éviter les contaminations croisées, ce qui complique davantage la gestion du régime au quotidien (**Schmitz, 2007**).

1.4.3 Besoin d'alternatives nutritives et accessibles

Pour garantir un équilibre nutritionnel, il est essentiel d'intégrer des alternatives naturellement sans gluten, riches en nutriments, comme le quinoa, le sarrasin, le millet ou les légumineuses. Ces aliments permettent de compenser les déficits liés à la malabsorption intestinale et d'assurer un apport suffisant en glucides complexes, protéines, fibres, vitamines et minéraux (**Schmitz, 2007**). Enfin, des substituts enrichis en micronutriments sont de plus en plus développés pour répondre aux besoins des patients tout en respectant les contraintes du régime.

CHAPITRE II : LE QUINOA UNE ALTERNATIVE NUTRITIONNELLE

2.1. Origine et culture

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) est une plante domestiquée appartenant à la famille des Chénopodiacées, considérée comme un aliment de base dans les régions andines de l'Amérique du Sud. Bien qu'il ne soit pas une céréale au sens botanique, il est cultivé, récolté et consommé de manière similaire aux céréales classiques. La domestication du quinoa remonte aux civilisations anciennes des Andes, dans la région de l'Altiplano bolivien et péruvien.

L'origine exacte de cette plante demeure controversée, plusieurs hypothèses ayant été proposées. Elle a été décrite botaniquement pour la première fois en 1778 par Willdenow comme une espèce originaire d'Amérique du Sud, avec un centre d'origine localisé dans la région andine (**Dharm, 2019**). Selon **Gandarillas (1968)**, la plus grande diversité génétique du quinoa se situe dans une zone allant de Cuzco (Pérou) à Potosí (Bolivie), particulièrement autour du lac Titicaca, ce qui suggère une forte concentration de variétés locales dans cette région.

Par ailleurs, **Gandarillas (1974)** et le **Conseil national de recherches (1989)** s'accordent à situer le centre d'origine du quinoa dans l'Altiplano andin, avec une aire de culture ancestrale s'étendant à la Bolivie, au Pérou, à l'Équateur, au nord du Chili et à la Colombie. Des preuves archéologiques indiquent que le quinoa était déjà domestiqué vers 5000 avant **J.-C. (Tapia, 1979)**.

La culture de quinoa est une pratique agricole ancestrale principalement développée dans les Andes, notamment au Pérou et en Bolivie. Elle se fait majoritairement en petites exploitations familiales, en haute altitude, selon des méthodes traditionnelles qui préservent une grande diversité génétique. Bien que sa production ait diminué après la colonisation, elle a connu un regain d'intérêt depuis les années 1960, avec une forte expansion nationale et internationale. Aujourd'hui, le quinoa est cultivé dans plus de 120 pays, avec le Pérou comme principal producteur mondial (**Huillca et al., 2021**).

2.2 Histoire et pays producteurs

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) est une plante originaire des Andes, plus précisément des environs du lac Titicaca, à la frontière entre le Pérou et la Bolivie. Il constituait un aliment de base pour les civilisations précolombiennes avant d'être progressivement remplacé par les céréales introduites par les colons espagnols, telles que le blé et l'orge (**Herbillon, 2015**). Selon les données archéologiques, sa domestication remonterait à environ 3 000 à 5 000 ans avant J.-C., avec la découverte de graines dans des sépultures à Tarapacá, Calama et Arica au Chili, ainsi que dans plusieurs régions du Pérou (**Herbillon, 2015**).

À l'arrivée des conquistadors, la culture du quinoa était déjà bien développée et étendue sur l'ensemble de l'Empire inca et au-delà. Le conquistador Pedro de Valdivia fut le premier Espagnol à mentionner le quinoa, observant qu'il faisait partie de l'alimentation des populations locales autour de Concepción (**Herbillon, 2015**). Dans ses Commentaires royaux, Garcilaso de la Vega décrit le quinoa comme une céréale secondaire, semblable au mil ou au riz à grains courts, et relate la première tentative d'exportation de graines vers l'Europe, qui échoua en raison de la mauvaise conservation des semences durant le transport (**Herbillon, 2015**). D'autres témoignages, comme ceux de **Cieza de León (1560)**, signalent la culture du quinoa sur les hauts plateaux de Pasto et de Quito, où il remplaçait le maïs dans les zones froides. **Patiño (1964)**, dans les chroniques de La Paz (citées par **Jimenes de la Espada, 1885**), confirme également son rôle dans l'alimentation des populations autochtones. Enfin, le naturaliste **Humboldt** rapporte, lors de son voyage en Colombie, que le quinoa accompagnait traditionnellement les habitants de la région de Cundinamarca.

Le quinoa est une plante originaire de la région andine, où sa culture s'étend traditionnellement du sud de la Colombie jusqu'au nord de l'Argentine et du Chili. Les deux principaux producteurs mondiaux sont le Pérou et la Bolivie, qui assuraient à eux seuls environ 92 % de la production mondiale en 2008. D'autres pays andins comme l'Équateur, l'Argentine (notamment dans la province de Jujuy), et le Chili (surtout sur les hauts plateaux du nord) participent également à cette production. Au cours des dernières décennies, la culture du quinoa s'est largement mondialisée. On le retrouve désormais dans plus de 70 pays, grâce à sa forte adaptabilité.

En dehors de l'Amérique du Sud, le quinoa est cultivé aux États-Unis (notamment au Colorado et au Nevada), au Canada (dans les Prairies de l'Ontario), ainsi que dans plusieurs

pays européens, tels que la France, le Royaume-Uni, l'Italie, les Pays-Bas, la Suède et le Danemark.

Par ailleurs, des rendements élevés ont été observés dans certains pays d'Afrique, comme le Kenya, et en Asie, notamment dans les régions de l'Himalaya et du nord de l'Inde. Ce développement global témoigne du fort potentiel agronomique et nutritionnel du quinoa, qui s'impose progressivement comme une culture stratégique à l'échelle mondiale **FAO.ORG(2013)**.

2.3 Culture du quinoa en Algérie

L'introduction du quinoa en Algérie remonte à l'année 2014, dans le cadre d'essais expérimentaux menés par plusieurs institutions nationales sur huit sites présentant des conditions agro-écologiques variées. Les principales institutions impliquées sont : l'**ITDAS** (à Biskra et El Oued), l'**INRAA** (à Adrar et Relizane), l'**ITGC** (à Sétif, Tiaret et Guelma) ainsi que l'**INRF** (à Alger).

Ces travaux ont démontré une bonne adaptabilité de la plante aux climats arides et semi-arides, avec des rendements allant jusqu'à 26 qx/ha dans certains sites, notamment à Biskra. À Adrar, sous irrigation complémentaire, un rendement de 19,4 qx/ha a été atteint lors de la récolte de mars 2015.

Cette culture représente une opportunité prometteuse pour l'agriculture algérienne, en raison de la capacité du quinoa à résister à des conditions climatiques extrêmes, telles que la sécheresse, la salinité et la pauvreté des sols. Cela en fait une plante stratégique pour la lutte contre la désertification et la diversification des systèmes agricoles. Des experts réunis à Alger ont confirmé ce potentiel lors du lancement d'un projet régional de la **FAO**, regroupant des pays d'Afrique et du Moyen-Orient (**FAO, 2016**).

2.4 Conditions climatiques et variétés cultivées

La culture du quinoa est bien adaptée aux conditions climatiques froides et arides (**Rodriguez Calle, 2006**). Cette plante peut tolérer une large gamme de températures, allant de -4 °C à 38 °C (**Pedersen et Tingvoll, 2013 ; Lutz et Bascuñán-Godoy, 2017**), avec une

température optimale de croissance située entre 15 °C et 20 °C (**Pedersen et Tingvoll, 2013**). Cependant, le quinoa est particulièrement sensible aux températures élevées durant la phase de floraison : des températures supérieures à 35 °C peuvent entraîner une dormance florale et la stérilité du pollen.

Il est également vulnérable au gel léger, entre -1 °C et 0 °C (**Cercam, 2014**). Les besoins en précipitations varient considérablement selon la zone agro-écologique et le génotype de la plante, allant de 250 mm dans les zones salines de la Bolivie à environ 1 500 mm dans les vallées interandines. Malgré cela, le quinoa montre une remarquable tolérance aux périodes de sécheresse (**FAO, 1994**).

Plusieurs variétés de quinoa sont cultivées dans les exploitations enquêtées. La variété la plus couramment cultivée est Amarilla Sacaca, présente chez 54,55 % des agriculteurs. Environ 27,27 % des exploitants cultivent d'autres variétés telles que Q101, Q102, Q104, Q105, Giza01, Giza02 et Santa Maria. Par ailleurs, les variétés Q noir, Q105 et Q102 sont cultivées par 18,18 % des agriculteurs **Mena (2022)**.

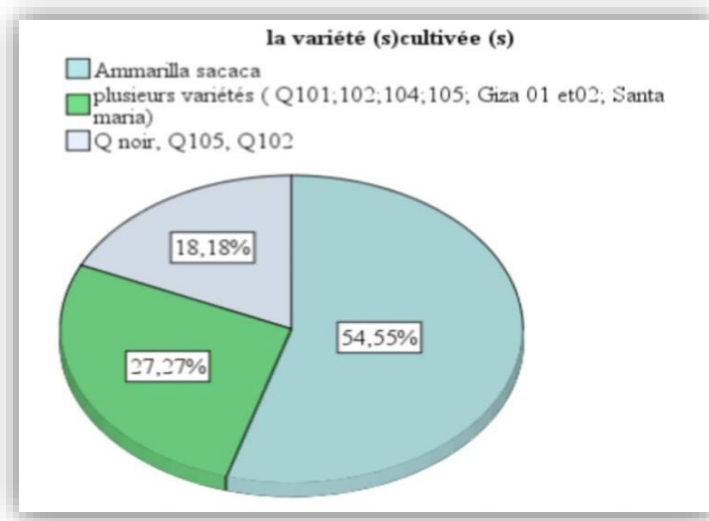


Figure 2.1 : variétés cultivées (**Mena., 2022**)

2.5 Composition nutritionnelle

Le quinoa, bien qu'il soit perçu dans certaines régions comme un aliment nouveau et nutritif récemment introduit dans les supermarchés et les restaurants, constitue en réalité une source alimentaire ancienne et essentielle pour les populations andines. Son intérêt nutritionnel

réside dans sa composition exceptionnelle : il s'agit d'une graine consommée comme une céréale, qui fournit une quantité d'énergie comparable à celle du riz, du blé, du maïs ou des haricots. Sur le plan nutritionnel, le quinoa se distingue par sa teneur élevée en protéines de haute qualité, contenant les huit acides aminés essentiels, ainsi que par sa richesse en fibres alimentaires, en acides gras polyinsaturés et en sels minéraux (FAO, 2011). Bien qu'il apporte une variété importante de nutriments, il est recommandé de l'intégrer dans une alimentation équilibrée associant d'autres groupes alimentaires pour répondre aux besoins nutritionnels globaux.

Tableau 2.1 : Teneurs en macronutriments du quinoa et d'autres aliments (pour 100 grammes de poids sec) **Koziol (1992)**.

	Quinoa	Haricots	Mais	Riz	Blé
Énergie (Kcal/100 g)	399	367	408	372	392
Protéines (g/100 g)	16,5	28,0	10,2	7,6	14,3
Lipides (g/100 g)	6,3	1,1	4,7	2,2	2,3
Glucides totaux (g/100 g)	69,0	61,2	81,1	80,4	78,4

2.5.1 Protéines et acides aminés essentiels

La teneur en protéines du quinoa varie entre 10,4 % et 17 % de la partie comestible, en fonction des variétés (FAO, 2011). Comparé à la majorité des céréales, le quinoa se distingue non seulement par une plus grande teneur en protéines, mais surtout par la qualité nutritionnelle de ces protéines.

Celles-ci contiennent les huit acides aminés essentiels nécessaires à l'organisme humain, aussi bien chez les enfants que chez les adultes. Selon les recommandations de la FAO, le quinoa dépasse les besoins en acides aminés essentiels pour les enfants âgés de 3 à 10 ans, ce qui renforce sa valeur en tant que source protéique complète.

Contrairement à la plupart des céréales, qui présentent une teneur limitée en lysine, et aux légumineuses, généralement pauvres en méthionine et cystéine (acides aminés soufrés), le quinoa offre un profil équilibré en acides aminés, ce qui en fait un aliment particulièrement adapté aux régimes végétariens et équilibrés (FAO, 2011).

Tableau 2.2 : Teneurs en acides aminés essentiels du quinoa et d'autres espèces cultivées au regard des valeurs recommandées par la FAO pour les enfants de 3 à 10 ans (en grammes pour 100 grammes de protéines).

	FAO(a)	Quinoa(b)	Mais (b)	Riz(b)	Blé(b)
Isoleucine	3,0	4,9	4,0	4,1	4,2
Leucine	6,1	6,6	12,5	8,2	6,8
Lysine	4,8	6,0	2,9	3,8	2,6
Méthionine(c)	2,3	5,3	4,0	3,6	3,7
Phénylalanine(d)	4,1	6,9	8,6	10,5	8,2
Thréonine	2,5	3,7	3,8	3,8	2,8
Tryptophane	0,66	0,9	0,7	1,1	1,2
Valine	4,0	4,5	5,0	6,1	4,4

(a)Valeurs recommandées pour les acides aminés chez les enfants de trois à 10 ans. Dietary protein quality evaluation in human nutrition, Report of an FAO Expert Consultation (2013), FAO, Rome, (b) Koziol (1992), (c)Méthionine + cysteine, (d)Phénylalanine + tyrosine

2.5.2 Fibres et impact sur la digestion

Des analyses réalisées sur quatre variétés de quinoa ont révélé une teneur en fibres alimentaires comprises entre 13,6 g et 16 g pour 100 g de matière sèche. La majorité de ces fibres sont insolubles (entre 12 et 14,4 g), tandis que la fraction soluble représente entre 1,4 et 1,6 g pour 100 g.

Comparé à d'autres céréales, le quinoa affiche généralement une teneur plus élevée en fibres, bien qu'elle reste inférieure à celle des légumineuses. Sur le plan physiologique, les fibres alimentaires constituent la fraction non digestible des aliments d'origine végétale. Elles jouent un rôle clé dans le bon fonctionnement du système digestif, en favorisant le transit intestinal et en prévenant la constipation, contribuant ainsi à une meilleure santé digestive **FAO(2011)**.

2.5.3 Minéraux et vitamines (fer, calcium, magnésium, vitamine B)

Les minéraux : Le quinoa se distingue par une teneur en sels minéraux supérieure à celle de la plupart des céréales conventionnelles, notamment en fer, magnésium et zinc, comme l'indique le tableau 2.3.

Ces minéraux jouent un rôle essentiel dans de nombreuses fonctions physiologiques, et leur présence en quantités significatives fait du quinoa un aliment d'intérêt nutritionnel, notamment pour prévenir les carences en fer, qui sont parmi les plus répandues à l'échelle mondiale.

Cependant, à l'instar de nombreux aliments d'origine végétale, le quinoa contient certains composés anti-nutritionnels, tels que les saponines, localisées dans l'enveloppe externe de la graine. Ces substances, généralement éliminées lors du processus de transformation en raison de leur goût amer, peuvent réduire la biodisponibilité des minéraux. De plus, le quinoa est riche en oxalates, des composés susceptibles de former des complexes insolubles avec des minéraux tels que le calcium et le magnésium, ce qui peut en limiter l'absorption par l'organisme **FAO (2011)**.

Tableau 2.3 : Teneurs en sels minéraux du quinoa et d'autres aliments (en milligrammes pour 100 grammes de poids sec) Koziol (1992).

	Quinoa	Mais	Riz	Blé
Calcium	148,7	17,1	6,9	50,3
Fer	13,2	2,1	0,7	3,8
Magnésium	249,6	137,1	73,5	169,4
Phosphore	383,7	292,6	137,8	467,7
Potassium	926,7	377,1	118,3	578,3
Zinc	4,4	2,9	0,6	4,7

Les vitamines : Le quinoa constitue une source intéressante de vitamines, en particulier les vitamines du groupe B. Il présente une teneur élevée en riboflavine (B2) et en acide folique (B9), tout en offrant une quantité comparable de thiamine (B1) à celle d'autres céréales, bien qu'il soit relativement moins riche en niacine (B3) (voir tableau 2.4). Par ailleurs, le quinoa est également une excellente source de vitamine E, reconnue pour ses propriétés antioxydantes. Toutefois, il est important de noter que la teneur en vitamine E diminue significativement après les étapes de transformation et de cuisson (**Koziol, 1992**).

Contrairement aux sels minéraux, l'élimination des saponines présentes dans l'enveloppe de la graine n'affecte pas la teneur en vitamines, puisque celles-ci ne se trouvent pas dans le péricarpe, mais plutôt dans d'autres tissus de la graine (**Koziol, 1992**).

Tableau 2.4 : Teneur en vitamines du quinoa et de certaines céréales (en mg/100 gr de poids sec) Koziol (1992)

	Quinoa	Mais	Riz	Blé
Thiamine	0,2-0,4	0,42	0,06	0,45-0,49
Riboflavine	0,2-0,3	0,1	0,06	0,17
Acide folique	0,0781	0,026	0,020	0,078
Niacine	0,5-0,7	1,8	1,9	5,5

2.6 Absence de gluten et digestibilité

Le quinoa est considéré comme une pseudocéréale naturellement exempte de gluten. Le gluten est un complexe protéique composé principalement de prolamines et de gluténines.

Certaines prolamines présentes dans des céréales comme le blé, l'orge ou le seigle sont toxiques pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque. Les protéines du quinoa ne contiennent pas, ou très peu, de prolamines, ce qui le rend théoriquement sans danger pour ces patients. Bien que certains experts recommandent la prudence en attendant des études complémentaires (**Alvarez-Jubete et al., 2010b**), le quinoa est actuellement reconnu comme un aliment sans gluten. Son incorporation dans le régime alimentaire des personnes intolérantes au gluten permettrait non seulement d'enrichir leur alimentation mais aussi d'en améliorer la qualité nutritionnelle (**Capriles et Areas, 2014 ; Elgeti et al., 2014**).

Le quinoa, riche en protéines de haute qualité représentant environ 17 % de sa composition, contient principalement des globulines 11S et des albumines 2S. Grâce à sa bonne digestibilité et à ses propriétés fonctionnelles, ses applications dans les produits végétaux peuvent être étendues par des procédés de modification technologique adaptés **Cui et al., (2023)**.

2.7 Études prouvant son innocuité pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque

Les études ont montré que la consommation de quinoa pourrait être une option sûre pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque (MC), bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Le quinoa, un grain andin résistant aux conditions environnementales extrêmes, est souvent qualifié de pseudocéréale, bien qu'il soit techniquement un membre des chenopodiacées.

Il présente un faible taux de prolamines ($\leq 7\%$) et un lien phylogénétique distant avec les céréales contenant du gluten telles que le blé, l'orge et le seigle, ce qui le rend potentiellement adapté à un régime sans gluten (GFD) pour les patients atteints de la MC, bien que la documentation scientifique reste limitée à cet égard. Plusieurs études ont examiné la réactivité immunologique du quinoa en tant qu'aliment pour les patients cœliaques. Par exemple, De Vincenzi et al. ont étudié l'activité d'agglutination des cellules myéloïdes indifférenciées, **Berti et al.**, ont mesuré la concentration de peptides toxiques pour la maladie cœliaque en utilisant des anticorps monoclonaux murins contre les ω -gliadines résistantes à la chaleur, tandis que Bergamo et al. ont testé la réactivité immunitaire des grains sans gluten, dont le quinoa, en effectuant des études de prolifération cellulaire et en mesurant l'expansion des lymphocytes intraépithéliaux intestinaux après culture d'organes. Ces études ont conclu que le quinoa pourrait être un ajout sûr à un GFD, bien que certaines études aient utilisé des cultivars de quinoa peu connus, et que seul l'étude de Bergamo ait donné des résultats partiels avec des patients atteints de la MC (**De Vincenzi et al.**, **Berti et al.**, **Bergamo et al.**).

Cependant, une caractérisation plus approfondie et complète de la réactivité des protéines de quinoa est nécessaire avant de recommander sa consommation généralisée pour les patients atteints de la MC. De plus, une étude a été menée pour déterminer la concentration des épitopes toxiques pour la maladie cœliaque dans différents cultivars de quinoa provenant des Andes, et pour évaluer la capacité des prolamines de quinoa à stimuler les réponses immunitaires adaptatives et innées chez les patients atteints de la MC.

Les résultats ont montré que le quinoa ne semblait pas présenter de réactions immunitaires significatives contre les peptides cœliaques toxiques, renforçant ainsi son potentiel comme alternative sûre pour les patients souffrant de la MC (**Berti et al.**). Ces recherches suggèrent que le quinoa pourrait être un aliment sûr dans le cadre d'un régime sans gluten pour les personnes atteintes de la MC, mais qu'une validation supplémentaire est requise pour confirmer ces résultats.

2.8 Comparaison avec d'autres céréales sans gluten (riz, maïs, sarrasin)

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) est souvent comparé à d'autres céréales sans gluten telles que le riz, le maïs et le sarrasin, en raison de son profil nutritionnel exceptionnel. Contrairement au riz et au maïs, qui sont relativement pauvres en protéines (7–9 %), le quinoa

en contient environ 14 %, avec un profil en acides aminés complet, incluant la lysine, rare dans les céréales conventionnelles (**Vega-Gálvez et al., 2010**).

En termes de fibres, le quinoa et le sarrasin en offrent davantage que le riz blanc, ce qui favorise la satiété et le contrôle glycémique (Alvarez-Jubete et al., 2010). Le quinoa est également une bonne source de minéraux tels que le magnésium, le fer et le zinc, souvent plus abondants que dans le riz ou le maïs (**Repo-Carrasco-Valencia & Serna, 2011**). Sur le plan de l'indice glycémique, le quinoa présente un IG faible à modéré (53–57), inférieur à celui du riz blanc ou du maïs, ce qui le rend adapté aux personnes diabétiques ou souhaitant réguler leur glycémie (**Bhargava et al., 2006**).

D'un point de vue culinaire, le quinoa est polyvalent, utilisé en salade, en accompagnement, en farine ou dans des produits de boulangerie, tout comme le sarrasin. Le goût du quinoa est légèrement noisette, plus apprécié que le goût parfois amer du sarrasin. Ainsi, le quinoa se distingue comme une pseudo-céréale particulièrement intéressante pour les régimes sans gluten, à la fois pour ses qualités nutritionnelles et sa diversité d'usage.

2.9 Avantages et limites

Le quinoa classé parmi les pseudo-céréales, connaît un essor croissant dans les régimes alimentaires modernes en raison de ses nombreux avantages nutritionnels et fonctionnels. Toutefois, comme tout aliment, il présente également certaines limites.

Avantages Profil nutritionnel complet

Le quinoa se distingue par une teneur élevée en protéines (12–14 %), contenant tous les acides aminés essentiels, ce qui en fait une source complète de protéines végétales (**Vega-Gálvez et al., 2010**).

Cela est particulièrement intéressant pour les personnes suivant un régime végétarien ou végétalien.

Sans gluten : Le quinoa est naturellement sans gluten, ce qui en fait une excellente alternative pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque ou sensibles au gluten (**Alvarez-Jubete et al., 2010**).

Riche en fibres, vitamines et minéraux : Il contient des quantités significatives de fibres alimentaires, de fer, de magnésium, de zinc et de vitamines B et E. Ces éléments contribuent à la prévention de l'anémie, à la santé osseuse et à la régulation du métabolisme (**Repo-Carrasco-Valencia & Serna, 2011**).

Indice glycémique bas à modéré : Avec un IG estimé entre 53 et 57, le quinoa permet un meilleur contrôle glycémique comparé à d'autres céréales raffinées, ce qui est bénéfique pour les personnes diabétiques (**Bhargava et al., 2006**).

Polyvalence culinaire : Il peut être utilisé dans divers plats : salades, soupes, plats chauds, desserts ou même sous forme de farine dans les produits de boulangerie sans gluten.

Impact écologique lié à la demande : L'essor mondial du quinoa a conduit à une pression accrue sur les zones de production traditionnelles, notamment en Bolivie et au Pérou, provoquant parfois des déséquilibres socio-économiques et environnementaux (**Jacobsen, 2011**).

2.10. Facteurs pouvant limiter son adoption (coût, accessibilité, goût)

Bien que le quinoa soit reconnu pour ses qualités nutritionnelles exceptionnelles, plusieurs facteurs peuvent freiner son adoption à grande échelle, en particulier dans les pays non producteurs.

Le coût élevé : Le prix du quinoa reste supérieur à celui des céréales traditionnelles telles que le riz ou le blé. Cette cherté est en partie due à l'augmentation de la demande mondiale, à la faible mécanisation dans les zones de culture andines, et aux coûts liés à l'importation. Ce facteur constitue un obstacle majeur à son intégration dans les régimes alimentaires des ménages à faibles revenus (**Bazile et al., 2016 ; Del Castillo et al., 2021**).

L'accessibilité géographique et logistique : La culture du quinoa reste concentrée en Amérique du Sud (Pérou, Bolivie, Équateur), bien que sa production se soit étendue à d'autres régions comme l'Europe et l'Amérique du Nord. Toutefois, sa disponibilité dans les marchés ruraux et dans certains pays en voie de développement demeure limitée, ce qui réduit les possibilités d'accès à cette pseudo-céréale pour une partie de la population (**FAO, 2013 ; Jacobsen, 2017**).

Le goût et les saponines : Le goût amer du quinoa, lié à la présence naturelle de saponines sur la surface des graines, peut être mal perçu par certains consommateurs. Bien que les procédés de lavage permettent d'éliminer une grande partie de ces composés, une préparation inadéquate peut altérer l'acceptabilité sensorielle du produit (**Mastebroek et al., 2000 ; Miranda et al., 2020**). Par ailleurs, certaines personnes non familières avec ce produit peuvent éprouver une réticence culturelle ou gustative à intégrer le quinoa dans leur alimentation quotidienne.

CHAPITRE III : PRODUCTION ET TRANSFORMATION DU QUINOA EN COMPLEMENT ALIMENTAIRE

3.1. Étapes de la production

La culture du quinoa suit un itinéraire technique bien structuré, adapté aux conditions climatiques de l'Altiplano bolivien. La préparation commence par un travail du sol approprié, suivi d'un semis optimal qui a lieu généralement en automne, entre octobre et novembre, coïncidant avec les premières pluies de la saison humide.

Une fertilisation modérée, notamment en azote, est recommandée afin d'éviter tout excès pouvant nuire à la croissance de la plante. Les besoins en eau pour cette culture varient entre 250 et 400 mm par cycle, en fonction des précipitations naturelles et des pratiques culturelles locales. Durant les premières semaines, un désherbage manuel ou mécanique s'avère essentiel pour limiter la concurrence avec les adventices. Par ailleurs, une attention particulière doit être accordée à la lutte contre les ravageurs, notamment les pucerons, les altises et les oiseaux, ces derniers représentant un danger significatif pour le rendement final (**Lebonvallet, 2008 ; Valencia-Chamorro et al., 2017**).

3.2 Récolte et nettoyage

La récolte du quinoa s'effectue lorsque les grains mûrs se détachent facilement à la pression entre les doigts. Après cette étape, les panicules sont laissées à sécher naturellement au soleil, une méthode traditionnelle bien adaptée aux conditions climatiques locales. Vient ensuite le battage, qui peut être manuel ou mécanisé selon les moyens disponibles, puis un tri gravitationnel permet d'éliminer les impuretés et les débris végétaux. Enfin, les graines subissent un lavage afin d'éliminer les résidus restants avant leur mise en marché ou leur transformation (**Lebonvallet, 2008 ; Benrekia-Yagoub, 2023**).

3.4 Élimination des saponines (composés amers)

Les graines de quinoa contiennent des saponines, des composés amers naturellement présents à la surface des grains. Leur élimination est indispensable pour rendre le produit

comestible. Deux principales méthodes sont utilisées à cet effet. La première est artisanale et repose sur une abrasion manuelle des graines, suivie d'un rinçage abondant à l'eau claire. La seconde, plus industrielle, consiste en un décorticage mécanique suivi d'un polissage, permettant d'obtenir un produit conforme aux exigences du marché international, notamment en matière de goût et de qualité sanitaire (**Lebonvallet, 2008 ; Benrekia-Yagoub, 2023**).

3.5 Techniques de transformation

La transformation du quinoa s'organise en trois niveaux complémentaires. Le premier niveau comprend le nettoyage, le décorticage et le polissage des graines. Le deuxième niveau est axé sur la transformation de la graine brute en produits semi-finis tels que la farine et le couscous. Le troisième niveau concerne l'élaboration de produits finis à plus forte valeur ajoutée, tels que les barres énergétiques, les snacks soufflés ou encore les céréales de petit-déjeuner. Cette valorisation permet de diversifier les usages du quinoa tout en favorisant le développement local des filières de transformation (**Lebonvallet, 2008 ; Alvarez-Jubete et al., 2010**).

3.5.1 Farine de quinoa

La farine de quinoa est obtenue par broyage des graines qui ont été préalablement lavées et polies. Elle est principalement utilisée dans les préparations de boulangerie et de pâtisserie, notamment pour les personnes intolérantes au gluten. Le couscous de quinoa, un produit plus populaire localement, est élaboré par un procédé d'hydratation suivi d'une cuisson à la vapeur, ce qui en fait un substitut nutritif aux céréales traditionnelles (**Lebonvallet, 2008 ; Benrekia-Yagoub, 2023**).

3.5.2 Flocons et extrusions

Les flocons de quinoa sont obtenus par une cuisson à la vapeur, suivie d'un aplatissage mécanique des graines. Cette méthode permet de conserver les propriétés nutritionnelles du quinoa, tout en rendant sa consommation plus pratique, en particulier au petit déjeuner.

Les produits extrudés, quant à eux, résultent d'un procédé technologique combinant des températures élevées et une pression importante, donnant naissance à des formes variées (bâtonnets, boules, etc.) à texture croustillante (**Valencia-Chamorro et al., 2017**). Ce procédé

d'extrusion permet ainsi de diversifier l'offre alimentaire à base de quinoa, en s'adressant particulièrement au segment en croissance des snacks sains.

3.5 3 Boissons et barres énergétiques à base de quinoa

Le quinoa est également utilisé dans l'élaboration de produits alimentaires innovants à haute valeur ajoutée, tels que les boissons nutritives, les barres énergétiques, les chips, les snacks et les céréales destinées au petit-déjeuner. Toutefois, la disponibilité de ces produits sur le marché demeure limitée, en raison du manque d'industrialisation et de transformation à grande échelle dans plusieurs régions (**Benrekia-Yagoub, 2023**).

3.6 Enrichissement et amélioration du produit

Grâce à sa richesse en protéines de haute qualité, en fibres alimentaires et en micronutriments (fer, zinc, magnésium), le quinoa est de plus en plus valorisé comme aliment fonctionnel. Il est particulièrement recommandé pour les personnes souffrant d'intolérance au gluten, comme les patients atteints de la maladie cœliaque (**Alvarez-Jubete et al., 2010**). Les produits transformés à base de quinoa permettent ainsi d'élargir l'offre alimentaire sans gluten, tout en maintenant une haute valeur nutritionnelle (**Alvarez-Jubete et al., 2010 ; Benrekia-Yagoub, 2023**).

3.6.1 Ajout de vitamines et minéraux

Le quinoa, naturellement riche en micronutriments tels que le fer, le magnésium, le potassium et le zinc, constitue une base idéale pour l'enrichissement nutritionnel des produits alimentaires. Certaines études ont exploré la possibilité de compléter les produits dérivés du quinoa par l'ajout de vitamines (notamment les vitamines du groupe B) et de minéraux afin d'améliorer leur valeur nutritionnelle globale, notamment pour répondre aux besoins des populations souffrant de carences (**FAO, 2013 ; Alvarez-Jubete et al., 2010**). Ces enrichissements permettent également de renforcer l'attrait du quinoa comme aliment fonctionnel, en particulier dans les régimes spécifiques comme celui des personnes atteintes de la maladie cœliaque.

3.6.2 Associations avec d'autres aliments (graines, légumineuses)

Le quinoa peut être associé à d'autres graines (comme le lin, le chia) ou à des légumineuses (lentilles, pois chiches, haricots) afin de créer des mélanges nutritionnels complémentaires. Ces associations permettent d'améliorer le profil en acides aminés essentiels, de renforcer la teneur en fibres et de diversifier les textures et goûts des produits (**Bazile et al., 2016 ; Benrekia-Yagoub, 2023**). De telles combinaisons sont particulièrement adaptées à l'élaboration de barres énergétiques, de snacks protéinés ou de plats végétariens équilibrés, contribuant ainsi à une alimentation saine et durable.

3.7 Études existantes sur les produits dérivés du quinoa

De nombreuses études scientifiques existantes ont porté sur les produits dérivés du quinoa, tant au niveau académique qu'expérimental. Ces recherches, menées par des universités et des organismes internationaux, ont mis en évidence les potentialités de cette culture en termes de sécurité alimentaire, de nutrition et de durabilité (**FAO, 2013 ; Bazile et al., 2016**). Des travaux ont également porté sur l'optimisation des procédés de transformation, la formulation de nouveaux produits, ainsi que sur les préférences des consommateurs (**Benrekia-Yagoub, 2023**). Ces efforts scientifiques ouvrent la voie à une meilleure intégration du quinoa dans les régimes alimentaires modernes.

3.8 Produits disponibles sur le marché

Sur le marché local bolivien, les produits à base de quinoa sont principalement vendus sous forme de graines en vrac, de farine ou de couscous, disponibles dans les épiceries fines et sur les marchés traditionnels. Cependant, l'offre demeure modeste face à la concurrence des produits transformés importés, notamment ceux distribués dans les grandes surfaces. Cette situation souligne la nécessité de renforcer les capacités locales de transformation et de commercialisation (**Lebonvallet, 2008**).

3.9 Retours des consommateurs et acceptabilité

L'acceptabilité du quinoa par les consommateurs reste limitée par plusieurs facteurs : l'amertume résiduelle due à une désaponification incomplète, le coût relativement élevé, et un

manque d'information sur ses bienfaits et ses modes de consommation (**Benrekia-Yagoub, 2023**). Néanmoins, une demande croissante est observée chez les consommateurs soucieux de leur santé, notamment ceux adoptant une alimentation fonctionnelle ou souffrant d'intolérance au gluten.

CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES

4.1. Objectif

Notre travail vise à étudier la possibilité de produire du quinoa dans les conditions locales de la wilaya de M'Sila, et à évaluer son aptitude à être utilisé comme complément alimentaire pour les personnes souffrant de la maladie cœliaque, en raison de son absence de gluten et de sa richesse en éléments nutritifs essentiels.

4.2. Lieu de l'expérimentation

Le processus de plantation s'est déroulé dans la serre du Département des Sciences Agronomiques de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila.

4.3. Caractéristiques physico-chimiques du sol et données climatiques

Le sol était de texture moyenne, bien aéré, et nous l'avons enrichi au départ avec du compost organique pour améliorer sa fertilité. La région présente un climat semi-aride, caractérisé par des températures modérées à élevées pendant la journée et une certaine fraîcheur la nuit, notamment en automne et en hiver. Nous avons contrôlé la température et l'humidité à l'intérieur de la serre pour offrir des conditions optimales à la croissance du quinoa.

4.4. Méthode d'étude

Nous avons adopté une approche expérimentale appliquée dans notre étude. Nous avons cultivé une variété de quinoa Giza 01 dans des conditions contrôlées sous serre plastique et nous avons suivi les différentes étapes de sa croissance et de son développement jusqu'à la maturité (Figure 4.1). L'irrigation a été effectuée manuellement tous les deux jours. Les graines mures ont été récoltées au stade de maturation afin de réaliser des analyses biochimiques (Figure 4.2).



Figure 4.1 : Stade de semis



Figure 4.2. Stade de maturation et de récolte des graines

4.5. Échantillonnage

Au stade de maturation, nous avons soigneusement sélectionné les meilleures panicules (mures et saines) afin de récolter les graines mures destinées aux analyses biochimiques (Figure 4.3).



Figure 4.3. Échantillonnage des graines

4.6. Les paramètres étudiés

4.6.1. Taux de gluten

Principe : La quantité de gluten est appréciée par extraction de gluten.

– malaxage mécanique ou manuel, puis lavage d'un mélange de mouture (farine) avec une solution d'eau salée à 2,5 %.

Préparation de la pâte :

Peser 33,33 g de la farine ; puis la verser dans un mortier. Ajouter environ 16 ml d'eau salée, puis former la pâte (figure 4.4).

Lixiviation : laisser l'eau couler goutte à goutte sur le pâton.

L'amidon est éliminé et le gluten se soude à lui-même, le malaxage est effectué en comprimant légèrement le pâton et en remoulant la surface avec l'extrémité des doigts.

Récupération des particules de gluten recueillies sur le tamis.

Après lixiviation et essorage, on obtient une boule de gluten humide.

Placer la plaque chauffante pour faire sécher le gluten, puis le peser pour obtenir le poids du gluten sec.



Figure 4.4 : préparation de la pâte



Figures 4.5 : Élimination de l'amidon

Expression des résultats

Pour obtenir le pourcentage de gluten humide et de gluten sec dans la farine, multipliez les résultats par trois.

Pour calculer la capacité d'hydratation du gluten, utilisez la formule suivante :

$$100 \times [(GH-GS)\GS] =CH$$

Soit :

- CH : capacité d'hydratation,
- GH : gluten humide,
- GS : gluten sec.

3.6.2. Dosage des éléments nutritif

Douze éléments nutritif : Sodium (Na %), Magnésium (Mg %), Silicium (Si %), Phosphore (P %), Soufre (S %), Potassium (K %), Calcium (Ca %), Manganèse (Mn%), Fer (Fe%), Cuivre (Cu %), zinc (Zn %) et Strontium (Sr %) sont mesurée à l'aide d'un appareil XFR. Les résultats sont exprimés en (%).

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Analyses physico-chimiques et technologiques

L'ensemble de nos résultats sont présentés dans le tableau suivant (tableau 5.1).

Tableau 5.1 : Composition physico-chimiques et technologiques

Eléments	Composition en %
Gluten	0
Sodium (Na %)	0,0829
Magnésium (Mg %)	0,1
Aluminium (Al %)	0,0342
Silicium (Si %)	0,18
Phosphore (P %)	0,2
Soufre (S %)	0,12
Potassium (K %)	0,32
Calcium (Ca %)	0,16
Manganèse (Mn%)	0,00775
Fer (Fe%)	0,29
Cuivre (Cu %)	0,000842
zinc (Zn %)	0,00296
Strontium (Sr %)	0,00205

5.1.1. Test du gluten humide et sec de la farine du quinoa

Il est important de noter que la grande partie des propriétés technologiques de la pâte peut être associée au gluten, qui se compose principalement de gluténines et de gliadines. Comme l'ont souligné plusieurs auteurs, la composition du gluten est un facteur déterminant de la force d'une farine.

La quantité et la qualité de ce dernier sont des facteurs déterminants dans l'expression des propriétés viscoélastiques de la pâte (extensibilité et élasticité).

Nos résultats montrent que la teneur en gluten humide est de 0 % (**Tableau 5.1**). Cette observation permet de conclure que la farine à base de quinoa est dépourvue de gluten.

Comme l'ont démontré **Ugrinovits et al. (2004)**, la force des farines est étroitement liée à leur teneur en gluten humide. Les résultats de cette étude révèlent que les valeurs obtenues sont extrêmement inférieures à l'intervalle de 33-34 % mentionné par **Godon (1991)**, et les valeurs du gluten sec sont également inférieures à 12,5 % trouvées par **Ounane et al. (2006)**. Donc nos résultats se trouvent en dessous de la limite minimale.

Par conséquent, cette étude met en évidence que la farine de quinoa, en raison de sa nature sans gluten, est considérée comme un aliment de base et de premier ordre pour les personnes souffrant de la maladie cœliaque. Il est particulièrement recommandé pour les personnes souffrant d'intolérance au gluten, comme les patients atteints de la maladie cœliaque (**Alvarez-Jubete et al., 2010**). Les produits transformés à base de quinoa permettent ainsi d'élargir l'offre alimentaire sans gluten, tout en maintenant une haute valeur nutritionnelle (**Benrekia-Yagoub, 2023**).

5.1.2. Composition en éléments minéraux de la farine de quinoa

Douze éléments minéraux sont détectés dans graines analysés par la méthode TXRF, Ces éléments sont présents dans le tableau suivant (tableau 1). La teneur s'exprime en pourcentage (%),

Deux catégories d'oligoéléments se distinguent : les oligoéléments essentiels et les oligoéléments non essentiels, Parmi eux, 12 oligoéléments sont considérés « essentiels » : le fer (Fe), le chrome (Cr), le silicium (Si), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), l'iode (I), le sélénium (Se), le manganèse (Mn), le cobalt (Co), le fluor (F), le lithium (Li), le molybdène (Mo) (Elie, 2022),

Les minéraux utilisés dans la fabrication des compléments alimentaires sont le Phosphore, le Sodium, le Magnésium, le Calcium, l'Iode, le Fer, le Manganèse, le Potassium, le Calcium, le Chrome, le Cuivre, le Molybdène, le Zinc, le Fluore, le Chlore, le Calcium (**Caro et al., 2010**).

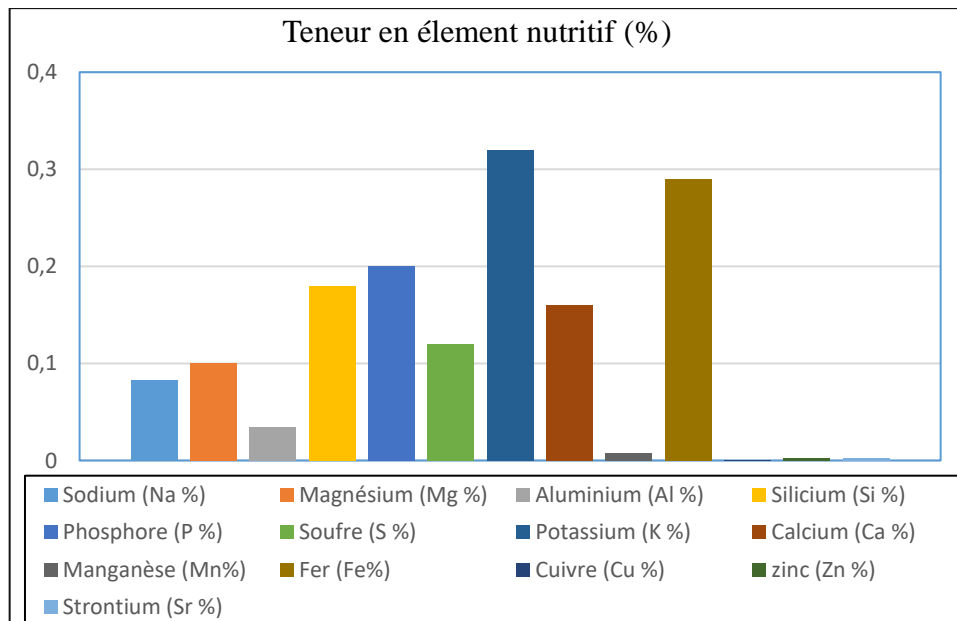


Figure 5.1 : Teneur en éléments nutritifs au niveau des graines de quinoa

5.1.3.1. La teneur en sodium (Na)

Les analyses réalisées en laboratoire ont révélé la présence de sodium (Na %) dans la farine des graines de quinoa.

La farine des graines du quinoa contiennent du sodium, avec une valeur de 0,0829 % de sodium, comme l'indique la figure 5.1. D'après ces résultats, on note que les graines du quinoa sont une bonne source de sodium. En conséquence, les graines de quinoa pourraient être considérées comme un indicateur nutritionnel potentiel pour la santé humaine.

5.1.3.2. Teneur en magnésium (Mg)

La figure 4.2 montre les taux de magnésium enregistrés dans la farine des graines du quinoa. Les graines du quinoa, contiennent un taux de magnésium très élevé (0,23%), comme l'indique la figure 5.1.

D'après les résultats obtenus, on note que les graines du quinoa présentent une matière fraîche riche en magnésium, En conséquence, ces graines pourraient être considérées comme un indicateur nutritionnel potentiel pour la santé humaine,

Le magnésium favorise la santé musculaire en participant à la régulation des contractions musculaires, Il joue également un rôle crucial dans la fonction nerveuse, permettant ainsi une transmission efficace des signaux à travers le système nerveux, et aide également à maintenir une pression artérielle normale (**Gröber & Kisters, 2015**),

5.1.3.3. Teneur en silicium (Si)

Les analyses réalisées en laboratoire ont révélé la présence de silicium (Si %) dans la farine des graines de quinoa. Le taux de ce dernier est de 0,18 % (figure 5.1).

D'après ces résultats, on peut donc conclure que les graines du quinoa sont riches en silicium et pourraient être considérées comme un indicateur nutritionnel potentiel pour la santé humaine.

Le silicium joue un rôle protecteur dans les maladies cardiovasculaires comme l'athérosclérose, maladie touchant les artères de gros et moyen calibres et caractérisée par la formation de plaques d'athéromes qui obstruent les vaisseaux,

Le Si joue également un rôle bénéfique pour la structure et le fonctionnement des os et favorise la santé osseuse en étant un des composants de la prolyl hydroxylase (enzyme de synthèse du collagène de type I et des GAG) et en stimulant la prolifération des ostéoblastes, Il favorise la fixation de calcium, lui conférant un rôle dans la croissance et le renouvellement osseux, la minéralisation et la densité minérale osseuse, ainsi que dans l'intégrité structurelle des os (**Richard, 2022**),

5.1.3.4. Teneur en phosphore (P)

La figure 5.1 montre le taux de phosphore enregistrés dans la farine des graines de quinoa,

Les graines de quinoa ont enregistré une meilleure teneur en phosphore avec une moyenne de 0,2 % (voir la figure 5.1).

Les résultats obtenus montrent que les graines du quinoa sont très riches en phosphore, ce qui peut être un indicateur important pour la nutrition.

Le phosphore est le deuxième sel minéral le plus abondant dans l'organisme, Il est indispensable à la minéralisation des os et des dents, ainsi qu'à la production d'énergie dans les cellules et au maintien de leurs membranes, La carence en phosphore se traduit, par une perte d'appétit, une fragilité osseuse, une atrophie des muscles et des troubles cardiaques (**Vidal, 2023**)

5.1.3.5. Teneur en soufre (S)

La figure 5.1 montre le taux de soufre enregistré dans la farine des graines de quinoa. Comme l'illustre la figure 5.1, le taux de soufre des graines de quinoa est de l'ordre de 0.12%.

D'après ces résultats, on note que les graines de quinoa sont riches en soufre, ce qui pourrait être considéré comme un bon indicateur nutritionnel.

Le soufre (S), élément biochimique important, joue un rôle primordial dans le vivant : non seulement il est constituant des acides aminés soufrés essentiels que sont la cystéine et la méthionine, il participe à la structure des protéines, mais c'est également un élément très réactif qui permet de nombreuses et diverses fonctions enzymatiques (**Bessonnet, 2018**),

5.1.3.6. Teneur en potassium (K)

La figure 5.1 montre le taux de potassium enregistré dans la farine des graines de quinoa. Les graines de quinoa contiennent un taux de potassium plus élevé, Ce taux est de 0,32 % (figure 5.1).

Les résultats obtenus montrent que les graines sont très riches en potassium, En conséquence, ces graines pourraient être considérées comme un bon indicateur nutritionnel.

Le potassium joue un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre acido-basique ainsi que de la pression osmotique, Il contribue ainsi au maintien de la pression artérielle, à la transmission de l'influx nerveux et à la contraction musculaire, (**Vidal, 2023**),

5.1.3.7. Teneur en calcium (Ca)

La figure 5.1 montre les taux de calcium enregistrés dans la farine des graines de quinoa. Les analyses menées sur les graines ont révélé la présence de cet élément nutritif au niveau des graines de quinoa qui affichent un taux de 0,16 % (figure 5.1).

À la lumière des résultats obtenus, on peut conclure que les graines de quinoa sont riches en calcium. En conséquence, il pourrait être pertinent de considérer ces graines comme un indicateur nutritionnel potentiel.

Le calcium est un nutriment essentiel à la santé humaine, car il contribue à la solidité des os et des dents, tout en étant indispensables au bon fonctionnement des muscles et des nerfs. Cela permet de maintenir une mobilité et une coordination adéquates (**Weaver & Heaney, 2006**).

Une consommation adéquate de calcium est particulièrement importante pour les femmes enceintes et les enfants à naître. En effet, une carence pendant les neuf mois de la grossesse peut avoir des conséquences néfastes sur la santé de la mère et du fœtus (**OMS, 2019**). De plus, des études ont montré que le calcium peut jouer un rôle dans la prévention de l'hypertension artérielle et dans la régulation du niveau de calcium dans le lait maternel (**Green et al., 2002**).

5.1.3.8. Teneur en manganèse (Mn)

Comme l'indique la figure 5.1, la farine des graines de quinoa présente un taux de manganèse plus élevé avec une valeur de 0,00775%.

Le manganèse est un oligo-élément crucial qui joue un rôle essentiel dans le maintien de diverses fonctions biologiques. Il est nécessaire au métabolisme des acides aminés, des glucides et des lipides (EFSA, 2013), En outre, il contribue à la synthèse des cartilages, de la myéline et à la coagulation sanguine (**Vidal, 2023**).

5.1.3.9. Teneur en fer (Fe)

Les analyses réalisées en laboratoire ont révélé la présence de fer dans la farine des graines de quinoa.

Comme l'illustre la figure 5.1, les graines de quinoa présentent un taux de fer plus élevé , avec une teneur de 0,29 %.

Les résultats de cette étude montrent que les graines de quinoa constituent une source importante de fer.

Le fer est un élément nutritif essentiel à la formation des globules rouges (hématies), qui assurent le transport de l'oxygène dans l'organisme. Ainsi, comme l'ont démontré plusieurs études, un apport adéquat en fer est donc nécessaire pour prévenir l'anémie et maintenir des niveaux d'énergie optimaux (**Camaschella, 2015**).

5.1.3.10. Teneur en Strontium (Sr)

Les analyses réalisées en laboratoire ont révélé la présence de strontium (Sr %) dans la farine des graines de quinoa. En effet, les graines de quinoa contiennent en moyenne 0,00205 % de strontium (figure 5.1).

D'après les résultats obtenus, les graines de quinoa constituent une bonne source de strontium.

Le strontium (Sr) est un élément chimique qui trouve son utilité dans le domaine médical. En effet, le Sr a longtemps été utilisé comme traitement des cas d'ostéoporose car il favorise l'ostéogénèse. Cependant, il ressort de récentes études que le médicament en question provoque une augmentation du risque de thrombose veineuse ainsi que de survenue d'infarctus du myocarde (**Reginster, 2014, Cooper et al., 2014**). L'agence européenne du médicament (EMA) recommande désormais la suspension du traitement chez les patients ayant des antécédents de maladies cardiovasculaires (**Reginster et al., 2015**).

5.1.3.11. Teneur en cuivre (Cu)

Les analyses réalisées en laboratoire ont révélé la présence de cuivre (Cu %) dans la farine des graines de quinoa. En effet, les graines de quinoa contiennent en moyenne 0,000842% de cuivre (figure 5.1).

Les résultats de cette étude révèlent que les graines de quinoa constituent une bonne source de cuivre.

Le cuivre est un élément chimique essentiel à la santé humaine. Il joue un rôle crucial dans la formation des globules rouges et le maintien d'un système immunitaire sain, En effet, il contribue à la protection du corps contre les infections et les maladies. Les gummies enrichis en ces minéraux offrent une option pratique pour compléter l'alimentation quotidienne et contribuer à combler d'éventuelles lacunes nutritionnelles. Il soutient par conséquent la santé globale et le bien-être (**Hood, 2019**).

5.1.3.12. Teneur en Zinc (Zn)

Les analyses effectuées en laboratoire ont permis de mettre en évidence la présence de zinc (Zn) dans la farine des graines de quinoa. Comme l'illustre la figure 5.1, les graines de quinoa présentent un taux de zinc de 0,00296 %.

Le zinc est un micronutriment qui joue un rôle crucial dans le maintien d'une bonne santé humaine. Il est largement reconnu pour son implication dans le renforcement du système immunitaire. Néanmoins, il joue un rôle dans des processus de guérison tels que la cicatrisation des plaies et contribue à la santé de la peau, favorisant ainsi son élasticité et sa régénération (**Wessels et al., 2017**).

Le quinoa est naturellement riche en éléments nutritifs tels que le calcium, le fer, le magnésium, le potassium et le zinc, et peut donc servir à nutritionnellement enrichir les produits alimentaires. Certaines études ont exploré la possibilité de compléter les produits dérivés du quinoa par l'ajout de vitamines (notamment les vitamines du groupe B) et de minéraux afin d'améliorer leur valeur nutritionnelle globale, notamment pour répondre aux besoins des populations souffrant de carences (**Alvarez-Jubete et al., 2010 ; FAO, 2013**). Ces enrichissements permettent également de renforcer l'attrait du quinoa en tant qu'aliment fonctionnel, en particulier dans le cadre de régimes spécifiques comme celui des personnes atteintes de la maladie cœliaque.

CONCLUSION

Au terme de ce travail, et à l'issue d'une étude approfondie alliant une analyse théorique rigoureuse à une expérimentation pratique, il ressort que le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) constitue une alternative nutritionnelle prometteuse et efficace pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque, grâce à son absence naturelle de gluten et à sa richesse en nutriments essentiels. Cette plante se distingue par sa teneur élevée en protéines complètes incluant tous les acides aminés indispensables, ainsi qu'en fibres alimentaires, en vitamines du groupe B et E, et en minéraux tels que le fer, le calcium et le magnésium, dont les déficits sont fréquents chez les patients cœliaques. Les résultats obtenus dans des conditions locales sous serre ont démontré une bonne capacité d'adaptation de la plante, et les analyses physico-chimiques ont confirmé sa haute valeur nutritionnelle. L'intégration du quinoa dans l'alimentation sans gluten apparaît ainsi comme une solution réaliste et bénéfique pour améliorer l'état nutritionnel des malades, mais nécessite toutefois une stratégie globale incluant le soutien à la culture locale, le développement de filières de transformation, et la sensibilisation du public à ses avantages. En conclusion, le quinoa ne se limite pas à une réponse diététique à une pathologie spécifique, mais représente également une opportunité pour promouvoir la sécurité alimentaire, la diversification agricole et une nutrition durable à l'échelle nationale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). The nutritional composition of pseudocereals. *Trends in Food Science & Technology*.
- Baillargeon, J. (2006). *Nutrition clinique: Guide pratique*. Maloine.
- Bazile, D., Jacobsen, S. E., & Verniau, A. (2015). State of the Art Report on Quinoa around the World. *FAO & CIRAD*.
- Bazile, D., Jacobsen, S. E., & Verniau, A. (2016). The global expansion of quinoa: Trends and limits. *Frontiers in Plant Science*.
- Benrekia-Yagoub, S. (2023). Valorisation du quinoa dans l'alimentation fonctionnelle en Algérie.
- Bergamo, P., Fedele, E., Tedesco, I., & Russo, G. L. (s.d.). Études sur la réactivité immunitaire du quinoa chez les cœliaques.
- Berti, C., Riso, P., Monti, L. D., & Porrini, M. (s.d.). Évaluation des peptides toxiques du quinoa.
- Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2006). *Chenopodium quinoa—An Indian perspective*. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 73–87.
- Boulaud, V., Moreau, F., & Garnaud, A.-T. (2015). *Nutrition et maladies chroniques*. Maloine.
- Bousquet, C. (2015). *La maladie cœliaque de l'enfant et de l'adulte*. Presses Universitaires.
- Bower, J. A., Whitten, R., & Wood, S. (2007). *Nutrition and health of coeliac patients*. British Nutrition Foundation.
- Capriles, V. D., & Areas, J. A. G. (2014). Development of gluten-free bread using quinoa. *Food Chemistry*.
- Carillo, M. (2018). Effets des régimes alimentaires sur le microbiote intestinal.
- Cercam. (2014). Fiche technique: Culture du quinoa.
- Chenine, H., & Sahli, A. (2020). Valeur nutritionnelle du quinoa cultivé en Algérie. *Revue Algérienne de Nutrition et Santé*.
- Clot, J., Flourie, B., & Albuissou, E. (2001). *Gastro-entérologie: Maladie cœliaque*. Masson.
- Conseil National de la Recherche. (1989). *Origine et diversité génétique du quinoa*.
- Cui, H., Li, S., Roy, D., Guo, Q., & Ye, A. (2023). Digestibilité et applications du quinoa. *Food Reviews International*.

- Del Castillo, D., Araya, H., & Ramírez, L. (2021). Consommation du quinoa: contraintes économiques. Université du Chili.
- De Vincenzi, M., Stammati, A., & Silano, M. (s.d.). Toxicité potentielle du quinoa chez les cœliaques.
- Di Sabatino, A., Vanoli, A., Giuffrida, P., Luinetti, O., Solcia, E., & Corazza, G. R. (2012). Celiac disease: Pathogenesis and clinical aspects. *Autoimmunity Reviews*.
- Dreywood, R. (1946). A qualitative test for carbohydrate material. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*.
- Dube, C., Rostom, A., Sy, R., Cranney, A., Saloojee, N., & Moher, D. (2005). The prevalence of celiac disease. *American Journal of Gastroenterology*.
- Egan, L. J., Walsh, S. V., Stevens, F. M., Connolly, C. E., Egan, E. L., & McCarthy, C. F. (1996). Malignancy in celiac disease. *Gastroenterology Clinics of North America*, 25(2), 337–354.
- Elgeti, D., Föste, M., Nordlohne, S. D., Linden, M. H., Heinz, V., Jekle, M., & Becker, T. (2014). Propriétés nutritionnelles du quinoa. *European Food Research and Technology*.
- Elsohaimy, S. A., Refaay, T. M., & Zaitoun, M. A. M. (2015). Composition nutritionnelle et activité antioxydante du quinoa. *International Journal of Agriculture and Food Science*.
- FAO. (1994). Production du quinoa dans les zones sèches. FAO.
- FAO. (2011). Quinoa: Une culture ancestrale pour la sécurité alimentaire. FAO, Rome.
- FAO. (2013). Année internationale du quinoa. FAO.
- FAO. (2016). Projet régional sur la culture du quinoa au Moyen-Orient et en Afrique. FAO.
- Fasano, A., & Catassi, C. (2012). Clinical practice: Celiac disease. *New England Journal of Medicine*.
- Francis, F. J., & Clydesdale, F. M. (1970). Chlorophyll measurement and leaf quality. *Journal of Food Science*, 35(1), 49–52.
- Gandarillas, H. (1968). Diversité génétique du quinoa dans l'Altiplano. INIA.
- Gandarillas, H. (1974). Centre d'origine du quinoa. INIA.
- Garcilaso de la Vega. (s.d.). Commentaires royaux. Manuscrit historique.
- Green, P. H. R., & Cellier, C. (2007). Celiac disease. *New England Journal of Medicine*.
- GreenFacts. (s.d.). Nutrition et maladies chroniques. Synthèse scientifique.
- Herbillon, C. (2015). Histoire et culture du quinoa. Éditions Quae.

- Hoffenberg, E. J., Haas, J. E., Drescher, A., Barnhurst, R., Osberg, I., & Bao, F. (2000). Oats in children with newly diagnosed celiac disease. *Journal of Pediatrics*, 137(3), 361–366.
- Huillca, J., Segura, B., & Álvarez, A. (2021). *Culture du quinoa dans les Andes*. Éditions INIA.
- Jacobsen, S. E. (2011). *Situation mondiale du quinoa*. FAO.
- Jacobsen, S. E. (2017). *Le quinoa: Une solution globale*. CIRAD.
- Jadoul, M. (2006). Complications digestives rares chez le coeliaque. *Revue Médicale de Liège*.
- Koziol, M. J. (1992). Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa. *Food Chemistry*.
- Lamireau, T., & Clouzeau, H. (2008). La maladie cœliaque de l'enfant. *Archives de Pédiatrie*.
- Lebonvallet, C. (2008). *Technologie de transformation du quinoa*. INRA.
- Lefebvre, S., & Bassereau, J. F. (2003). *Analyse sensorielle*. Dunod.
- Lionetti, E., & Catassi, C. (2014). Épidémiologie de la maladie cœliaque. *Pediatric Clinics of North America*.
- Lutz, M., & Bascuñán-Godoy, L. (2017). Quinoa et adaptation climatique. *Agronomy for Sustainable Development*.
- Marie, C. (2018). *Impact des régimes sur le microbiote intestinal*.
- Matuchansky, C., Nicolas, J. P., & Barbier, J. (2004). Traitement de la maladie cœliaque. *La Revue de Médecine Interne*, 25(6), 423–430.
- Mastebroek, H. D., Limburg, H., Gilles, T., & Marvin, H. J. P. (2000). Bitter compounds in quinoa: Saponins. *Plant Foods for Human Nutrition*, 55(4), 371–383.
- Megiorni, F., & Pizzuti, A. (2009). HLA-DQ genotyping and celiac disease risk. *Human Immunology*.
- MENA, B. (2022). *Étude sur les variétés de quinoa en Algérie*.
- Miranda, M., Vega-Gálvez, A., Quispe-Fuentes, I., & Uribe, E. (2020). Acceptabilité sensorielle du quinoa. *Journal of Ethnic Foods*, 7(1), 1–8.
- Mouterde, O., Lachaux, A., & Morali, A. (2008). *Pathologies digestives de l'enfant*. Med-Line.
- Msika, P. (2010). Formulation de compléments alimentaires à base de quinoa. *Revue de Nutrition Fonctionnelle*.
- Pennazio, M. (2005). Complications malignes du coeliaque. *Journal de Gastroentérologie*.
- Pietzak, M. (2005). Suivi des patients coeliaques. *Nutrition in Clinical Practice*.

- Rampertab, S. D., Pooran, N., Brar, P., Singh, P., & Green, P. H. R. (2012). Changing face of celiac disease. *Archives of Internal Medicine*.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., & Serna, L. A. (2011). Quinoa as a source of fiber and minerals. *Food Science and Technology*.
- Rodriguez Calle, F. (2006). *Climat et culture du quinoa*. Éd. Andes.
- Romani, A., Campo, M., & Ieri, F. (2006). Méthode d'extraction des phénols. *Food Chemistry*.
- Schmitz, J. (2007). *Les régimes sans gluten*. Éditions Vidal.
- Schlienger, J. L. (2020). Aspects cliniques de la maladie cœliaque. *Revue du Praticien*.
- Singh, P., Arora, A., Strand, T. A., Leffler, D. A., Catassi, C., Green, P. H., ... & Makharia, G. K. (2018). Global prevalence of celiac disease. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 16(6), 823–836.e2.
- Sollid, L. M., & Jabri, B. (2013). Immunopathogenèse de la maladie cœliaque. *Nature Reviews Immunology*, 13(6), 411–422.
- Srinivasan, U., Jones, E., Carolan, J., Feighery, C., & McCarthy, C. F. (1999). Lactose malabsorption in coeliac disease. *Archives of Disease in Childhood*, 81(5), 418–420.
- Szajewska, H., Shamir, R., Mearin, L., & Catassi, C. (2012). Early nutrition and celiac disease. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 54(4), 563–566.
- Tapia, M. (1979). Domestication du quinoa dans les Andes. INIA.
- Thompson, T. (2008). Celiac disease and the gluten-free diet. *Journal of the American Dietetic Association*.
- Tkoub, K. (2008). Sprue collagène et autres complications. *La Revue de Médecine Interne*.
- Valencia-Chamorro, S. A., Pérez, G. T., & Ferrer, E. B. (2017). Extrusion processing of quinoa. *Cereal Chemistry*, 94(5), 847–856.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martinez, E. A. (2010). Nutrition facts and potential of quinoa. *Food Science and Technology*.
- Williamson, L., & March, J. (2002). Gluten-free diet: challenges and strategies. *Clinical Pediatrics*.
- World Gastroenterology Organisation (WGO). (2016). *Global Guidelines on Celiac Disease*. WGO.