الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة -

UNIVERSITE 20 AOUT 1955 - SKIKDA -

Faculté des Sciences

Département des Sciences de la Nature et de la Vie

Mémoire Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité : Agroalimentaire et qualité des produits

Intitulé du mémoire :

Possibilité de remplacement partiel ou total du cacao dans la formulation de chocolat par des poudres de nabaq (*Ziziphus spina-christi*) et de caroube (*Ceratonia siliqua*) : formulation, caractérisation physicochimique, sensorielle.

Présenté Par :

ZRAYOUD Ilham

MOUMANI Ghada

BERRAHAL Manar

BENMOUSSA AYA

Membre de Jury :

Mme DJEFFAL. S	Professeur	Présidente	Université 20 Août 1955 – Skikda
Mme LEULMI Imene	MAA	Promoteur	Université 20 Août 1955 – Skikda
Mme GHAOUS. S	MCB	Examinatrice	Université 20 Août 1955 – Skikda

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

*Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à **Dieu**, qui nous a accordé la force, la patience et la persévérance tout au long de ces années d'études, et qui nous a guidées jusqu'à la concrétisation de ce mémoire.*

*Nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude à notre encadrante, **Mme LEULMI Imene**, pour son accompagnement scientifique précieux tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses orientations pertinentes, ses remarques constructives ainsi que son souci constant d'améliorer la qualité de ce travail ont contribué de manière significative à son aboutissement. Nous lui exprimons également toute notre reconnaissance pour son intérêt, sa patience et son soutien continu, qui nous ont permis de mener à bien cette étude dans les meilleures conditions.*

*Nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude s'adressent aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Nous tenons à exprimer notre reconnaissance particulière à **Mme DJEFFAL**, qui a bien voulu présider le jury, ainsi qu'à **Mme GHAOUS**, pour avoir accepté la mission d'examiner ce mémoire.*

Un grand merci également à toute l'équipe du laboratoire du département des sciences agronomiques pour leur soutien et leur entière disponibilité sans faille.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les enseignants qui, par leurs conseils et leurs efforts durant toutes les années passées, nous ont permis d'atteindre ce niveau aujourd'hui.

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

Dédicace

Avant tout, je rends grâce à Allah le Tout-Puissant pour Sa bénédiction, Sa guidance et la force qu'Il m'a accordée afin de mener ce travail à son terme.

Je dédie ce mémoire à tous mes enseignants, qui ont contribué à ma formation, et tout particulièrement à mon encadrante, ***Mme Leulmi Imen****, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de ce travail.*

À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien sans faille. Aucun mot ne saurait exprimer ma profonde gratitude envers eux.

À ma chère sœur ***Khadidja*** *et à mes chers frères* ***Aboubakr*** *et* ***Haroun****, pour leur affection et leurs encouragements constants.*

À mes chères amies ***Riham*** *et* ***Wissam****, ainsi qu'à tous mes amis, pour leur présence, leur soutien et les beaux moments partagés.*

À toute ma famille, pour son amour et sa bienveillance.

Une dédicace toute particulière à ma cousine ***Nardjis****, ma compagne de route et mon plus fidèle soutien. Merci d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir encouragée dans les moments les plus difficiles et d'avoir partagé avec moi chaque étape de ce parcours. Ta présence a été une source précieuse de force et de motivation.*

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Avec toute ma gratitude, mon respect et mon affection.

Ilham…

.

Dédicace

Alhamdulillah

Pour la force dans les moments de faiblesse, la patience dans les périodes difficiles, et la guidance qui m'a accompagnée jusqu'à l'achèvement de ce travail.

Je dédie ce travail :

À moi-même pour tous les efforts et de toute la fatigue que j'ai fournis au cours de mon parcours académique jusqu'à cette étape.

À mon cher père, pour son amour, ses encouragements et tous les sacrifices qu'il a accomplis pour moi. Que Dieu le protège et lui accorde une longue vie.

À ma chère mère, source d'amour, de tendresse et de sagesse, dont les prières ont toujours été mon plus grand soutien. Que Dieu la préserve et lui accorde santé et bonheur.

*À celle à qui **Dieu** m'a accordé la grâce d'avoir dans ma vie, au lien solide et au soutien permanent, à celle qui a été une aide pour moi tout au long de mon parcours, ma chère sœur **Imane** .*

*À toute ma famille élargie, chacun par son nom et la place qu'il occupe dans mon cœur, avec toute mon affection et ma gratitude pour votre présence et votre soutien constants. Et tout particulièrement à mes grands-parents et ma chère cousine **Norhène**, ma sœur de cœur.*

À mes amies Rayane, Aya, Rania et Nesreena, je vous remercie du fond du cœur pour votre présence à mes côtés dans les moments les plus difficiles comme dans les plus beaux, pour vos paroles encourageantes, vos conseils sincères et vos messages qui m'ont toujours donné de la force. Vous avez été une partie importante de ce beau parcours.

*À tous mes enseignants, je vous remercie pour votre dévouement, votre patience et la qualité de votre enseignement tout au long de mon parcours. J'adresse également mes remerciements les plus sincères à ma promotrice, **Mme LEULMI Imene**, pour son encadrement scientifique précieux, ses conseils avisés et sa disponibilité constante tout au long de la réalisation de ce travail.*

Enfin, à toutes les personnes qui m'ont soutenu et aidé sans attendre rien au retour.

Ghada…

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى النور الذي لا ينطفئ في حياتي، إلى من كان دعاؤها سرَّ قوتي ونجاحي، إلى أمي الغالية... أنتِ الحضن الذي لا يميل، والقلب الذي لا يملّ، بكِ كبرتُ، وبدعواتكِ وصلتُ، فلكِ هذا النجاح، ولكِ من الحب والامتنان ما تعجز الكلمات عن وصفه.

إلى من علّمني أن الطموح طريق، وأن الإرادة مفتاح، إلى أبي العزيز... أنتَ السند الذي لا يُعوَّض، والقوة التي أستند إليها في كل خطوة، وهذا الإنجاز ثمرة تعبك وعطائك، وفخرك هو غايتي.

إلى إخوتي الأحبة: مهدي، سفيان، طارق... كنتم دائماً ظهري الذي لا يُكسر، وعوني بعد الله في الشدائد، بوجودكم كانت الطريق أخف، والأيام أجمل، فحفظكم الله وأدامكم نعمة في حياتي.

إلى أخواتي الغاليات: سارة، مريم، مليكة... أنتم زينة العمر وبهجة الأيام، بكم تطيب الحياة، ومن محبتكم أستمد القوة والأمل، فشكراً لكم على كل لحظة دعم وصدق ووفاء.

إلى زوج أختي العزيز... إلى من كان نعم الأخ، وصاحب الخلق الكريم والقلب الطيب، أهديك خالص التقدير والاحترام، وأسأل الله أن يديم عليكم نعمة المحبة والمودة، وأن يرزقكم حياة مليئة بالسعادة والهناء.

إلى الأستاذة لعلمي إيمان... أتقدم إليكِ بخالص الشكر والتقدير والامتنان على توجيهاتكِ القيمة، ودعمكِ المستمر، ونصائحكِ الصادقة، وعلى كل ما قدمتِه لي من علم وخبرة، فكنتِ خير قدوة، وخير مرشدة، فجزاكِ الله عني خير الجزاء.

إلى صديقاتي الغاليات آية، جهاد، بسمة... إلى من شاركوني تفاصيل هذه الرحلة، أفراحها وتحدياتها، شكراً لوقوفكم إلى جانبي، ولكلماتكم المشجعة، ولدعمكم الذي كان يخفف عني كل صعوبة، فوجودكم كان نعمة أعتز بها.

إلى خطيبي العزيز... إلى من كان حضوره دعماً، وكلماته طمأنينة، وقلبه ملاذاً للأمل، شكراً لإيمانك بي، وصبرك معي، ومساندتك لي في كل خطوة، كنتَ سنداً حقيقياً في هذه الرحلة، وهذا النجاح أهديه لك بكل محبة وامتنان.

إلى نفسي... إلى تلك التي صبرت واجتهدت، وتعبت ولم تستسلم، إلى التي آمنت بأن الأحلام لا تتحقق إلا بالإرادة والعزيمة، أهديكِ هذا النجاح، فأنتِ تستحقينه بعد كل ما بذلتِه من جهد وصبر.

وإلى كل أفراد عائلتي الكريمة، وإلى كل من ساندني بدعوة صادقة، أو كلمة طيبة، أو موقف نبيل، وإلى كل من كان له أثر جميل في مسيرتي، أهديكم هذا العمل المتواضع عربون محبة ووفاء، سائلاً الله أن يجزيكم عني خير الجزاء.

وفي الختام...

الحمد لله الذي وفقني وأعانني، والحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والحمد لله على فضله وإحسانه، فما كان هذا الإنجاز ليتحقق لولا توفيقه سبحانه، ثم دعوات الأحبة ودعمهم .(وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ ۚ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ) .والحمد لله حتى يبلغ الحمد منتهاه.

منار...

إهداء

(وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ)

بسم الله نبدأ وباسمه ننتهي، والصلاة والسلام على من علّمنا أن طلب العلم فريضة، وأن الصبر مفتاح الفرج، اليوم لا نحتفل فقط بانتهاء مرحلة دراسية بل نحتفل بانتصار الإرادة على التعب، وتحول الأحلام البعيدة إلى واقع ملموس، اليوم تزفنا الأماني إلى عتبات المستقبل ونحن نحمل في قلوبنا حصاد السنين وفي أيادينا مشاعل النور.

أولا وقبل كل شيء أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى الأستاذة المشرفة العلمي إيمان على تأطيرها ومرافقتها القيمة وتوجيهاتها التي ساهمت في إنجاز هذا العمل.

فيما بعد أهدي هذا العمل:

إلى نفسي التي اجتهدت وصبرت ولم تستسلم رغم كل التحديات حتى وصلت إلى هذه اللحظة التي طالما حلمت بها .

إلى من اتكأت عليه حين مالت بي السبل، فأستقام دربي، إلى من علمني كيف أصنع المجد من العدم أهديك هذا الحصاد فما أنا إلا أثر من كفاحك "أبي العزيز".

إلى من لولا رضاها لما اهتديت سبيلا ولو لا كفاحها لما بلغت قماما بكِ هانت الصعاب وتيسرت الخطى " أمي الغالية".

إلى جدي وجدتي بدعائكُما كتب النجاح فأنتما الدعاء المستجاب والحلم الذي لا يخيب حفظكما الله من كل شر، العمود الذي يقوم عليه جزء من ثباتي في الحياة " عمي رشدي "دعمك ترك أثرا لا ينسى في مسيرتي جزاك الله عني خير الجزاء وأدامك عزًا وفخرًا لنا .

إلى من بهم أكبر وعليهم أعتمد وبوجودهم أكسب قوة ومحبة أخواتي " نور العيون، هبة الخالق، قطر الندى الليلك وقمر.

إلى من اختاره الله لي كنتَ السند في لحظات التعب والقوة في اوقات الضعف، شكرا لدعمك الصادق لي أسأل الله أن يديم بيننا المودة والرحمة وأن يجمعنا دائما على الخير والمحبة.

إلى صديقتي العزيزة "منار" شاركتني أجمل الذكريات وأصعب اللحظات كنتي ولازلتي نعم الصديقة شكرًا من القلب على كل شيء .

إلى كل من رأى نجاحي نجاحا له وكل من دعمني أهديكم ثمرة هذا الجهد سائلة الله ان يجعل القادم أجمل.

آية ...

Résumé

Le caroubier et le nabaq sont des espèces végétales résilientes du bassin méditerranéen et des zones arides, revêtant une importance écologique et économique majeure. Cette étude expérimentale vise à évaluer les aptitudes technologiques et sensorielles de la valorisation de leurs poudres de fruits comme alternatives naturelles et durables à la poudre de cacao importée dans la formulation du chocolat.

Les résultats des analyses physico-chimiques ont révélé une haute qualité technologique des matières premières : de faibles taux d'humidité (7,89 % pour la caroube et 5,78 % pour la nabaq) optimisant la stabilité microbiologique, et une grande richesse en sucres totaux (67,80 % pour le caroube et 77,70 % pour nabaq) apportant une pouvoir sucrant naturelle qui limite l'ajout de sucre blanc. Les analyses ont également montré une activité antioxydante notable et une teneur significative en composés phénoliques et flavonoïdes.

Sur le plan appliqué, six formulations de chocolat ont été élaborées (du témoin T0 à la substitution totale T3, T4, T5). L'évaluation sensorielle a confirmé une excellente acceptabilité commerciale, les formulations à substitution totale (telles que la formulation exclusive de nabaq T4 et la formulation mixte T3) ayant obtenu les meilleurs scores de préférence pour le goût, la couleur et l'acceptabilité globale. Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour améliorer la valeur nutritionnelle du chocolat, rationaliser les coûts de production et soutenir l'industrie agroalimentaire nationale.

Mots-clés : Analyses physico-chimiques, *Ceratonia siliqua* L., Chocolat, Substitution du cacao, *Ziziphus spina-christi*.

Abstract

The carob and nabaq trees are resilient plant species of the Mediterranean basin and arid zones, holding major ecological and economic importance. This experimental study aims to evaluate the technological and sensory capabilities of valorizing their fruit powders as natural and sustainable alternatives to imported cocoa powder in chocolate formulation.

The results of the physicochemical analyses revealed a high technological quality of the raw materials: low moisture content (7.89% for carob and 5.78% for nabaq) optimizing microbiological stability, and a high richness in total sugars (67.80% for carob and 77.70% for nabaq) providing a natural sweetness that limits the need for added white sugar. The analyses also showed a notable antioxidant activity and a significant content of phenolic compounds and flavonoids.

On a practical level, six chocolate formulations were developed (from the control T0 to total substitution T3, T4, T5). Sensory evaluation confirmed excellent commercial acceptability, with the total substitution formulations (such as the 100% nabaq formulation T4 and the mixed formulation T3) obtaining the highest preference scores for taste, color, and overall acceptability. These results open promising prospects for improving the nutritional value of chocolate, rationalizing production costs, and supporting the national agri-food industry.

Keywords: *Ceratonia siliqua* L., Cocoa substitution, Chocolate, Physicochemical analyses, Sensory analysis, *Ziziphus spina-christi*.

ملخص

تعتبر شجرتا الخروب والنبق من الأنواع النباتية المقاومة في حوض البحر الأبيض المتوسط والمناطق الجافة، ولها أهمية بيئية واقتصادية بارزة .يهدف هذا العمل التجريبي إلى تقييم الإمكانيات التكنولوجية والحسية لتثمين مساحيق ثمار الخروب والنبق كبدائل طبيعية ومستدامة لمسحوق الكاكاو المستورد في تركيب الشوكولاتة .

أظهرت نتائج التحاليل الفيزيائية والكيميائية جودة تكنولوجية عالية للمواد الأولية؛ حيث تميزت المساحيق بنسب رطوبة منخفضة (7.89% للخروب و5.78% للنبق) تعزز استقرارها الميكروبيولوجي، إلى جانب غناها بالسكريات الكلية (67.80% في الخروب و77.70% في النبق) مما يمنح المنتج حلاوة طبيعية تقلل الحاجة لإضافة السكر الأبيض .كما كشفت التحاليل عن نشاط مضاد للأكسدة ومحتوى معتبر من المركبات الفينولية والفلافونويدات .

من الناحية التطبيقية، أُعدت ست صياغات مختلفة من الشوكولاتة (من الشاهدة T0 إلى الاستبدال الكلي T3، T4، T5) وأكد التقييم الحسي المقارن قبولاً تجارياً كبيراً، حيث حظيت الصياغات المستبدلة كلياً (مثل صياغة النبق الكاملة T4 والصياغة المختلطة T3) بأعلى درجات التفضيل من حيث المذاق، اللون، والقبول العام .تفتح هذه النتائج آفاقاً واعدة لتحسين القيمة الغذائية للشوكولاتة، وتقليل تكاليف الإنتاج، ودعم الصناعات الغذائية الوطنية .

الكلمات المفتاحية: الخروب، النبق، بدائل الكاكاو، الشوكولاتة، التحاليل الفيزيائية والكيميائية، التقييم الحسي.

Table des matières

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des annexes	
Introduction générale	01

Chapitre 01 : Généralités sur le chocolat

1.1. Historique du chocolat	03
1.2. Présentation générale du chocolat	03
1.3. Définition du chocolat	03
1.4. Types de chocolat	04
1.4.1. Chocolat noir	04
1.4.2. Chocolat au lait	04
1.4.3. Chocolat blanc	04
1.5. Composition du chocolat	04
1.6. Technologie de fabrication du chocolat	05
1.6.1. Malaxage	05
1.6.2. Broyage et raffinage	06
1.6.3. Conchage	06
1.6.4. Tempérage	06
1.6.5. Moulage	06
1.7. Intérêts nutritionnels et fonctionnels du chocolat	07
2. Généralités sur le Cacao	08
2.1. Répartition géographique	08
2.2. Composition chimique de Cacao	09

Table de matière

2.3. Rôle du cacao et propriétés biologiques	11
2.4. Contraintes liées à la production de cacao	11
3. Généralités sur la caroube	13
3.1. Description botanique	13
3.2. Répartition géographique du caroubier	15
3.2.1. Dans le monde	15
3.2.2. En Algérie	16
3.3. Composition chimique de la caroube	17
3.4. Propriétés technologiques	17
3.5. Utilisation en substitut du cacao	18
3.6. Propriétés biologiques de la caroube	18
4. Généralités sur le Zizyphus spina-christi	19
4.1. Répartition géographique	20
4.1.1. À l'échelle mondiale	20
4.1.2. En Algérie	21
4.2. Description botanique	21
4.3. Composition chimique et nutritionnelle de Ziziphus spina-christi	22
4.4. Usage traditionnels	22
4.5. Propriétés pharmacologiques et bénéfices thérapeutiques de Ziziphus spina-christi	23

Chapitre 02 : Matériel et méthode

1. Matière première végétale	25
2. Préparation des poudres de de caroube et de nabaq	25
2.1. Préparation de la poudre de caroube (Ceratonia siliqua L.)	25
2.1.1. Nettoyage	25
2.1.2. Séchage	26
2.1.3. Broyage	26
2.1.4. Tamisage	26
2.1.5. Stockage	27
2.2. Préparation de la poudre de jujubier (nabq) ((Ziziphus spina-christi)	27

Table de matière

2.2.1. Nettoyage	27
2.2.2. Séchage	27
2.2.3. Broyage	28
2.2.4. Tamisage	28
2.2.5. Stockage	28
3. Analyses physico-chimiques des poudres	29
3.1. Potentiel d'hydrogène (pH)	29
3.2. Taux d'humidité	29
3.3. Taux de cendres	30
3.4. Acidité titrable	30
3.5. Détermination de la teneur en sucres totaux (ST)	31
3.6. Détermination des sucres réducteurs	33
4. Détermination des propriétés antioxydantes	34
4.1. Extraction	34
4.2. Dosage des polyphénols totaux	35
4.3. Dosage des flavonoïdes totaux	35
4.4. Détermination de l'activité antioxydante par le test DPPH	35
5. Formulation des chocolats	36
6. Analyse sensorielle	39
6.1. Objectif de l'analyse sensorielle	39
6.2. Déroulement du test hédonique	39
7. Analyse statistique	40

Chapitre III : Résultats et discussions

1. Caractéristiques physicochimiques des poudres de nabaq et de caroube	42
1.1. Taux d'humidité	42
1.2. pH	44
1.3. Acidité titrable.	45
1.4. Taux de cendres	46
2. Évaluation de la fraction glucidique des poudres de nabaq et de caroube	47

Table de matière

2.1. Sucres totaux	48
2.2. Sucres réducteurs	50
3. Évaluation des composés phénoliques, des flavonoïdes et du potentiel antioxydant des poudres de caroube et de nabaq	51
3.1. Polyphénols totaux	51
3.2. Flavonoïdes totaux	54
3.3. Activité anti radicalaire (Test DPPH)	56
4. Analyse sensorielle et profil hédonique des chocolats formulés	57
4.1. Propriétés visuelles : Couleur et Brillance	59
4.2. Qualités structurales et aromatiques : Homogénéité et Intensité des arômes	59
4.3. Propriétés hédoniques et commerciales : Goût, Acceptabilité et Intention d'achat	60
5. Relation entre les caractéristiques physicochimiques des poudres et les propriétés sensorielles des chocolats formulés	62
Conclusion générale	65
Référence biographique	67
Annexe	77

Liste des abréviations

Liste des abréviations

Les mots	Abréviations
FAO	Food and Agriculture Organizations (Organisation Alimentaire et Agricole)
DNS	Acide 3,5-dinitrosalicylique
DPPH	2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle
HMF	HMF : Hydroxyméthylfurfural
EAG	Équivalent d’acide gallique
EQ	Équivalent
OIC	Organisation internationale du cacao
OMS	Organisation mondiale de la Santé
ERO	Espèces réactives de l'oxygène
ERN	Espèces réactives de l'azote

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N° tableau	Titre	Page
Tableau 01	Composition chimique des fèves de cacao avant et après fermentation	10
Tableau 02	Composition chimique de la pulpe de cacao	10
Tableau 03	Composition chimique de la caroube	17
Tableau 04	Gamme étalon de glucose pour le dosage des sucres totaux	32
Tableau 05	Gamme étalon de glucose pour le dosage des sucres réducteurs	34
Tableau 06	Formulations expérimentales des variantes de chocolat (% m/m)	37
Tableau 07	Caractéristiques physicochimiques des poudres de caroube et de nabaq	42
Tableau 08	Teneurs en sucres réducteurs des poudres de caroube (Ceratonia siliqua) et de nabaq (Ziziphus spina-christi) exprimées en g/100 g de matière sèche	50
Tableau 09	Résultats de l'évaluation sensorielle des différentes formulations de chocolat	58
Tableau 10	Les résultats de test de classement	61

Liste des figures

Liste des figures

N° Figure	Titre	Page
Figure 01	Schéma résumant les étapes de fabrication du chocolat	07
Figure 02	Pays producteurs de cacao en 2023	09
Figure 03	Photos illustrant le *caroubier*	13
Figure 04	Gousses et graines de 12 populations de Ceratonia siliqua en Algérie	15
Figure 05	Répartition mondiale du caroubier et centres d'origine	16
Figure 06	Répartition géographique de *Ceratonia* siliqua en Algérie	16
Figure 07	Fruit du Ziziphus spina-christi après la récolte	20
Figure 08	Distribution mondiale du Ziziphus spina-christi (GBIF Secretariat, n.d)	21
Figure 09	Gousses de caroube avant le nettoyage	26
Figure 10	Tamisage de la poudre de caroube	26
Figure 11	Poudre fine de caroube	27
Figure 12	Fruits de nabq avant le nettoyage	27
Figure 13	Tamisage de la poudre de nabq	28
Figure 14	Poudre fine de nabq	28
Figure 15	Diagramme de préparation des formulations des chocolats	38
Figure 16	Formulations des chocolats	39
Figure 17	Teneurs en sucres totaux dans la poudre de caroube et de nabaq	48

Lise des figures

Figure 18	Teneurs en sucres réducteurs dans la poudre de caroube et de nabaq	50
Figure 19	Teneurs en polyphénols totaux dans la poudre de caroube et de nabaq	52
Figure 20	Teneurs en flavonoïdes totaux dans la poudre de caroube et de nabaq	54
Figure 21	Pourcentage d'activité anti radicalaire dans la poudre de caroube et de nabaq	56
Figure 22	Profil sensoriel des chocolats élaborés.	58

Liste des annexes

Liste des annexes

N° Annexe	Titre	Page
Annexe 01	Courbe d'étalonnage des sucres totaux	77
Annexe 02	Courbe d'étalonnage des sucres réducteurs	77
Annexe 03	Courbe d'étalonnage de l'acide gallique	78
Annexe 04	Photo de fiche dégustation chocolat	79

Introduction générale

Introduction générale

Le chocolat Le chocolat est l'un des produits alimentaires les plus appréciés et consommés dans le monde pour ses qualités sensorielles et sa valeur nutritionnelle. Élaboré principalement à partir du cacao, il est utilisé dans la fabrication de nombreux produits tels que les tablettes, les biscuits, les glaces et diverses confiseries **(Codex, 2015).**

Au-delà de ses caractéristiques organoleptiques, le chocolat, notamment le chocolat noir, suscite un intérêt croissant en raison de sa richesse en composés bioactifs et de ses effets potentiellement bénéfiques sur la santé **(Montagna et al., 2019).**

Face à l'augmentation de la demande mondiale en cacao et à la nécessité de valoriser des ressources végétales locales, la recherche de matières premières alternatives capables d'améliorer la qualité nutritionnelle des produits chocolatés constitue un axe de recherche prometteur. Dans ce contexte, la caroube (Ceratonia siliqua L.) et le nabaq (Ziziphus spina-christi) présentent un intérêt particulier en raison de leur richesse en fibres alimentaires, en minéraux et en composés bioactifs tels que les polyphénols et les flavonoïdes. La caroube est reconnue pour sa richesse en composés phénoliques possédant une importante activité antioxydante **(Makris et Kefalas, 2004 ; Bernaldo-Gil et al., 2011 ; Sebai et al., 2013).** Grâce à sa saveur naturellement proche de celle du cacao ainsi qu'à l'absence de caféine et de théobromine, elle est considérée comme un substitut potentiel du cacao dans diverses formulations alimentaires **(Biner et al., 2007).**

Le nabaq, quant à lui, constitue une ressource végétale encore peu exploitée dans l'industrie alimentaire malgré sa richesse en polyphénols, flavonoïdes et saponines, auxquels sont attribuées des propriétés antioxydantes, antimicrobiennes et anti-inflammatoires **(Abalaka et al., 2011 ; Michel et al., 2011 ; Dahiru et al., 2006 ; Abdel-Zaher et al., 2005).** Ses fruits sont également appréciés pour leur valeur nutritive élevée **(Adzu et al., 2001).** Cependant, si plusieurs études se sont intéressées à l'utilisation de la caroube comme substitut du cacao, les travaux portant sur l'incorporation de la poudre de nabaq dans les formulations chocolatées demeurent très limités.

Dès lors, il est légitime de s'interroger sur la possibilité d'utiliser la poudre de nabaq, seule ou en association avec la poudre de caroube, comme substitut partiel ou total du cacao tout en préservant, voire en améliorant, les propriétés physicochimiques, nutritionnelles et sensorielles du chocolat ? Cette étude repose ainsi sur l'hypothèse que la substitution du cacao par ces deux poudres permettrait d'obtenir un chocolat présentant une bonne acceptabilité

sensorielle et une valeur nutritionnelle améliorée grâce à leur richesse en composés bioactifs. Dans cette perspective, l'objectif général de ce travail est d'évaluer la possibilité de substituer partiellement ou totalement le cacao par les poudres de caroube et de nabaq dans la formulation du chocolat. Plus spécifiquement, il s'agit de préparer et de caractériser ces poudres, d'élaborer différentes formulations de chocolat contenant des taux variables de substitution du cacao, d'évaluer leurs caractéristiques physicochimiques et sensorielles et d'identifier la formulation présentant la meilleure acceptabilité.

Chapitre 1

Généralités sur le chocolat et substitution du cacao

1.1. Historique du chocolat

Le chocolat possède une histoire millénaire remontant aux civilisations maya et aztèque d'Amérique centrale, où le cacao était principalement consommé sous forme de boisson amère à caractère rituel et cérémoniel. Au XVIe siècle, l'introduction du cacao en Europe par les conquistadors espagnols, notamment Hernán Cortés, a marqué le début de sa diffusion à l'échelle mondiale. L'ajout progressif de sucre puis de lait a contribué à améliorer son acceptabilité sensorielle auprès des élites européennes. À partir de la révolution industrielle des XVIIIe et XIXe siècles, les avancées technologiques, notamment l'extraction du beurre de cacao et le développement du chocolat solide, ont favorisé l'essor de l'industrie chocolatière moderne.

Des entreprises telles que Nestlé et Cadbury ont ensuite participé à la démocratisation du chocolat à travers le monde. Aujourd'hui, le chocolat est consommé sous différentes formes, tandis que la majorité de la production mondiale de cacao provient des pays d'Afrique de l'Ouest **(Beckett, 2008 ; Coe *e*t Coe, 2013).**

1.2. Présentation générale du chocolat

Le chocolat est l'un des produits alimentaires les plus consommés et appréciés dans le monde en raison de ses caractéristiques sensorielles particulières, notamment sa saveur, son arôme et sa texture. Longtemps considéré comme un produit de luxe, il suscite aujourd'hui un intérêt croissant non seulement pour ses qualités organoleptiques, mais également pour sa richesse en composés bioactifs susceptibles d'exercer des effets bénéfiques sur la santé **(Latif, 2013).**

D'un point de vue technologique, le chocolat est une matrice complexe constituée d'une phase lipidique continue formée principalement par le beurre de cacao, au sein de laquelle sont dispersées des particules solides telles que la poudre de cacao, le sucre et, dans le cas du chocolat au lait, les constituants laitiers. Cette organisation structurale joue un rôle déterminant dans les propriétés rhéologiques, la texture et la qualité sensorielle du produit fini **(Talbot, 2012).**

1.3. Définition du chocolat

Le chocolat est un produit alimentaire obtenu à partir de matières premières dérivées du cacao, auxquelles peuvent être ajoutés divers ingrédients tels que le sucre, les produits laitiers, des édulcorants et certains additifs autorisés conformément aux normes en vigueur. Sa

composition et sa dénomination sont réglementées afin de garantir la qualité et l'authenticité du produit **(CODEX STAN 87-1981, Rév.1-2003).**

D'un point de vue technologique, le chocolat est une matrice complexe constituée de particules solides finement dispersées dans une phase grasse continue principalement formée par le beurre de cacao. Ces particules comprennent notamment les constituants du cacao, les sucres, les protéines et les minéraux. Dans le chocolat noir, la phase lipidique provient essentiellement du cacao, tandis que dans le chocolat au lait et le chocolat blanc, elle résulte de la combinaison des matières grasses du cacao et du lait **(Multon, 1992).**

1.4. Types de chocolat

Selon leur formulation et leur teneur en constituants du cacao, plusieurs catégories de chocolat sont distinguées. Ces différences influencent directement les caractéristiques sensorielles, nutritionnelles et technologiques du produit final **(Montagna *et al.*, 2019).**

1.4.1. Chocolat noir

Le chocolat noir est principalement constitué de pâte de cacao, de beurre de cacao et de sucre. Sa teneur élevée en cacao lui confère une saveur intense ainsi qu'une forte concentration en composés phénoliques. Les propriétés sensorielles et nutritionnelles du chocolat noir dépendent principalement du pourcentage de cacao incorporé dans la formulation.

1.4.2. Chocolat au lait

Le chocolat au lait est élaboré à partir de beurre de cacao, de pâte de cacao, de sucre, de lait en poudre et d'émulsifiants tels que la lécithine. Sa teneur en cacao est généralement comprise entre 20 et 25 %, ce qui lui confère une saveur plus douce et une texture plus onctueuse que le chocolat noir.

1.4.3. Chocolat blanc

Le chocolat blanc est fabriqué à partir de beurre de cacao, de sucre et de lait en poudre. Contrairement au chocolat noir et au chocolat au lait, il ne contient pas pâte de cacao, ce qui explique sa couleur claire et son profil sensoriel particulier.

1.5. Composition du chocolat

La composition du chocolat varie selon sa catégorie et les ingrédients utilisés lors de sa fabrication. D'après la directive européenne 2000/36/CE, le chocolat est défini comme un

produit obtenu à partir de produits de cacao et de sucres, contenant au minimum 35 % de matière sèche totale de cacao, dont au moins 18 % de beurre de cacao et 14 % de matière sèche dégraissée de cacao.

Sur le plan nutritionnel, le chocolat est constitué principalement de lipides provenant du beurre de cacao, de glucides issus du saccharose ajouté et, dans une moindre mesure, de protéines.

Il renferme également des fibres alimentaires, des minéraux tels que le magnésium, le potassium et le fer, ainsi que diverses vitamines présentes en faibles quantités.

Le chocolat est également reconnu pour sa richesse en composés bioactifs, notamment les polyphénols de la famille des flavonoïdes (catéchines, épicatéchines et procyanidines), auxquels sont attribuées d'importantes propriétés antioxydantes.

Afin d'améliorer la stabilité physique, la texture et les propriétés rhéologiques du produit, certains additifs technologiques, tels que la lécithine de soja, peut être incorporés au cours du procédé de fabrication **(Devos *et al.*, 2021).**

1.6. Technologie de fabrication du chocolat

La fabrication industrielle du chocolat repose sur plusieurs opérations technologiques successives. Elle débute par le mélange des ingrédients principaux, notamment la masse de cacao, le sucre, le beurre de cacao et, selon le type de chocolat, les constituants laitiers. Cette étape est suivie du raffinage, qui permet de réduire la taille des particules afin d'obtenir une texture homogène et fine.

Le conchage constitue ensuite une opération essentielle visant à améliorer les propriétés rhéologiques et à développer les arômes caractéristiques du chocolat.

Le tempérage permet ensuite la formation de cristaux stables du beurre de cacao, responsables de la brillance, de la texture et de la stabilité du produit final. Enfin, le chocolat est moulé, refroidi puis conditionné.

Les propriétés physicochimiques, rhéologiques, sensorielles et nutritionnelles du chocolat dépendent fortement de la formulation ainsi que des paramètres technologiques appliqués lors de la fabrication **(Goya *et al.*, 2022).**

1.6.1. Malaxage

La pâte de cacao est maintenue à l'état liquide grâce à la chaleur puis mélangée avec le

sucre et le beurre de cacao. Dans le cas du chocolat au lait, du lait en poudre est ajouté au mélange. Cette opération permet d'obtenir une pâte homogène destinée aux étapes ultérieures de raffinage et de broyage **(Beuzard, 2003).**

1.6.2. Broyage et raffinage

Le broyage constitue une étape essentielle permettant de réduire la taille des particules solides afin d'améliorer la texture du chocolat. Cette opération est généralement réalisée à l'aide de broyeurs à cylindres successifs permettant d'atteindre une granulométrie inférieure à 20 µm, seuil en dessous duquel les particules deviennent imperceptibles en bouche **(Hlin, 2001).**

1.6.3. Conchage

Le conchage est une opération technologique destinée à améliorer les propriétés rhéologiques du chocolat ainsi que le développement de ses arômes. Cette étape repose sur l'action combinée du brassage, de l'aération, de la température et des forces de cisaillement appliquées à la pâte chocolatée (**Beckett, 2009).**

1.6.4. Tempérage

Le tempérage correspond à une étape de refroidissement contrôlé permettant la formation de cristaux stables du beurre de cacao, principalement la forme cristalline V, responsable de la brillance et de la bonne aptitude à la fusion du chocolat.

Pour le chocolat noir, la masse est généralement chauffée à 45–50 °C afin de faire fondre tous les cristaux, puis refroidie à 27–28 °C pour initier la cristallisation, avant d'être réchauffée à 31–32 °C, température de travail favorisant la stabilité de la forme V **(Lerno, 1992).**

1.6.5. Moulage

Après le tempérage, la masse chocolatée est versée dans des moules puis soumise à des vibrations afin d'assurer une répartition homogène et l'élimination des bulles d'air.

Les moules sont ensuite refroidis avant le démoulage et le conditionnement du produit final **(Girard, 1994).** La figure 1 présente les principales étapes de fabrication du chocolat.

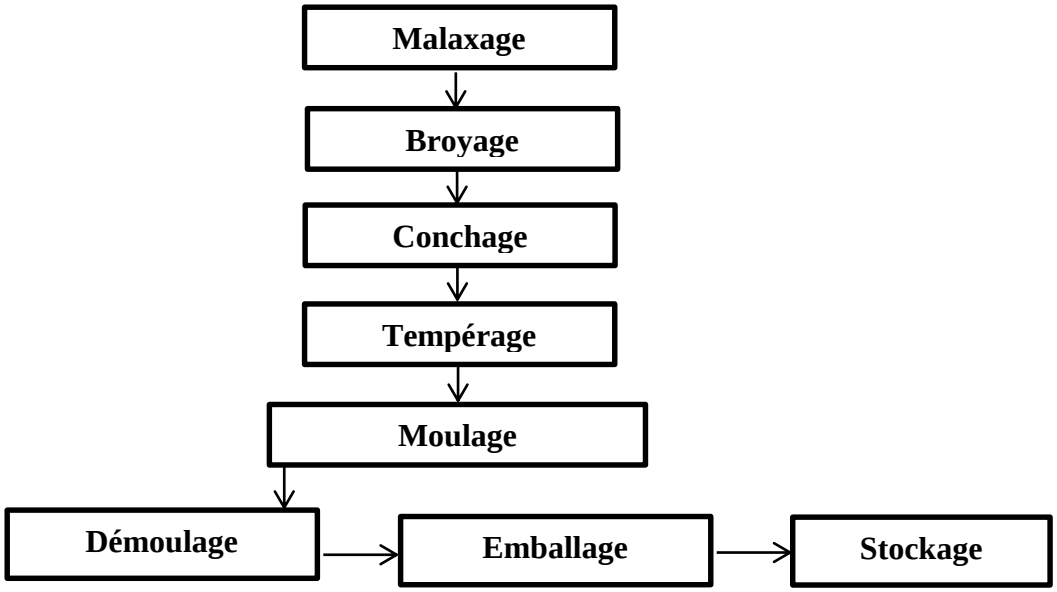


Figure 01 : Schéma résumant les étapes de fabrication du chocolat.

1.7. Intérêts nutritionnels et fonctionnels du chocolat

Le chocolat, en particulier le chocolat noir, suscite un intérêt croissant en raison de ses effets potentiellement bénéfiques sur la santé. Ces effets sont principalement attribués à sa teneur élevée en cacao, en flavonoïdes et en théobromine. Comparé au chocolat au lait, généralement plus riche en sucres et moins concentré en composés bioactifs, le chocolat noir présente un potentiel antioxydant plus important et est davantage associé à des effets favorables sur la santé **(Latif, 2013 ; Montagna *et al.*, 2019 ; Samanta *et al.*, 2022).** Les principaux effets rapportés dans la littérature concernent :

- La santé cardiovasculaire, grâce à l'amélioration de la fonction endothéliale et à l'augmentation de la biodisponibilité de l'oxyde nitrique (NO), favorisant ainsi la vasodilatation et le maintien d'une pression artérielle normale ;
- Le métabolisme glucidique, plusieurs études suggérant qu'une consommation modérée de chocolat noir riche en flavonoïdes pourrait améliorer la sensibilité à l'insuline et contribuer à une meilleure régulation de la glycémie ;
- La protection contre le stress oxydatif, en raison de sa teneur élevée en composés antioxydants capables de neutraliser les radicaux libres et de limiter les dommages cellulaires ;
- Le métabolisme lipidique et énergétique, les polyphénols pouvant participer à la régulation de l'accumulation des lipides et à l'amélioration du profil lipidique en réduisant l'oxydation du cholestérol LDL ;

- Les fonctions cognitives et le bien-être, par l'amélioration de la circulation sanguine cérébrale et la stimulation de mécanismes impliqués dans les performances cognitives et l'humeur.

Toutefois, ces effets bénéfiques sont principalement associés au chocolat noir à forte teneur en cacao et doivent être considérés dans le cadre d'une consommation modérée et d'une alimentation équilibrée.

2. Généralités sur le Cacao

Le cacaoyer *(Theobroma cacao)* est un arbuste emblématique de la famille des Malvacées, selon la FAO, et pousse dans les zones tropicales humides de la région équatoriale. Bien que les fèves de cacao soient mondialement connues pour le chocolat, les cabosses séchées de cet arbre permettent de produire une grande variété d'autres produits.

L'Organisation internationale du cacao (OIC) indique que la transformation du cacao, de l'état brut aux produits transformés, ne se limite pas à la production de beurre ou de poudre de cacao ; elle implique de nombreux procédés complexes tels que la fermentation, le séchage, la torréfaction et le broyage, afin d'obtenir des matières premières pour toutes les industries manufacturières.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a identifié les composants bioactifs du cacao, notamment les flavonoïdes, comme de puissants antioxydants aux propriétés préventives importantes contre les maladies.

L'histoire du cacao remonte à plus de mille ans en Amérique centrale et du Sud (son berceau), où il fut intégré à l'avenir des peuples autochtones, notamment les Mayas et les Aztèques.

À cette époque, les peuples autochtones utilisaient le cacao comme moyen de se nourrir et de faire du commerce en l'utilisant comme moyen de réaliser des transactions **(ICCO, 2021).**

2.1. Répartition géographique

Le cacaoyer est un petit arbre atteignant 6 à 9 m de hauteur, cultivé dans les forêts tropicales situées dans la zone intertropicale, entre 20° de latitude Nord et Sud de l'équateur, englobant l'Afrique occidentale, l'Amérique centrale et du Sud ainsi que l'Asie et l'Océanie (figure 2).

Son origine se situe en Amérique du Sud **(Motamayor *et al.*, 2003)** où plusieurs populations sauvages se rencontrent dans les régions amazoniennes et guyanaises, et il est reconnu comme l'une des cultures pérennes les plus importantes au monde, avec une production estimée à 3,5 millions de tonnes en 2006 **(ICCO., 2006).**

Il est principalement cultivé dans les zones tropicales mentionnées ci-dessus ***(*Marita *et al.*, 2001)** et les variétés traditionnellement cultivées appartiennent à trois groupes principaux Criollo, Forastero et Trinitario selon leur morphologie, leurs caractéristiques génétiques et leur origine géographique **(Bartley, 2005)** et les producteurs récoltent les cabosses fruits du cacaoyer de septembre–octobre à janvier pour la récolte principale et de mai à juillet pour la récolte secondaire **(Deuss, 1989).**

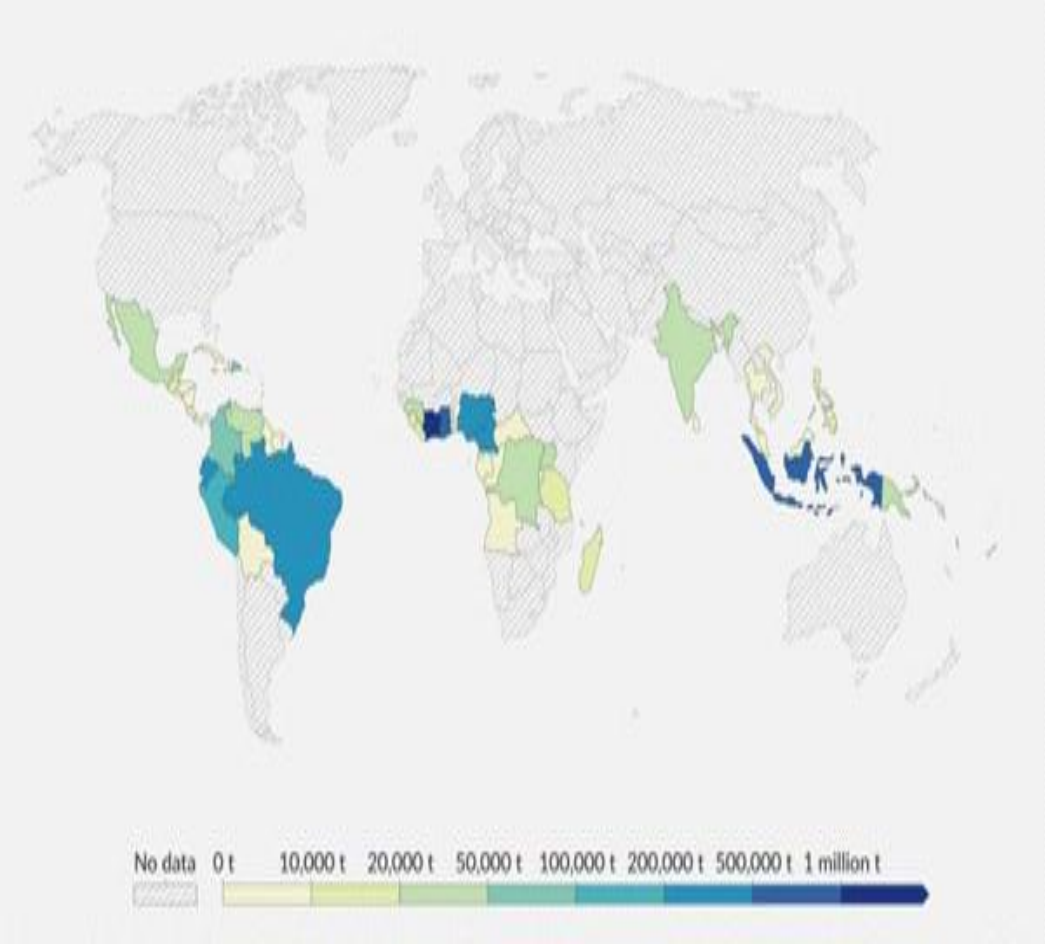


Figure 02 : Pays producteurs de cacao en 2023 **(FAO, 2023).**

2.2. Composition chimique de Cacao

La composition chimique des fèves de cacao varie selon l'origine botanique, les conditions de culture ainsi que les procédés de fermentation et de séchage.

Tableau 01 : Composition chimique des fèves de cacao avant et après fermentation **(Afokawa *et al.*, 2013)**

Paramètre	Fèves non fermentées (%)	Fèves fermentées (%)
Eau	4.2%	4.0%
Protéines	21.6%	18.8%
Lipides	55.2%	53.4%
Glucides	15.5%	21.0%

Tableau 02 : Composition chimique de la pulpe de cacao **(Dias *et al.*, 2003 ; Schwan et Wheals, 2004)**

Composant	Teneur (%)
Eau	6-7
Sucres totaux	10-15
Glucides	24.4-43.4
Pectine	1-1.5
Acide citrique	1-3
Polyphénols	5-6
Matière grasse (beurre de cacao)	50-57
Théobromine	4.7-11.6 mg/g
Cendre	5.5
Fibre brute	19.5

2.3. Rôle du cacao et propriétés biologiques

Sur le plan technologique et sensoriel, les propriétés du cacao déterminent la qualité finale du chocolat. Ses caractéristiques aromatiques, regroupant près de 600 composés volatils, résultent de la formation de précurseurs lors de la fermentation et du séchage, suivis des réactions de Maillard et des dégradations de Strecker au cours de la torréfaction **(Aprotosoaie *et al.*, 2015).**

Parallèlement, la couleur brune caractéristique du chocolat se développe par oxydation enzymatique des polyphénols (via la polyphénol oxydase) et par leurs interactions avec les protéines durant la transformation, atténuant ainsi la pigmentation violette initiale des fèves fraîches **(Barišić *et al.*, 2019).**

Enfin, la texture, la dureté, la brillance et le cassant du chocolat dépendent directement de la composition en triglycérides du beurre de cacao et de l'organisation de son réseau cristallin à température ambiante 20 à 25°C **(Afoakwa *et al.*, 2007).**

Sur le plan physiologique, les composés bioactifs du cacao notamment les flavanols, la théobromine et la caféine offrent d'importants bénéfices métaboliques, cardiovasculaires et systémiques. En stimulant la synthèse de monoxyde d'azote, ces molécules favorisent la vasodilatation, améliorent la circulation sanguine et réduisent la pression artérielle. Le cacao participe également à la régulation lipidique, diminue le risque de thrombose et améliore la sensibilité à l'insuline, contribuant ainsi à la prévention du diabète de type 2 **(Visioli & Galli, 2009).**

Au niveau systémique, le cacao influence positivement l'axe intestin-cerveau et les fonctions cognitives. Il fournit des précurseurs de la sérotonine impliqués dans la régulation de l'humeur, du sommeil et de la satiété, tandis que sa teneur en fer biodisponible prévient les états anémiques. Dans la sphère digestive, ses polyphénols agissent comme des prébiotiques en stimulant la microflore intestinale bénéfique. Enfin, l'action synergique de ses antioxydants neutralise les espèces réactives de l'oxygène, réduisant le stress oxydatif cellulaire et l'inflammation systémique, ce qui ralentit la sénescence prématurée et limite l'incidence des pathologies chroniques **(Visioli & Galli, 2009).**

2.4. Contraintes liées à la production de cacao

La production cacaoyère est soumise à un ensemble de contraintes complexes d'ordre phytosanitaire, agronomique, technique et socio-économique, qui influencent négativement sa

productivité et sa durabilité. Sur le plan phytosanitaire, les cultures de cacao sont fortement exposées aux attaques de bioagresseurs, notamment les mirides (*Sahlbergella singularis*) et les foreurs de tiges, entraînant des dommages structuraux aux plants et une diminution significative des rendements. Par ailleurs, les maladies fongiques, en particulier la pourriture brune des cabosses causée par *Phytophthora* spp., constituent un facteur limitant majeur de la production.

Du point de vue agronomique, l'accès restreint aux intrants agricoles (pesticides, fertilisants et matériel végétal amélioré) réduit l'efficacité des itinéraires techniques. Cette contrainte est davantage accentuée dans les systèmes de production biologique, où les alternatives phytosanitaires sont limitées. En outre, les insuffisances en matière de formation technique, d'encadrement agricole et d'adoption de pratiques culturales améliorées contribuent à maintenir de faibles niveaux de productivité.

Les facteurs climatiques, tels que les variations de la pluviométrie, l'augmentation des températures et les épisodes de stress hydrique, affectent également la croissance et le développement des cacaoyers. Enfin, les contraintes économiques, notamment la volatilité des prix sur le marché international et les difficultés d'accès aux circuits de commercialisation, limitent les revenus des producteurs et freinent les investissements dans l'amélioration des systèmes de production **(ANKOU, 2023).**

Le cacao peut être considéré comme un élément essentiel dans la fabrication du chocolat, en raison des propriétés sensorielles et nutritionnelles distinctives qu'il lui confère. Cependant, ce lien soulève des interrogations dans un contexte marqué par les transformations du secteur, notamment en ce qui concerne la disponibilité de la matière première et sa stabilité.

Dans ce contexte, la recherche d'alternatives naturelles au cacao suscite un intérêt croissant. Des matières premières telles que la caroube *(Ceratonia siliqua),* et jujubier *Ziziphus spina-christi* apparaissent comme des substituts potentiels en raison de leurs propriétés nutritionnelles, technologiques et sensorielles.

Toutefois, leur incorporation dans les formulations chocolatées soulève plusieurs interrogations relatives à leur impact sur la qualité physicochimique, sensorielle et fonctionnelle des produits finis. Ainsi, la partie suivante a pour objectif de présenter des généralités sur ces deux plantes, en mettant en évidence leurs caractéristiques botaniques, leur composition chimique, leurs propriétés technologiques ainsi que leurs principales applications alimentaires et fonctionnelles.

3. Généralités sur la caroube

La caroube est le fruit du caroubier, dont le nom scientifique est *Ceratonia siliqua*, un arbre caractéristique de la région méditerranéenne **(FAO, 1997).** Elle se présente sous la forme d'une gousse allongée de couleur brune, renfermant des graines très dures **(FAO, 1997)** et appartient à la famille des légumineuses (Fabacées), de l'ordre des Rosales et de la sous-famille des Césalpiniacées. C'est un arbre à croissance lente, dont la longévité dépasse souvent 200 ans (figure 3) **(Batlle *et al.*, 1997 ; Rejeb *et al.*, 1995).**



Figure 03 : Photos illustrant le *caroubier.*

3.1. Description botanique

Le caroubier est considéré comme une espèce végétale d'une grande importance, ayant suscité un intérêt taxonomique important en raison de sa diversité et de son histoire évolutive au sein de la région du bassin méditerranéen.

- **Règne :** Plantae ;
- **Division :** Magnoliophyta (Angiospermes) ;
- **Classe :** Magnoliopsida (Dicotylédones) ;
- **Ordre :** Fabales ;
- **Famille :** Fabaceae (Leguminosae) ;
- **Sous-famille :** Caesalpinioideae ;
- **Genre :** *Ceratonia L ;*
- **Espèce :** *Ceratonia siliqua L*. **(Dahmani *et al.*, 2023).**

Le caroubier est un arbre vivace et résistant à la sécheresse, capable de produire sur une longue période allant de 100 à 150 ans. Il présente une couronne large, étalée et arrondie,

ainsi qu'un tronc épais, fortement fissuré et tortueux, rappelant celui de l'olivier. Cette morphologie s'explique par sa croissance lente et sa longévité remarquable, pouvant atteindre jusqu'à 500 ans.

La base du tronc peut mesurer entre 2 et 3 mètres de circonférence et 7 à 20 mètres de haut. Cette espèce ligneuse possède une écorce lisse et grise lorsqu'elle est jeune, qui devient progressivement brune et rugueuse avec l'âge. Son bois est d'abord jaune blanchâtre, puis prend une teinte rosée veinée avant de devenir rouge foncé et très dur à maturité. Le caroubier développe également un système racinaire pivotant très profond, pouvant atteindre jusqu'à 18 mètres, ce qui lui permet de mieux résister aux conditions de sécheresse **(Dahmani *et al*.,2023).**

Les feuilles du caroubier sont persistantes et relativement grandes, mesurant entre 10 et 20 cm de longueur. Elles sont composées et paripennées, formées généralement de 4 à 8 folioles, pouvant parfois être plus nombreuses dans de rares cas. Ces folioles présentent une forme ovale, à bord entier et une texture coriace. Leur face supérieure est lisse et de couleur vert foncé, tandis que la face inférieure est plus claire, ce qui reflète une adaptation fonctionnelle de ces feuilles aux conditions environnementales arides

Le fruit du caroubier appelé Caroube se présente sous forme de gousse indéhiscente, allongée et comprimée, pouvant être droite ou courbée, et présentant un épaississement au niveau de la suture. Sa longueur varie entre 10 et 30 cm, tandis que sa largeur est comprise entre 1,5 et 3,5 cm, avec une épaisseur d'environ 1 cm et un apex obtus ou subaigu. À maturité, les gousses prennent une couleur brune et présentent une surface ridée et coriace.

La pulpe est constituée de deux couches principales : une couche externe dure appelée péricarpe et une couche interne plus tendre appelée mésocarpe. Les graines sont disposées latéralement à l'intérieur de la gousse et séparées par le mésocarpe. Leur nombre varie généralement entre 4 et 15 graines. Elles sont homogènes, lisses, brillantes, de couleur brune et de forme ovale allongée. Elles mesurent environ 8 à 10 mm de longueur, 7 à 8 mm de largeur et 3 à 5 mm d'épaisseur. En raison de leur dureté, elles sont difficiles à casser ou à examiner **(Dahmani *et al.*, 2023).**



Figure 04 : Gousses et graines de 12 populations de Ceratonia siliqua en Algérie **(Smaili et al., 2024).**

3.2. Répartition géographique du caroubier

La distribution a été progressive compte tenu de son exigence climatique, cette espèce s'adapte à un climat doux typiquement méditerranéen comme l'Australie, la Californie, l'Afrique du sud ainsi l'Amérique du sud.

3.2.1. Dans le monde

Le caroubier pousse en Turquie, à Chypre, en Syrie, Liban, sud de la Jordanie, Égypte, Arabie, Tunisie et Libye avant d'atteindre l'ouest Méditerranéen **(Hillcoat et *al.*, 1980).** Il a été propagé par les Grecs en Grèce et en Italie, et par les Arabes sur la côte nord Afrique, sud et est de l'Espagne (figure 5). Depuis, il est diffusé dans le sud du Portugal, dans le sud-est de la France. La caroube est également cultivée dans plusieurs autres pays, zones climatiques et

régions méditerranéennes telles que l'Australie, l'Afrique du Sud, les États-Unis (en particulier l'Arizona et Californie du Sud), les Philippines et l'Iran **(Bertrand, 2013).**

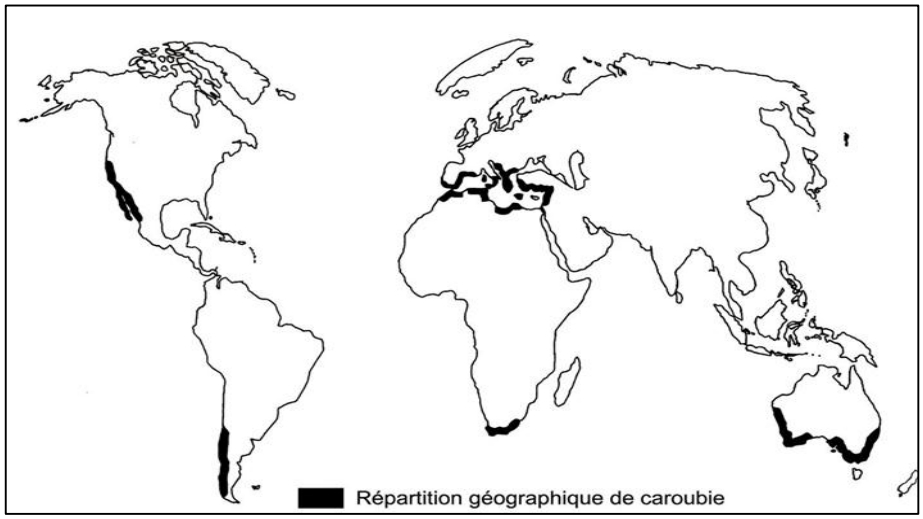


Figure 05 : Répartition mondiale du caroubier et centres d'origine **(Batlle *et al.*, 1997).**

3.2.2. En Algérie

En Algérie, la caroube est souvent cultivée dans l'Atlas saharien, On le retrouve à l'état naturel associé à l'amandier, *Olea Européa* et *Pistacia Atlantica* dans les régions semi-arides chaudes, sub-humides et humides, Il est protégé du gel dans les vallées fraîches à des altitudes comprises entre 100 et 1300 mètres, Les températures varient de 5°C à 20°C et les précipitations varient de 80mm à 600mm/an **(Rebour, 1968).** Sur la base de ces critères climatiques, l'aire de répartition du caroubier a été déterminée en Algérie comme montre la figure 06.

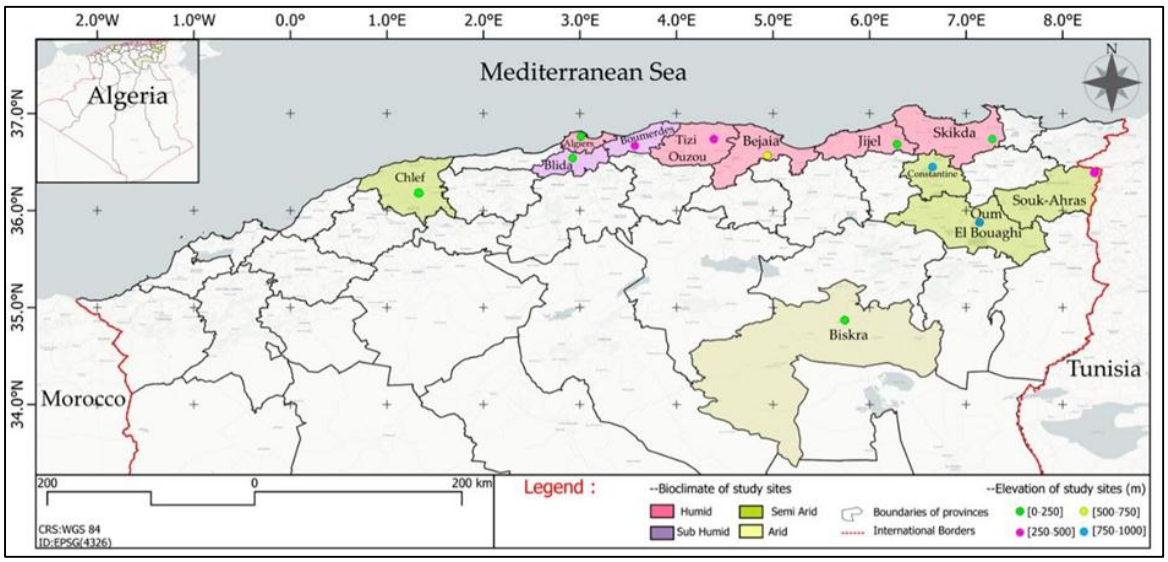


Figure 06 : Répartition géographique de *Ceratonia* siliqua en Algérie **(Smaili *et al.*, 2024).**

3.3. Composition chimique de la caroube

La caroube se présente sous forme de gousses fermées, mesurant entre 10 et 30 cm de longueur et plusieurs centimètres de largeur. À maturité, ces gousses changent de couleur et deviennent brunes. Elles sont constituées principalement de deux fractions la pulpe qui représente environ 90 % du poids total et les graines qui en constituent près de 10 % **(Haddarah *et al.*, 2013).** La composition chimique de la pulpe varie en fonction de plusieurs facteurs notamment la variété du climat, des méthodes de culture, de l'origine et de la période de récolte **(Albanell et *al.*, 1991 ; Petit *et al.*, 1995).**

Tableau 03 : Composition chimique de la caroube **(Biner *et al.*, 2007).**

La pulpe 90%	**La graine 10%**
Glucides 40%-60%	L'enveloppe tégumentaire (cuticule) 30-33%
Protéines 3%-4%	
Matières grasses 0.5-0.7%	
Fibre 25%-50%	
Cellulose et hémicellulose 18 %	L'endosperme (albumen) 42-46 %
Minéraux (Ca, Na, K, Zn, Fe)	
Pectines et fibres 4.2 à 9.6%	L'embryon (germe) 23-25%
Cendres 1.5-2.4%	
Polyphénols 18% - 20 %	

3.4. Propriétés technologiques

✓ **Pouvoir sucrant et profil glucidique**

La caroube se distingue par un pouvoir sucrant élevé, corrélé à sa forte teneur en glucides totaux, laquelle excède 50 % de sa matière sèche. Ce profil saccharidique est majoritairement dominé par le saccharose, qui représente environ 75 % ou plus de la fraction glucidique globale, conférant ainsi à la caroube des propriétés d'édulcorant naturel **(Yousif & Alghzawi, 2000).** Par ailleurs, sur le plan organoleptique, la poudre de caroube présente des caractéristiques aromatiques et gustatives analogues à celles du cacao. Cette similitude

biochimique et sensorielle en fait un substitut de choix dans les formulations de produits de substitution au chocolat **(Akdeniz *et al.*, 2021).**

✓ **Absence d'alcaloïdes (caféine et de théobromine)**

Contrairement au cacao, la caroube présente l'avantage technologique et nutritionnel d'être totalement dépourvue de caféine et de théobromine. Ces deux molécules, appartenant à la famille des méthylxanthines, peuvent exercer des effets physiologiques indésirables ou être considérées comme des facteurs antinutritionnels lorsqu'elles sont ingérées en quantités élevées. Cette absence d'alcaloïdes confère à la caroube une valeur ajoutée significative pour le développement d'aliments fonctionnels ou hypoallergéniques **(Yousif & Alghzawi, 2000).**

3.5. Utilisation en substitut du *cacao*

Dans le cadre de l'étude de la substitution du cacao par la poudre de caroube, plusieurs recherches ont été menées afin d'évaluer la faisabilité technologique et l'impact sur les qualités sensorielles et physico-chimiques des produits. **(Akdeniz *et al.* 2021)** ont étudié l'incorporation de la caroube dans le chocolat au lait et le chocolat noir à différents taux de substitution allant jusqu'à 40 %, en analysant à la fois les propriétés physico-chimiques et l'acceptabilité sensorielle. Les résultats ont montré qu'à des niveaux modérés, la substitution ne provoque pas de différences significatives en termes d'acceptation globale, ce qui confirme la possibilité d'utiliser la caroube comme alternative partielle au cacao. Cependant, une augmentation du taux de substitution entraîne des modifications au niveau du goût, avec une diminution de l'intensité de l'arôme chocolaté et une perception plus sucrée du produit, ainsi que des changements de texture caractérisés par une légère augmentation de la fermeté et une réduction du fondant en bouche.

De son côté, **(Pawłowska *et al.* 2018)** ont évalué l'effet de la caroube dans les muffins en substituant partiellement le cacao par la poudre de caroube£ ; leur étude a montré que cette incorporation modifie les propriétés sensorielles et texturales des produits, notamment en rendant le goût moins amer et plus sucré, ainsi qu'en augmentant la densité du produit et en réduisant son moelleux. Malgré ces modifications, les produits restent globalement acceptables à des niveaux d'incorporation modérés.

3.6. Propriétés biologiques de la caroube

La caroube est reconnue pour ses nombreuses propriétés biologiques liées principalement à sa richesse en composés phénoliques, en fibres alimentaires et en autres

métabolites bioactifs. Ces composés lui confèrent un intérêt croissant dans la prévention de certaines maladies chroniques **(Brassesco *et al.*, 2021).**

La principale propriété de la caroube est son activité antioxydante, attribuée à sa forte teneur en polyphénols capables de neutraliser les radicaux libres et de limiter le stress oxydatif impliqué dans diverses pathologies telles que les maladies cardiovasculaires, métaboliques et neurodégénératives **(Graves, 2012 ; Lushchak, 2014 ; Brassesco *et al.*, 2021).**

La caroube présente également un effet hypoglycémiant potentiel grâce à sa capacité à réduire l'absorption du glucose et à moduler l'activité de certaines enzymes impliquées dans la digestion des glucides. Ses fibres alimentaires contribuent également à ralentir l'absorption des sucres **(Custodio *et al.*, 2015 ; Chait *et al.*, 2020).**

Par ailleurs, plusieurs études rapportent des effets bénéfiques sur la santé digestive, notamment par la protection de la muqueuse gastro-intestinale et la régulation du transit intestinal **(Mudgil et Barak, 2013 ; Rtibi *et al.*, 2017 ; Aboura *et al.*, 2017).**

Enfin, la consommation de caroube pourrait contribuer à l'amélioration du profil lipidique, en réduisant l'oxydation des lipoprotéines de basse densité (LDL) et en participant au maintien de la santé cardiovasculaire **(El-Beshbishy *et al.*, 2006 ; Chan *et al.*, 2013 ; Macho-González *et al.*, 2018 ; Valero-Muñoz *et al.*, 2019)**

4. Généralités sur le *Zizyphus spina-christi*

Ziziphus spina-christi appartenant à la famille des Rhamnacées, est un arbuste épineux ou un arbre à feuilles persistantes, connu sous le nom « épine du Christ » et désigné en arabe par des appellations telles que Nabaq et Sider comme mentionné dans le Coran par conséquent cette espèce est très respectée par les musulmans à travers le Moyen-Orient, Il s'agit d'une espèce indigène largement répandue en Afrique ainsi que dans les régions tropicales et subtropicales du monde. Cette plante se caractérise par une croissance lente et peut se développer soit de manière isolée, soit en peuplements purs, atteignant 3 à 8 m de hauteur et 50 à 60 cm de diamètre du tronc. Elle présente un port arrondi, des rameaux tortueux, des brindilles fines verdâtres souvent épineuses et une écorce fissurée **(Bâa *et al.*, 2001).**

Ses feuilles sont simples, alternes, trinervées, courtement pétiolées, de forme ovale avec des bords finement dentés, vert clair sur la face supérieure et vert pâle sur la face

inférieure. Les rameaux portent de petites fleurs jaunes disposées en cymes. Le fruit est une drupe charnue ovoïde ressemblant à une olive, d'abord jaune puis rouge à maturité (figure 7) sa pulpe est sucrée, gélatineuse et de saveur douce **(Akhter *et al*., 2013).**



Figure 07 : Fruit du Ziziphus spina-christi après la récolte.

4.1. Répartition géographique

4.1.1. À l'échelle mondiale

Le *Ziziphus spina-christi* est une espèce largement adaptée aux climats arides et semi-arides, où les températures élevées favorisent sa floraison et sa fructification **(Zait *et al*., 2020).** Grâce à sa grande capacité d'adaptation écologique, cette plante peut se développer aussi bien dans les plaines et les régions désertiques que dans les zones montagneuses atteignant des altitudes comprises entre 1550 et 2150 m. Elle est également capable de croître dans des environnements secs comme humides.

La répartition géographique de cette espèce est très étendue, couvrant plusieurs régions du monde telles que la Chine, l'Iran, l'Afrique du Nord et de l'Est, notamment les pays du bassin méditerranéen comme l'Algérie, le Maroc, la Tunisie et la Libye, ainsi que la péninsule arabique et plusieurs pays du Moyen-Orient et d'Asie, dont l'Égypte, la Syrie, la Palestine, le Liban, l'Irak, le sud de l'Iran et de l'Afghanistan, le Pakistan et le nord-ouest de l'Inde.

Elle est également présente dans certaines régions d'Europe, notamment à Chypre, en Espagne, en Grèce et en Sicile **(Moulessehoul et al., 2023 ; Almalki & Alzahrani, 2018)** (Figure 8).

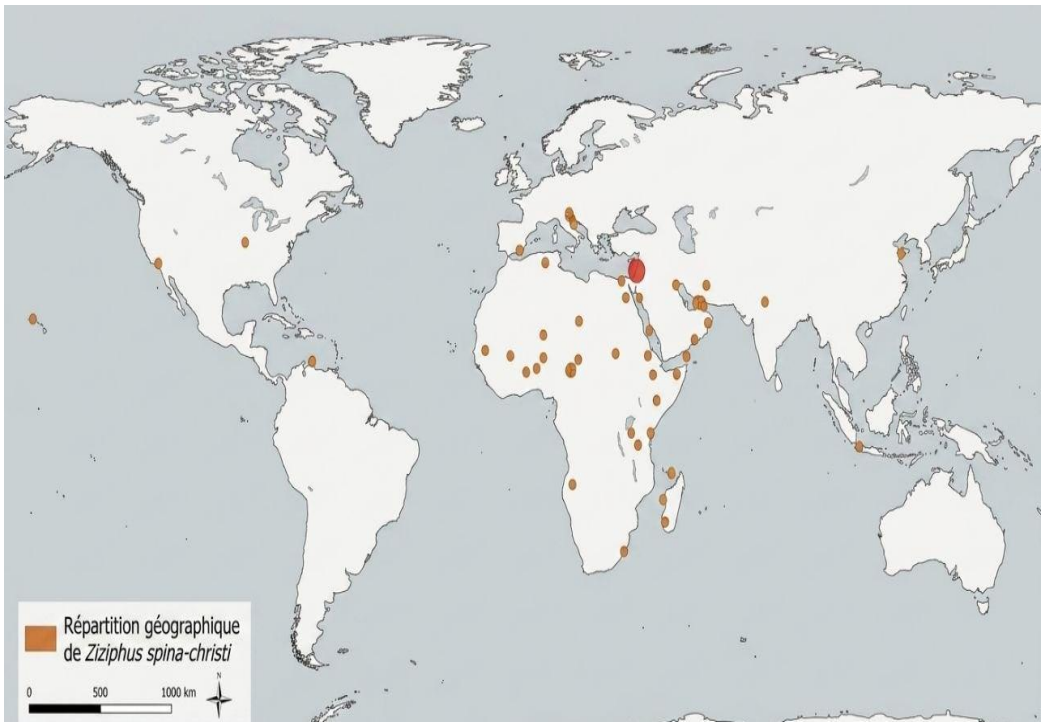


Figure 08 : Distribution mondiale du *Ziziphus spina-christi* (GBIF Secretariat, n.d).

4.1.2. En Algérie

En Algérie, le *Ziziphuse spina-christi* présente une large distribution géographique. Cette espèce est répandue sur la quasi-totalité du territoire national, à l'exception de la région du Tell algéro-constantinois.

Elle est particulièrement abondante dans les hauts plateaux steppiques, notamment au niveau des dayas, ainsi que dans l'Atlas saharien, s'étendant jusqu'au Sahara septentrional, où elle est observée à Taghit (wilaya de Béchar) **(Moulessehoul *et al.*, 2023).** Dans la région d'Oranie, sa présence peut atteindre des zones proches du littoral.

4.2. Description botanique

Le Ziziphus spina-christi appartient à la famille des Rhamnaceae. Sa classification taxonomique est la suivante :

- **Classification Règne :** Plante ;
- **Embranchement :** Streptophyta ;
- **Classe :** Equisetopsida ;
- **Sous-classe :** Magnoliidae ;
- **Ordre :** Rosales ;
- **Famille :** Rhamnaceae ;

- **Genre :** *Ziziphus* Mill ;
- **Espèce :** *Ziziphus spina-christi* **(Almalki *et* Alzahrani, 2018).**

Le tronc de *Ziziphus spina-christi* peut atteindre jusqu'à 45 cm de diamètre. Son écorce est de couleur brun blanchâtre à gris pâle et présente de profondes fissures. La couronne est arrondie ou en forme de parasol, avec des branches denses et largement étalées dont les extrémités sont souvent retombantes. Les rameaux portent des épines par paires, l'une droite et dirigée vers l'avant pouvant atteindre 8 mm de longueur, l'autre plus courte et légèrement recourbée.

Les feuilles sont simples, alternes, de forme étroitement ovale à lancéolée. Elles mesurent entre 1 et 9 cm de longueur et entre 1 et 3,5 cm de largeur. La face supérieure est glabre, tandis que la face inférieure est finement et densément pubescente. Les feuilles présentent trois nervures basales bien marquées qui s'étendent jusqu'à l'apex et sont portées par un pétiole de 0,5 à 1 cm de longueur.

Les fleurs sont petites, de couleur jaune verdâtre et dégagent un parfum agréable. Elles sont regroupées en grappes denses à l'aisselle des feuilles. Chaque fleur possède cinq sépales d'environ 2 mm de long, cinq pétales d'environ 1,5 mm de long et cinq étamines opposées aux pétales. L'ovaire est biloculaire et le style, court, se divise en deux lobes à son extrémité.

Le fruit est une drupe globuleuse de couleur brun rougeâtre, mesurant environ 1 à 1,5 cm de diamètre. Il renferme un noyau dur entouré d'une pulpe sucrée et comestible. La fructification s'étend généralement d'octobre à avril **(Saied *et al*., 2008).**

4.3. Composition chimique et nutritionnelle de *Ziziphus spina-christi*

Le fruit de *Ziziphus spina-christi* se caractérise par une forte teneur en glucides, atteignant environ 90,94 %, composés principalement de saccharose (27,19 %), de glucose (18,45 %), de sucres réducteurs (9,72 %) et d'amidon (16,61 %).

Il constitue également une source importante de fibres alimentaires, contribuant à l'amélioration de la digestion. Par ailleurs, ce fruit est riche en composés bioactifs, notamment les composés phénoliques totaux (46,62 mg/g) et les flavonoïdes (165,68 mg/100 g), ce qui lui confère une activité antioxydante notable (IC50 = 13,88 mg/ml ; inhibition du radical DPPH = 36,02 %) **(Hachem *et* Abdellahout, 2021).**

4.4. Usage traditionnels

En alimentation Les fruits du *Ziziphus spina-christi* constituent un aliment traditionnel

important dans les régions arides, où ils sont consommés frais ou séchés. Les fruits ont une saveur sucrée et leur pulpe, après séchage et broyage, est transformée en une farine fine utilisée dans la préparation d'aliments locaux.

Cette farine est parfois cuite à la vapeur pour former une pâte compacte consommée directement, ou mélangée avec de l'eau et du sésame afin de produire des boules alimentaires qui peuvent être consommées immédiatement ou conservées. Dans certaines régions, les fruits sont broyés avec leurs graines pour obtenir une substance alimentaire consommée crue ou cuite avec de l'eau, du lait ou du babeurre.

De manière générale, les fruits représentent une importante source d'énergie et de nutrition, surtout dans les zones désertiques où les ressources alimentaires sont limitées **(Saied *et al*., 2008).**

En médecine *Ziziphus spina-christi* est largement utilisé en médecine traditionnelle en raison de la richesse de ses propriétés thérapeutiques variées. Ses fruits sont employés pour traiter les troubles digestifs tels que la diarrhée, ainsi que les affections respiratoires et les douleurs thoraciques, et ils sont également considérés comme un tonique général pouvant exercer un effet sédatif. Les feuilles et les jeunes branches sont utilisées dans le traitement de diverses inflammations, notamment les douleurs dentaires, les troubles gastriques, les affections rhumatismales et les inflammations oculaires, que ce soit par application locale ou sous forme de décoctions.

L'écorce est utilisée pour soulager les spasmes intestinaux et pour la désinfection des plaies, tandis que les racines et les cendres sont employées dans le traitement des céphalées et des morsures de serpent. Les décoctions de feuilles sont appliquées sur les blessures superficielles et utilisées pour atténuer certains troubles digestifs, et dans certains cas elles servent à stimuler les contractions utérines lors de travaux d'accouchement prolongés. En outre, différentes parties de la plante sont également utilisées à des fins de soins corporels et cosmétiques, notamment pour adoucir la peau et les cheveux **(Said *et al*., 2008).**

4.5. Propriétés pharmacologiques et bénéfices thérapeutiques de *Ziziphus spina-christi*

Les différentes parties de *Ziziphus spina-christi* suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés nutritionnelles et de leurs effets biologiques potentiels. Cette espèce est particulièrement riche en composés bioactifs tels que les flavonoïdes, les polyphénols, les caroténoïdes, les saponines ainsi que diverses substances antioxydantes, lui conférant

plusieurs activités pharmacologiques et physiologiques bénéfiques **(Abdulrahman *et al*., 2022 ; El Maaiden *et al*., 2020).**

Sur le plan métabolique et cardiovasculaire, *Z. spina-christi* présente des effets antidiabétiques prometteurs grâce à sa capacité à inhiber les enzymes α-amylase et α-glucosidase, contribuant ainsi à la réduction de l'hyperglycémie postprandiale et à l'amélioration de l'homéostasie glucidique. Ces propriétés suggèrent un potentiel préventif dans la prise en charge du diabète de type 2 **(Abdulrahman *et al*., 2022).**

Par ailleurs, la richesse de cette espèce en flavonoïdes, polyphénols et autres antioxydants lui confère une activité immunomodulatrice, anti-inflammatoire et hépatoprotectrice. Plusieurs études ont montré que les extraits de *Z. spina-christi* protègent les cellules hépatiques contre le stress oxydatif et contribuent au maintien de l'intégrité fonctionnelle du foie **(El Maaiden *et al*., 2020 ; Abdulrahman *et al*., 2022).**

Au niveau digestif, la plante est traditionnellement utilisée pour le traitement de divers troubles gastro-intestinaux, notamment la constipation et certaines affections intestinales, en favorisant le transit et l'élimination des déchets métaboliques **(Wali *et al*., 2022 ; Abdulrahman *et al*., 2022).** En application topique, les extraits des feuilles et des fruits présentent des propriétés antimicrobiennes, cicatrisantes et anti-inflammatoires favorisant la régénération cutanée. Ils sont traditionnellement employés dans le traitement de diverses affections dermatologiques telles que les plaies, les infections cutanées et l'eczéma **(Abdulrahman *et al*., 2022 ; Wali *et al*., 2022).**

Enfin, plusieurs travaux ont mis en évidence des activités anticancéreuses potentielles associées à certains composés phénoliques, notamment la quercétine et ses dérivés flavonoïques. Ces molécules exercent des effets cytotoxiques et antiprolifératifs sur différentes lignées cellulaires tumorales, bien que des études cliniques complémentaires soient encore nécessaires pour confirmer leur efficacité thérapeutique chez l'Homme **(Abdulrahman *et al*., 2022 ; El Maaiden *et al*., 2020).**

Chapitre 2
Matériel et méthodes

Le présent travail expérimental a été réalisé au sein des laboratoires du département d'Agronomie de l'Université du 20 Août 1955 de Skikda.

Nous rappelons que cette étude vise à évaluer la faisabilité technologique et sensorielle de la substitution partielle ou totale du cacao par des poudres de caroube (*Ceratonia siliqua* L.) et de nabq (*Ziziphus spina-christi*) dans la formulation du chocolat.

Pour atteindre cet objectif, le travail expérimental a été structuré en plusieurs étapes :

1) Préparation des poudres de caroube et de nabaq destinées à être utilisées comme matières premières dans les formulations des chocolats ;

2) Caractérisation physicochimique des poudres obtenues ;

3) Élaboration de différentes formulations de chocolat comportant des taux variables de substitution du cacao par les poudres de caroube et de nabaq ;

4) Évaluation sensorielle des chocolats élaborés à travers l'étude de leur acceptabilité globale et de leurs principales caractéristiques organoleptiques (couleur, arôme, texture et goût).

1. Matière première végétale

Les matières premières utilisées dans le cadre de ce travail sont constituées de gousses de caroube (*Ceratonia siliqua* L.) et de fruits mûrs de nabaq (*Ziziphus spina-christi*), deux ressources végétales traditionnellement destinées à la consommation humaine et largement valorisées pour leurs propriétés nutritionnelles et fonctionnelles.

Les fruits de nabaq ont été collectés au mois d'octobre dans la région de SFISFA, relevant de la commune d'Emjez Ed chiche (Algérie), tandis que les gousses de caroube ont été acquises au mois de novembre 2025 auprès du marché local « Achab », situé dans la région de Sidi Mezghiche, wilaya de Skikda.

Les matières premières sélectionnées correspondaient à un stade de maturité avancé, compatible avec les usages alimentaires et les applications technologiques décrites dans la littérature.

2. Préparation de poudre de caroube

2.1. Préparation de la poudre de caroube (*Ceratonia siliqua L.*)

2.1.1. Nettoyage

Les gousses ont été soigneusement débarrassés des déchets par un tri manuel et lavée

par l'eau potable jusqu'à ce qu'elle soit bien nettoyée.



Figure 09 : Gousses de caroube avant le nettoyage (Cliché original).

2.1.2. Séchage

Les gousses nettoyées ont été déposées sur une plaque et séchées à température ambiante pendant 24 heures, puis dans un four à air chaud à 55 °C en les remuant régulièrement pour assurer le séchage complet des gousses

2.1.3. Broyage

Après le séchage, les échantillons ont été laissés à refroidir, puis découpés en petits morceaux. Les graines ont été retirées manuellement afin d'être éliminées (seule la pulpe a été conservée). La matière végétale a ensuite été broyée à l'aide d'un mixeur électrique afin d'obtenir une poudre fine.

2.1.4. Tamisage

La poudre a été tamisée à l'aide d'un tamis en acier inoxydable de 200 µm pour contrôler la granulométrie.



Figure 10 : Tamisage de la poudre de caroube (Cliché original).

2.1.5. Stockage

La poudre fine obtenue (figure 12) est stockée dans des récipients en plastique bien fermées protégés de la lumière et de l'humidité à température ambiante, en attendant leur analyse physicochimique.

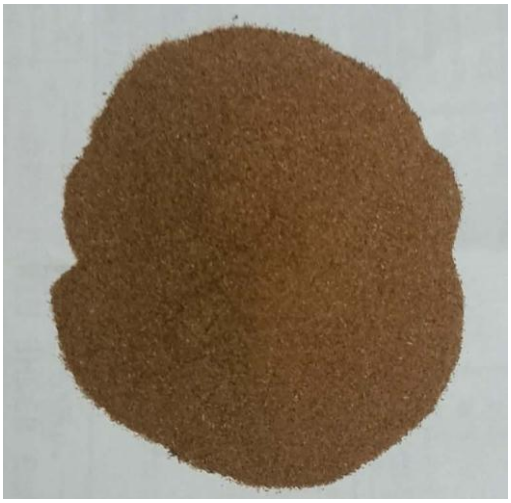


Figure 11 : Poudre fine de caroube (Cliché original).

2.2. Préparation de la poudre de nabaq (*Ziziphus spina-christi*)

2.2.1. Nettoyage

Les fruits de nabq ont été soigneusement lavés à l'eau potable afin d'éliminer les fruits abimés, les impuretés, la poussière et tout résidu éventuel avant le séchage.



Figure 12 : Fruits de nabaq avant le nettoyage (Cliché original).

2.2.2. Séchage

Après le nettoyage, les fruits sont d'abord séchés à l'air puis dans un four à température contrôlée 55 °C en les remuant continuellement pendant 5mim afin de réduire

leur teneur en eau et de faciliter leur transformation en poudre.

2.2.3. Broyage

Le broyage est effectué à l'aide d'un mixeur électrique, afin d'obtenir une poudre pas complètement fine.

2.2.4. Tamisage

La poudre a été tamisée à l'aide d'un tamis en acier inoxydable de 200 µm pour contrôler la granulométrie



Figure 13 : Tamisage de la poudre de nabaq (Cliché original).

2.2.5. Stockage

La poudre fine obtenu figure 15 est stockée dans des récipients en plastique bien fermées, protégés de la lumière et de l'humidité à température ambiante, en attendant leur analyse physicochimique.



Figure 14 : Poudre fine de nabaq (Cliché original).

3. Analyses physico-chimiques des poudres

3.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

La détermination du pH a été effectuée selon la méthode standard AACC 02-52.01 **(AACC, 2000)** à l'aide d'un pH-mètre.

✓ **Mode opératoire**

Une quantité de 5 g de chaque échantillon a été mise en contact avec un volume de 50 ml d'eau distillée tiède. Le mélange a été soigneusement agité à l'aide d'un agitateur magnétique pour assurer une homogénéisation complète. La solution obtenue a ensuite été soumise à une filtration pour éliminer les éventuelles particules insolubles présentes par la suite le pH de la solution a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné (De marque *inoLab*). La valeur du pH a été relevée directement sur l'affichage de l'appareil.

3.2. Taux d'humidité

L'humidité des échantillons a été déterminée selon la méthode de dessiccation par étuvage **(AOAC, 2005).**

✓ **Mode opératoire**

Une prise d'essai de 5 g de chaque échantillon est placée dans un creuset préalablement taré, puis soumise à un séchage dans une étuve ventilée (Memmert, Allemagne) à 105 °C jusqu'à obtention d'un poids constant. Après séchage, les creusets sont refroidis dans un dessiccateur afin d'éviter toute reprise d'humidité, puis pesés. L'ensemble des analyses a été réalisé en triplicata. Le pourcentage d'humidité (**H%**) de chaque échantillon est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\boldsymbol{H\%} = \frac{(\boldsymbol{m1}-\boldsymbol{m2})}{\boldsymbol{m}} \times \mathbf{100}$$

- **H**% : Taux d'humidité en (%) ;
- **m1** : Masse de l'échantillon et de la boite de pétri (avant le séchage) en (g) ;
- **m2** : Masse de l'échantillon et de la boite de pétri (après le séchage) en (g) ;
- **m** : Masse de l'échantillon en (g).

A partir de taux d'humidité on détermine le taux de la matière sèche qui est donné par la formule suivante :

$$\boldsymbol{Taux\ de\ mati\grave{e}re\ s\grave{e}che}(\%) = \mathbf{100} - \boldsymbol{Taux\ d'humidit\acute{e}}(\%)$$

3.3. Taux de cendres

Les cendres sont déterminées par incinération du produit dans un four à moufle électrique à 550°C, jusqu'à obtention d'un résidu blanchâtre de poids constant **(Boussaid *et al.*, 2020).**

✓ **Mode opératoire**

Une masse de **5 g** de chaque échantillon est précisément pesée dans des creusets préalablement tarés, puis introduite dans un four à moufle (*Thermo Scientific – Thermolyse*) réglé à **550 °C**. L'incinération est maintenue jusqu'à l'obtention d'un résidu inorganique constant, de couleur blanche ou blanc grisâtre, signe d'une combustion réussie.

À la sortie du four, les creusets sont transférés dans un dessiccateur afin de refroidir à température ambiante à l'abri de l'humidité, puis pesés avec précision. Chaque détermination a été effectuée en triplicata, afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats.

✓ **Expression des résultats**

Le taux de cendres totales (TC%**)**, exprimé en pourcentage de matière sèche, est calculé selon la relation suivante :

$$\boldsymbol{TC\% = \frac{(m2 - m0)}{m1} \times 100}$$

- **TC** : Taux de cendre en (%) ;
- $\mathbf{m_0}$: La masse du creuset vide en (g) ;
- $\mathbf{m_1}$: La masse de l'échantillon avant incinération en (g) ;
- $\mathbf{m_2}$: La masse de creuset et l'échantillon après incinération en (g).

3.4. Acidité titrable

Conformément à la norme (NF V05-101, 1974) l'acidité titrable est déterminée en titrant une solution aqueuse avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), en présence de phénolphtaléine comme indicateur coloré

✓ **Mode opératoire**

Une quantité de 0,5g de chaque échantillon a été placée dans une fiole jaugée contenant déjà 50 mL d'eau distillé. Le mélange a été agité vigoureusement jusqu'à obtention d'un liquide homogène. Ensuite, le mélange a été chauffé pendant 30 min puis filtrée. Un volume de 10 mL de la solution filtrée a été prélevé à l'aide d'une pipette et déposé dans un bécher à ce bécher un volume de 10 mL d'eau distillée bouillie a été ajouté. 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine ont été incorporées à la solution pour servir d'indicateur coloré. La titration a

été réalisée en ajoutant progressivement une solution de NaOH (0,1 N) tout en agitant jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante.

✓ **Expression des résultats**

L'acidité titrable a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\textbf{Acidité titrabl}\ (\%) = \frac{\boldsymbol{V_1 \times N_{NaOH} \times 0.07 \times V_{extraction} \times 100}}{\boldsymbol{M \times V_0}}$$

Où :

- $\boldsymbol{V_1}$ **:** Volume consommé du NaOH en mL ;
- $\boldsymbol{N_{NaOH}}$ **:** Concentration de la solution de NaOH (0,1N) ;
- **0,07 :** Facteur de conservation de l'acidité titrable en équivalent d'acide citrique ;
- $\boldsymbol{V_{extraction}}$ **:** 50 mL ;
- $\boldsymbol{V_0}$ **:** Volume en millilitre de prise d'essai ;
- $\boldsymbol{M}$ **:** Masse en gramme du produit prélevé.

3.5. Détermination de la teneur en sucres totaux (ST)

La teneur en sucres totaux est déterminée selon la méthode colorimétrique décrite par **(Dubois *et al.* 1956).**

✓ **Principe**

Cette méthode repose sur la déshydratation des oses sous l'action de l'acide sulfurique concentré à chaud, entraînant la formation d'hydroxyméthylfurfural (HMF) à partir des hexoses et de furfural à partir des pentoses. Ces composés réagissent ensuite avec le phénol pour former des complexes colorés de teinte jaune-orangé. L'intensité de la coloration obtenue est proportionnelle à la concentration en sucres présents dans l'échantillon. La lecture de l'absorbance est réalisée à une longueur d'onde de 490 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

✓ **Mode opératoire**

Le dosage a été réalisé selon les étapes suivantes :

- Prélever 1 mL de chaque extrait et l'introduire dans un tube à essai ;
- Ajouter 0,25 mL de solution de phénol à 5 % ;

- Ajouter ensuite 1,5 mL d'acide sulfurique concentré à l'aide d'une micropipette ;
- Homogénéiser le mélange par une agitation douce ;
- Placer les tubes dans un bain-marie préchauffé à 60 °C ;
- Incuber pendant 40 minutes afin de permettre le développement de la coloration jaune-rouge caractéristique ;
- Retirer les tubes du bain-marie et les laisser refroidir à température ambiante ;
- Mesurer l'absorbance des échantillons à 490 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

La teneur en sucres totaux a été déterminée à partir de la courbe d'étalonnage du glucose établie à différentes concentrations (Annexe 01). Les concentrations obtenues ont ensuite été converties et exprimées en grammes pour 100 grammes de matière sèche (g/100 g MS), correspondant au pourcentage (%) de matière sèche.

✓ **Préparation de la gamme étalon**

La quantification est effectuée par report des absorbances sur une courbe d'étalonnage réalisée avec du glucose pur.

La gamme étalon a été préparée à partir d'une solution mère de glucose à 0,5 g/L (25mg/50 mL d'eau distillée), diluée pour obtenir différentes concentrations de référence (Tableau 05).

Tableau 04 : Gamme étalon de glucose pour le dosage des sucres totaux.

Tubes	**blanc**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Solution de glucose (ml)	0	0.4	0.8	1	1.2	1.6	2
Eau distillée (ml)	10	9.6	9.2	9	8.8	8.4	8
Concentration	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1

- Prélever 0.5 ml de chaque dilution er versez-le dans le tube à essai vide ;
- Ajouter 0.5 ml de phénol de 5% ;
- Ajouter 2.5 ml d'acide sulfurique concentré (96%) ;
- Agiter vigoureusement les tubes et maintenez-les à 100°C pendant 5 min ;
- Incuber pendant 30 min à l'abri de la lumière et à T° ambiante ;
- Lire l'absorbance à 490 nm.

3.6. Détermination des sucres réducteurs

La teneur en sucres réducteurs des poudres de caroube et de nabaq a été déterminée selon la méthode colorimétrique de Miller (1959), utilisant l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS) comme réactif.

✓ **Principe**

Cette méthode repose sur la capacité des sucres réducteurs (glucose, fructose, maltose, etc.) à réduire, en milieu alcalin et sous l'effet de la chaleur, le DNS de couleur jaune en acide 3-amino-5-nitrosalicylique de couleur brun-orangé. L'intensité de la coloration développée est directement proportionnelle à la concentration en sucres réducteurs présents dans l'échantillon. L'absorbance a été mesurée à 540 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, puis la concentration en sucres réducteurs a été déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage réalisée avec une solution standard de glucose.

✓ **Mode opératoire**

1) Préparation des extraits de caroube et nabaq

Dans des béchers 2 g de chaque poudre ont été mélangés pour chaque échantillon avec 100 ml d'eau distillée. Le mélange est chauffé sur une plaque chauffante en agitant pendant 40 min à une température de 60°C. Une filtration préalable est réalisée à l'aide d'une passoire et du coton.

2) Dosage colorimétrique des sucres réducteurs

Dans un tube à essai, un volume de 1mL d'extrait est mélangé à 1mL de réactif DNS. Après homogénéisation, les tubes sont placés au bain-marie bouillant marie à 100°C, pendant 10 min afin de développer la réaction colorée. Après refroidissement rapide à température ambiante, l'absorbance est lue à 540 nm contre un blanc de gamme (eau distillée + DNS).

La concentration en sucres réducteurs a été déterminée à partir de la courbe d'étalonnage du glucose établie à différentes concentrations (Annexe 02).

Les concentrations obtenues ont ensuite été converties et exprimées en grammes pour 100 grammes de matière sèche (g/100 g MS), correspondant au pourcentage (%) de matière sèche.

3) Préparation de la courbe d'étalonnage et expression des résultats

La gamme d'étalonnage a été préparée à partir d'une solution mère de glucose à 2 g/L. Les concentrations de glucose utilisées sont résumées dans le tableau 06.

Tableau 05 : Gamme étalon de glucose pour le dosage des sucres réducteurs.

Tubes	**Blanc**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Solution mère de glucose (mL)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Eau distillée (mL)	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
Volume DNS mL	1					
Chauffage au bain marie 100°C pendant 10min						
Refroidissement à l'eau courante						
Lecture de l'absorbance à 530nm						

4. Détermination des propriétés antioxydantes

4.1. Extraction

L'extraction des composés polyphénoliques libres et conjugués à partir des poudres caroube et nabaq a été réalisée par macération hydro-alcoolique, selon le protocole décrit par **(Barros et al. 2010).**

De ce fait, une masse de 10 g de chaque poudre, préalablement séchées et finement broyées, a été mise en contact avec 100 mL de solvant préparé (éthanol/eau : 80 :20). Le mélange a été incubé pendant 24 heures à l'obscurité et à température ambiante, avec une agitation initiale de 2 heures afin d'assurer une homogénéisation efficace et de favoriser la solubilisation des composés phénoliques.

À l'issue de la macération, l'extrait a été centrifugé pendant 15 minutes, puis le surnageant a été filtré à l'aide d'un papier filtre afin d'éliminer les résidus solides. Les extraits éthanoliques obtenus ont été utilisés directement, sans évaporation préalable du solvant, pour le dosage des composés phénoliques totaux, des flavonoïdes et pour l'évaluation de l'activité antioxydante par le test DPPH. Avant analyse, l'extrait brut a été dilué de manière appropriée afin de rester dans la zone de linéarité des méthodes spectrophotométries employées. Les résultats ont été exprimés par rapport à la matière sèche initiale, en tenant compte du volume total d'extraction et des facteurs de dilution.

Les extraits ont été conservés à 4 °C, à l'abri de la lumière, et analysés dans un délai court afin de limiter toute dégradation oxydative.

4.2. Dosage des polyphénols totaux

La teneur en polyphénols totaux est habituellement déterminée avec le spectrophotomètre UV-Vis grâce à la méthode de Folin-Ciocalteu décrite par Singleton et Rossi (1965). Brièvement, 0,3 mL de chaque extrait sont ajoutés à 1,5 mL de réactif de Folin-Ciocalteu 10 fois dilué. Les solutions sont mélangées et incubées pendant 4 minutes. Après l'incubation, 1,2 mL de la solution de carbonate de sodium Na_2CO_3 (7,5 %) sont ajoutés. Le mélange final est secoué et puis incubé pendant 2 heures dans l'obscurité à température ambiante. L'absorbance de tous les extraits est mesurée par un spectrophotomètre à 765 nm. Une courbe d'étalonnage a été réalisée en parallèle dans les mêmes conditions opératoires en utilisant l'acide gallique à différentes concentrations (15,62–200 µg/ml) (Annexe 03).

Toutes les mesures ont été effectuées en triplicate. La concentration des polyphénols est calculée à partir de la droite d'étalonnage établie avec l'acide gallique. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalents d'acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG/g MS).

4.3. Dosage des flavonoïdes totaux

Les flavonoïdes donnent avec le chlorure d'aluminium des complexes chromogènes de couleur jaune, coloration dont l'intensité est mesurable à un spectrophotomètre à UV 430 nm **(Donzo *et al.*, 2015).** La teneur en flavonoïdes totaux est déterminée par une méthode colorimétrique décrite par (Serra *et al.*, 2001). La procédure consiste à mélanger 1 ml de chlorure d'aluminium ($AlCl_3$ à 2%) avec 1 ml d'extrait. Après 15 mn d'incubation à l'abri de la lumière, l'absorbance est mesurée à 430 nm. Les résultats ont été exprimés en mg équivalent de quercitrine par gramme de matière sèche (mg EQ/g ms.).

4.4. Détermination de l'activité antioxydante par le test DPPH

L'évaluation de la capacité antioxydante des extraits éthanoliques de poudres de caroube et de nabaq a été réalisée par le test de DPPH.

✓ **Principe**

Le composé chimique 2, 2diphényl-1- picrylhydrazyl (α, α-diphényle-β-picrylhydrazyle) fut l'un des premiers radicaux libres utilisé pour étudier la relation structure-activité antioxydant des composés phénoliques. Du fait que ce composé possède un électron non apparié sur un atome du pont d'azote, les molécules du radical ne forme pas des dimères il reste donc sous sa forme monomère relativement stable à température ambiante.

C'est cette délocalisation qui provoque la coloration violette foncé bien caractéristique de la solution de DPPH. Mesurer la diminution de la coloration de DPPH permet de mesurer l'efficacité d'un antioxydant, due à une recombinaison des radicaux DPPH qui possède une absorbance maximum à 517 nm.

Concernant les composés phénoliques, le mécanisme principal d'action est le piégeage des radicaux libres par transfert de l'atome H sur le DPPH° alors transformé en une molécule stable DPPH **(Popovici *et al.*, 2010).** Les résultats peuvent être exprimés en tant qu'activité anti-radicalaire ou en pourcentage d'inhibition des radicaux libres

✓ **Mode opératoire**

- **Préparation de la solution DPPH :** Dissoudre 4mg de DPPH dans 100mL éthanol (couvrir la solution avec l'aluminium)
- Ajouter 100 µL d'extrait d'échantillon, puis mélanger avec 2 mL de solution de DPPH à 0,1 mm (faire 3 répétitions), Agiter pendant 10 secondes, puis conserver à l'obscurité à température ambiante pendant 30 minutes ;
- Mesurer l'absorbance à 517 nm au spectrophotomètre contre un blanc contenant uniquement le solvant (2mL éthanol) ;
- Pour l'échantillon contrôle Utiliser 2ml solution de DPPH et 100µL éthanol à la place de l'extrait et enregistrer l'absorbance comme blanc ;

✓ **Expression des résultats**

Le pourcentage d'inhibition ou Activité de piégeage (AP%) a été calculé selon la formule :

$$\text{Activité de piégeage } = \frac{\text{Abs}_{\text{blanc}} - \text{Abs}_{\text{ echantillon}}}{\text{Abs}_{\text{blanc}}} \times 100$$

Où :

- **Abs blanc :** absorbance du blanc (DPPH dans l'éthanol) ;
- **Abs échantillon :** absorbance de l'échantillon.

5. Formulation des chocolats

Cette partie du travail est consacrée à la formulation de chocolats substitués, en utilisant les poudres de caroube (*Ceratonia siliqua* L.) et de nabaq (*Ziziphus spina-christi*)

comme alternatives partielles ou totales à la poudre de cacao. À cet effet, six formulations différentes ont été élaborées en faisant varier les proportions de ces matières premières afin d'évaluer leur aptitude technologique et leur influence sur les caractéristiques du produit final. Les compositions détaillées des différentes formulations sont présentées dans le Tableau 07.

Tableau 06 : Formulations expérimentales des variantes de chocolat (% m/m).

Ingrédients (% m/m)	**T0 (Témoin)**	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**
Poudres (Substitution)						
Poudre de cacao	100	70	50	0	0	0
Poudre de nabq	0	15	25	50	100	0
Poudre de caroube	0	15	25	50	0	100
Taux de substitution du cacao(%)	0	30	50	100	100	100
Matière grasse et sucres						
Beurre de cacao	25	25	25	25	25	25
Sucre en poudre	25	20	20	20	20	20
Lait en poudre entier	10	10	10	10	10	10
Additifs						
Lécithine de soja	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Vanilline	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

La préparation des échantillons de chocolat a été réalisée selon un procédé de fabrication simplifié. Dans un premier temps, le beurre de cacao a été fondu à une température de 45 °C, puis la lécithine de soja a été incorporée afin d'améliorer les propriétés

émulsifiantes et l'homogénéité du mélange. Les ingrédients solides, à savoir la poudre de cacao ou les mélanges de poudre de caroube (*Ceratonia siliqua* L.) et de nabaq (*Ziziphus spina-christi*), selon les proportions définies dans le Tableau 07, ainsi que le sucre et le lait en poudre, ont ensuite été ajoutés progressivement sous agitation continue.

Le mélange obtenu a été homogénéisé à l'aide d'un mixeur à haute vitesse pendant 10 à 20 minutes jusqu'à l'obtention d'une pâte chocolatée lisse et homogène. Après homogénéisation, un tempérage simplifié a été appliqué par refroidissement de la masse chocolatée à 28 °C, suivi d'un réchauffement contrôlé à 31–32 °C, afin de favoriser la formation de cristaux stables du beurre de cacao et d'améliorer les caractéristiques de texture et d'aspect du produit final.

La masse chocolatée a ensuite été coulée dans des moules propres et secs, puis laissée à solidifier pendant 24 heures à température ambiante. Après solidification complète, les échantillons ont été démoulés et conservés à l'abri de la lumière, de la chaleur et de l'humidité jusqu'aux différentes analyses. Les principales étapes de préparation des chocolats sont présentées dans la Figure 16.

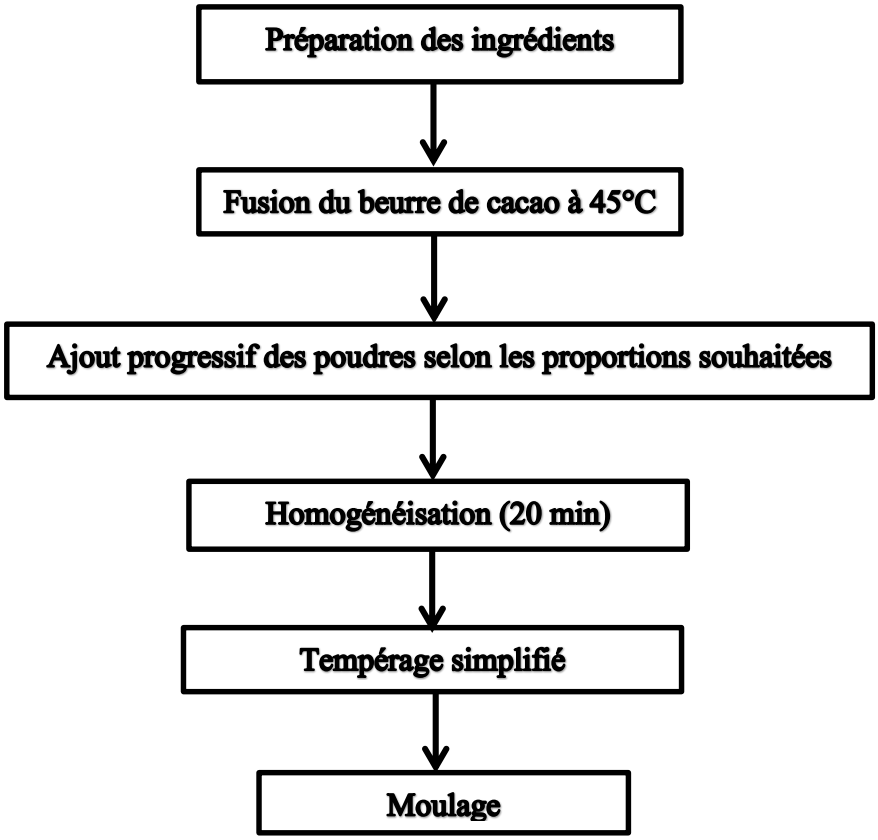


Figure 15 : Diagramme de préparation des formulations des chocolats.

À l'issue de ces différentes étapes de préparation, les différentes formulations de chocolat ont été obtenues. Elles sont présentées dans la Figure 16.



Figure 16 : Formulations des chocolats (Cliché original).

6. Analyse sensorielle

L'évaluation sensorielle des différentes formulations de chocolat a été réalisée selon la méthodologie décrite par **(Watts et al. 1991),** à l'aide d'un test hédonique permettant de mesurer le degré d'acceptabilité des produits par les consommateurs. Cette approche est largement utilisée dans les études d'évaluation sensorielle des aliments **(Mudgil *et al.*, 2017).**

6.1. Objectif de l'analyse sensorielle

L'objectif de cette analyse était d'évaluer l'impact de la substitution du cacao par les poudres de caroube (*Ceratonia siliqua* L.) et de nabaq (*Ziziphus spina-christi*) sur les caractéristiques organoleptiques des chocolats, ainsi que d'identifier la formulation présentant la meilleure acceptabilité globale.

6.2. Déroulement du test hédonique

L'étude a porté sur six formulations de chocolat codées de T0 à T5, dont un échantillon témoin (T0) élaboré à base de cacao et cinq formulations contenant différentes proportions de poudre de caroube et/ou de nabaq T0 (100 % cacao, témoin), T1 (70 % cacao ; 15% nabaq et 15% caroube), T2 (50 % cacao + 25 % nabaq + 25 % caroube), T3 (50 % caroube + 50 % nabaq), T4 (100% nabaq) et T5 (100% caroube). Les échantillons ont été

présentés sous forme codée et dans un ordre aléatoire afin de limiter les biais liés à l'identification des produits.

L'évaluation sensorielle a été réalisée par un jury composé de 30 dégustateurs non entraînés, principalement des étudiants du Département des Sciences Agronomiques de l'Université du 20 Août 1955 de Skikda, âgés de 18 à 25 ans. Avant la dégustation, les participants ont reçu des explications sur les critères d'évaluation afin d'harmoniser leur compréhension des attributs sensoriels étudiés.

Les séances de dégustation ont été réalisées dans une salle calme et bien éclairée. Chaque dégustateur était installé individuellement afin de garantir l'indépendance des jugements. Les échantillons ont été servis à température ambiante et accompagnés d'un morceau du pain et un verre d'eau pour le rinçage du palais entre les dégustations.

Les dégustateurs ont évalué plusieurs attributs sensoriels regroupés en quatre catégories : les attributs visuels (couleur, brillance et homogénéité), les attributs olfactifs (intensité aromatique, arômes de cacao, de caroube et de nabaq), les attributs gustatifs (goût global, équilibre sucré/amer, persistance aromatique et arrière-goût) ainsi que les attributs de texture (fermeté, onctuosité et caractère fondant). Une appréciation globale du produit, ainsi que l'intention d'achat, ont également été recueillies.

Chaque critère a été noté à l'aide d'une échelle hédonique à neuf points, allant de 1 («je n'aime extrêmement pas ») à 9 (« j'aime extrêmement »), la note 5 correspondant à une appréciation neutre.

En complément, un test de préférence par classement a été effectué afin de déterminer l'ordre de préférence des différentes formulations et d'identifier les chocolats les plus appréciés par les dégustateurs (Annexe 04).

Les résultats ont été exprimés sous forme de moyenne ± écart-type. Les données ont ensuite été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur, suivie du test de comparaison multiple de Tukey, à l'aide du logiciel XLSTAT 2026 (Addinsoft). Les différences ont été considérées comme statistiquement significatives pour une valeur de $p < 0,05$.

7. Analyse statistique

Toutes les manipulations expérimentales ont été réalisées en triplicat (n = 3), et les valeurs sont exprimées sous la forme de moyenne ± écart-type. Le traitement préliminaire, la

centralisation des données et le calcul des écarts-types ont été effectués à l'aide du logiciel Microsoft Excel (version 2013).

L'analyse statistique descriptive a été exécutée à l'aide du logiciel XLSTAT (version 2026.28.1.0, Addinsoft). Selon l'objectif et la nature des variables, deux outils statistiques distincts ont été appliqués :

- **Pour les analyses physicochimiques :** La comparaison des résultats entre les deux matrices d'étude (poudre de caroube et poudre de nabaq) a été réalisée en appliquant le test t de Student pour échantillons indépendants.
- **Pour l'évaluation sensorielle :** Les scores hédoniques attribués aux différentes formulations de chocolat (T0 à T5) ont été soumis à une analyse de variance à un facteur (ANOVA), suivie du test de comparaison multiple de Tukey (HSD) afin d'identifier et d'isoler les moyennes significativement distinctes.

Pour l'ensemble des analyses, le seuil de significativité a été fixé à $p < 0,05$. Dans les différents tableaux et figures de ce manuscrit, les moyennes portant des lettres minuscules différentes (a, b, c, etc.) sont considérées comme statistiquement différentes au seuil de 5 %, tandis que les valeurs partageant au moins une lettre commune ne présentent aucune différence significative.

Chapitre 3
Résultats et discussion

La réussite d'une substitution du cacao par des ressources végétales alternatives repose en grande partie sur les caractéristiques physicochimiques et fonctionnelles des matières premières utilisées. Dans cette optique, les poudres de nabaq (*Ziziphus spina-christi*) et de caroube (*Ceratonia siliqua*) ont été soumises à une série d'analyses visant à déterminer leurs propriétés physicochimiques, nutritionnelles et antioxydantes.

L'étude de paramètres tels que l'humidité, le pH, l'acidité, les cendres, les sucres, les composés phénoliques et l'activité antioxydante permet d'évaluer leur potentiel technologique et leur aptitude à remplacer partiellement ou totalement la poudre de cacao dans les formulations chocolatées. Les résultats obtenus sont présentés et discutés ci-après en relation avec les exigences de qualité des produits chocolatés et les données de la littérature.

1. Caractéristiques physicochimiques des poudres de nabaq et de caroube

Les caractéristiques physicochimiques des poudres de nabaq et de caroube obtenues au cours de cette étude sont regroupées dans le tableau 08.

Tableau 07 : Caractéristiques physicochimiques des poudres de caroube et de nabaq.

	Taux d'humidité (%)	**pH**	**Taux de cendres (%)**	**Acidité titrable (%)**	**Taux de matière sèche (%)**
Caroube	7.89±0.24[a]	5.32 [a]	3.49±0.41 [a]	2.1 [a]	92.33±0.56 [a]
Nabaq	5.78±0.035[b]	5.40 [b]	2.39±0.007 [b]	1.4 [b]	94.21±0.035[b]

Les moyennes suivies de lettres différentes dans une même ligne sont significativement différentes ($p \leq 0,05$).

Les résultats présentés dans le tableau 8 révèlent des différences entre les poudres de caroube et de nabaq pour l'ensemble des paramètres physicochimiques étudiés.

1.1. Taux d'humidité

La détermination de l'humidité est un paramètre important pour la conservation des aliments, plus l'échantillon est moins humide plus sa durée de conservation est prolongée **(Ergun *et al.*, 2010).** Les résultats présentés dans le tableau 8 montrent que la poudre de caroube présente une teneur en humidité plus élevée (7,89 ± 0,24 %) que celle de la poudre de nabaq (5,78 ± 0,04 %). Cette différence se traduit logiquement par une teneur en matière sèche plus faible dans la caroube (92,33 ± 0,56 %) que dans le nabaq (94,21 ± 0,04 %).

La plus forte humidité observée dans la poudre de caroube pourrait être attribuée à sa richesse en fibres alimentaires et en polysaccharides, composés hydrophiles capables de retenir davantage d'eau au sein de la matrice végétale.

Ce comportement est conforme aux observations **(d'Einhorn-Stoll 2018),** qui souligne que les polysaccharides et les fibres alimentaires possèdent une capacité élevée de liaison à l'eau, influençant ainsi les propriétés de rétention hydrique des matrices alimentaires. Par ailleurs, la composition biochimique des matières premières constitue un facteur déterminant de leur teneur en eau et de leur stabilité au stockage.

Selon **(Fellows 2009),** une augmentation de l'humidité favorise les réactions enzymatiques et le développement microbien, tandis qu'une faible teneur en eau contribue à améliorer la stabilité et la conservation des produits alimentaires.

La teneur en humidité obtenue pour la poudre de caroube est légèrement inférieure à celle rapportée par **(Yousif et Alghzawi 2000),** qui ont enregistré une valeur d'environ 9 % dans la poudre de caroube torréfiée.

En revanche, elle demeure supérieure aux valeurs comprises entre 5,13 et 6,35 % observées par **(Boublenza et al. 2019)** sur différentes variées algériennes de caroube. Ces différences peuvent être attribuées aux conditions de séchage, au degré de torréfaction, aux conditions de stockage, ainsi qu'aux variations des conditions environnementales et à la répartition géographique des échantillons **(Ruiz-Rodriguez *et al.*, 2011).**

Concernant le nabaq, la teneur en humidité mesurée (5,78 ± 0,04 %) est nettement inférieure à celle rapportée par **(Hassan et al. 2025),** qui ont obtenu une valeur de 16,23 % dans une poudre déshydratée de *Ziziphus spina-christi*. Cette faible teneur en eau témoigne d'une bonne stabilité du produit et suggère une moindre susceptibilité aux altérations microbiologiques.

Des observations similaires ont été rapportées par **(Yelwa et al. 2021),** qui ont montré que les poudres végétales à faible humidité présentent une meilleure stabilité durant le stockage grâce à la limitation de la croissance microbienne et des réactions de dégradation.

Dans l'ensemble, les faibles teneurs en humidité enregistrées pour les deux poudres constituent un avantage technologique majeur pour leur utilisation dans les formulations chocolatées.

En effet, la réduction de la teneur en eau limite les phénomènes de dégradation

microbiologique et ralentit plusieurs réactions d'altération physicochimique susceptibles d'affecter la qualité des poudres au cours du stockage. Par conséquent, ces caractéristiques favorisent une meilleure conservation des matières premières et contribuent à maintenir la stabilité et la qualité des produits finis **(Ueda *et al.*, 2023).**

1.2. pH

Le pH constitue un paramètre physicochimique fondamental dans l'évaluation de la qualité des produits alimentaires. Il correspond à une mesure logarithmique de l'activité des ions hydrogène (H^+) en solution aqueuse et permet d'exprimer le degré d'acidité ou de basicité d'un milieu **(Sørensen, 1909 ; Atkins et de Paula, 2014).** Ce paramètre influence directement la stabilité microbiologique, les réactions biochimiques, la conservation ainsi que les propriétés organoleptiques des aliments.

Les résultats présentés dans le tableau 8 montrent que les deux poudres étudiées présentent des valeurs de pH relativement proches, avec un pH de 5,32 pour la caroube et de 5,40 pour le nabaq. Ces valeurs traduisent un caractère légèrement acide des deux matières premières, susceptible de contribuer favorablement à leur stabilité microbiologique et à certaines caractéristiques sensorielles des produits finis.

Pour la poudre de caroube, le pH mesuré est de 5,32, indiquant une acidité modérée. Cette valeur est légèrement inférieure à celles rapportées dans la littérature, où des pH compris entre 5,8 et 6,1 ont généralement été observés. Ainsi**, (Yousif et Alghzawi 2000)** ont rapporté un pH voisin de 5,9, tandis que **(Dakia et al. 2007)** ont enregistré des valeurs proches de 6,0.

Ces écarts peuvent être attribués à plusieurs facteurs, notamment l'origine géographique des gousses, le stade de maturité des fruits, les conditions environnementales, les procédés de transformation ainsi que les modalités de stockage.

Le caractère légèrement acide de la caroube est principalement lié à la présence d'acides organiques naturels, notamment l'acide malique et l'acide citrique, qui participent également à son profil sensoriel.

D'une manière générale, le pH de la caroube reste moins acide que celui du cacao, ce qui favorise son utilisation comme substitut dans certaines formulations alimentaires. Cette propriété contribue également à améliorer l'acceptabilité sensorielle des produits à base de caroube.

Le pH de la poudre de nabaq a été mesuré à 5,40, indiquant un caractère légèrement acide. Cette valeur est cohérente avec les données de la littérature, qui rapportent généralement des pH compris entre 5,0 et 6,0 pour les fruits *de Ziziphus spina-christi* selon la variété, le stade de maturité et les conditions de stockage **(Mohammed et Ahmed, 2014).** En revanche, **(Hassan et al. 2025)** ont obtenu un pH plus faible (4,13) dans une poudre déshydratée de nabaq, tandis que **(Hashem et Abd El-Lahot 2014)** ont rapporté un pH de 3,95 pour la pulpe déshydratée du fruit. Les écarts observés entre les études peuvent être attribués à l'origine géographique des fruits, aux conditions de séchage, au degré de maturité ainsi qu'aux méthodes analytiques employée.

La comparaison des deux poudres montre que la caroube présente un pH légèrement inférieur à celui du nabaq, traduisant une acidité légèrement plus marquée. Cette différence peut être liée à des variations de composition en acides organiques, en sucres et en autres constituants bioactifs. Néanmoins, les valeurs obtenues demeurent proches de celles rapportées dans la littérature pour ces deux matières premières **(Yousif et Alghzawi, 2000 ; Mohammed et Ahmed, 2014).**

D’un point de vue technologique, ces pH faiblement acides sont favorables à la conservation des poudres en limitant partiellement le développement microbien et en contribuant à la stabilité physicochimique des formulations.

Ils peuvent également influencer positivement les propriétés organoleptiques des produits chocolatés élaborés à partir de la caroube et du nabaq.

1.3. Acidité titrable.

L’acidité titrable représente également un paramètre important dans l’évaluation de la qualité des produits alimentaires, car elle reflète la teneur en acides organiques présents dans l’échantillon.

Ce paramètre influence les propriétés sensorielles, notamment la saveur, ainsi que la stabilité et la conservation du produit.

D’après les résultats présentés dans le tableau 8, l’acidité titrable obtenue pour la poudre de caroube est de 2,1 %. Cette valeur est nettement supérieure à celle rapportée par **(Cavdarova *et al*.2014),** qui ont enregistré des valeurs très faibles estimées à AT1 = 0,0011 % et AT2 = 0,0015 %.

Cette différence pourrait s’expliquer par la richesse de notre échantillon en composés

acides, notamment les acides organiques et les composés phénoliques, responsables du caractère acide de la poudre de caroube. Par ailleurs, les variations observées entre les résultats peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, tels que les différences variétales, les conditions environnementales, le degré de maturité des gousses, ainsi que les méthodes de préparation, de séchage et de stockage des échantillons.

Concernant la poudre de nabaq, l'acidité titrable mesurée est de 1,4 %, traduisant la présence d'acides organiques naturels qui contribuent aux propriétés organoleptiques, à la stabilité et à la conservation du produit. Cette valeur est proche de celles rapportées par **(Alghamdi et al. 2020)** et **(Hashem et Abd El-Lahot 2021),** qui ont respectivement observé des acidités titrables d'environ 1,32 % et 1,15 % pour les fruits de *Ziziphus spina-christi*.

Cette similitude suggère une composition relativement comparable en composés acides. Les légères variations observées entre les études peuvent être attribuées au degré de maturité des fruits, aux conditions climatiques de culture ainsi qu'aux méthodes de séchage et de préparation des échantillons.

Dans l'ensemble, l'acidité plus élevée de la poudre de caroube par rapport à celle du nabaq pourrait avoir des répercussions technologiques et sensorielles intéressantes dans les formulations chocolatées. En effet, elle est susceptible de contribuer au développement des notes aromatiques et gustatives du produit final tout en favorisant sa stabilité au cours du stockage.

1.4. Taux de cendres

La teneur en cendres constitue un indicateur de la fraction minérale totale d'un aliment après élimination complète de la matière organique par calcination **(AOAC, 2016).** Ce paramètre est couramment utilisé pour évaluer la richesse d'un produit en éléments minéraux essentiels et son intérêt nutritionnel.

Les résultats présentés dans le tableau 8 montrent que la poudre de caroube (*Ceratonia siliqua*) possède une teneur en cendres de 3,49 ± 0,41 %, supérieure à celle de la poudre de nabaq (*Ziziphus spina-christi*), qui est de 2,39 ± 0,007 %. Cette valeur relativement élevée pour la caroube confirme sa richesse en matières minérales, déjà mise en évidence par **(Boublenza et al. 2019).**

Cette caractéristique est généralement attribuée à sa forte capacité d'accumulation de minéraux tels que le calcium, le potassium et le phosphore, ce qui confère à la caroube un

intérêt nutritionnel et technologique important dans les formulations alimentaires destinées à l'enrichissement minéral.

Concernant la poudre de nabaq, la teneur en cendres obtenue (2,39 ± 0,007 %) révèle également une contribution appréciable en éléments minéraux. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celles rapportées pour d'autres espèces du genre *Ziziphus*. Ainsi, **(Abdeddaim *et al*. 2014)** ont mis en évidence une teneur notable en matières minérales chez *Ziziphus lotus*, tandis que **(Hashem et Abd El-Lahot 2021)** ont rapporté une teneur en cendres totales de 3,89 ± 0,12 % dans la pulpe de fruits de *Ziziphus spina-christi*.

La différence observée avec notre résultat peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment la variété étudiée, le degré de maturité des fruits, les conditions de séchage, la partie du fruit analysée ainsi que les conditions pédoclimatiques de culture.

La présence de minéraux essentiels tels que le potassium, le calcium, le magnésium et le fer, fréquemment identifiés dans les fruits du jujubier, pourrait expliquer cette teneur en cendres et renforcer l'intérêt du nabaq comme ingrédient fonctionnel potentiel **(Gao *et al.*, 2013).**

La comparaison des deux poudres montre ainsi que la caroube présente une concentration minérale globale plus élevée que le nabaq. Cette différence peut être liée aux caractéristiques physiologiques propres à chaque espèce, à leur capacité d'absorption et d'accumulation des éléments minéraux, ainsi qu'à des facteurs externes tels que la nature du sol, les conditions climatiques, l'origine géographique des fruits et les procédés technologiques appliqués avant l'analyse **(AOAC, 2016).**

D'un point de vue nutritionnel, ces résultats suggèrent que la caroube constitue une source minérale particulièrement intéressante pour la formulation de produits alimentaires enrichis.

Toutefois, malgré une teneur en cendres plus faible, la poudre de nabaq présente également un potentiel nutritionnel appréciable et pourrait contribuer à l'amélioration de la valeur fonctionnelle des formulations chocolatées grâce à sa composition minérale complémentaire.

2. Évaluation de la fraction glucidique des poudres de nabaq et de caroube

Les glucides constituent l'une des principales composantes des fruits de caroube et de nabaq. Leur quantification permet d'apprécier la valeur nutritionnelle des poudres étudiées

ainsi que leur potentiel technologique dans les formulations chocolatées.

2.1. Sucres totaux

Les résultats relatifs aux teneurs en sucres totaux sont présenté et discutés ci-après.

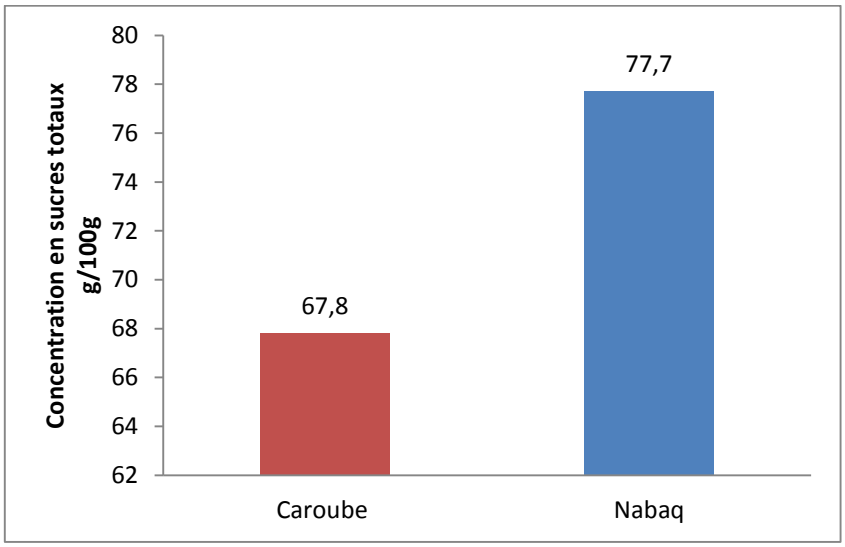


Figure 17 : Teneurs en sucres totaux dans la poudre de caroube et de nabaq.

La caroube (*Ceratonia siliqua*) et le nabaq (*Ziziphus spina-christi*) sont deux matrices fruitières reconnues pour leur densité énergétique, principalement portée par leur richesse en glucides solubles.

Les analyses quantitatives réalisées sur la poudre de caroube ont révélé une teneur en sucres totaux de 67,80 % de matière sèche, confirmant la richesse glucidique de cette matière première. Cette valeur se situe dans l'intervalle rapporté par **(Dikkaya et al. 2020),** qui ont étudié différents génotypes de Ceratonia siliqua et observé une importante variabilité de la teneur en sucres totaux, comprise entre 30,03 % et 81,93 %.

Notre résultat apparaît ainsi relativement élevé, tout en restant conforme aux valeurs décrites dans la littérature. Cette richesse en sucres est principalement attribuée à la forte présence de saccharose, de glucose et de fructose dans la pulpe de caroube, composés responsables de sa saveur naturellement sucrée.

Des teneurs similaires ont également été rapportées par **(Biner et al. 2007),** qui ont enregistré des concentrations en sucres totaux comprises entre 48,0 et 56,5 %, ainsi que par **(Avallone et al. 1997),** qui ont mis en évidence l'accumulation importante des sucres dans la pulpe comparativement aux graines.

Les différences observées entre les études peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, notamment le génotype, les conditions pédoclimatiques, le stade de maturité des gousses, ainsi que les procédés de séchage et de transformation appliqués avant l'analyse **(Dikkaya *et al.*, 2020).** Cette teneur élevée en sucres constitue un avantage technologique majeur dans le cadre de la substitution du cacao, puisqu'elle permet de conférer naturellement une saveur sucrée aux formulations chocolatées tout en réduisant potentiellement l'ajout de sucres exogènes.

Pour la poudre de nabaq, les analyses ont révélé une teneur en sucres totaux de 77,70 g/100 g de matière sèche, légèrement supérieure à celle observée pour la poudre de caroube (67,80 g/100 g).

Cette valeur témoigne de la richesse naturelle du fruit de *Ziziphus spina-christi* en glucides solubles et confirme son caractère fortement énergétique. Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par **(Hashem et Abd El-Lahot 2021),** qui ont enregistré une teneur en sucres totaux de 71,08 % dans la pulpe déshydratée de nabaq.

Toutefois, la valeur obtenue dans la présente étude demeure légèrement plus élevée, ce qui pourrait être attribué aux différences variétales, au degré de maturité des fruits, aux conditions pédoclimatiques ainsi qu'aux procédés de séchage et de transformation appliqués avant l'analyse.

La forte concentration en sucres observée met en évidence le profil biochimique particulièrement glucidique du nabaq, résultant d'une accumulation importante de sucres au cours des dernières phases de maturation du fruit.

Cette richesse en composés glucidiques contribue non seulement à sa saveur naturellement sucrée, mais également à son intérêt potentiel comme substitut naturel du cacao dans les formulations chocolatées, permettant de réduire partiellement l'ajout de sucre tout en préservant l'acceptabilité sensorielle du produit.

Ces résultats sont également cohérents avec les travaux **(d'Abdelmuti 1991)** et de **(Saied et al. 2008),** qui ont montré que les fruits déshydratés de nabaq renferment d'importantes quantités de glucides, notamment 21,8 % d'amidon, 22,6 % de sucres réducteurs totaux, 21,8 % de saccharose, 9,6 % de glucose et 16 % de fructose.

De plus, **(Amoo et Atasie 2012)** ont identifié parmi les principaux sucres présents dans les fruits et les graines de nabaq le glucose (dextrose), le fructose, le maltose et le lactose. L'ensemble de ces données confirme que le nabaq constitue une source naturelle importante

de sucres simples et complexes, ce qui explique les teneurs élevées obtenues dans la présente étude.

Ainsi, la teneur en sucres totaux plus élevée du nabaq par rapport à la caroube suggère que cette poudre pourrait jouer un rôle déterminant dans l'amélioration de la douceur naturelle des formulations chocolatées élaborées dans ce travail, tout en apportant une valeur nutritionnelle intéressante liée à sa richesse en glucides.

2.2. Sucres réducteurs

Les résultats relatifs aux teneurs en en sucres réducteurs sont présentés dans le tableau 08 et discutés ci-après.

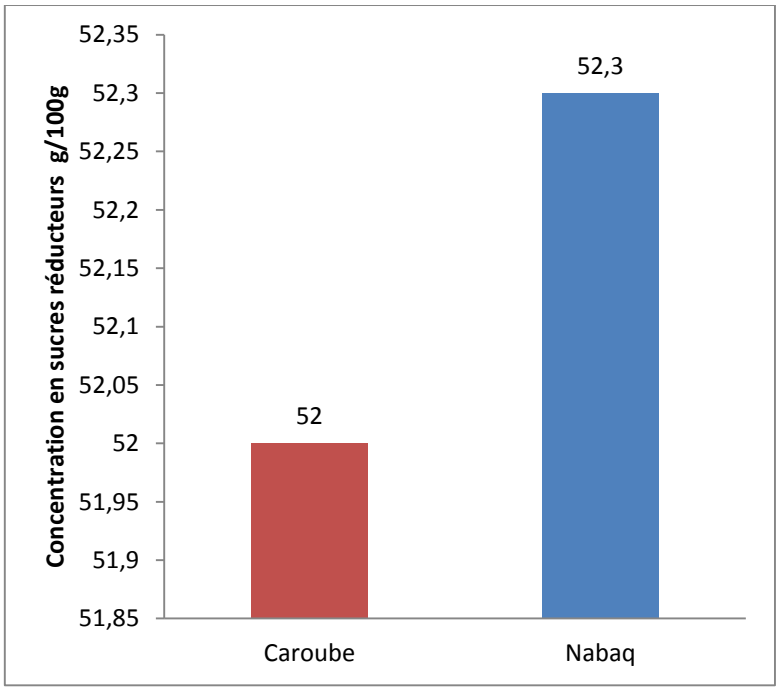


Figure 18 : Teneurs en sucres réducteurs dans la poudre de caroube et de nabaq.

Les sucres réducteurs constituent une fraction majeure des glucides solubles des matrices végétales. Ils participent non seulement à la valeur nutritionnelle des aliments, mais également à la définition de leurs propriétés organoleptiques, notamment via la perception de la saveur sucrée et leur implication dans les réactions de brunissement non enzymatique (réactions de Maillard) lors des traitements thermiques.

Les résultats présentés dans le tableau 08 montrent que les teneurs en sucres réducteurs des poudres de caroube et de nabaq sont respectivement de 52,00 et 52,30 g/100 g de matière sèche. Les deux poudres présentent ainsi des valeurs très proches, indiquant une richesse comparable en sucres simples facilement assimilables.

Concernant la poudre de caroube, la teneur obtenue confirme la composition glucidique caractéristique de ce fruit. **(Yousif et Alghzawi 2000)** ont mis en évidence que les principaux sucres de la caroube sont le saccharose, le glucose et le fructose, représentant une proportion prépondérante de la matière sèche de la pulpe.

La forte proportion de sucres réducteurs observée dans notre étude suggère que la caroube peut contribuer favorablement à la douceur des matrices formulées, tout en participant activement au développement des arômes et de la coloration lors des étapes de cuisson ou de transformation.

Pour la poudre de nabaq, la teneur en sucres réducteurs atteint 52,30 g/100 g, révélant une valeur légèrement supérieure à celle de la caroube. Ce résultat excède la teneur de 43,52% rapportée par **(Hashem et Abd El-Lahot 2021)** pour la pulpe déshydratée de *Ziziphus spina-christi*. Il se situe également bien au-dessus des valeurs avancées par **(Abdelmuti, 1991)** et **(Saied et al. 2008),** qui ont quantifié environ 22,6 % de sucres réducteurs dans des fruits déshydratés.

Cette variabilité quantitative peut être attribuée à des facteurs intrinsèques et extrinsèques tels que le degré de maturité des fruits à la récolte, les conditions pédoclimatiques, les méthodes de séchage et de stockage, ainsi que l'efficacité des techniques analytiques d'extraction. Par ailleurs, les travaux de **(Amoo et Atasie, 2012)** rappellent que le profil du nabaq est dominé par des sucres hautement assimilables (glucose, fructose, maltose), explicitant son profil gustatif naturellement doux.

Bien qu'une légère supériorité numérique soit observée pour le nabaq, l'absence de différence statistiquement marquée suggère que les deux poudres possèdent un potentiel énergétique similaire.

D'un point de vue technologique, cette richesse en sucres réducteurs s'avère particulièrement stratégique dans le cadre de la substitution partielle ou totale du cacao. Elle permet d'exalter la sucrosité naturelle des formulations chocolatées ou biscuitières tout en offrant une opportunité concrète de réduire l'incorporation de sucre raffiné exogène.

3. Évaluation des composés phénoliques, des flavonoïdes et du potentiel antioxydant des poudres de caroube et de nabaq

3.1. Polyphénols totaux

Les résultats de dosage composés phénoliques totaux dans les extraits éthanoliques de

poudres de caroube et nabaq sont présentés dans la figure 19.

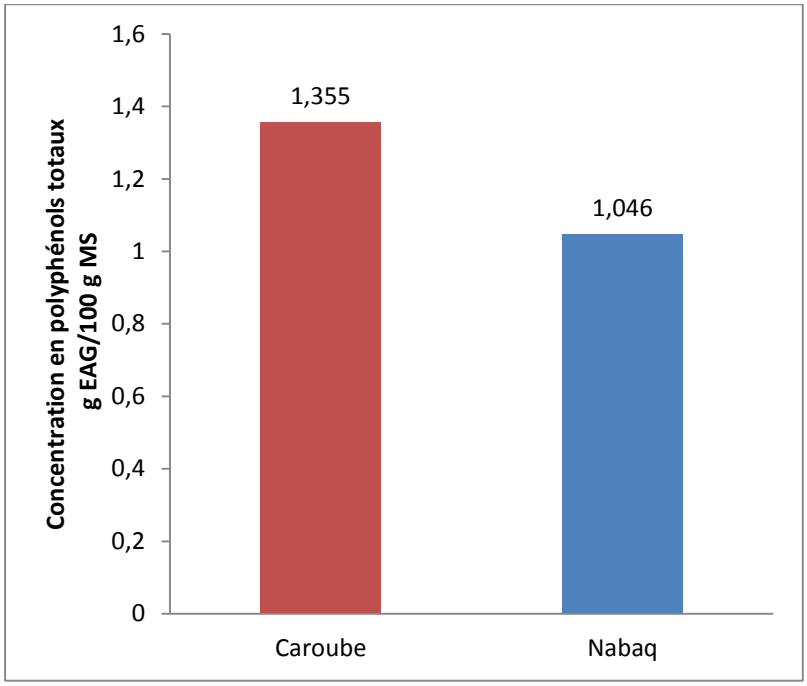


Figure 19 : Teneurs en polyphénols totaux dans la poudre de caroube et de nabaq.

Les composés polyphénoliques constituent l'une des principales classes de métabolites secondaires présents dans la caroube et sont largement reconnus pour leur contribution à l'activité antioxydante de ce fruit **(Ioannou *et al.*, 2023).**

Les résultats montrent que la teneur en polyphénols totaux de la poudre de caroube est de 1,355 g EAG/100 g MS, soit 13,55 mg EAG/g MS.

La teneur obtenue est toutefois inférieure à celles rapportées par **(Ioannou et al. 2023)** pour différentes poudres de caroube, dont les valeurs variaient entre 18,19 et 23,18 mg EAG/g, avec les concentrations les plus élevées observées dans les échantillons torréfiés. De même, **(Karakuş et al. 2023)** ont rapporté une teneur de 15,37 mg EAG/g dans une poudre de caroube obtenue après extraction et séchage par atomisation.

En revanche, notre résultat demeure légèrement supérieur aux teneurs observées par **(Ioannou et al. 2023)** dans la pulpe de caroube, qui variaient entre 7,20 et 12,28 mg EAG/g. Cette différence suggère que la poudre de caroube étudiée est plus riche en composés phénoliques que la pulpe brute, probablement en raison du broyage et de la préparation de l'échantillon, qui améliorent l'homogénéité de la matrice et facilitent l'extraction des composés bioactifs.

Les écarts observés entre les différentes études peuvent être attribués à plusieurs

facteurs, notamment l'origine géographique des gousses, les conditions pédoclimatiques, le degré de maturité des fruits, ainsi que les procédés technologiques appliqués avant l'analyse.

En particulier, la torréfaction est connue pour modifier la structure cellulaire de la matrice végétale et favoriser la libération des composés phénoliques liés, ce qui peut conduire à des teneurs plus élevées en polyphénols totaux dans les produits transformés **(Ahmed *et al.*, 2024).** Par ailleurs, les méthodes d'extraction et de dosage utilisées influencent directement les valeurs obtenues.

Il convient également de souligner que, dans la présente étude, le dosage des polyphénols a été réalisé sur des extraits bruts après filtration, sans étape de concentration par évaporation sous vide (rota-vaporisation). Or, cette opération permet généralement d'éliminer le solvant et de concentrer les composés phénoliques dans l'extrait final, conduisant ainsi à des teneurs apparentes plus élevées.

Cette différence méthodologique pourrait donc contribuer à expliquer les valeurs plus faibles obtenues dans notre étude par rapport à certaines données de la littérature. Malgré cela, les résultats obtenus confirment que la poudre de caroube constitue une source importante de composés phénoliques et présente un intérêt fonctionnel considérable dans le cadre de la substitution partielle ou totale du cacao.

Concernant la poudre de nabaq (*Ziziphus spina-christi),* la teneur en polyphénols totaux obtenue dans cette étude (10,46 mg EAG/g MS) est inférieure aux valeurs rapportées par **(Hassan et al. 2025)** (25,27 mg EAG/g MS) ainsi qu'à celles observées par **(Hashem et Abd El-Lahot 2021),** qui ont enregistré 46,62 mg EAG/g d'extrait et 22,10 ± 0,30 mg EAG/g d'extrait respectivement pour les extraits aqueux et éthanoliques de pulpe déshydratée. Ces écarts peuvent être attribués aux différences de protocoles analytiques et d'expression des résultats.

En effet, dans notre étude, le dosage a été réalisé sur des extraits bruts non concentrés, sans étape de rota-vaporisation, contrairement aux travaux utilisant des extraits concentrés, généralement plus riches en composés phénoliques. Par ailleurs, les teneurs en polyphénols sont fortement influencées par plusieurs facteurs tels que l'origine géographique des fruits, les conditions pédoclimatiques, le stade de maturité, les procédés de séchage ainsi que la nature du solvant d'extraction, qui conditionnent la préservation et l'extractibilité des composés phénoliques. Malgré cette variation, la valeur obtenue dans cette étude confirme que la poudre de nabq constitue une source appréciable de composés phénoliques, reconnus pour leur rôle

important dans l'activité antioxydante et la protection contre le stress oxydatif **(Hassan *et al.*, 2025).**

Globalement, les résultats obtenus montrent que la poudre de caroube présente une teneur en polyphénols totaux plus élevée que celle de la poudre de nabaq. Cette différence peut être attribuée à la richesse naturelle de la caroube en composés phénoliques, notamment en tanins, flavonoïdes et acides phénoliques. Selon **(Rodríguez-Solana et al. 2021),** les gousses de caroube constituent une source importante de métabolites phénoliques bioactifs, ce qui explique leur potentiel antioxydant élevé.

Néanmoins, les deux poudres présentent des teneurs appréciables en polyphénols, traduisant leur intérêt en tant qu'ingrédients fonctionnels susceptibles d'enrichir les formulations chocolatées en composés antioxydants. Ces résultats confirment ainsi le potentiel de la caroube et du nabaq comme alternatives naturelles au cacao, tout en apportant une valeur ajoutée nutritionnelle grâce à leur richesse en composés bioactifs.

3.2. Flavonoïdes totaux

Les flavonoïdes constituent une sous-classe majeure des composés phénoliques naturellement présents dans les végétaux. Ils sont reconnus pour leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et antimicrobiennes, jouant un rôle essentiel dans la protection des cellules contre le stress oxydatif et les dommages induits par les radicaux libres **(Panche *et al.*, 2016).**

Les teneurs en flavonoïdes totaux des poudres de caroube et de nabaq obtenues dans cette étude sont présentées à la figure 20.

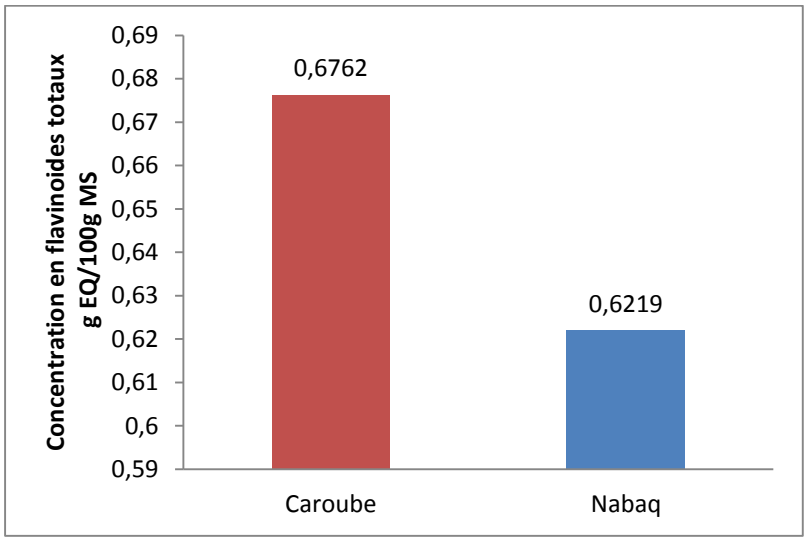


Figure 20 : Teneurs en flavonoïdes totaux dans la poudre de caroube et de nabaq.

La poudre de caroube a présenté une teneur en flavonoïdes de 0,6762 g EQ/100 g MS, soit 6,76 mg EQ/g MS. Cette valeur est très proche de celle rapportée par **(Ydjedd et al. 2017),** qui ont enregistré une teneur d'environ 0,71 g EQ/100 g MS dans une variété de caroube algérienne.

Cette richesse en flavonoïdes est cohérente avec la teneur élevée en polyphénols totaux observée précédemment (13,55 mg EAG/g MS) et confirme le potentiel antioxydant important de la caroube. Plusieurs auteurs ont souligné que les gousses de Ceratonia siliqua renferment des quantités appréciables de flavonoïdes, de tanins condensés et d'acides phénoliques, contribuant à leurs propriétés fonctionnelles et biologiques **(Rodríguez-Solana et *al.*, 2021 ; Ioannou et *al.*, 2023).**

Concernant la poudre de nabaq (*Ziziphus spina-christi*), la teneur en flavonoïdes totaux a été estimée à 0,6219 g EQ/100 g MS, soit 6,22 mg EQ/g MS. Cette valeur est légèrement supérieure à celle rapportée par **(Michel et al. 2011),** qui ont observé une teneur voisine de 0,58 g EQ/100 g MS. Elle confirme que le nabaq constitue également une source intéressante de composés flavonoïdiques.

Par ailleurs, **(Hashem et Abd El-Lahot, 2021)** ont rapporté des teneurs beaucoup plus élevées dans les extraits de pulpe déshydratée de Z. spina-christi, atteignant 170.87mg/g d'extrait pour l'extrait éthanolique. Toutefois, cette comparaison doit être interprétée en prenant en compte que leurs résultats sont exprimés par gramme d'extrait concentré et séché, alors que les analyses réalisées dans notre étude ont été effectuées directement sur des extraits bruts obtenus après filtration, sans étape de concentration par rota-vaporisation. Cette différence méthodologique est susceptible d'expliquer en grande partie les écarts observés.

La comparaison des deux poudres révèle que la caroube présente une teneur en flavonoïdes légèrement supérieure à celle du nabaq (0,6762 contre 0,6219 g EQ/100 g MS). Cette tendance est en accord avec les résultats obtenus pour les polyphénols totaux et reflète les différences de composition phytochimique entre les deux espèces végétales **(Rtibi *et al.*, 2017 ; Rodríguez-Solana *et al.*, 2021).**

Les variations observées entre les différentes études peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, notamment l'origine géographique des fruits, les conditions pédoclimatiques, le stade de maturité à la récolte, les procédés de séchage ainsi que la nature du solvant et les conditions d'extraction utilisées.

Dans l'ensemble, les deux poudres se distinguent par des teneurs élevées en flavonoïdes, confirmant leur intérêt en tant que sources naturelles d'antioxydants. Ces résultats, associés aux teneurs importantes en polyphénols totaux précédemment observées, mettent en évidence le potentiel fonctionnel de la caroube et du nabaq et soutiennent leur utilisation comme ingrédients alternatifs prometteurs dans le cadre de la substitution partielle ou totale du cacao dans les formulations chocolatées.

3.3. Activité anti radicalaire (Test DPPH)

Les résultats de l'activité antioxydante évaluée par le test du DPPH sont présentés à la figure 21. Cette méthode est largement utilisée pour estimer la capacité des extraits végétaux à neutraliser les radicaux libres grâce au transfert d'électrons ou d'atomes d'hydrogène vers le radical stable DPPH. Une diminution de l'absorbance à 517 nm traduit ainsi une augmentation de l'activité antioxydante de l'échantillon **(Brand-Williams *et al.*, 1995).**

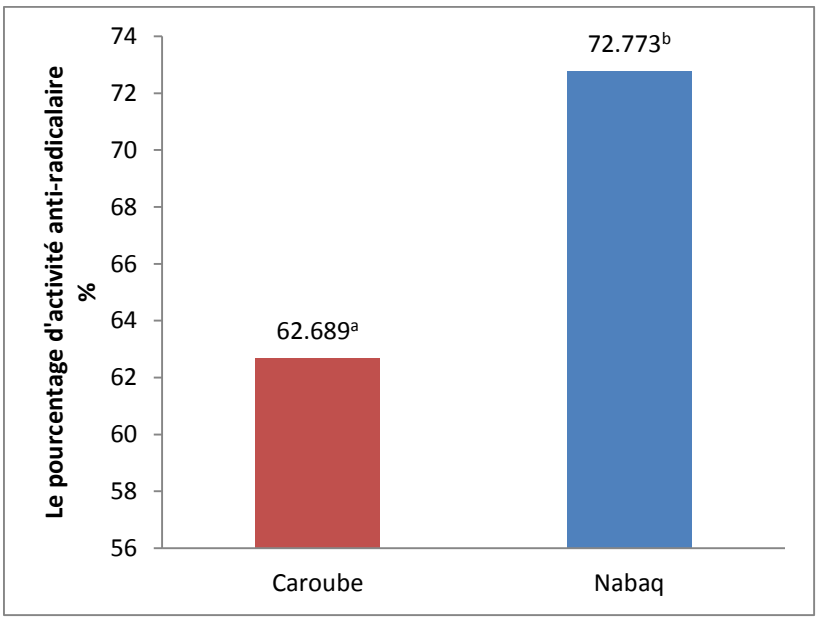


Figure 21 : Pourcentage d'activité anti radicalaire dans la poudre de caroube et de nabaq.

Les résultats obtenus montrent que les deux poudres étudiées possèdent une activité antioxydante importante. L'extrait de caroube a présenté un pourcentage d'inhibition de 62,68 %, tandis que celui du nabaq a atteint 72,77 %, indiquant une capacité antiradicalaire significativement plus élevée pour le nabaq. Cette activité peut être attribuée à la présence de composés bioactifs tels que les polyphénols, les flavonoïdes et d'autres métabolites secondaires capables de piéger les radicaux libres et de limiter les phénomènes d'oxydation.

Concernant la caroube (*Ceratonia siliqua*), le pourcentage d'inhibition obtenu confirme son potentiel antioxydant élevé. Ce résultat est cohérent avec les travaux de **(Ben**

Khaldi, 2015) ainsi que ceux de **(Boudjrima et Dahak, 2022),** qui ont mis en évidence une forte capacité de piégeage des radicaux libres par les extraits de caroube. Cette activité est généralement associée à la richesse de la caroube en polyphénols, notamment en tanins condensés, flavonoïdes et acides phénoliques, reconnus pour leur pouvoir réducteur et leur aptitude à neutraliser les espèces réactives de l'oxygène.

Pour le nabaq (*Ziziphus spina-christi*), le pourcentage d'inhibition enregistré (72,77 %) est supérieur à celui observé pour la caroube, ce qui traduit une activité antioxydante particulièrement marquée. Cette valeur est également supérieure à celle rapportée par **(Hashem et Abd El-Lahot, 2021),** qui ont obtenu un pourcentage d'inhibition de 41,42 ± 0,21 % pour un extrait éthanolique de pulpe déshydratée de nabaq. Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment l'origine géographique du matériel végétal, les conditions pédoclimatiques, le stade de maturité des fruits, la méthode d'extraction utilisée ainsi que les conditions expérimentales du test DPPH.

De plus, la teneur et la composition qualitative des composés phénoliques peuvent varier considérablement selon les conditions de culture et de transformation des fruits. Nos résultats demeurent néanmoins en accord avec les observations de **(Djâfer et al. 2020)** et de **(Bakhti et Boucherba, 2020),** qui ont rapporté une forte activité antioxydante chez les espèces du genre *Ziziphus*, attribuée à leur richesse en composés phénoliques et flavonoïdes.

Il est intéressant de noter que, malgré une teneur en polyphénols totaux plus faible que celle de la caroube (10,46 contre 13,55 mg EAG/g MS), le nabaq présente une activité antioxydante plus élevée. Cette observation suggère que l'activité antioxydante ne dépend pas uniquement de la quantité totale de polyphénols, mais également de leur nature chimique, de leur structure moléculaire et des interactions synergiques entre les différents composés bioactifs présents dans l'extrait. Plusieurs auteurs ont montré que certains flavonoïdes et acides phénoliques possèdent une activité antiradicalaire particulièrement élevée, même lorsqu'ils sont présents en faibles concentrations **(Panche *et al.*, 2016).** Dans l'ensemble, les résultats obtenus confirment que les poudres de caroube et de nabaq constituent des sources naturelles intéressantes d'antioxydants.

4. Analyse sensorielle et profil hédonique des chocolats formulés

L'analyse sensorielle est une étape décisive dans le développement de nouveaux produits alimentaires. Elle permet d'évaluer l'impact de la substitution du cacao par les poudres de caroube et de nabaq sur la perception du consommateur et de déterminer

l'acceptabilité commerciale des formulations. Les scores attribués aux sept attributs sensoriels des six chocolats étudiés (T0 à T5) sont consignés dans le tableau 11.

Tableau 09 : Résultats de l'évaluation sensorielle des différentes formulations de chocolat.

	Couleur	Brillance	Homogénéité (texture)	Intensité des aromes	Goût global	Acceptabilité globale	Intention d'achat
T0	5.276^{b}± 0.341	7.483^{a}±0.315	7.000^{a}±0.304	7.379^{a}±0.340	6.241^{a}±0.369	6.000^{ab}±0.393	5.793^{ab}±0.449
T1	6.400^{ab}±0.335	6.133^{b}±0.310	6.267^{a}±0.299	7.200^{a}±0.334	4.667^{b}±0.363	4.567^{b}±3.804	4.067^{b}±0.442
T2	5.935^{ab}±0.329	6.065^{b}±0.305	7.065^{a}±0.294	6.516^{a}±0.329	5.484^{ab}±0.357	5.839^{ab}±0.380	4.645^{ab}±0.435
T3	7.167^{a}±0.335	5.300^{b}±0.310	5.933^{a}±0.299	6.200^{a}±0.334	5.600^{ab}±0.363	6.433^{ab}±0.386	6.933^{a}±0.442
T4	7.000^{a}±0.335	5.733^{b}±0.310	6.933^{a}±0.299	6.633^{a}±0.334	6.600^{a}±0.363	$5,93^{ab}$±0.386	6.900^{a}±0.442
T5	7.167^{a}±0.335	4.933^{b}±0.310	6.200^{a}±0.299	6.400^{a}±0.334	5.800^{ab}±0.363	6.300^{a}±0.386	6.133^{a}±0.442

Les résultats de l'analyse sensorielle montrent que la substitution partielle ou totale du cacao par les poudres de nabaq (*Ziziphus spina-christi*) et de caroube (*Ceratonia siliqua*) a influencé différemment les attributs évalués. Les formulations étudiées étaient : T0 (100 % cacao), T1 (70 % cacao + 15 % nabaq + 15 % caroube), T2 (50 % cacao + 25 % nabaq + 25 % caroube), T3 (50 % caroube + 50 % nabaq), T4 (100 % nabaq) et T5 (100 % caroube).

L'analyse de variance (ANOVA) a révélé des différences significatives ($p < 0,05$) pour certains attributs sensoriels, notamment la couleur, la brillance, le goût global, l'acceptabilité globale et l'intention d'achat. En revanche, aucune différence significative n'a été observée pour l'homogénéité et l'intensité des arômes, comme l'indique la présence de la même lettre statistique (« a ») pour l'ensemble des échantillons.

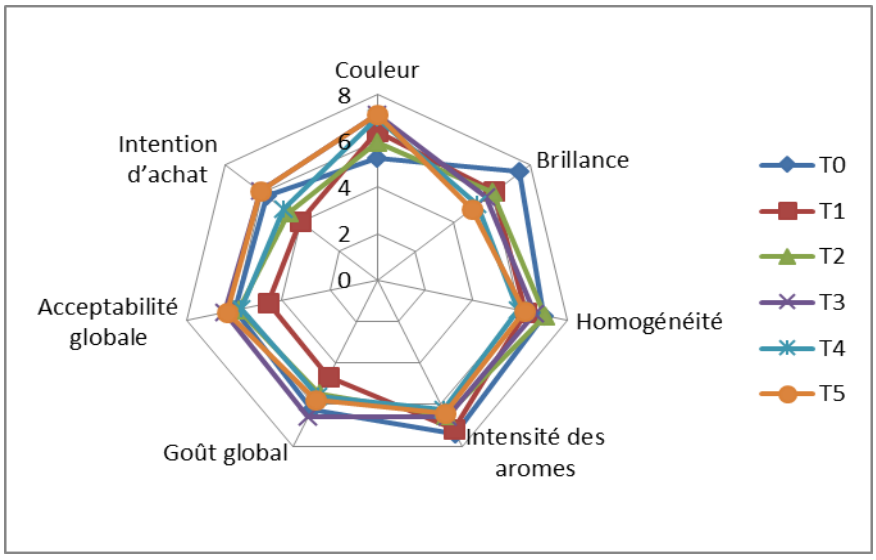


Figure 22 : Profil sensoriel des chocolats élaborés.

4.1. Propriétés visuelles : Couleur et Brillance

✓ **La Couleur**

Les notes attribuées à la couleur varient significativement entre les formulations ($p < 0,05$). Les formulations T3 (50 % caroube + 50 % nabaq), T4 (100 % nabaq) et T5 (100 % caroube) ont obtenu les scores les plus élevés (7,00 à 7,17), formant un groupe statistiquement supérieur au témoin T0 (5,28). Cette amélioration de la couleur pourrait être liée à la pigmentation naturelle des poudres de nabaq et de caroube, qui confèrent aux produits une teinte brun foncé appréciée par les dégustateurs. La présence de composés phénoliques et les réactions de brunissement intervenant lors du séchage des fruits pourraient également contribuer à cette coloration plus intense.

✓ **La Brillance**

Le chocolat témoin T0 a obtenu la meilleure note de brillance (7,48), significativement supérieure à toutes les formulations substituées. La diminution observée dans les échantillons contenant du nabaq et/ou de la caroube peut être attribuée à leur richesse en fibres alimentaires, susceptibles d'augmenter la rugosité de surface et de limiter la réflexion de la lumière.

La formulation T5 (100 % caroube) présente la valeur la plus faible (4,93), indiquant que l'absence totale de cacao affecte davantage cet attribut visuel. Sur le plan de la technologie alimentaire, ce phénomène est totalement logique : l'introduction de poudres végétales riches en fibres insolubles perturbe le réseau cristallin des triglycérides de beurre de cacao (phénomène de polymorphisme des graisses lors du tempérage). Les particules solides de caroube et de nabaq modifient la réflexion de la lumière à la surface du chocolat, lui donnant un aspect plus mat.

4.2. Qualités structurales et aromatiques : Homogénéité et Intensité des arômes

✓ **L'Homogénéité**

Il est remarquable de noter qu'aucune différence statistique significative n'est détectée entre le témoin et les essais substitués pour ce paramètre (tous classés dans le groupe a). Les notes restent stables et élevées (de $5,933^{a}$ à $7,065^{a}$). Cela démontre la performance technologique de votre procédé de broyage et de mélange, permettant d'intégrer parfaitement les poudres de caroube et de nabaq au sein de la matrice grasse sans générer de sensation de granularité ou de séparation de phases en bouche.

✓ **L'Intensité des arômes**

De même, l'intensité aromatique ne présente pas de divergence statistique entre les échantillons (groupe a généralisé). Le témoin (7,379[a]) et les formulations substituées (comme T1 à 7,200[a]) se valent. Ce résultat est extrêmement positif : il prouve que le profil aromatique intrinsèque de la caroube (notes caramélisées, fruitées et torréfiées) et du nabaq compense quantitativement et qualitativement la diminution des composés volatils du cacao traditionnel.

4.3. Propriétés hédoniques et commerciales : Goût, Acceptabilité et Intention d'achat

✓ **Goût global**

Le goût global constitue l'un des critères les plus discriminants de l'étude. La formulation T4 (100 % nabaq) a obtenu la meilleure note (6,60), statistiquement comparable au témoin T0 (6,24) mais supérieure à T1 (4,67). Ce résultat suggère que le nabaq possède un profil gustatif particulièrement apprécié, probablement en raison de sa richesse naturelle en sucres simples, qui procure une saveur douce et réduit la perception de l'amertume. À l'inverse, la formulation T1, contenant seulement 15 % de nabaq et 15 % de caroube, a enregistré la note la plus faible. Ce résultat pourrait refléter une phase intermédiaire de substitution où les arômes du cacao, du nabaq et de la caroube ne sont pas encore suffisamment équilibrés pour produire un profil gustatif harmonieux.

✓ **Acceptabilité globale**

Les scores d'acceptabilité globale varient de 4,57 à 6,43. La formulation T3 (50 % caoube + 50 % nabaq) présente la valeur la plus élevée (6,43 ± 0,39), suivie de T5 (100 % caroube) (6,30 ± 0,39), du témoin T0 (100 % cacao) (6,00 ± 0,39) et de T4 (100 % nabaq) (5,93 ± 0,39). Ces résultats montrent que les formulations contenant de fortes proportions de nabaq ou de caroube ont été globalement bien acceptées par les dégustateurs.

La formulation T1 (70 % cacao + 15 % nabaq + 15 % caroube) présente la note la plus faible (4,57 ± 3,80), traduisant une appréciation globale moins favorable. Cette diminution pourrait être liée à une combinaison moins harmonieuse des caractéristiques sensorielles apportées par les trois ingrédients.

Bien que T4 ait obtenu la meilleure note pour le goût global (6,60 ± 0,36), son acceptabilité globale (5,93 ± 0,39) reste légèrement inférieure à celles de T3 et T5. Cela suggère que d'autres paramètres sensoriels, notamment la brillance ou certains aspects de texture, ont pu influencer l'évaluation finale des dégustateurs.

✓ **Intention d'achat**

Les résultats relatifs à l'intention d'achat suivent la même tendance que l'acceptabilité globale. La formulation T3 (50 % caroube + 50 % nabaq) obtient le score le plus élevé (6,93), suivie de T4 (100 % nabaq) et T5 (100 % caroube), qui présentent respectivement les valeurs (6,90 et 6.13). Le témoin T0 affiche une intention d'achat intermédiaire (5,79), tandis que T1 présente la valeur la plus faible (4,07). Ces observations suggèrent que les consommateurs seraient disposés à acheter des produits chocolatés élaborés à partir de nabaq ou de caroube, particulièrement lorsque ces ingrédients sont utilisés à des niveaux élevés de substitution.

✓ **Relation entre acceptabilité globale et intention d'achat**

Un résultat particulièrement intéressant est observé pour T4 (100 % nabaq). Malgré une acceptabilité globale légèrement inférieure à celle de T3, cette formulation présente une intention d'achat très élevée (6,90 ± 0,44), pratiquement identique à celle de T3 (6,93 ± 0,44). Cela indique que les dégustateurs ont perçu favorablement ce produit et seraient disposés à l'acheter, probablement en raison de son goût agréable et de son caractère original.

Tableau 10 : Les résultats de test de classement.

	Somme	**Classement**
T0	112	5
T1	128	6
T2	104	4
T3	97	2
T4	80	1
T5	110	3

Les résultats présentés dans le tableau sont issus d'un test de classement sensoriel réalisé auprès d'un panel de dégustateurs non entraînés, où chaque formulation de chocolat T0 à T5 a été évaluée et classée selon les préférences sensorielles (goût globale, acceptabilité globale, couleur et autres critères). Les valeurs correspondent à la somme des rangs attribués à chaque échantillon : plus cette somme est faible, plus la formulation est appréciée.

Dans l'ensemble, les résultats sensoriels démontrent que les poudres de nabaq et de caroube possèdent un réel potentiel pour remplacer le cacao dans les formulations chocolatées. La formulation T4 (100 % nabaq) apparaît comme la plus performante, obtenant les meilleures notes pour le goût global, l'acceptabilité globale et l'intention d'achat. La formulation T5 (100 % caroube) présente également une très bonne acceptabilité, tandis que T3 (50 % caroube + 50 % nabaq) se distingue par une excellente couleur et une forte intention d'achat. À l'inverse, la formulation T1, caractérisée par une faible substitution mixte du cacao, est la moins appréciée. Ces résultats confirment la faisabilité sensorielle d'une substitution partielle, voire totale, du cacao par le nabaq et la caroube, ouvrant ainsi des perspectives intéressantes pour la valorisation de ces ressources locales dans l'industrie des produits chocolatés.

5. Relation entre les caractéristiques physicochimiques des poudres et les propriétés sensorielles des chocolats formulés

L'interprétation conjointe des résultats physicochimiques des poudres de nabaq (*Ziziphus spina-christi*) et de caroube (*Ceratonia siliqua*) ainsi que des données issues de l'évaluation sensorielle des chocolats formulés met en évidence l'influence de la composition des matières premières sur la perception des consommateurs. Bien qu'aucune analyse de corrélation statistique n'ait été réalisée, les tendances observées permettent d'établir plusieurs relations entre les propriétés des poudres utilisées et les performances sensorielles des formulations obtenues.

Les analyses physicochimiques ont montré que la poudre de nabaq se distingue par une teneur particulièrement élevée en sucres totaux (77,70 % MS), supérieure à celle de la poudre de caroube (67,80 % MS). Cette richesse en glucides pourrait expliquer, au moins en partie, les bonnes performances sensorielles des formulations contenant une forte proportion de nabaq. En effet, la formulation T4 (100 % nabaq) a obtenu les meilleures notes pour le goût global (6,60/9) ainsi qu'une intention d'achat élevée (6,90/9). Ces résultats suggèrent que les sucres naturellement présents dans le nabaq ont contribué à améliorer la perception gustative du produit en apportant une douceur naturelle susceptible de compenser l'amertume généralement associée aux produits à base de cacao.

Par ailleurs, la poudre de caroube a présenté la teneur la plus élevée en polyphénols totaux (13,55 mg EAG/g MS) et en flavonoïdes (6,76 mg EQ/g MS), contre respectivement 10,46 mg EAG/g MS et 6,22 mg EQ/g MS pour la poudre de nabq. Cette richesse en

composés phénoliques est largement documentée dans la littérature et confère à la caroube d'importantes propriétés fonctionnelles et antioxydantes **(Rodríguez-Solana *et al.*, 2021 ; Ioannou *et al.*, 2023).** Toutefois, les composés phénoliques, notamment les tanins, peuvent également influencer les propriétés organoleptiques en générant des sensations d'astringence ou d'amertume lorsqu'ils sont présents à des concentrations élevées. Cela pourrait expliquer pourquoi la formulation T5 (100 % caroube), malgré sa richesse en composés bioactifs, a présenté un goût global légèrement inférieur à celui de la formulation T4.

L'activité antioxydante déterminée par le test DPPH a également révélé une capacité antiradicalaire importante pour les deux poudres, avec des valeurs de 72,73 % pour le nabaq et de 62,68 % pour la caroube. Ces résultats confirment la présence de composés bioactifs capables de neutraliser les radicaux libres et soulignent le potentiel fonctionnel des deux matières premières. La forte activité antioxydante observée dans la poudre de nabaq, associée à sa teneur élevée en sucres, pourrait avoir contribué à l'obtention d'un profil sensoriel plus équilibré et mieux apprécié par les dégustateurs.

Les différences observées au niveau des attributs visuels peuvent également être mises en relation avec la composition des poudres. Les formulations riches en nabaq ou en caroube (T3, T4 et T5) ont obtenu les meilleures notes de couleur, avec des scores compris entre 7,00 et 7,17, significativement supérieurs à celui du témoin T0. Cette amélioration pourrait être liée à la pigmentation naturelle des poudres ainsi qu'à la présence de composés phénoliques participant aux phénomènes de brunissement, conférant aux chocolats une apparence jugée plus attractive par les dégustateurs.

D'un point de vue technologique, les faibles teneurs en humidité enregistrées pour les deux poudres (5,78 % pour le nabaq et 7,89 % pour la caroube) constituent également un avantage pour leur incorporation dans les formulations chocolatées. Une faible humidité favorise généralement la stabilité microbiologique des matières premières, limite les phénomènes d'agglomération et contribue à une meilleure conservation des produits finis. Ces caractéristiques sont particulièrement importantes dans les systèmes riches en matières grasses tels que le chocolat, où l'excès d'eau peut altérer la texture et la qualité globale du produit. Dans l'ensemble, les résultats obtenus montrent que les poudres de nabaq et de caroube possèdent des caractéristiques physicochimiques susceptibles d'influencer favorablement la qualité sensorielle des chocolats formulés. La forte teneur en sucres et l'activité antioxydante élevée du nabaq semblent avoir favorisé le goût et l'intention d'achat, tandis que la richesse de la caroube en polyphénols et flavonoïdes renforce son intérêt

fonctionnel et nutritionnel. Ces observations confirment le potentiel de ces deux ressources végétales comme alternatives naturelles au cacao dans le développement de produits chocolatés innovants à valeur ajoutée nutritionnelle et fonctionnelle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le caroubier Le caroubier (*Ceratonia siliqua L.)* et le nabaq (*Ziziphus spina-christi*) constituent des ressources végétales locales prometteuses, largement présentes dans l'environnement algérien et reconnues pour leurs importantes propriétés nutritionnelles, fonctionnelles et biologiques. Dans un contexte marqué par la recherche croissante d'alternatives naturelles et durables aux matières premières importées, cette étude a eu pour objectif d'évaluer les caractéristiques physicochimiques ainsi que l'activité antioxydante des poudres de caroube et de nabaq, et d'étudier leur potentiel d'exploitation dans le développement d'un substitut du chocolat par remplacement partiel ou total de la poudre de cacao.

Les résultats des analyses physicochimiques ont montré que les poudres de caroube et de nabaq présentent une composition riche en composés d'intérêt nutritionnel. Par ailleurs, les analyses de l'activité antioxydante ont révélé la présence de teneurs appréciables en composés phénoliques, responsables de leurs propriétés biologiques. La comparaison avec les données de la littérature a mis en évidence une concordance globale des résultats obtenus, confirmant ainsi la valeur nutritionnelle et fonctionnelle de ces deux matières premières ainsi que leur potentiel d'utilisation dans l'industrie alimentaire.

Dans la partie appliquée de cette étude, six formulations différentes de chocolat ont été élaborées : la formulation témoin (T0 : 100 % cacao), ainsi que les formulations T1 (70 % cacao, 15 % caroube, 15 % nabaq), T2 (50 % cacao, 25 % caroube, 25 % nabaq), T3 (50 % caroube, 50 % nabaq), T4 (100 % nabaq) et T5 (100 % caroube). Les résultats de l'analyse sensorielle ont mis en évidence un effet significatif de la formulation sur la plupart des attributs évalués, notamment la couleur, le goût global, l'acceptabilité globale et l'intention d'achat. Les formulations mixtes ont présenté les meilleures performances sensorielles, traduisant un effet synergique entre les différents ingrédients utilisés.

La formulation T3, composée de 50 % de caroube et de 50 % de nabaq, s'est distinguée par les niveaux les plus élevés d'acceptabilité globale et d'intention d'achat. Ce résultat démontre la possibilité d'obtenir un produit présentant des caractéristiques sensorielles satisfaisantes et capable de concurrencer les produits conventionnels, malgré l'absence totale de cacao. Cette observation revêt une importance particulière puisqu'elle met en évidence la faisabilité d'un remplacement complet du cacao par des ressources végétales locales.

Conclusion générale

D'une manière générale, cette étude confirme que la caroube et le nabaq représentent des alternatives naturelles prometteuses au cacao dans la fabrication du chocolat. Leur valorisation ouvre de nouvelles perspectives pour le développement de produits alimentaires innovants associant qualité sensorielle et valeur nutritionnelle.

Les résultats soulignent également l'importance de la valorisation des ressources locales et de leur orientation vers des applications industrielles à forte valeur ajoutée, particulièrement dans un contexte marqué par l'augmentation continue des prix du cacao sur le marché mondial et par une forte dépendance aux importations.

L'utilisation de la caroube et du nabaq pourrait ainsi contribuer à réduire cette dépendance, à diminuer les coûts de production, à renforcer la sécurité alimentaire et à soutenir le développement de l'industrie agroalimentaire nationale dans une perspective de développement durable.

Perspectives

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives de recherche et de développement :

- Approfondir la caractérisation nutritionnelle des formulations développées, notamment en termes de fibres alimentaires, de minéraux et de composés bioactifs ;
- Étudier l'évolution des propriétés physicochimiques, microbiologiques et sensorielles des produits au cours du stockage afin de déterminer leur durée de conservation ;
- Optimiser les formulations par des approches statistiques et des plans d'expériences afin d'identifier les proportions les plus performantes de caroube et de nabaq ;
- Réaliser des analyses instrumentales de texture, de rhéologie et de couleur pour compléter l'évaluation sensorielle ;
- Évaluer le potentiel économique et industriel de la production à grande échelle de substituts du cacao à base de ressources locales ;
- Explorer l'intégration de la caroube et du nabaq dans d'autres catégories de produits alimentaires tels que les boissons, les biscuits, les produits de boulangerie-pâtisserie ou les aliments fonctionnels.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. Abalaka, M. E., Mann, A., & Adeyemo, S. O. (2011). Studies on in-vitro antioxidant and free radical scavenging potential and phytochemical screening of leaves of Ziziphus mauritiana L. and Ziziphus spina-christi L. compared with ascorbic acid. Journal of Medical Genetics and Genomics, 3(2), 28–34. https://doi.org/10.5897/JMGG.9000039

2. Abdeddaim, M., Betsche, T., Nicolas, J., & Abdeddaim, D. (2014). Chemical composition and antioxidant activity of Ziziphus lotus L. fruits. Industrial Crops and Products, 53, 160–166. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.026

3. Abdelmuti, O. M. S. (1991). Biochemical and nutritional evaluation of famine foods of the Sudan. Doctoral Dissertation in Biochemistry and Nutrition, University of Khartoum, Sudan.

4. Abdel-Zaher, A. O., et al. (2005). Pharmacological studies on Ziziphus spina-christi extracts. Journal of Ethnopharmacology, 96(3), 433–441.

5. Abdoul-Azize, S. (2016). Potential benefits of jujube (Zizyphus lotus L.) bioactive compounds for nutrition and health. Journal of Nutrition and Metabolism, 2016, 2867470. https://doi.org/10.1155/2016/2867470

6. Abdulrahman, M. D., Zakariya, A. M., Hama, H. A., Hamad, S. W., Al-Rawi, S. S., Bradosty, S. W., & Ibrahim, A. H. (2022). Ethnopharmacology, biological evaluation, and chemical composition of Ziziphus spina-christi (L.) Desf.: A review. Advances in Pharmacological and Pharmaceutical Sciences, 2022, Article 4495688. https://doi.org/10.1155/2022/4495688

7. Aboura, I., Chibane, M., & Madani, K. (2017). Effects of carob (Ceratonia siliqua L.) gastrointestinal protection and transit regulation. Journal of Functional Foods, 32, 120–128.

8. Acourene S., Belguedj M., Tama M. & Talebi A. (2001). Caractérisation, évaluation de la qualité de la datte et identification des cultivars rares de palmier dattier de la région des ziban. Institut national de la recherche agronomique d'Algérie, 5(8),19-39.

9. Adzu, B., Amos, S., Amizan, M. B., & Gamaniel, K. S. (2001). Evaluation of the antidiarrhoeal effects of Ziziphus spina-christi fruits. Journal of Ethnopharmacology, 76(3), 265–272.

10. Afoakwa, E. O., Paterson, A., & Fowler, M. (2007). Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate – a review. Trends in Food Science & Technology, 18(6), 290–298. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.02.002

11. Akdeniz, E., Yakışık, E., Pirouzian, H. R., Akkın, S., Turan, B., Tipigil, E., Toker, O. S., & Ozcan, O. (2021). Carob powder as cocoa substitute in milk and dark compound chocolate formulation. Journal of Food Science and Technology, 58(12), 4558–4566. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04943-z

12. Akhter, C., Dar, G. H., & Khuroo, A. A. (2013). Ziziphus jujuba Mill. subsp. spinosa (Bunge) Peng, Li & Li: A new plant record for the Indian subcontinent. Taiwania, 58(2), 132–135. https://doi.org/10.6165/tai.2013.58.132

13. Albanell, E., Caja, G., & Plaixats, J. (1991). Characteristics of Spanish carob pods and nutritive value of carob kibbles. In J.-L. Tisserand & X. Alibés (Eds.), Fourrages et sous-produits méditerranéens (pp. 135–136). CIHEAM, Options Méditerranéennes, Série A, Séminaires Méditerranéens, 16.

14. Al-Kahtani, H. A. (2007). Chemical composition and nutritional value of Christ's thorn (Ziziphus spina-christi) fruits. King Saud University Press.

15. Almalki, R. A., & Alzahrani, D. A. (2018). Morphological investigation of genus Ziziphus Mill. (Rhamnaceae) in Saudi Arabia. American Journal of Plant Sciences, 9(13), 2644–2658. https://doi.org/10.4236/ajps.2018.91319

16. Amoo, I. A. and Atasie, V. N. (2012). Nutritional and functional properties of Tamarindus indica pulp and Zizyphus spina- christi fruit and seed. Journal of Food Agriculture & Environment 10: 16-19.

17. ANKOU, K. G. (2023). Contraintes et pistes d'amélioration de la production du cacao biologique au Togo. Revue RAMRES, Sciences de la vie, de la terre et agronomie, 11(1). https://publication.lecames.org/index.php/svt/article/view/4576

18. AOAC International. (2016). Official Methods of Analysis of AOAC International (20th ed.). AOAC International. Yousif, A. K., & Alghzawi, H. M. (2000). Processing and characterization of carob powder. Food Chemistry, 69(3), 283–287. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00208-0

19. Aprotosoaie, A. C., Luca, S. V., & Miron, A. (2015). Flavor chemistry of cocoa and cocoa products—An overview. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15(1). https://doi.org/10.1111/1541-4337.1218

20. Atkins, P., & de Paula, J. (2014). Atkins' physical chemistry (10th ed.). Oxford University Press.

21. Bâa A., Guissoub T., Duponnoisc R., Plenchetted C., Sackoe O., Sidibéf D., Syllag K. et Windoug B. (2001). Mycorhization contrôlée et fertilisation phosphatée: Applications à la domestication du jujubier. Article de synthèse. 56: 261-269

22. Barišić, V., Kopjar, M., Jozinović, A., Flanjak, I., Ačkar, Đ., Miličević, B., Šubarić, D., Jokić, S., & Babić, J. (2019). The chemistry behind chocolate production. Molecules, 24(17), 3163. https://doi.org/10.3390/molecules24173163

23. Barros, L., Carvalho, A. M., & Ferreira, I. C. F. R. (2010). Leaves, flowers and fruits: phenolic compounds and antioxidant activity. Food and Chemical Toxicology, 48(6), 1466–1472.

24. Bartley B. G. D. (2005). The Genetic Diversity of Cacao and its Utilization. CABI Publishing (UK and USA), 341.

25. Batlle, I., & Tous, J. (1997). Carob tree (Ceratonia siliqua L.). In J. Heller, J. M. M. Engels & K. Hammer (Eds.), Promoting the conservation and use of neglected and underutilized crops (No. 17). IPGRI, Rome.

26. Beckett, S. T. (2009). Industrial chocolate manufacture and use (4th ed.). Wiley-Blackwell

27. Ben Ayache, S., Reis, F. S., Dias, M. I., Pereira, C., Glamočlija, J., Soković, M., Saafi, E. B., Ferreira, I. C. F. R., Barros, L., & Achour, L. (2021). Chemical characterization of carob seeds (Ceratonia siliqua L.) and use of different extraction techniques to promote its bioactivity. Food Chemistry, 351, 129263. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129263

28. Bertrand, J. (2013). Le caroubier : un arbre d'avenir pour les zones arides et semi-arides. Options Méditerranéennes, Série A, Séminaires Méditerranéens, 106, 129–134.

29. Beuzard, M. (2003). Le chocolat. Science et Vie, 136–151

30. Biner, B., Gubbuk, H., Karhan, M., Aksu, M., & Pekmezci, M. (2007). Sugar profiles of the pods of cultivated and wild types of carob bean (Ceratonia siliqua L.) in Turkey. Food Chemistry, 100(4), 1453–1455. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.037

31. Boublenza, I., Ghezlaoui, S., Mahdad, M., Vasaï, F., & Chemat, F. (2019). populations algériennes de caroubes (Ceratonia siliqua L.). Variabilité morphologique et chimique de leurs fruits et graines. Scientia Horticulteur, 256, 108537.

32. Boussaid L., Aguedal H., Iddou A. & Bouras N.(2020). « Aperçu sur les caractéristiques physicochimiques et biochimiques de trois sirops de » 2 (1): 8.

33. Boussaid, A., Chérif, J. K., Zaouay, F., & Mars, M. (2020). Valorization of Ziziphus spina-christi fruits: Chemical composition and functional properties. Journal of Food Measurement and Characterization, 14, 1234–1245. https://doi.org/10.1007/s11694-019-00354-7

34. Brassesco et al., 2021 Brassesco, M. E., Brandão, T. R. S., Silva, C. L. M., & Pintado, M.

(2021). Carob bean (Ceratonia siliqua L.): A review of its phytochemical composition, health benefits and food applications. Trends in Food Science & Technology, 110, 278–290.

35. Cavdarova, M., & Makris, D. P. (2014). Extraction kinetics of phenolics from carob (Ceratonia siliqua L.) kibbles using environmentally benign solvents. Waste and Biomass Valorization, 5(5), 773–779. https://doi.org/10.1007/s12649-014-9298-3

36. Chait, Y., Gunenc, A., & Hosseinian, F. (2020). Carob polyphenols and dietary fiber: Hypoglycemic effects and modulation of digestive enzymes. International Journal of Food Science & Technology, 55(4), 1420–1430.

37. Chan, S. Y., Wong, C. W., & Chang, S. K. (2013). Effects of carob bean composition on lipid profile and LDL oxidation. Food Chemistry, 141(3), 2234–2241.

38. Codex Alimentarius Commission. (2015). Codex Alimentarius. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & World Health Organization (WHO). https://www.codexalimentarius.org/

39. Coe, S. D., & Coe, M. D. (2013). The true history of chocolate (3rd ed.). Thames & Hudson.

40. Custódio, L., Fernandes, E., Martins, A., & Romano, A. (2015). Evaluation of the hypoglycemic potential of carob extracts via glucose absorption and enzyme inhibition. Industrial Crops and Products, 72, 114–121.

41. Dahiru, D., Obidoa, O., & Umaru, H. A. (2006). Protective effects of Ziziphus spina-christi. African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines, 3(2), 15–20.

42. Dahmani, W., Elaouni, N., Abousalim, A., Akissi, Z. L. E., Legssyer, A., Ziyyat, A., & Sahpaz, S. (2023). Exploring carob (Ceratonia siliqua L.): A comprehensive assessment of its characteristics, ethnomedicinal uses, phytochemical aspects, and pharmacological activities. Plants, 12(18), 3303. https://doi.org/10.3390/plants12183303

43. Deuss. (1989). Le cacaoyer. Culture et développement de la production de cacao"(p. 30). https://agritrop.cirad.fr/376398/

44. Devos, N., Reyman, D., & Sánchez-Cortés, S. (2021). Chocolate composition and its crystallization process: A multidisciplinary analysis. Food Chemistry, 342, 128301. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128301

45. Dias, 2003 Dias, M. I. (2003). Chemical composition and nutritional value of carob (Ceratonia siliqua L.). Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

46. Dikkaya, Y.R., Baydar, K., Kafkas, E., Comlekcioglu, S. and Küden, A.B. (2020). Sugar content of selected carob fruits. Acta Hortic. 1280, 269-274. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1280.37

47. Doctissimo. (2025). Le chocolat : valeurs nutritionnelles. Consulté le 28 mars 2026, de https://www.doctissimo.fr/nutrition/famille-d-aliments/guide-aliments/chocolat

48. Einhorn-Stoll, U. (2018). Pectin-water interactions in foods – From powder to gel. Food Hydrocolloids, 78, 109–119. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.029

49. El Maaiden, E., El Kharrassi, Y., Qarah, N. A. S., Essamadi, A. K., Moustaid, K., & Nasser, B. (2020). Genus Ziziphus: A comprehensive review on ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological properties. Journal of Ethnopharmacology, 259, 112950.

50. El-Beshbishy, H. A., Singab, A. N. B., & Sinkkonen, J. (2006). Hypolipidemic and antioxidant effects of Ceratonia siliqua pods in high-cholesterol fed rats. Journal of Ethnopharmacology, 106(3), 371–377.

51. Ergun, R., Lietha, R., & Hartel, R. W. (2010). Moisture and Shelf Life in Sugar Confections. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 50(2), 162–192.

52. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2011). FAOSTAT. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

53. FAO, 1997 fao.org□. (1997). Carob tree and its products. Rome, Italy: FAO.

54. Fellows, P. J. (2009). Food Processing Technology: Principles and Practice. Woodhead Publishing.

55. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). West African food composition table. FAO. https://www.fao.org

56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). Cocoa bean production https://ourworldindata.org/grapher/cocoa-bean-production

57. Gao, Q. H., Wu, C. S., Wang, M., & Xu, B. N. (2013). Effect of drying of jujube (Ziziphus jujuba Mill.) fruit on physicochemical properties, bioactive compounds and antioxidant activity. Food Science and Biotechnology, 22(2), 483–492. https://doi.org/10.1007/s10068-013-0101-3

58. GBIF Secretariat. (n.d.). Ziziphus spina-christi (L.) Desf. Global Biodiversity Information Facility. https://www.gbif.org/species/8228089

59. Girard, S. (1994). Le guide du chocolat et de ses à-côtés

60. Goya, L., Kongor, J. E., & de Pascual-Teresa, S. (2022). From cocoa to chocolate: Effect of processing on flavanols and methylxanthines and their mechanisms of action. International Journal of Molecular Sciences, 23(22), 14365. https://doi.org/10.3390/ijms232214365

61. Graves, D. (2012). The antioxidant powerhouse: Role of polyphenols in oxidative stress and chronic diseases. Academic Press.

62. Haddarah, A., Ismail, A., Bassal, A., Hamieh, T., Ioannou, I., & Ghoul, M. (2013). Morphological and chemical variability of Lebanese carob varieties. European scientific journal, 9 (18). https://doi.org/10.1080/09637480701395549

63. Hashem, S. M., & Abd El-Lahot, M. S. (2021). Utilization of Nabaq fruit nutritional value and antioxidant activity in some food products. Journal of Food and Dairy Sciences, 12(5), 111–117. https://doi.org/10.21608/jfds.2021.69882.1020

64. Hassan, N. A. A., Elkhouly, A. W., & Ali, M. I. K. (2025). Nutritional, antioxidant, and sensory properties of Ziziphus spina-christi fruit powder and its application in bakery products. Scientific Reports, 15, 43655. https://doi.org/10.1038/s41598-025-30233-9

65. Hillcoat, D., Lewis, G. P., & Verdcourt, B. (1980). A new species of Ceratonia (Leguminosae-Caesalpinioideae) from Arabia and the Horn of Africa. Kew Bulletin, 34(2), 261–271.

66. Hlin, S. (2001). Le chocolat : un aliment, une drogue, 7–69

67. International Cocoa Organization. (2007). Quarterly bulletin of cocoa statistics. https://www.icco.org.

68. International Cocoa Organization. (2021). Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics (Vol. 47, No. 4, Cocoa year 2020/21). International Cocoa Organization.

69. Ioannou, G. D., Savva, I. K., Christou, A., Stavrou, I. J., & Kapnissi-Christodoulou, C. P. (2023). Phenolic profile, antioxidant activity, and chemometric classification of carob pulp and products. Molecules, 28(5), 2269. https://doi.org/10.3390/molecules28052269

70. Karakuş, M. Ş., Akalan, M., Yücetepe, M., Bayrak Akay, K., Karaaslan, A., Başyiğit, B., & Karaaslan, M. (2023). Kullanıma hazır suda çözünebilir keçiboynuzu kabuğu

71. Latif, R. (2013). Chocolate/cocoa and human health: A review. Nutrition & Metabolism, 10, Article 12.

72. Lerno, J. F. (1992). Le chocolat: des vertus thérapeutiques à la chocolatomanie.

73. Li, J., Fan, L., Ding, S., & Ding, X. (2018). Nutritional composition and antioxidant activity of different Ziziphus species: A review. Food Chemistry, 253, 244–252.

74. Lushchak, V. I. (2014). Free radicals, reactive oxygen species, oxidative stress and its classification. Chemico-Biological Interactions, 224, 164–175.

75. Macho-González, A., Garcimartín, A., López-Oliva, M. E., & Benedí, J. (2018). Carob fruit ameliorates cardiovascular risk by improving lipid profile and reducing LDL oxidation. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 28(9), 920–928.

76. Marita J. M., Nienhuis J., Pires J L. & Aitken W.M. (2001). Analysis of genetic diversity in Theobroma cacao with emphasis on witches´ broom disease resistance. Crop Science, 41: 1305-1316.

77. McFadden, C., & France, C. (1998). Le grand livre du chocolat. Manise

78. Michel, C. G., Nesseem, D. I., & Ismail, M. F. (2011). Anti-diabetic activity and stability study of the formulated leaf extract of Zizyphus spina-christi (L.) Willd with the influence of seasonal variation. Journal of Ethnopharmacology, 133(1), 53–62. https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.09.001

79. Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Analytical Chemistry, 31(3), 426–428. https://doi.org/10.1021/ac60147a030

80. Mohamed Ahmed, I. A., AlJuhaimi, F. Y., Özcan, M. M., Uslu, N., & Karrar, E. (2024). The Role of Different Roasting Temperatures on the Physico-Chemical Properties, Phenolic Compounds, Fatty Acid and Mineral Contents of Carob (Ceratonia siliqua L.) Fruit Powder. Processes, 12(9), 1990. https://doi.org/10.3390/pr12091990

81. Montagna, M., Gonella, E., Mereghetti, V., Magoga, G., Ferrari, E., Pontini, M., Ferracini, C., & Alma, A. (2019). Molecular species delimitation of the Asian chestnut gall wasp biocontrol agent released in Italy. Insect Systematics and Evolution, 50(3), 327–345. https://doi.org/10.1163/1876312X-00002188

82. Motamayor J.C., Risterucci A.M., Heath M. & Lanaud C. (2003). Cacao domestication II: progenitor germplasm of the Trinitario cacao cultivar. Heredity (Edinb) 91 (3), 322–330.

83. Moulessehoul, S., Bensaid, M., Benslama, A., & Khelifi, D. (2023). Contribution à l'étude de la répartition et des caractéristiques écologiques du Ziziphus spina-christi en Algérie. Journal Algérien des Régions Arides, 17(2), 45–56.

84. Mudgil, D., & Barak, S. (2013). Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 61, 1–6.

85. Mudgil, D., Barak, S., & Khatkar, B. S. (2017). Sensory evaluation and quality assessment of food products: A review. Journal of Food Science and Technology, 54(11), 3297–3308.

86. Multon, J.-L. (1992). Le sucre, les sucres, les édulcorants et les glucides de charge dans les industries agroalimentaires. Tec & Doc Lavoisier.

87. Pawłowska, K., et al. (2018). Effect of replacing cocoa powder by carob powder in muffins on sensory and physicochemical properties. Plant Foods for Human Nutrition, 73, 196–202. https://doi.org/10.1007/s11130-018-0675-0

88. Petite M.D. Pinilla J.M., (1995). Production and Purification of a Sugar Pods Syrup from Carob Pods Lebensm. Wiss. U.- Technol. 28, 145-152.

89. Pontillon, J. (1998). Cacao et le chocolat : production, utilisation, caractéristiques. TEC & DOC

90. Popovici, C., Saykova, I., & Tylkowski, B. (2010). Evaluation of antioxidant activity of polyphenols by DPPH method. Chemical Papers, 64(1), 90–92.

91. Rebour, H. (1968). Fruits méditerranéens autres que les agrumes. Paris, France: La Maison Rustique.

92. Rejeb, M. N. (1995). Le caroubier en Tunisie: Situations et perspectives d'amélioration. In Quel avenir pour l'amélioration des plantes (pp. 79–85).

93. Rodríguez-Solana, R., Romano, A., & Moreno-Rojas, J. M. (2021). Carob pulp: A nutritional and functional by-product worldwide spread in the formulation of different food products and beverages. A review. Processes, 9(7), 1146. https://doi.org/10.3390/pr9071146

94. Rtibi, K., Selmi, S., Grami, D., Amri, M., Marzouki, L., & Sebai, H. (2017). Chemical constituents and gastrointestinal protective effects of carob pods (Ceratonia siliqua L.) in rats. RSC Advances, 7(50), 31255–31263.

95. Ruiz-Rodríguez, B. M., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Sánchez-Mata, M. C., Cámara, M., Díez-Marqués, C., … Tardío, J. (2011). Valorization of wild strawberry-tree fruits (Arbutus unedo L.) through nutritional assessment and natural production data. Food Research International, 44(5), 1244–1253.

96. Saadia Mohamed Hachem, Mess Abdellahout. Revue des Sciences des Aliments et des Produits Laitiers, 2021, 12(5), 111–117**.**

97. Saaty, A. H. (2019). Review of the nutritional values and biological activities of Ziziphus spina-christi (Sidr) plant extract. American Journal of Food and Nutrition, 7(4), 166–172. https://doi.org/10.12691/ajfn-7-4-7

98. Saied, A. S., Gebauer, J., Hammer, K. and Buerkert, A. (2008). *Ziziphus spina-Christi* (L.) Willd. A multipurpose fruit tree. Genetic Res. Crop Evol. 55: 929- 937.

99. Saied, A. S., Gebauer, J., Hammer, K., & Buerkert, A. (2008). Ziziphus spina-christi (L.) Willd.: a multipurpose fruit tree. Genetic Resources and Crop Evolution, 55, 929–937. https://doi.org/10.1007/s10722-007-9299-1

100. Samanta, S., Sarkar, T., Chakraborty, R., Rebezov, M., Shariati, M. A., Thiruvengadam, M., & Rengasamy, K. R. R. (2022). Dark chocolate: An overview of its biological activity, processing, and fortification approaches. Current Research in Food Science, 5, 1916–1943. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.10.017

101. Sebai, H., Souli, A., Gharbi, N., et al. (2013). Antioxidant and hepatoprotective effects of carob (Ceratonia siliqua L.). Journal of Medicinal Food, 16(7), 606–613.

102. Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 16(3), 144–158.

103. Smaili, O., Chebouti-Meziou, N., Scollo, F., La Malfa, S., Gentile, A., Distefano, G., Paul Luca, L., & Catalano, C. (2024). Evaluation of the morphological and physicochemical diversity of carob (Ceratonia siliqua, Fabaceae) germplasm from Algeria. Forests, 15(8), 1423. https://doi.org/10.3390/f15081423

104. Sørensen, S. P. L. (1909). Enzymstudien II: Über die Messung und die Bedeutung der Wasserstoffionenkonzentration bei enzymatischen Prozessen. Biochemische Zeitschrift, 21, 131–304.

105. Talbot, G. (2012). Chocolate and cocoa butter—Structure and composition. In N. Garti & N. R. Widlak (Eds.), Cocoa butter and related compounds (pp. 1–33). AOCS Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-9830791-2-5.50004-9

106. Tozu üretiminin yanıt yüzey yöntemi ile çift aşamalı optimizasyonu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *12*(2), 408-419. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1205063

107. Ueda, J. M., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Ferreira, A., Barros, L., Carocho, M., & Heleno, S. A. (2023). Powdered foods: Structure, processing, and challenges: A review. Applied Sciences, 13(22), 12496. https://doi.org/10.3390/app132212496

108. Valero-Muñoz, M., Martín-Fernández, B., & Ballesteros, S. (2019). Protective effects of carob extracts on cardiovascular health and lipid peroxidation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67(15), 4210–4218.

109. Wali, A. F., Pillai, J. R., Beigh, S., et al. (2022). Ethnopharmacological uses, phytochemistry, pharmacological properties and clinical trials of Ziziphus spina-christi: A comprehensive review. Saudi Pharmaceutical Journal.

110. Watts, B. M., Ylimaki, G. L., Jeffery, L. E., & Elias, L. G. (1991). Basic sensory methods for food evaluation. International Development Research Centre.

111. Ydjedd, S., Chaalal, M., Richard, G., Kati, D. E., López-Nicolás, R., Fauconnier, M. L., & Louaileche, H. (2017). Assessment of antioxidant potential of phenolic compounds fractions of Ceratonia siliqua L. pods during ripening stages. International Food Research Journal, 24(5), 2041–2049.

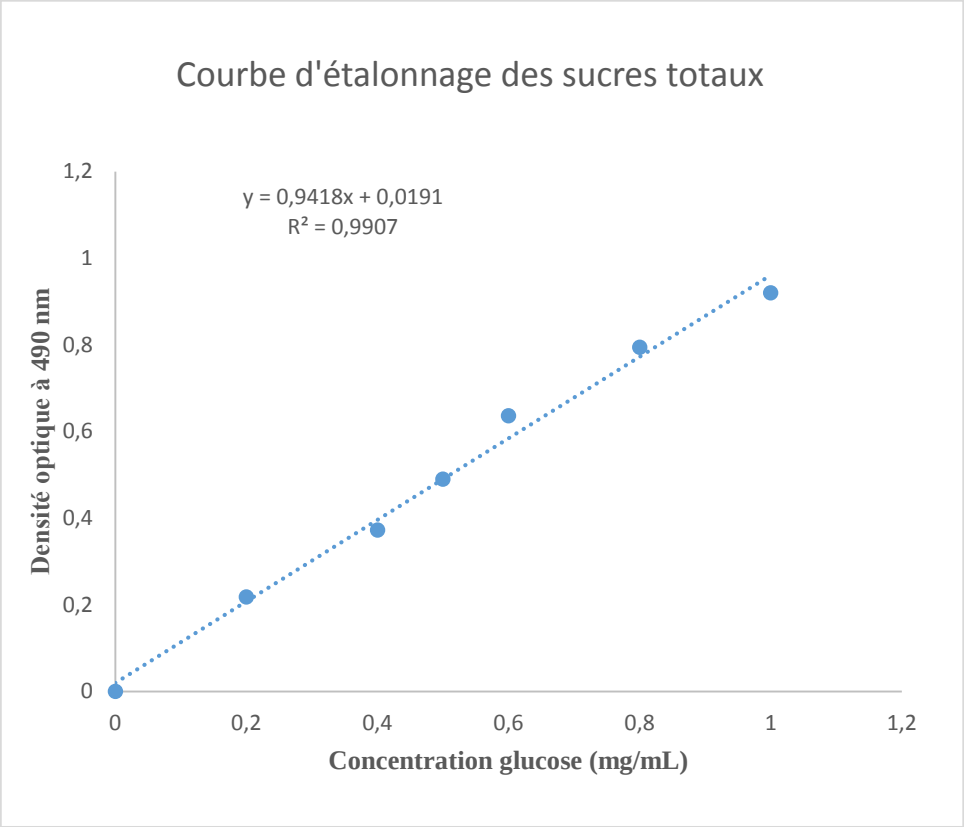
112. Yelwa, S. A. (2021). Proximate and selected mineral elements analysis of Nigerian Ziziphus spina-christi (L.) Willd edible fruit pulp. Earthline Journal of Chemical Sciences, 5(1), 231–240. https://doi.org/10.34198/ejcs.5121.231240

113. Yousif, A. K., & Alghzawi, H. M. (2000). Processing and characterization of carob powder. Food Chemistry, 69(3), 283–287. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00265-4

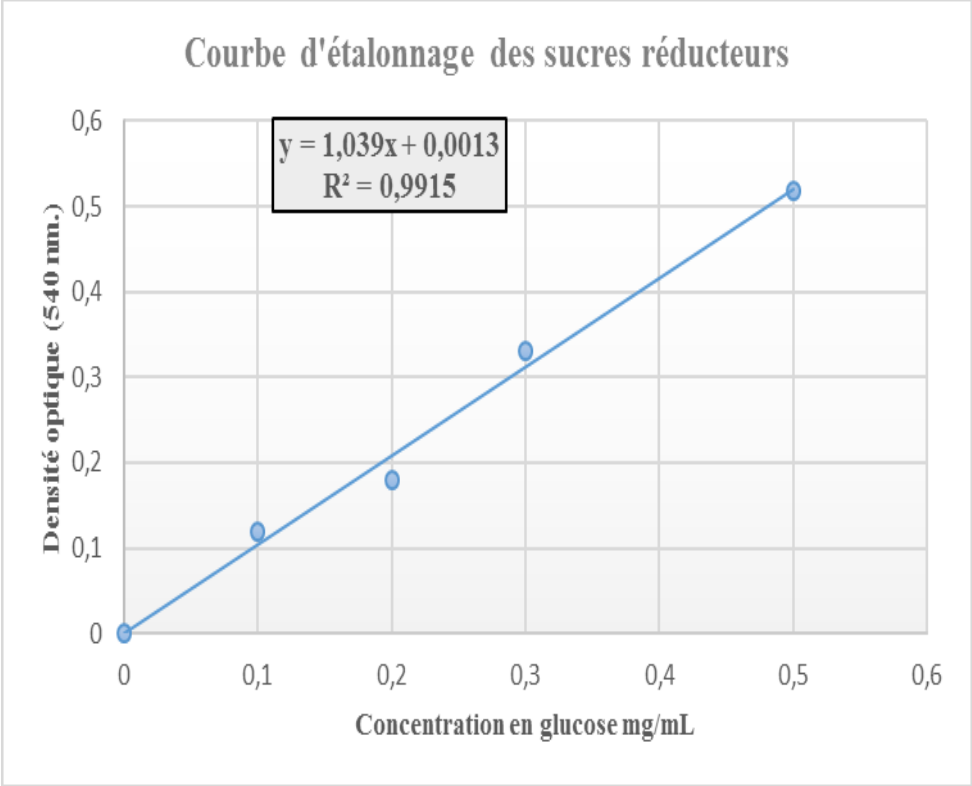
114. Zait, Y., Konsens, I., & Schwartz, A. (2020). Elucidating the limiting factors for regeneration and successful establishment of the thermophilic tree Ziziphus spina-christi under a changing climate. Scientific Reports, 10(1), 14335. https://doi.org/10.1038/s41598-020-71276-4

Les annexes

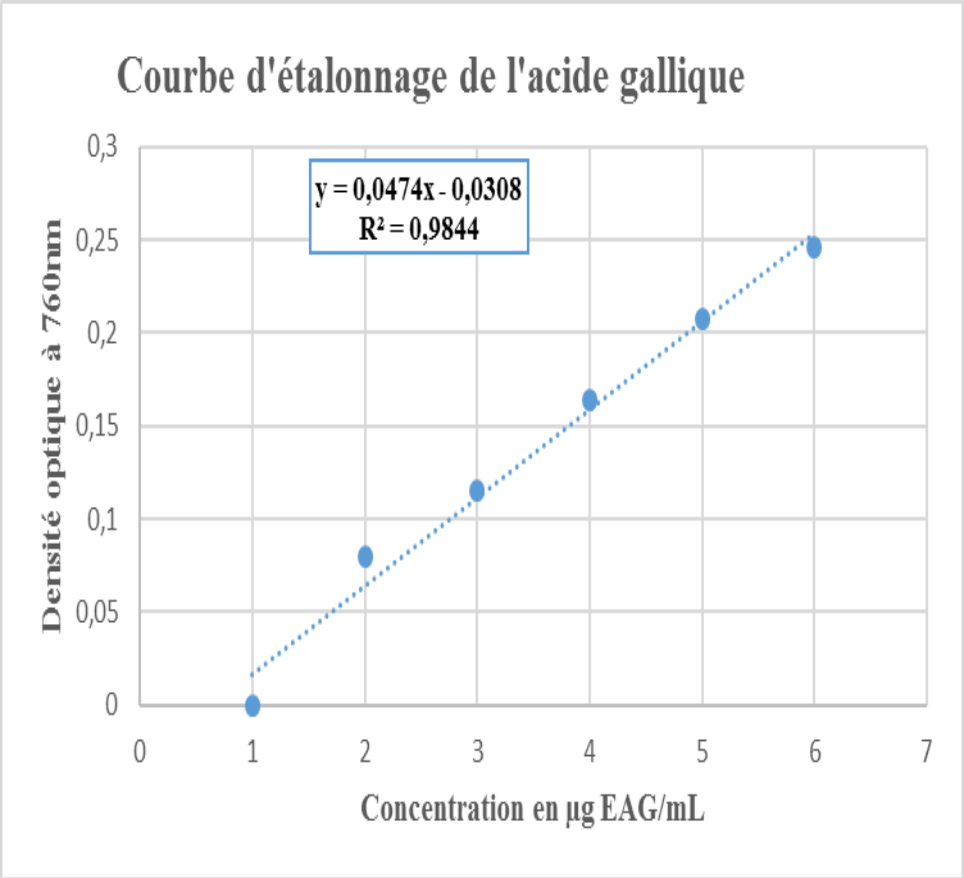
Annexe 1 : Courbe d'étalonnage des sucres totaux



Annexe 2 : Courbe d'étalonnage des sucres réducteurs



Annexe 3 : Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.



Annexe 4 : Photo de fiche dégustation chocolat

FICHE DE TEST HÉDONIQUE

Chocolats formulés à base de Cacao, Nabaq et Caroube

Dégustateur : Age :
Sexe : H / F

6 formulations des chocolats codés T0, T1, T2, T3, T4 et T5 sont présentés devant vous. Veuillez attribuer une note de 1 à 9 selon votre degré d'appréciation de chaque caractéristique.
1 = Je déteste extrêmement

5 = Ni aimé ni détesté

9 = J'aime extrêmement

Attributs organoleptique	Echantillon T0	Echantillon T1	Echantillon T2	Echantillon T3	Echantillon T4	Echantillon T5
1. ATTRIBUTS VISUELS						
Couleur						
Brillance						
3. ATTRIBUTS GUSTATIFS						
Goût global						
Appréciation du goût Cacao						
Appréciation du goût Caroube						
Appréciation du goût Nabaq						
Appréciation de l'arrière-goût						
2. ATTRIBUTS OLFACTIFS						
Intensité aromatique globale						
4. TEXTURE						
Texture en bouche						
Fondant en bouche						
5. Appréciation globale						
Acceptabilité globale						
Intention d'achat						

Quel est votre échantillon préférer ?

Classez les échantillons du plus apprécié au moins apprécié :

- Echantillon T0: .....
- Echantillon T1 : .....
- Echantillon T2 : .....
- Echantillon T3: .....
- Echantillon T4 : .....
- Echantillon T5:.....

Merci de nous aider à remplir ce questionnaire, nous espérons que vous avez apprécié l'expérience passe une bonne journée

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement
Supérieur etde la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences كلية العلوم
Dpartement D' Agronomie قسم علوم الفلاحة
Réf : / D S AGRO/20262026 / ق ع ف /

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
أوت 1955- سكيكدة

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **DJEFFAL Samia.** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : BERRAHAL Manar

Spécialité : **Agroalimentaire et qualité des produits**

Intitulé : **Possibilité de remplacement partiel et total du cacao dans la formulation de chocolat par des poudres de nabaq (*Ziziphus spina*-christi) et de caroube (*Ceratonia siliqua*) Formulation, caractérisation physicochimique et sensorielle.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

تم المسح الضوئي بـ CamScanner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement
Supérieur etde la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences كلية العلوم
Dpartement D' Agronomie قسم علوم الفلاحة
Réf : / D S AGRO/20262026 / ق ع ف /

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
ئوت 1955- سكيكدة

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **DJEFFAL Samia.** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : BENMOUSSA Aya

Spécialité : **Agroalimentaire et qualité des produits**

Intitulé : **Possibilité de remplacement partiel et total du cacao dans la formulation de chocolat par des poudres de nabaq (*Ziziphus spina*-christi) et de caroube (*Ceratonia siliqua*) Formulation, caractérisation physicochimique et sensorielle.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

تم المسح الضوئي بـ CamScanner

الجمـــهوريـة الجزائـــريـة الديمقراطية الشعبيـــة.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement
Supérieur etde la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences كلية العلـوم
Dpartement D' Agronomie قسم علوم الفلاحة
Réf : / D S AGRO/20262026 / ق ع ف /

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
أوت 1955- سكيكدة

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **DJEFFAL Samia.** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : MOUMANI Ghada

Spécialité : **Agroalimentaire et qualité des produits**

Intitulé : **Possibilité de remplacement partiel et total du cacao dans la formulation de chocolat par des poudres de nabaq (*Ziziphus spina*-christi) et de caroube (*Ceratonia siliqua*) Formulation, caractérisation physicochimique et sensorielle.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

تم المسح الضوئي بـ CamScanner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement
Supérieur etde la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 - SKIKDA -
Faculté des Sciences كلية العلوم
Dpartement D' Agronomie قسم علوم الفلاحة
Réf : / D S AGRO/20262026 / ق ع ف /

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
أوت 1955- سكيكدة

Skikda le : .....

Autorisation de Dépôt de Mémoire de Master

Je soussigné(e) : **DJEFFAL Samia.** Président(e) de Jury

Certifie que L'étudiant(e) : ZRAYOUD Ilham

Spécialité : **Agroalimentaire et qualité des produits**

Intitulé : **Possibilité de remplacement partiel et total du cacao dans la formulation de chocolat par des poudres de nabaq (*Ziziphus spina*-christi) et de caroube (*Ceratonia siliqua*) Formulation, caractérisation physicochimique et sensorielle.**

A apporté les corrections relatives à son travail de mémoire.

Directeur de mémoire	Président(e) de Jury

تم المسح الضوئي بـ CamScanner