



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou Bakr Balkaid-TLEMCEM



Département de Biologie

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Génétique

Thème

**Identification par caractérisation morpho-géométrique des
folioles de populations mâles, femelles et hermaphrodites du
caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) en Algérie**

Elaboré par

RAIS Salima

ADNANE Yousra

Soutenu le 15/09/2022

Devant le jury composé de

Président	Mr. GAOUAR S.B.S.	Professeur	Univ. Tlemcen
Encadreur	Mr. MAHDAD Moustafa Yassine	M.C.B	C. Univ. Naâma
Examinatrice	Mme. BELLATRECHE Amina	M.C.A	Univ. Tlemcen

Année Universitaire 2021/2022

Dédicaces

A mes très chers parents, avant tout et partout, qui ont toujours été là
pour moi ;

Mon père ; mon gentil et adorable papa , ma fierté et mon exemple
dans cette vie , qui m'a tout donné sans rien recevoir en parallèle , qui
n'a pas un seul instant cessé de m'encourager et de me booster pour
atteindre mes objectifs ,mon homme dont j'essaierai toujours de lui
faire honneur et fierté .

A ma lionne ; au symbole de la bonté par excellence, la source de
tendresse, ma mère qui m'a fortement soutenu et qui a été toujours à
mes côtés qui n'a pas cessé de me conseiller et prier pour moi ; Que
dieu la bénisse.

A mes frères et mes sœurs « Issam, Riad, Afaf et Ghada » qu'ils
trouvent ici le témoignage de ma profonde tendresse.

A ma nièce Anaïs,

A toute ma famille et amis....

Yousra.

Je profite de cette honorable occasion pour dédier ce travail

A la mémoire de mon père « qu'il repose en paix » qui a béni mon désir d'apprendre et m'a toujours encouragé, avec tout mon amour et ma reconnaissance pour être devenue ce qui je suis.

A la source de la tendance, ma mère. Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement.

A mes frères et sœurs « Fathi, Mohammed, Souad et Malika »

Ma nièce Hadjer,

A toute chère famille et amis ...

Salima.

Remerciements

Gloire à ALLAH le tout puissant pour la volonté, et la patience qu'il nous a prodiguée tout le long de ce travail. Qui nous a comblées de sa miséricorde jusqu'à la réalisation de ce modeste mémoire. Merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.

Nous tenons à exprimer notre vif remerciement et profonde gratitude à notre encadrant Monsieur MAHDAD Moustafa Yassine qui, tout au long de l'encadrement, nous a fait bénéficier de son expérience, ses conseils fructueux qu'il nous a prodigués, la patience, de nous avoir accordé sa confiance en acceptant de nous encadrer.

Nous tenons à exprimer notre gratitude au Professeur GAOUAR Semir Bechir Suheil pour ses précieux conseils, son soutien et sa présence tout au long de notre formation en licence et master, ainsi que pour nous avoir fait l'immense plaisir d'accepter la présidence de ce jury.

Nous adressons nos remerciements à Mme BELLATRECHE Amina, Maîtres de conférences à l'Université de Tlemcen, pour avoir bien voulu examiner ce travail.

À Mr. MEDOUNI Mohammed Reda qui a bien voulu nous aider à réaliser ce travail avec beaucoup de compétence et d'efficacité. Pour ses orientations, sa disponibilité, son aide et ses conseils qui nous en était très précieux. Nous lui devons une immense reconnaissance et un très grand respect.

On n'oublie pas Belantar Ibrahim pour sa disponibilité, son aide précieux, son écoute et ses Conseils.

Merci mille fois à tous ceux qui ont rendu ce travail

Finalement possible

Résumé

Le caroubier est une espèce agro-sylvo-pastorale présentant des enjeux socio-économiques et écologiques importants. Depuis de nombreuses années, la cératoniculture en Algérie est en régression, principalement à cause de l'effet des facteurs anthropiques. Néanmoins, cette régression a conduit à la hausse des prix du caroubier, rendant cette spéculation très lucrative pour les agriculteurs et les agro-industriels. Toutefois, la problématique du déterminisme sexuel chez le caroubier reste un inconvénient important pour la création de vergers et le développement des programmes d'amélioration génétique de l'espèce. D'où l'objectif de cette étude qui est d'identifier et de distinguer par une caractérisation morpho-géométrique des folioles, les caroubiers de sexe mâle, femelle et hermaphrodite, provenant de 21 régions différentes du nord Algérien.

Au total 781 folioles ont fait l'objet de caractérisation à travers le choix de 16 points repères (Landmarks). Une fois enregistrées en format numérique (TPS), les conformations morpho-géométriques sont alignées et superposées à l'aide de technique de superposition de Procruste. L'Analyse de variance (ANOVA) des données a révélé des différences hautement significative pour la forme ($p=0.0001$), et significative pour la taille centroïde ($p=0,0243$) entre les trois populations étudiées. L'analyse descriptive de la taille a montré une seule différence significative ($p=0.035$) entre la taille des folioles hermaphrodites et mâles. L'analyse en composantes principales (ACP) a présenté une inertie de 57,15% entre les deux premiers composants et a fait apparaître trois formes différentes. L'analyse des variantes canonique (AC) a distingué ces différentes formes, la foliole femelle tant vers une forme elliptique avec une base contractée en nœud vers le bas et avec apex caractérisé par un angle fermé. Tandis que la forme de la foliole mâle est en général ovale avec une base dispersée à apex caractérisé par un angle ouvert. Les folioles des hermaphrodites ressemblent aux folioles des mâles (ovale) mais avec une base aplatie. Ces résultats peuvent être utilisés comme moyen pour faire une sélection préliminaire des jeunes plants de caroubier.

Mots-clés : Caroubier, populations, folioles, caractérisation, morpho-géométrie, forme.

Abstract

The carob tree is an agro-salvo-pastoral species that has an important socio-economic and ecological role. For many years, the horticultural in Algeria has been in regression, mainly due to the effect of anthropic factors. This regression has led to the increase in carob tree prices, which makes this speculation gainful for farmers and agro-industrialists. However, the problem of sexual determinism in carob remains an important difficulty for the creation of orchards and the development of genetic improvement programs for the species. So the object of this study is to identify and distinguish by a morpho-geometric characterization of the leaflets, the carob trees of male, female and hermaphrodite sex, from 21 different regions of the Algerian north with 781 leaflets characterized through the selection of 16 landmarks. Once recorded in digital format (TPS), the morpho-geometric conformations are aligned and superimposed using the Procrustean superposition technique.

Analysis of variance (ANOVA) of the data revealed highly significant differences in shape ($p=0.0001$), and significant centroid size ($p=0.0243$) between the three populations studied. Descriptive analysis of size showed only one significant difference ($p=0.035$) between the size of hermaphrodite and male leaflets. Principal component analysis (PCA) showed inertia of 57.15% between the first two components and revealed three different shapes. The analysis of canonical variants (CA) distinguished these different forms, the female leaflet so much towards an elliptical form with a base contracted in node downwards and with apex characterized by a closed-angle. While the shape of the male leaflet is generally oval with a scattered base and with apex characterized by an open-angle. The leaflets of hermaphrodites resemble the leaflets of males (oval) but with a flattened base. These results can be used as a means to make a preliminary selection of young carob plants.

Keywords: Carob tree, populations, leaflets, characterization, morpho-geometry, shape.

المخلص

شجرة الخروب هي نوع من الأشجار الزراعية والغابية والرعية ذات قيمة اقتصادية وبيئية مهمة. شهدت زراعة أشجار الخروب في الجزائر تدهورًا منذ سنوات عديدة، ويرجع ذلك أساسًا إلى تأثير العوامل البشرية. ومع ذلك، أدى هذا الانحدار إلى ارتفاع أسعار الخروب، مما جعل هذه المضاربة مربحة للغاية للمزارعين والصناعيين الزراعيين. ومع ذلك، فإن مشكلة تحديد جنس شجرة الخروب تظل عائقًا رئيسيًا لإنشاء البساتين وتطوير برامج التحسين الوراثي للأنواع.

من هنا فإن الهدف من هذه الدراسة هو التعرف والتمييز، من خلال التوصيف الهندسي للوريقات، لأشجار الخروب من الذكور والإناث والخنثى من 21 منطقة مختلفة من شمال الجزائر. تم تمييز 781 وريقة من خلال اختبار 16 معلمًا هندسيًا. بمجرد تسجيلها بتنسيق رقمي (TPS)، تتم محاذاة المطابقة المورفولوجية الهندسية وفرضها باستخدام تقنية التطابق التراكمي.

كشفت تحليل التباين (ANOVA) من البيانات عن وجود فروق كبيرة ذات دلالة إحصائية بالنسبة للشكل (0.0001) وكذلك فرق بالنسبة لحجم ($p = 0.0243$) بين المجموعات السكانية الثلاثة المدروسة. أظهر تحليل الحجم الوصفي اختلافًا واحدًا فقط ($p = 0.035$) بين حجم الوريقات الخنثوية والذكور. أظهر تحليل المكون الرئيسي (PCA) خملاً بنسبة 57.15% بين المكونين الأولين وكشفت عن ثلاثة أشكال مختلفة. ميز تحليل المتغيرات (AC) هذه الأشكال المختلفة، الوريقات شجرة الأنثى باتجاه شكل بيضاوي مع قاعدة متقلصة في عقدة لأسفل وذات قمة تتميز بزواوية مغلقة. في حين أن شكل الوريقة الشجرة الذكرية بشكل عام بيضاوي مع قاعدة متناثرة ذات قمة تتميز بزواوية مفتوحة. وريقات الخنثى تشبه وريقات الذكور (بيضاوية) لكن بقاعدة مسطحة. حيث يمكن استخدام هذه النتائج كوسيلة لإجراء اختبار أولي لشتلات الخروب.

الكلمات المفتاحية: شجرة الخروب، المجموعات السكانية، المنشورات، التوصيف، الشكل الهندسي.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACP : Analyse des composantes principales.

ANOVA : Analyse de la Variance.

Cm : centimètre.

CV : Analyses des variantes canoniques.

D² : distances de Mahalanobis.

Ddl: degrees de liberté.

DF: degree of freedom.

DFG : Direction générale des forêts.

DSA : Direction des Services Agricole de la wilaya de Tlemcen.

E410 : Additif alimentaire (Gomme de caroube)

FAO: Food and agricultural organization.

G : gramme.

Ha : hectare.

Kg : Kilogramme.

LM: Landmarks.

M : mètre.

Mg : Milligramme.

Mm : millimètre.

MS: Mean of Sum Squares (carrés moyen).

P : valeur de probabilité.

PEG : polyéthylène glycol.

PR : points de repère.

PR : Points Repères.

Q_x : quintaux.

Q_x/ha : quintaux par hectare.

SS: Sum of Squares (Somme des carrés).

T : tonne.

TPS : Méthode des plaques minces.

LISTE DES FIGURES

Figure 01. Origine tropicale pré-méditerranée du caroubier	04
Figure 02. Distribution du caroubier dans le monde.	05
Figure 03. Production mondiale de la caroube, année 2017	07
Figure 04. Le Caroubier.....	10
Figure 05. Tronc du Ceratonia siliqua	10
Figure 06. Feuille et foliole du caroubier	10
Figure 07. Racines du caroubier	11
Figure 08. Branches du caroubier	11
Figure 09. Inflorescence femelle	14
Figure 10. Inflorescence mâle	14
Figure 11. Inflorescence hermaphrodite	14
Figure 12. Inflorescence polygames	14
Figure 13. Graines de caroubier	14
Figure 14. Fruit de caroubier	16
Figure 15. La gousse de la caroube	16
Figure 16. Fructification du caroubier sur des rameaux secondaires et sur le tronc	18
Figure 17. Les graines traitées avec de l'acide sulfurique pour faciliter la germination....	19
Figure 18. La germination des graines de caroubier	19
Figure 19. Boutures en pépinière.....	20
Figure 20. Des plantes de caroubiers greffés dans la pépinière.....	21
Figure 21. Vitroplants de caroubier	22
Figure 22. Arbre du caroubier utilisé dans l'ornementation et l'ombrage	23
Figure 23. Composants de la graine du caroubier	26
Figure 24. Produits de confiseries fabriqués à partir de caroube.....	28
Figure 25. Gomme de caroube	29
Figure 26. Poudre de caroube	29
Figure 27. La carte géographique des régions échantillonnées	31
Figure 28. Photo de la feuille de caroubier N° 01, femelle	32
Figure 29. Organisation des dossiers	33
Figure 30. La fenêtre principale du logiciel TpsUtil.	34
Figure 31. Etape 1 de la création d'un fichier TPS	34
Figure 32. Etape 2 de la création d'un fichier TPS	34

Figure 33. La fenêtre de répertoire d'images	34
Figure 34. Etape 3 de la création d'un fichier TPS	35
Figure 35. Etape de la nomination du fichier TPS	35
Figure 36. Etape 4 la création du fichier TPS.....	35
Figure 37. Etape 5.....	35
Figure 38. La fenêtre principale du logiciel TpsDig 32	36
Figure 39. Interface graphique du logiciel TpsDig2.....	37
Figure 40. Diagramme de distribution cumulative des distances des échantillons individuels et de la forme moyenne de l'échantillon complet.....	39
Figure 41. Résultat de la superposition de Procruste.....	39
Figure 42. Pourcentage de la variation expliquée par les axes principaux	42
Figure 43. Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le premier axe.....	44
Figure 44. Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le deuxième axe.....	44
Figure 45. Projection des individus Présentation des résultats et discussion selon les deux premières composantes principales	45
Figure 46. Visualisation du changement de la foliole selon le premier axe(CV1).....	46
Figure 47. Visualisation du changement de la foliole selon le deuxième axe(CV2).....	46
Figure 48. Représentation graphique des variantes canoniques 1 et 2	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01. Classification taxonomique du genre <i>Ceratonia</i>	03
Tableau02. Estimations de la superficie récoltée, de la production et du rendement de le caroube pour l'année 2017	06
Tableau 03. Présent la superficie cultivée, la production et le rendement du <i>Ceratonia</i> . Siliqua en Algérie en 2009	08
Tableau 04. Composition moyenne de la pulpe de caroube Puhane et Wielinga	25
Tableau 05. Utilisations de la gomme de caroube et ses applications techniques	28
Tableau 06. Cordonnées des points repères du consensus (nouvelles variables).....	40
Tableau07. Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance pour la taille du centroïde (Centroid size) pour les folioles de caroubier.....	41
Tableau 08. Moyenne, minimum, maximum, de la taille centroïde des folioles pour chaque population	41
Tableau 09. Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance pour la forme (Shape) pour les folioles de caroubier.....	42
Tableau10. Valeurs propres et pourcentages de la variance expliquée par les de l'ACP ..	43
Tableau 11. Résultats des distances de Mahalanobis entre les groupes.....	47

TABLE DES MATIÈRES

Liste des abréviations	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	

Synthèse bibliographique

Première partie : Présentation du caroubier

1. Taxonomie et terminologie commune.....	03
2. Origine et Répartition biogéographique	04
2.1.Origine du caroubier.....	04
2.2.Répartition biogéographique	04
2.2.1. Dans le monde.....	04
2.2.2. En Algérie	05
3. Aire de production du caroubier	06
3.1 . Dans le monde	06
3.2.Au niveau national	08
4. Description botanique	09
4.1.Racines	09
4.2.Tronc	10
4.3.Branche.....	10
4.4.Feuilles	10
4.5.Fleurs	13
4.6.Graine	15
4.7.Fruits.....	16
5. Reproduction biologique	18
6. Multiplication	19
6.1. Par Semis	19
6.2. Par Bouturage	21
6.3. Par Greffage	21
6.4. Culture in vitro du caroubier	22
7. Impact écologique et économique	23
7.1.Ecologique	23

7.2.Economique	24
8. Propriétés et utilisations du caroubier	25
8.1.Propriétés	25
8.2.Utilisations	28

Partie expérimentale

Deuxième partie : Matériels et méthodes

1. Objectif	31
2. Régions d'échantillonnage	31
3. Récolte du matériel végétal.....	31
4. Méthode de caractérisation morpho-géométrique.....	32
4.1.Prise des photos numériques et traitement des images	32
4.2.Organisation des dossiers.....	32
4.3.Choix de points de repères	33
4.3.1. Collecte des données.....	33
4.3.2. Création du fichier TPS	33
4.3.3. Numérisation ou Digitalisation des points repères	36
4.4.Vérification des données.....	37
5. Analyse statistique	37

Troisième Partie : Résultats et discussion

1. Vérification des valeurs aberrantes	39
2. Superposition de Procruste	39
3. l'ANOVA (Analyse de la variance).....	41
4. Analyse en composantes principales (ACP)	42
4.1. Distribution de l'inertie.....	42
4.2. Description de l'ACP.....	42
4.2.1. Changement de conformation dans le deuxième axe.....	43
4.2.2. Changement de conformation dans le premier axe.....	44
5. Les analyses des variantes canoniques	45
6. Distance de Mahalanobis (D^2)	47

Conclusion générale et perspectives	50
--	-----------

Références bibliographiques	51
--	-----------

INTRODUCTION GENERALE

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) est un arbre fruitier de la famille des Fabacées, ayant une origine tropicale pré-méditerranée (Mahdad, 2022). Cette espèce a été domestiquée depuis la nuit des temps, remontant à 4000 ans avant J.C. Elle est cultivée de manière extensive depuis au moins 2000 ans avant J.C. pour ses produits dérivés mais aussi pour sa tolérance au manque d'eau (Ait Chitt et al., 2007 ; Biner et al., 2007). C'est une espèce xérophile, sclérophylle, héliophile, calcicole, et thermophile (Mahdad et Gaouar, 2016).

Cette espèce agroforestière rustique joue un rôle socio-économique et écologique essentiel, en particulier dans les régions sèches et les zones où les processus de désertification se produisent à des magnitudes importantes, notamment en Algérie (Mahdad et al., 2022). Toutes les parties de ce précieux végétal (feuillage, fleur, fruit, bois, écorce, racine) sont susceptibles d'un réel intérêt et ont une valeur ornementale ou paysagère (Hariri et al., 2009). De ce fait, il est considéré comme l'un des arbres fruitiers et forestiers ayant le plus grand potentiel de valorisation, en raison de sa forte teneur en nutriments, qui a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs, mais surtout pour ses graines, qui font l'objet de transactions commerciales dont la valeur dépasse de loin celle de la production ligneuse. Ainsi, les gousses entières, les graines, pulpe et la gomme sont largement vendues en Europe et largement utilisées dans l'agroalimentaire (Biner et al., 2007).

En Algérie, la production de caroube est en baisse continue et ce en raison du vieillissement de peu de vergers de caroubier existants, des incendies à répétitions ravageant des dizaines de milliers de caroubiers chaque année, mais aussi, de l'absence de programmes de renouvellement et d'installation de nouvelles plantations viables (Mahdad, 2022). De ce fait, la mise en place urgente de stratégies de gestion de l'espèce est fortement recommandée en vue de conserver sa diversité génétique et améliorer ses caractéristiques agronomiques et commerciales.

Parmi ses caractères agronomiques, l'entrée tardive en floraison des pieds femelles qui est considérée comme un inconvénient non seulement pour le rendement, puisque le semis chez le caroubier, espèce dioïque, donne un ratio de 50% de femelles et 50% de mâles improductifs (Mahdad, 2013), mais aussi pour les programmes d'amélioration génétique issus de croisement entre des parents sélectionnés, lesquels prendront un temps considérable (jusqu'à 8 ans) pour la sélection des individus de la génération F1. Ces inconvénients notamment celui du

déterminisme sexuel peut être surmonté par les différences qui pourraient exister entre les feuilles des différents sexes de pieds de caroubier, d'où l'objectif de cette étude qui est d'identifier par une caractérisation morpho-géométrique les folioles des populations mâles, femelles et hermaphrodites afin de permettre la sélection des plants selon leur sexe dès leur plus jeune âge.

Ce manuscrit est divisé en trois parties, la première est dédiée à la synthèse bibliographique qui fournit des généralités sur le caroubier, la deuxième partie comprend les méthodologies utilisées pour la réalisation de ce travail. Enfin, la dernière partie est consacrée aux résultats et discussion.

1^{ère} PARTIE

PRESENTATION DU CAROUBIER

1. Taxonomie et terminologie commune

Ceratonia siliqua L, nom scientifique proposé par Linnaeus est dérivé du grec keras = corne et du latin siliqua (gousse), faisant allusion à la forme de son fruit, qui ressemble à une corne de bouc (Bolonos, 1955). Dans différents pays et langues le nom du caroubier découle d'une forme générale du nom arabe Al kharroub ou kharroub (Albanell, 1990), comme c'est le cas del algarrobo ou garrofero en espagnol, carrubo en italien caroubier en français, et garrofer ou garrover en catalan...etc (Mahdad, 2022).

Par ailleurs, en raison de leur uniformité, les graines de caroube sont appelées " carats " et ont longtemps été utilisées par les joailliers comme unité de poids pour peser les diamants, les perles et autres pierres précieuses (1 carat= 205,3mg) (Rejeb, 1995).

Dans certains cas, le caroubier prend une terminologie commune selon la croyance que Saint Jean-Baptiste s'alimenta du fruit de cet arbre durant son séjour dans le désert, lequel a donné origine à la dénomination "pain de Saint Jean-Baptiste" (Albanell, 1990).

Cette espèce appartient au genre *Ceratonia* de la classe des Magnoliosida, famille des légumineuses (Sbay, 2008) (Tableau 01).

Tableau 01. Classification taxonomique du genre *Ceratonia* (Sbay, 2008)

Règne	Plantae
Sous-règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliosida
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Rosales
Famille	Legumineuses
Sous-famille	Caesalpinioideae
Sous-tribu	Ceratoninae
Genre	<i>Ceratonia</i>
Règne	Plantae

2. Origine et Répartition biogéographique

2.1. Origine du caroubier

Les données génétiques et fossiles soutiennent une origine pré-méditerranéenne du caroubier et ses ancêtres étaient probablement distribués largement autour de la mer de Téthys au cours du paléogène dans des forêts tropicales (Figure 01) qui ont été appauvries par les extinctions successives pendant la transition vers le climat méditerranéen (Mahdad et al., 2022).



Figure 01. Origine tropicale pré-méditerranée du caroubier (Mahdad, 2022)

2.2. Répartition biogéographique

2.2.1. Dans le monde

Selon Hillcoat et al. (1980), le caroubier s'étend dans la nature, en Turquie, Chypre, Syrie, Liban, Palestine, le Sud de la Jordanie, Egypte, Arabie, Tunisie et Lybie avant d'atteindre la Méditerranée occidentale. En effet, des preuves archéologiques et philologiques suggèrent une dissémination par l'homme de *C. siliqua* de l'Arabie, où elle a trouvé refuge au cours de l'époque glaciaire, vers la Mésopotamie, puis vers l'ouest de la Méditerranée (Mahdad, 2022).

Le caroubier s'est récemment répandu depuis l'Espagne (Figure 02) vers d'autres régions à climat méditerranéen comme la Californie (USA), le Mexique, le Chili et l'Argentine (Mahdad, 2022). Il a été introduit dans certaines parties de l'Australie par les migrants méditerranéens et en Afrique du Sud et en Inde par les Anglais (Batlle et Tous, 1997).

La Méditerranée est incontestablement le centre de diversification de *C. siliqua* et par conséquent, c'est la région qui abrite la plus importante ressource génétique de l'espèce, laquelle est nécessaire pour la mise en place de programmes d'amélioration génétique chez l'espèce (Mahdad, 2022).

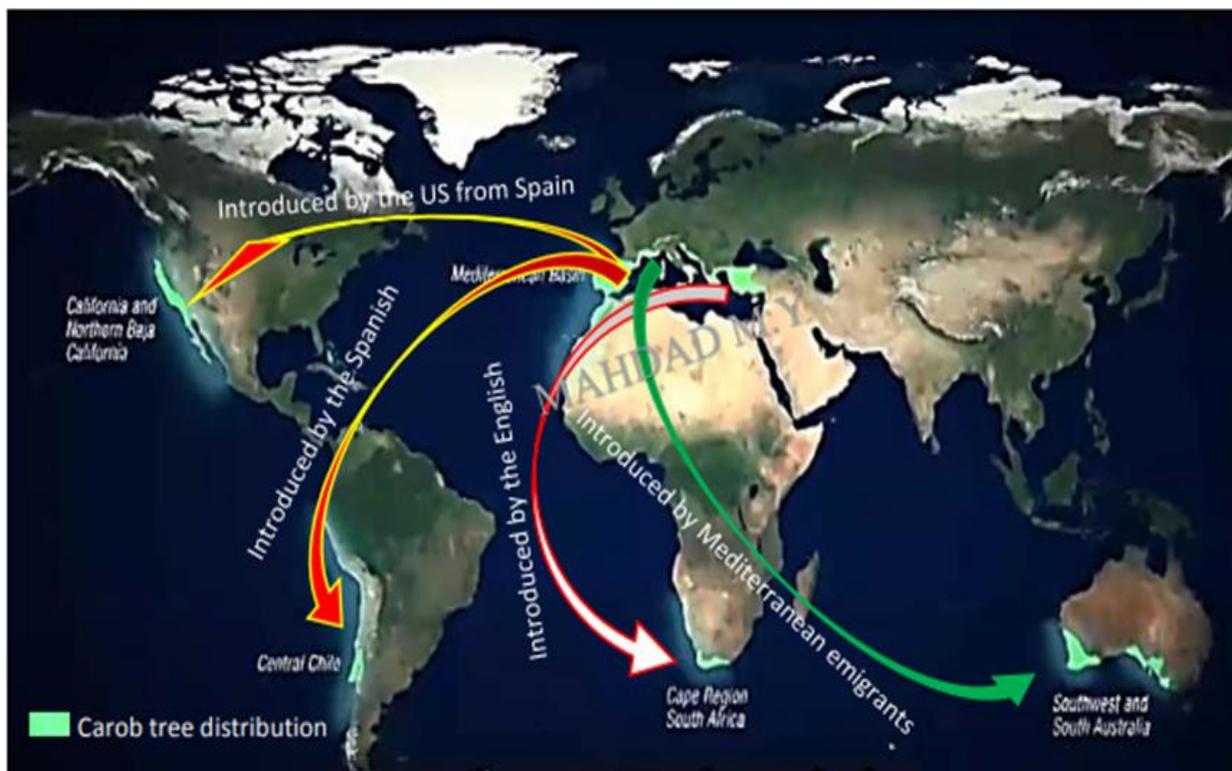


Figure 02. Distribution du caroubier dans le monde (Mahdad, 2022)

2.2.2. En Algérie

Les caroubiers ont été rarement plantés dans l'Atlas saharien et très fréquemment dans le tell. On le trouve généralement dans les régions au climat méditerranéen (Baumel et al., 2018), mais aussi dans les régions au climat continental comme la steppe algérienne, où des caroubiers sauvages ont été observés à 1168 m d'altitude dans des zones où les températures atteignent régulièrement - 10 °C (Mahdad, 2013). L'espèce *C. siliqua* est en association commune avec

l'olivier (*Olea europaea*), le lentisque (*Pistacia lentiscus*), et occasionnellement associée à l'olivier sauvage (*Olea oleaster*) et au lentisque du Mont Atlas (*Pistacia atlantica*), et rarement au laurier-rose (*Nerium oleander*) dans les thalwegs de la steppe algérienne (Mahdad et al., 2022).

3. Aire de production du caroubier

3.1. Dans le monde

La superficie récoltée totale du caroubier dans le monde en 2017 est estimée à 45.626 ha (Tableau 01) desquels 38.227 ha (83,78 %) sont répartis entre le Portugal, le Maroc, l'Espagne et l'Italie. La production mondiale de la caroube est estimée à 173.423 t et se concentre principalement en Portugal, premier pays producteur avec 41.329 t, ce qui représente le quart de la production mondiale (Figure 03) suivi par l'Espagne avec le 1/5 de la production mondiale et l'Italie (16,67 %). L'Algérie occupe le neuvième rang avec une production de 4042 t, soit 2,33 % de la production mondiale. (Mahdad, 2022).

Tableau02. Estimations de la superficie récoltée, de la production et du rendement de la caroube pour l'année 2017 (Mahdad, 2022)

Pays*	Superficie récoltée (ha)	Production (tonnes)	Rendement (t /ha)
Portugal	13240	41329	3.12
Maroc	10234	21611	2.11
Espagne	9177	36368	3.96
Italie	5576	28910	5.18
Grèce	1757	12287	6.99
Palestine	1730	477	0.27
Chypre	982	7475	7.61
Algérie	827	4042	4.89
Turquie	674	15016	22.28
Croatie	513	461	0.90
Liban	413	4431	10.73
Tunisie	402	819	2.04
Ukraine	101	197	1.95
Total	45626	173423	72.04

* les pays ont été classés par ordre décroissant selon la superficie récoltée (ha).

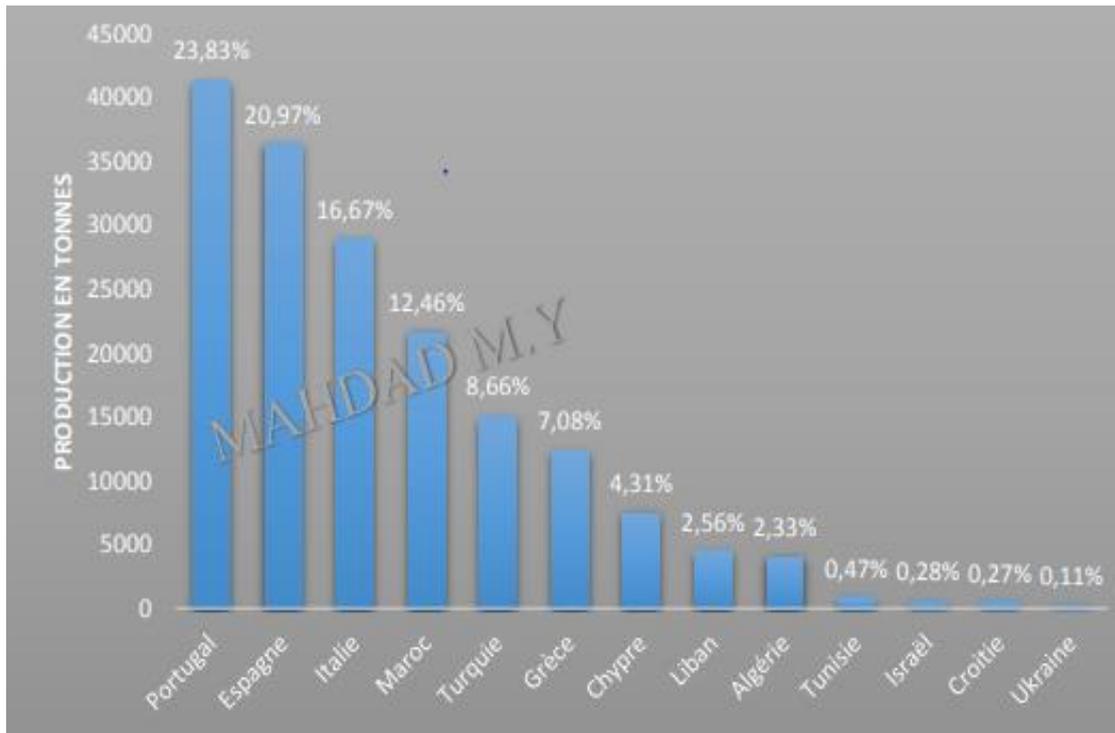


Figure 03. Production mondiale de la caroube, année 2017 (Mahdad, 2022)

3.2. Au niveau national

En Algérie, la superficie récoltée du caroubier a diminué de façon spectaculaire, passant de 11 000 hectares en 1961 à 732 ha en 2019 (Mahdad, 2022). Le caroubier était cultivé sur 927 hectares en 2009, dont 645 hectares, soit 69,58 % de la superficie totale, dans la wilaya de Bejaïa. La production nationale de caroube a été estimée à 3384 tonnes, la wilaya de Bejaia représentant 54,42% du total (842 tonnes), suivie des wilayas de Blida (23,79%) et Tipaza (16,55%) (DSA de Tlemcen).

Les opérateurs économiques, notamment la SARL Boublenza, leader national de la transformation et de l'exportation des dérivés de la caroube, ont estimé la production nationale de caroube à 11 500 tonnes en 2018, soit une hausse de 340 % par rapport à 2009 (Mahdad, 2022). Cette forte augmentation n'est pas due à une augmentation de la surface de production, qui est en baisse constante depuis l'indépendance, mais plutôt à une augmentation de l'exploitation de la caroube par les collecteurs, de plus en plus motivés par des prix qui augmentent sensiblement d'année en année, grâce à l'intensification de la concurrence suite à l'installation de nouveaux acteurs économiques dans le secteur de la transformation et l'exploitation du caroubier (Mahdad, 2022).

Tableau 03. Superficie cultivée, production et rendement du caroubier en Algérie en 2009
(Mahdad, 2013)

Wilaya	Surface cultivée (ha)	Production (Qx)	Rendement (Qx / ha)
Bejaia	645	18 417	28,6
Tipaza	105	5 600	53,3
Blida	100	8 050	80,5
Boumerdes	32	1 080	40,0
Bouira	22	144	6,9
Mila	10	80	8,0
Tlemcen	5	100	20,0
B.B.Arreridj	4	20	5,0
Ain-Delfla	2	300	150
Mascara	1	30	30,0
Tizi-Ouzou	1	20	20,0
Total	927	33 841	36.5

4. Description botanique

Selon Mahdad (2022), le caroubier est un arbre présentant un aspect général avec un feuillage abondant et persistant et son houppier est généralement peu dense à dense chez les pieds femelles et dense à très dense chez les arbres mâles et se caractérise par des branches solides. Il peut atteindre dans des conditions propices une hauteur de 12 mètres et enregistrer une circonférence au niveau de la base du tronc pouvant atteindre les 4 mètres. C'est une espèce rustique avec une longue durée de vie (jusqu'à 300 ans). En particulier dans les sols peu profonds, elle possède un système racinaire puissant, très étendu et généralement réparti en surface. Sa croissance est lente, surtout au cours des cinq premières années (Mahdad, 2022).

4.1. Racines

Les racines de cette essence sont très ramifiées à des plusieurs racines latérales ou secondaires de grande longueur et avec une tendance à être superficielles, spécialement sur les sols compacts ou peu profonds (Mahdad, 2022). Les racines latérales très ramifiées, qui ont de nombreux poils absorbants, ont une longueur de 30 à 40 m (Tous, 1984), et elles peuvent se développer jusqu'à une hauteur de quatre fois celle des branches (Albanell, 1990). Avec des

formations épaisses dans sa partie supérieure qui en se séparant du tronc vont prendre une direction oblique par géotropisme positif (Albanell, 1990).

Les racines se distinguent par une croissance lente mais avec un développement important aux extrémités, de sorte que le volume des racines dépasse rapidement le double ou le triple de celui de l'houpier, Ceci nous permet de classer cette espèce comme ayant un système racinaire très étendu et particulièrement distribué en surface (Figure 07) (Melgarejo et Salazar, 2003).

Non seulement ce système racinaire ancre fermement l'arbre dans le sol, mais il permet également l'absorption de l'humidité et des nutriments dans une vaste zone de terrain, en particulier dans la couche supérieure du sol, qui présente les niveaux les plus élevés de fertilité, d'aération et de matière organique. C'est très probablement l'une des principales explications pour laquelle cet arbre peut prospérer dans des environnements rocheux, à sol peu profond et secs (Albanell, 1990).

4.2. Tronc

Le tronc du caroubier a un diamètre moyen de 50 centimètres en fonction de l'âge de l'arbre (Albanell, 1990), il est robuste, épais avec de clairs canaux de rotation de sève associés aux racines les plus épaisses, ce qui leur donne un aspect tortueux, particulièrement marqué chez certaines variétés (Melgarejo et Salazar, 2003). Le tronc a une circonférence comprise entre 1.5 et 4 m. (Mahdad, 2022) (Figure 05).

4.3. Branche

Les branches présentent des caractéristiques différentes selon leur âge (Albanell, 1990) :

- D'un âge avancé, les branches principales sont général, tortueuses, épaisses et ont tendance à être horizontales (Figure 08) en raison de leur poids et aux tailles de formation. Leur rôle principal est de servir d'éléments aux autres branches, même s'ils sont occasionnellement productifs.
- Les secondes branches sont de taille moyenne et ont tendance à être plus ou moins érigées selon l'âge. Elles sont les principales branches de production ;
- Les petites jeunes branches sont à l'extérieur de de la couronne ou de la zone de croissance. Elles sont flexibles et possèdent une écorne lisse recouverte de lenticelle qui permet les échanges gazeux avec l'atmosphère.

4.4. Feuilles

Les feuilles se caractérisent par un pétiole sillonné sur la face interne et un rachis portant de 8 à 15 folioles, opposées, de 3 à 7 cm (Figure 06) Elles sont persistantes, de longueur de 10 à 20 cm, coriaces ,entières ,ovales à elliptiques, légèrement échancrées au sommet avec une couleur vert pâle à la face inférieure et vert sombre brillante à la face supérieure (Albanell, 1990).

L'arbre perd ses feuilles tous les deux ans, au mois de juillet, et sont renouvelées au printemps en avril et mai de la même année (Ait Chitt et al., 2007).



Figure 04. Le Caroubier
(photo prise à Maghnia – Tlemcen, 2022)

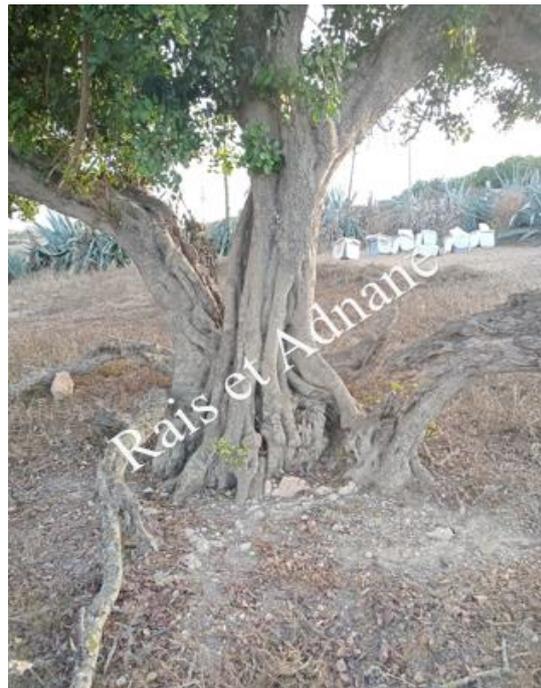


Figure 05. tronc du Ceratonia siliqua
(photo prise à Bab el Assa – Tlemcen, 2022)



Figure 06. Feuille et foliole du caroubier (photo prise à Bab el Assa – Tlemcen, 2022)



Figure 07. Racines du caroubier (Mahdad 2013)



Figure 08. Branches du caroubier (photo prise à Maghnia – Tlemcen, 2022)

4.5.Fleurs

Les fleurs sont vertes rouge ; sans corolle, donc ils ne sont pas visuellement attrayants (Albanell, 1990). Linné a décrit *C. siliqua* comme un arbre polygametrioïque. En effet, elle est caractérisée par l'existence de quatre types d'individus :

- Femelle, constituée d'un pistil court et recourbé bien développé avec un petit ovaire (5 à 7mm) bi-carpelle. Le stigmate est bilobé et couverte par des papilles. A la base, le disque nectarifère est entouré de 5 à 6 sépales rudimentaires. En général, la corolle est absente (Aafi, 1996) (Figure9).
- Mâles, comprenant des fleurs caractérisées par des étamines à filament longs et un pistil non développé (Figure10). Selon le cultivar, les fleurs mâles ont cinq sépales bien développés. Et à leur base il y a du nectar fusionné avec des sépales pour former des disques charnus (3-5 mm diamètre, vert). Le nombre d'étamines est généralement de 5, mais. Des anomalies de symétrie pentagonale peuvent souvent être trouvées (4, 6, 8 étamines) (Albanell, 1990).
- Hermaphrodites qui se caractérisent par un pistil et étamines développés fonctionnels à l'intérieur de la même fleur, considérée comme une fleur parfaite ou complète. sa taille et semblable en apparence aux fleurs unisexuées (Figure 11).
- Polygames avec les trois formes : fleurs femelles, mâles et hermaphrodites ; ils sont rares (Mahdad, 2013) (Figure 12).

Traditionnellement, les caroubiers sont différenciés par la couleur de leurs fleurs, distinguant ainsi arbres à "fleurs jaunes et rouges", Mais la norme semble être insuffisante et indépendante d'autres caractéristiques florales (Haselberg, 1998). En général, les inflorescences mâles sont plus courtes que les inflorescences femelles, également plus compactes, et nombreuses (Melgarejo et Salazar, 2003). Les fleurs à étamines rouges sont plus intéressantes à cultiver car elles produisent une plus grande quantité de pollen, mais en revanche, elles sont plus sensibles au froid (Mahdad, 2022). Les fleurs de la caroube sont pentamères présentant un seul ovaire supère chez les fleurs femelles et hermaphrodites.



Figure 9. Inflorescence femelle
(Franck, 2018)

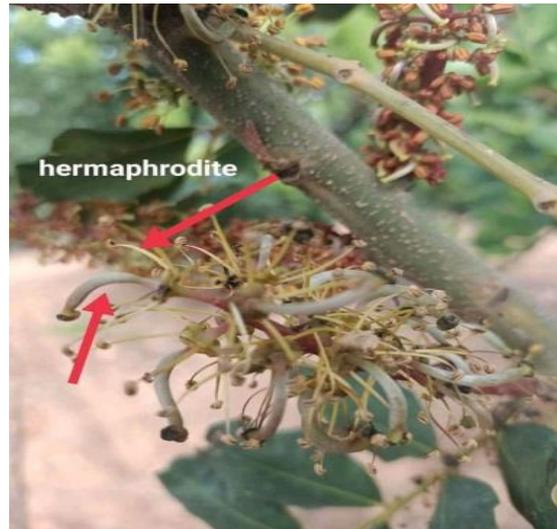


Figure 11 . Inflorescence hermaphrodite
(Boublenza ,2020)



Figure 10. Inflorescence mâle (photo prise à sabra – Tlemcen) ; (Mahdad ,2022)



Figure 12. Inflorescence polygames (Mahdad ,2022)

4.6. Graine

Le graine de caroube est petite rigide et plate, presque ovale avec une base tronquée et écrasée dans la zone supérieure (Mahdad, 2013) (Figure 13). Son tégument est généralement lisse, dur, brun rougeâtre ou noir et brillant (Albanell, 1990 ; Batlle et Tous, 1997). Elle a un diamètre de 8 à 10 mm 6 à 8 mm de long et 3 à 5 mm d'épaisseur. Les graine est dure et a de grande résistance. La graine de caroube est composée de trois parties (Melgarejo et Salazar, 2003).

- L'épisperme ou tégument, qui recouvre la graine et se compose principalement de cellulose, tanins et lignine. Il se compose de deux enveloppes différentes, la couche externe est appelée le *testa*, coloré et dur, l'autre à l'intérieur, appelé *tegmen*, est plus blanc et plus doux. Cette enveloppe représente 30 à 33 % de la graine.
- L'endosperme ou albumen, qui est situé sous l'épisperme et constitue le tissu de réserve de Germination des embryons. Economiquement, c'est une partie très intéressante de semence en raison de sa teneur élevée en galactomannane ou en gomme de caroube. Représentation de l'endosperme 42% à 46% des graines.
- Germe ou embryon, 23% à 25% de la semence.



Figure 13. Graines de caroubier (Mahdad ,2022)

4.7. Fruits

Le fruit du caroubier est appelé kharrouba en arabe, caroube ou carouge et généralement classée en raison de sa faible teneur en eau malgré son aspect pulpeux, comme un fruit sec (Albanell, 1990).

La caroube est un fruit qui atteint une taille de 10 à 30 cm de long, 2 à 3,5 cm de large et 1 à 2.5cm d'épaisseur. Chaque gousse pèse 15 à 40 g (Ait Chitt *al*, 2007). Sa couleur est d'abord verte, puis brune foncée, rouge ou noire à maturité, toujours très brillantes. Ses bords sont sinueux, courbés, plats, droit ou arqué à surface ridée, tannée lorsqu'elle est mûre et montrant un tissu pulpeux sucré et rafraîchissant et généralement compris entre 1 et 6 fruits (Melgarejo et Salazar, 2003 ; Batlle et Tous, 1997; Konate, 2007).

La caroube est une gousse pendante, il se développe très lentement et met 9 à 10 mois pour arriver à maturité (Batlle et Tous, 1997), correspondant à trois stades de développement :

- La première étape est caractérisée par une croissance lente en automne et en hiver ;
- La seconde correspond au développement actif et à la croissance rapide des gousses au printemps ;
- Au stade final, les gousses mûrissent et durcissent en juillet-août.

L'intérieur des gousses est séparé par des cloisons pulpeuses transversales contenant 4 à 16 graines, soit 10 à 20% du poids de la gousse selon les variétés, climat, efficacité de la pollinisation, gestion technique et entretien des arbres. La caroube est une gousse riche en sucre et en tanins ; ces deux composés lui donne un aspect charnu au début de son cycle, distinguant une variété d'une autre, ce qui est intéressant pour l'étude des fruits immatures (état vert) (Melgarejo et Salazar, 2003).

La gousse est composée de trois parties depuis la peau externe ou l'épicarpe de l'extérieur vers l'intérieur, de nature fibreuse et colorée ; mésocarpe ou pulpe, charnue, riche en sucres. Il représente 70% à 95% du fruit entier ; endocarpe, fibreux, il recouvre l'intérieur du fruit, qui le divise en loges carpellaires où se situent les gousses (Batlle et Tous, 1997 ; Caja, 1985).

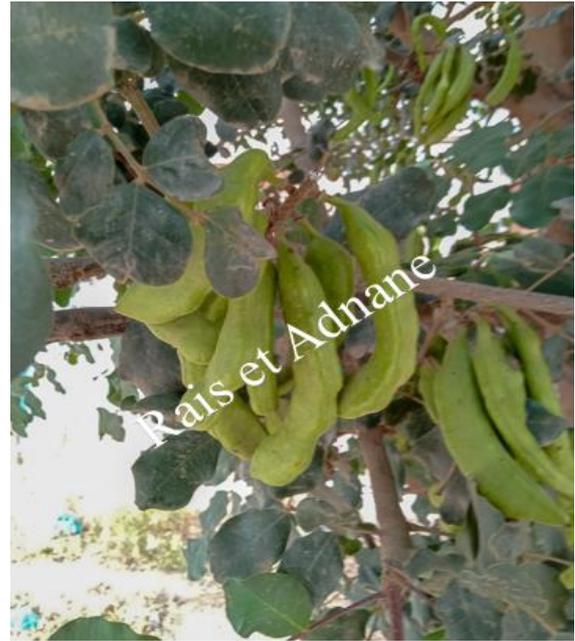


Figure 14 .fruit de caroubier (photo prise à Maghnia – Tlemcen, 2022)



Figure 15. La gousse de la caroube (Boublenza, 2020)

5. Reproduction biologique

C. siliqua est le seul arbre de la région méditerranéenne dont la saison de floraison est en été : d'août à octobre, en automne, de septembre à novembre (Aafi, 1996 ; Fournier, 1977). Cependant, le moment et la durée de la période de floraison dépendent des conditions climatiques locales ; en effet, dans les régions côtières, la floraison peut avoir lieu au mois de juin, surtout chez les pieds mâles et hermaphrodites et occasionnellement chez les femelles, tandis que la floraison y est absente chez les caroubiers des zones intérieures à climat continental où les conditions environnementales sont plus rudes (Mahdad, 2022).

La pollinisation des fleurs du caroubier est, en grande partie, assurée par les insectes (Retana et al., 1990, 1994 ; Rejeb et al, 1991 ; Ortiz et al, 1996). En fait, une intervention quasi nulle du vent sur la pollinisation a été observée (Retana et al, 1990). Cependant, le rôle du vent dans le transport du pollen des fleurs mâles ne peut être exclu (Thomson, 1971 ; Tous, 1984 ; Batlle et Tous, 1997).

Les trois sexes de fleurs, sécrètent des substances nectarifères dont la quantité et la contenance en sucre (concentration des oses dans le nectar) sont élevées dans la fleur femelle par rapport à son homologue mâle. Toutefois, les pieds mâles reçoivent un plus grand nombre de visiteurs (insectes) (Ortiz et al, 1996).

Les inflorescences femelles et hermaphrodites possèdent respectivement une moyenne de 17 et 20 fleurs, mais peu d'entre elles produisent des gousses, et seule une faible proportion des inflorescences arrivent à produire plus de deux fruits (Retana et al, 1994). Selon Haselberg (1996), les variations dans l'intensité de la production des inflorescences et des gousses sont plus liées à des facteurs endogènes qu'aux conditions climatiques. Cependant, des conditions climatiques défavorables peuvent réduire considérablement le rendement en réduisant la nouaison (Batlle et Tous, 1997).

La fructification se produit principalement sur les branches secondaires, occasionnellement sur les branches primaires, et rarement sur les troncs d'arbres, entre juillet et décembre de l'année suivant la floraison, selon la région et la variété (Aafi A, 1996) (Figure 16).



Figure 16. Fructification du caroubier sur des rameaux secondaires (B) et sur le tronc (A)

(Mahdad, 2022)

6. Multiplication

Le caroubier a été, depuis des siècles, propagé en culture par semis et plus tard par bouturage. Ainsi, les plantes choisies au hasard dans les populations locales, ont été à la base de la sélection des cultivars et l'établissement des vergers commerciaux (Boublenza, 2020). Toutefois, les différents cultivars recensés actuellement dans le monde se distinguent entre eux par leur vigueur, leur taille, leur qualité de gousses, leur graines, leur productivité et leur résistance aux maladies (Batlle et Tous, 1997).

La multiplication de caroubier est réalisée via deux voies : multiplication végétative « bouturage, greffage, ou par micro-propagation » et par multiplication sexuée (semis).

6.1. Par Semis

Cette méthode de multiplication sexuée soit la plus courante en Algérie, elle présente plusieurs inconvénients non négligeables. La descendance issue des graines et donc d'une ségrégation allélique est très hétérogène et est génétiquement dissemblable du parent femelle sélectionnée. En effet, le semis chez le caroubier, espèce dioïque, aboutit à un ratio de 50% de femelles et 50% de mâles improductifs. Enfin, il faut plus de 7 ans pour que les arbres cultivés à partir de semis commencent à produire (Mahdad, 2022).

Les graines de la caroube présentent une enveloppe tégumentaire épaisse et dure, il faut faire une scarification au préalable pour faciliter la germination, soit par trempage des graines

dans l'acide sulfurique pendant 1h puis dans l'eau pendant 24h (Ait Chitt et al., 2007), soit par trempage des graines dans l'eau bouillante (Sbay, 2008) (Figure 17).



Figure 17. Les graines traitées avec de l'acide sulfurique pour faciliter la germination (photo prise à Maghnia – Tlemcen, 2022)



Figure 18. La germination des graines (photo prise à Maghnia – Tlemcen, 2022)

6.2. Par Bouturage

Selon Mahdad (2022), la technique du bouturage chez le caroubier est très ancienne, elle remonte au 11^{ème} siècle où elle fut pratiquée par les musulmans en Andalousie. Abū al-Kḥayr, cité par Ibn al-‘Awwām dans son livre Kitāb al-filāḥa (Banqueri, 1802 in Mahdad, 2022), préconisa la technique du bouturage en crossette. En Espagne, le bouturage se faisait par des boutures, toutefois, on préférait le semis à cette technique (RSEM, 1818 in Mahdad, 2022), car elle est très limitée en pratique, variant en fonction des arbres (génétique), la nature de la bouture et de la concentration en auxine (AIB) (Ait Chitt et al., 2007). Le bouturage s’effectue en mars ou avril dans un sol riche, un traitement hormonal préalable (Sbay ,2008).



Figure 19. boutures en pépinière (Benzyane, 2005)

6.3. Par Greffage

La propagation par greffage chez le caroubier est une technique efficace et dominée (Mahdad, 2022). Il s'agit de greffer les pieds des mâles par les femelles. Cette méthode permet aux arbres mâles de fructifier dès la troisième année, de produire des cultivars garantissant la fructification et le maintien de la conformité des caractères sélectionnés chez de la plante mère (Gharnit, 2004 ; Ait Chitt et al, 2007).

En Algérie, la technique en placage d’écusson chez le caroubier a donné de bons résultats (Boublenza, 2020), toutefois, la greffe en écusson reste la technique la plus utilisée (Mahdad, 2022).

La multiplication végétative par le greffage chez le caroubier est actuellement l'unique approche pour pallier à la problématique de la présence dans une plantation de caroubier de 50 % de pieds mâles improductifs, issus de semis (Mahdad, 2022).

Elle permet d'associer un greffon à un porte greffe, le greffon doit être sélectionné pour une meilleur qualité (Gharnit, 2003 ; Ait Chitt et al., 2007).

- Greffage en fente double : la greffe en fente se fait au premier printemps, au moment de la végétation. Cette greffe donne un bon résultat sur des francs de 9 à 10 mois (Boublenza, 2020).
- Greffe des vieux arbres par couronne : la greffe en couronne s'applique sur des arbres de caroubier, de certaines dimensions en février ou mars et en octobre et en novembre (Boublenza, 2020).
- Greffage en placage : cette pratique est appliquée en mi-juin et qui donne un bon résultat (Boublenza, 2012).



Figure 20. Des plantes de caroubiers greffés dans la pépinière (capte.io, 2019)

6.4. Culture in vitro du caroubier

C'est une technique prometteuse, essentiellement depuis le développement de protocoles d'organogénèse via des explants issus de semences germées in vitro (Mahdad, 2022) permettant d'atteindre des pourcentages efficients d'enracinement, dépassant les 90% (Saïdi et al., 2016; Lozzi et al., 2019). Toutefois, les résultats du taux d'enracinement à partir d'explants provenant

de caroubier matures restes très faibles (Naghmouchi et al., 2008; Zouari et El Mtili, 2020) et constitue la problématique majeure pour la micropropagation de caroubiers femelles clones issus de programmes de sélection (Mahdad, 2022).



Figure 21. Vitroplants de caroubier (Gharnit et Enhabil , 2006)

7. Impact écologique et économique

7.1. Ecologique

Le caroubier est une essence agro-sylvo-pastorale de grande valeur écologique du fait de sa rusticité et de son adaptabilité aux contraintes environnementales. *Ceratonia siliqua* est de plus en plus recommandée pour le reboisement dans les zones arides et dégradées, car c'est une ressource de reboisement précieuse pour gérer les espèces inadaptées à d'autres cultures (terres arides et salines, tolérantes à la sécheresse) ou à la désertification (Biner et al, 2007 ; Batlle et Tous, 1997 ; Barracosa et al, 2007 ; Sbay, 2008). Par conséquent, il peut être utilisé pour le reboisement afin de contrôler la propagation du feu, comme arbre d'ornement et d'ombrage le long des routes et des jardins (le long des allées en Californie, Australie) (Batlle et Tous, 1997), et en raison de sa couronne sphérique, il peut être utilisé comme brise-vent, avec son feuillage dense, brillant, et persistant, (Sidina et al, 2009 ; Winer, 1980 ; Yousif et Alghzawi, 2000). Il a été sélectionné par la DGF pour son programme de reboisement national et offre une place de choix pour certaines parties des zones ombragées et de « Green Dam II » (DGF, 2021).



Figure 22. Arbres du caroubier utilisé dans l'ornementation et l'ombrage (Mahdad, 2013)

7.2. Economique

C. siliqua est considéré comme l'un des arbres fruitiers et forestiers les plus intéressants car toutes ses parties (fleurs, feuilles, racine, écorce, fruits et bois) sont utiles et précieuses dans plusieurs domaines (Aafi, 1996).

La culture des caroubiers et l'industrialisation de leurs produits se sont considérablement développées en raison de la variété des utilisations de leurs graines et gomme extraite des graines de gousses qui sont très importantes dans l'industrie alimentaire (amélioration de la texture des aliments), la nutrition, la pharmacie, la cosmétique et d'autres applications (Gonçalves et al, 2005 ; Correia & Martins-Louca, 2010, 2005). Selon des recherches récentes, la caroube est une source de glucides bon marché actuellement explorée comme matériaux pour la production de bioéthanol, avec plusieurs avantages par rapport aux autres cultures riches en sucre (Vourdoubas et al, 2002 ; Turhan et al, 2010). De plus, ses gousses utilisées dans les industries alimentaires et pharmaceutiques ont une teneur en sucre plus élevée que la canne à sucre et les betteraves à sucre (NAS, 1979 ; Battle, 1997 ; Markis et Kefalas, 2004). Cet arbre est une véritable source de profit pour les arboriculteurs, car les caroubiers sont vendus à des prix très encourageants et les coûts de main-d'œuvre (cueillette) sont inférieurs par rapport aux pays concurrents (Espagne, Portugal, Italie, etc.). En Algérie, le caroubier constitue une véritable valeur ajoutée pour l'économie nationale si l'on sait que les importations algériennes

de cacao sont passées de 5 000 tonnes en 2015 à 17 000 tonnes en 2019, alors qu'en même temps il peut profiter de la réputation mondialement connue de ses propriétés nutritionnelles. Le bois de caroubier est très apprécié en ébénisterie et en charbonnage. L'écorce et les racines sont utilisées pour le tannage. Le développement de la farine de caroube produite localement comme alternative à la poudre de cacao a pour objectif d'économiser des millions de dollars en devises chaque année, en plus de créer des emplois et de renflouer les finances publiques avec des devises étrangères, lorsque les exportations sont lancées des excédents de caroube. (Algérie Presse Service, 2020).

8. Propriétés et utilisations du caroubier

8.1. Propriétés

La pulpe et les graines des gousses de caroube représentent respectivement 90 % et 10 % de leur poids total (Mahdad, 2013). La composition chimique de la pulpe est généralement déterminée par son origine, le moment de récolte et des conditions de stockage (Orphanos et papaconstantinou, 1969).

La pulpe de caroube, qui est obtenue après la séparation des graines, est riche en fibres alimentaires, en sucres et en divers composés bioactifs tels que les polyphénols. Elle est riche en sucres (48-56%), notamment en saccharose, glucose, fructose et maltose (tableau 04). L'analyse de la composition en sucre de la pulpe de plusieurs populations Algériennes de caroubier a révélé une richesse en sucre totaux de 43,22 à 50,28% (Boublenza et al., 2019). Mais pauvre en protéines (2-6%) et en lipides (0,4-0,6%), dont les acides saturés et insaturés sont égaux. Les gousses contiennent de faibles quantités de matières grasses ($0,6 \pm 0,1\%$) et une quantité importante de protéines ($3 \pm 2\%$) (Avallone et al., 1997). Ayaz et al. (2009) ont pu déterminer dans les extraits de gousses 18 acides aminés, principalement de l'acide aspartique et glutamique, l'alanine, la valine et la leucine.

En outre, l'analyse minéralogique de la pulpe a montré par que sa composition (Calculé sur la base du poids sec : mg/kg) était de : K= 8637,64, Ca=2123, Na=505,97, Cu=4,84, Fe=381,80, Mn =10,24 (Kamal et al., 2013).

Les composés bioactifs présents dans cette pulpe se sont révélés bénéfiques pour le contrôle de nombreux problèmes de santé tels que le diabète, les maladies cardiaques et le cancer du côlon en raison de leurs activités antidiabétiques, antioxydants et anti-inflammatoires (Nassar-Abbas et al., 2016). La pulpe de caroube a un haut potentiel d'utilisation en tant

qu'ingrédient alimentaire (Tsatsaragkou et al., 2014). En effet, elle peut être transformée en poudre qui peut servir comme matière première pour l'industrie agroalimentaire. Des recherches ont montré que la caroube peut constituer un bon candidat pour être utilisée comme un aliment fonctionnel ou comme un ingrédient alimentaire (Arribas et al., 2019 ; Biernacka et al., 2017) du fait qu'elle peut constituer une bonne source de polyphénols antioxydants (Owen et al., 2003). Une fois torréfiée, la pulpe de caroube développe des caractéristiques sensorielles (goût et couleur) similaires à ceux de la poudre de cacao (Durazo et al., 2014), mais et contrairement au cacao, la caroube ne contient pas le thiobromine (stimulants), la caféine et l'acide oxalique (composé toxique lorsqu'il est consommé en grandes quantités) (Biner et al., 2007).

Tableau 04 .Composition moyenne de la pulpe de caroube Puhan et Wielinga (1996 ; cité dans Batlle et Tous, 1997)

Constituant	%
Sucres totaux	48 – 56
Saccharose	32 – 38
Glucose	5 – 6
Fructose	5 – 7
Pinnitol	5 – 7
Tanins condensés	18-20
Polysaccharides non amines	18
Cendres	2 – 3
Lipides	0.2 – 0.6

Les graines de caroube sont composées de trois éléments :

- Le tégument est une enveloppe brune résistante (Dakia et al., 2007 ; Dakia et al., 2008). Cette enveloppe constitue 30 à 35 % du poids sec de la graine (Neukom, 1988) et L'enveloppe tégumentaire est considérée comme étant une source naturelle pour la production de polyphénol antioxydant (Batista et al., 1996; Makris et Keflas, 2004).
- La radicule représente entre 15 et 30 % du poids sec de la graine (Neukom, 1988). Celle-ci possède une valeur énergétique élevée due à son taux important de protéines principalement solubles dans l'eau et de lipides majoritairement insaturés (Dakia et al., 2007).

- L'endosperme est situé entre le tégument et la radicule. Il constitue 40 à 50% du poids de la graine et est la matière première pour la fabrication de la gomme de caroube ou galactomannane, qui est une molécule polysaccharidique composée de deux unités : le mannose et le galactose (García-Ochoa et Casas, 1992).

La valeur nutritionnelle des gousses de caroube est considérée comme similaire à celle de la plupart des céréales (Coit ,1962; NAS ,1979). Selon Noblet et al (1989), la valeur de l'énergie métabolisable (EM) de la farine de caroube a été estimée à 13,1 MJ EM/kg de produit frais.

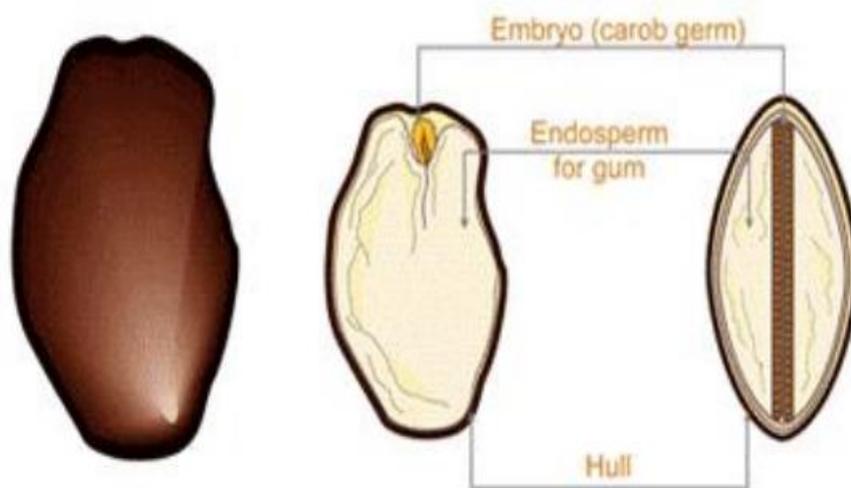


Figure 23. Composants de la graine du caroubier (Mahdad, 2022)

8.2. Utilisations

La gousse de caroube, est un fruit à usage multiple. Toutes les composantes de l'arbre (feuillage, fleur, fruit, bois, écorce, racine) sont utiles et ont de la valeur. Une gamme de produits est dérivée de la caroube à partir des graines et des gousses (Santos et al., 2005).

a. Arbre

En raison de sa rusticité et de son adaptation aux contraintes de l'environnement, le caroubier est souvent utilisé, pour le reboisement des zones affectées par l'érosion et la désertification (Biner et al., 2007). Et également utilisé comme plante ornementale en bordure des routes et dans les jardins. Le bois du caroubier appelé carouge (Rivière et Leco, 1900) est dur à grain fin

; il est utilisé pour la fabrication d'ustensiles et la production de combustible. Les pieds mâles, qui ne fournissent pas de gousses sont les plus préférés dans le domaine d'ornementation (Battle et Tous, 1997). Il peut être également utilisé en verger comme plantation homogène destinée à la production commerciale. Actuellement, il est considéré comme l'un des arbres fruitiers et forestiers les plus performants puisque toutes ses parties sont utiles et ont des valeurs dans plusieurs domaines (Aafi, 1996).

b. Fruit

Le fruit du caroubier, ou caroubier, est constitué de pulpe enroulée autour de graines régulières. En effet, la pulpe sucrée de la caroube est utilisée depuis longtemps dans l'alimentation du bétail avec d'autres aliments comme la farine d'orge (Ait Chitt et al., 2007). Il est utilisé dans l'industrie alimentaire humaine en raison de sa forte teneur en sucres et en composés phénoliques. Il est également utilisé dans la production d'alcool (éthanol), d'acide citrique et comme substitut du cacao pour la fabrication du chocolat, car il ne contient ni caféine ni théobromine (alcaloïdes). La farine de pulpe entre dans la composition de divers produits alimentaires tels que les biscuits, le lait en poudre, etc. (Dakia et al., 2007).

Dans la pharmacopée traditionnelle, la pulpe est utilisée pour traiter la diarrhée et pour soigner certaines maladies comme la gastrite, l'entérite, l'angine, le rhume, le cancer... (Crosi et al., 2002 ; Gharnit, 2003 ; Ait Chitt et al., 2007).

Tous les composants des graines de caroube (enveloppe, endosperme et cotylédons) jouent des rôles industriels et médicaux importants, mais la gomme (endosperme) reste la plus importante car elle est utilisée dans divers domaines comme stabilisant, gélifiant et fixateur, dans l'industrie alimentaire, cosmétique, industrie pharmaceutique (médicaments, sirops, etc.), tannage, textile, etc... (Battle et Tous, 1997 ; Biner et al., 2007; Dakia et al., 2007).

Tableau 05. Utilisations de la gomme de caroube et ses applications techniques Droste (1993) mentionné dans (Batlle et Tous, 1997)

Utilisations industrielles	Applications
Pharmaceutiques	Produits anti coeliaques, pommades, comprimés, dentifrice
Cosmétiques	Emulsions et mousses, mousse à raser
Textiles	Epaississant de coloration
Papier	Produit de flottation pour matériel de couverture épaisissant pour traitement de surface
Chimiques	Colles, coloriage, polissage, teinture, allumettes, pesticides
Pétrole	Adjuvant de floculation pour augmenter la stabilité
Mines	Produit de flotation
Béton	Renforcement de la solidification
Explosifs	Liant d'eau pour les explosifs

c. Les autres parties de l'arbre

Les autres parties de l'arbre sont aussi exploitées, en effet, la fleur est utilisée par les apiculteurs pour la production du miel de caroube ou miel d'automne. Plusieurs études ont montré que l'utilisation des feuilles associées avec le polyéthylène glycol (PEG) améliore la digestibilité et la qualité nutritionnelle des tanins contenus dans les feuilles (Priolo et al., 2000). L'écorce et les racines sont utilisées en tannerie grâce à leur teneur en tanins. Le bois du caroubier, dur de couleur rouge, est estimé dans la charbonnerie et la menuiserie (Rejeb al., 1991 ; Gharnit, 2003).



Figure 24. Produits de confiseries fabriqués à partir de caroube (chocolat, confiture...etc) (Photo Internet)



Figure 25 .Gomme de caroube
(Photo Internet)



Figure 26. Poudre de caroube
(Photo Internet)

2^{ème} PARTIE

MATERIELS ET METHODES

1. Objectif

Etudier la différence qui existe au sein des folioles entre les populations mâles, femelles et hermaphrodites du caroubier en Algérie par une analyse morpho-géométrique. Ce type d'analyse a pour but de rechercher en premier lieu, une éventuelle variation morphologique des folioles et de déterminer leurs caractéristiques spécifiques afin de confirmer la présence ou l'absence d'une homogénéité au sein des groupes feuilles collectées.

2. Régions d'échantillonnage

L'échantillonnage a été mené dans le Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les wilayas de Tlemcen, Tipaza, Sétif, Relizane, Aïn defla, Boumerdés, Béjaïa, Jijel, Skikda, El Tarf, Guelma, Mila, M'sila, Blida, Sidi Bel Abbès, Annaba, Oran, Mostaganem, Mascara, Tizi-Ouzou et Chlef (Figure 27).

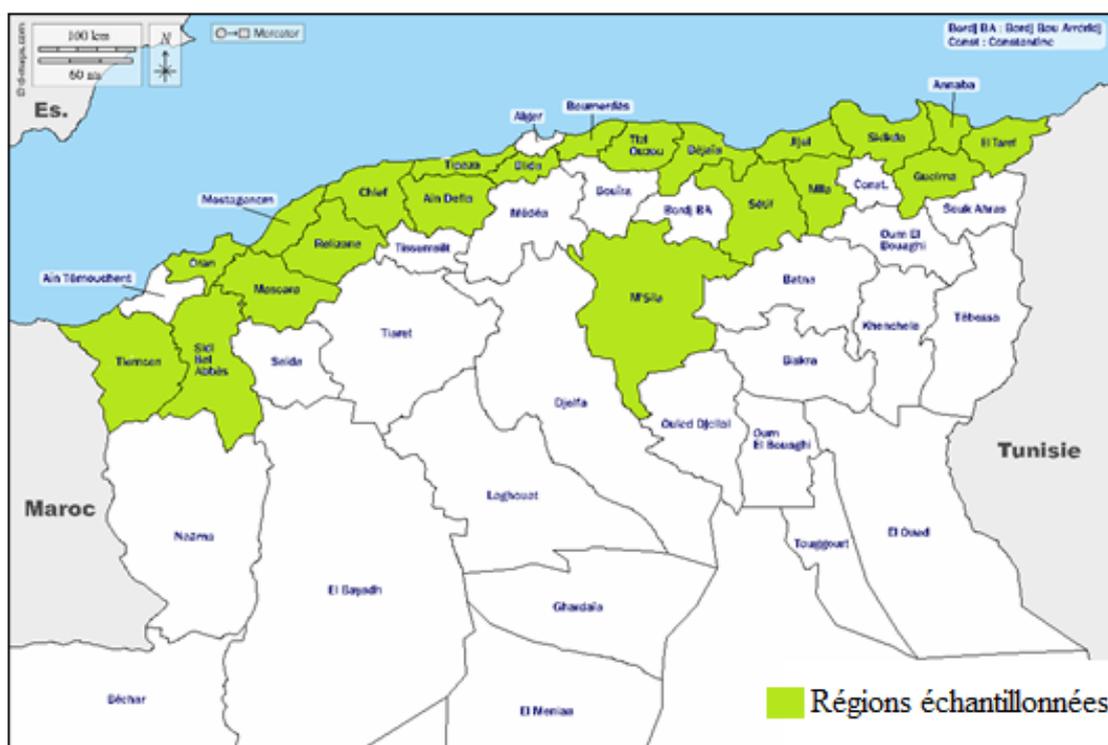


Figure 27. La carte géographique des régions échantillonnées (d-maps.com)

3. Récolte du matériel végétal

Au total, 253 feuilles de caroubier ont été récoltées (Juin 2020) à partir de 21 régions du Nord de l'Algérie. Ces feuilles proviennent de 118 pieds mâles, 127 pieds femelles et 4 pieds hermaphrodites. Le nombre réduit d'unités expérimentales hermaphrodites s'explique par sa rareté en Algérie. Pour chaque arbre, 03 folioles ont été caractérisées sauf pour les pieds

hermaphrodites où toutes les folioles ont été prises en considération (37 folioles). En tout, 781 folioles ont été caractérisées via deux variables, la taille et la forme.

4. Méthode de caractérisation morpho-géométrique

4.1. Prise des photos numériques et traitement des images

Des photos numériques de haute résolution ont été prises de feuilles à l'aide d'un appareil photo de téléphone portable type Samsung S6. Les feuilles étaient déposées sur un papier blanc numéroté sur lequel on dépose une règle graduée dans la même direction et distance (Figure 28).



Figure 28. photo de la feuille de caroubier N° 01, femelle

4.2. Organisation des dossiers

Les fichiers d'images des feuilles ont été enregistrés dans un seul dossier, contenant toutes les feuilles (mâles, femelles, hermaphrodites) et Tps (Bloc – notes) : spécimens sous forme de tps, qui regroupe les informations sur toutes les feuilles (Figure 29).

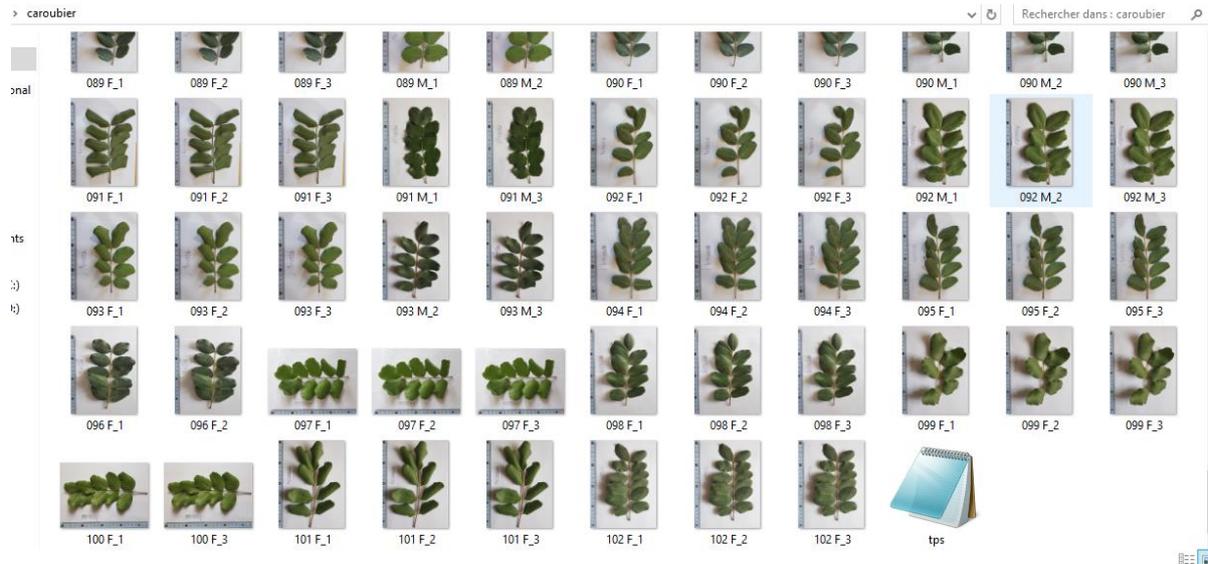


Figure 29. Organisation des dossiers

4.3. Choix de points de repères (Landmarks)

Pour analyser la conformation d'un objet, un choix minutieux doit être fait dans la sélection des points repères. Nous avons choisi les folioles dont la marge n'a pas été endommagée. Pour cela nous avons opté pour le choix de 16 points repères.

4.3.1. Collecte des données

Avant de commencer la collecte de données, c'est-à-dire la digitalisation des points repères, il faut créer un fichier TPS, qui est essentiellement une liste contenant nos spécimens. Ce fichier est indispensable pour l'implantation des points repères avec TpsDig2.

4.3.2. Création du fichier TPS

D'abord, les fichiers TPS doivent être créés à l'aide du logiciel TpsUtil version 1.81. Ce fichier contient tous les spécimens photographiés analysés, ce dernier est requis pour l'implantation ultérieure des points repères à l'aide du logiciel TpsDig32 version 2.31.

Après avoir ouvert le logiciel tpsUtil pour la création d'un fichier TPS, suivez les étapes ci-dessous.

Une fenêtre s'affiche (Figure 30)

1) Etape 1 : Cliquez sur " Select an opération " (Sélectionner une opération), et choisissez "Build tps file" (créer un fichier tps) dans la liste déroulante (Figure 31).

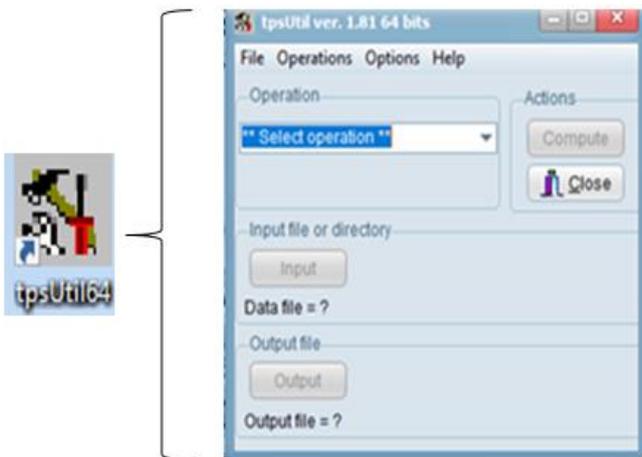


Figure 30. la fenêtre principale du logiciel TpsUtil

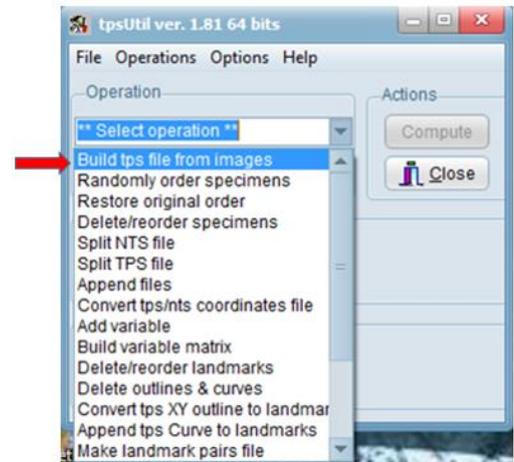


Figure 31. Etape 1 de la création d'un fichier TPS (Sélection d'une opération)

2) Etape 2 : cliquez sur "Input" (Entrée), une fois que vous avez trouvé le répertoire d'images cliqué sur fichier, il suffit de cliquer sur une seule image dans ce répertoire pour que tpsUtil importe automatiquement le reste (Figure 32 et 33).

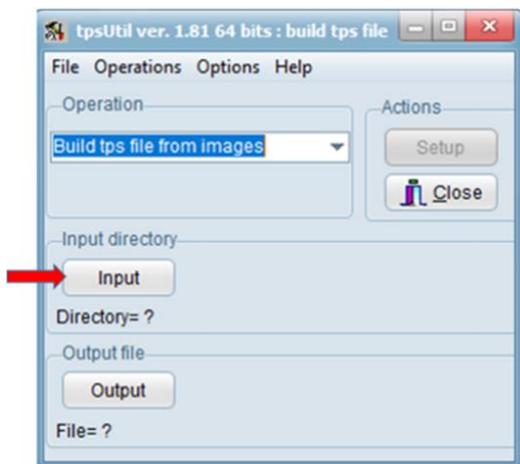


Figure 32. Etape 2 de la création d'un fichier TPS (choix du répertoire d'entrée)

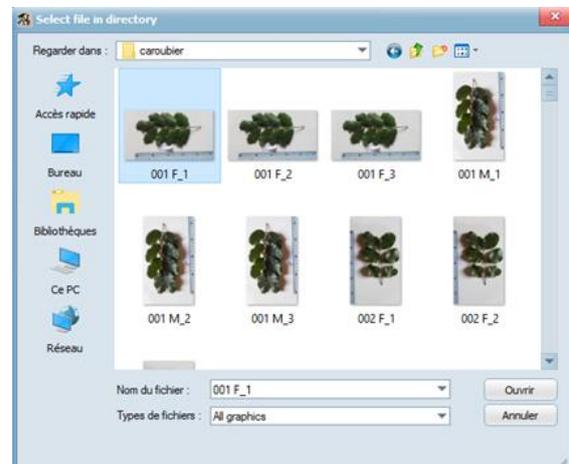


Figure 33. la fenêtre de répertoire d'images

3) Etape 3 : Cliquez sur "output " pour créer un fichier de sortie avec l'extension "tps" et nommez-le. Il est recommandé de sauvegarder ce fichier dans le dossier avec les images (Figure 34 et 35).

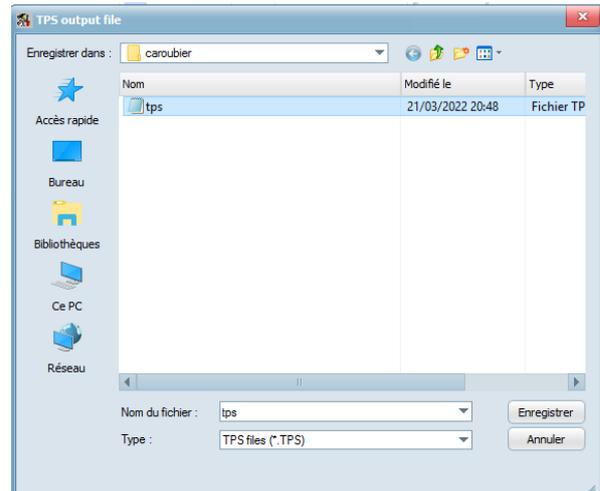
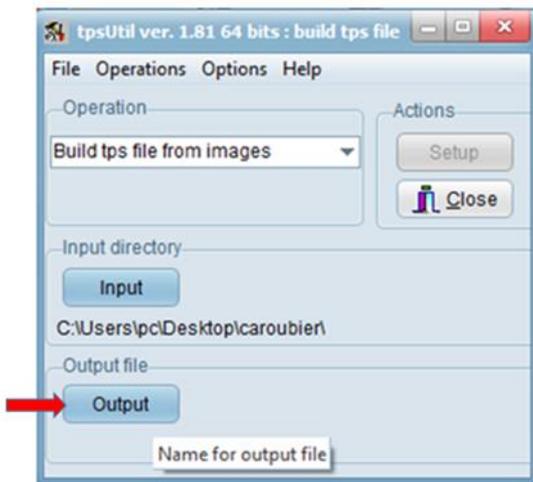


Figure 34. Etape 3 de la création d'un fichier TPS "nomination du fichier"(attribuer un nom du fichier de sortie)

Figure 35. Etape de la nomination du fichier TPS

4) Etape 4 : Cliquez sur "Setup". Une fenêtre apparaît alors avec les adresses de tous les fichiers image sélectionnés (Cocher / décocher au besoin), Confirmez la création du fichier tps et Cliquez sur " Create "(Créer) (Figure 36).

5) Etape 5 : Cliquez sur " Close « (Fermer) pour quitter tpsUtil (Figure 37)

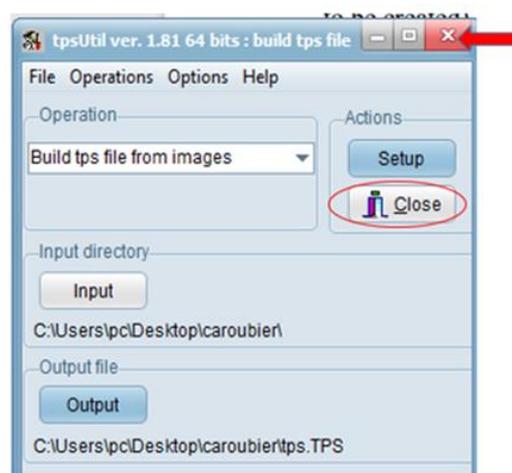
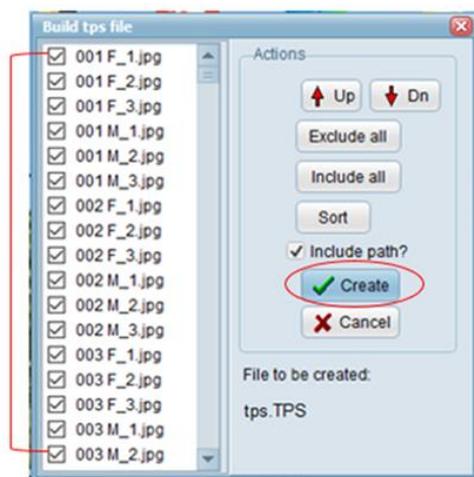


Figure 36. Etape 4 la création du fichier tps

Figure 37. Etape 5

4.3.3. Numérisation ou Digitalisation des points repères

Dans cette étape, les points repères sont placés à la bordure de la feuille. Ensuite, les images digitalisées sont enregistrées dans le fichier tps. Cinq critères importants sont à considérer lors de la numérisation des points repères : Premièrement, les points repères doivent être des points homologues sur tous les échantillons analysés. Deuxièmement, les points ne doivent pas changer de position par rapport aux autres points. Troisièmement, le point de repère doit bien couvrir la forme de l'objet étudié. De plus, la répétabilité des repères qui restent sur l'objet doit être élevée. Enfin, les marques doivent être sur le même plan. Un élément clé de ce processus consiste à identifier les points avec un accord élevé afin que les correspondances entre les échantillons soient claires (Bookstein, 1991 ; Zelditch et al., 2004).

Avant d'appliquer les coordonnées, définissez le facteur d'échelle des mesures dans tpsDig à l'aide de la règle incluse dans l'arrière-plan de chaque image.

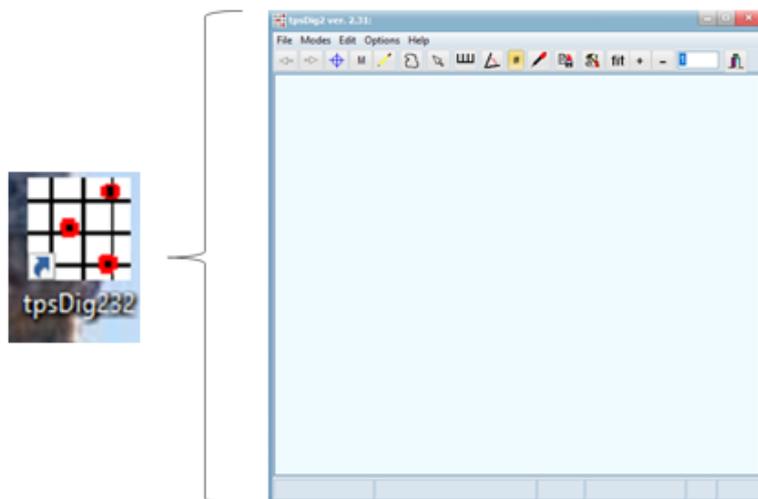


Figure 38. la fenêtre principale du logiciel TpsDig 32

Une fois TpsDig2 ouvert, nous créons le fichier ".tps". Les étapes de numérisation du logiciel tpsDig2 sont décrites en détail par Lateb (2014) et n'ont pas besoin d'être répétées ici. Cependant, la Figure 39 montre une fenêtre tpsDig2 avec les principales options. Une fois l'étape de numérisation terminée, les fichiers tps peuvent être analysés à l'aide de divers logiciels tels que MorphoJ, ImageJ, mophoR,...etc. Le logiciel que nous avons utilisé pour nos analyses est MorphoJ version 1.06 (Klingenberg, 2005).

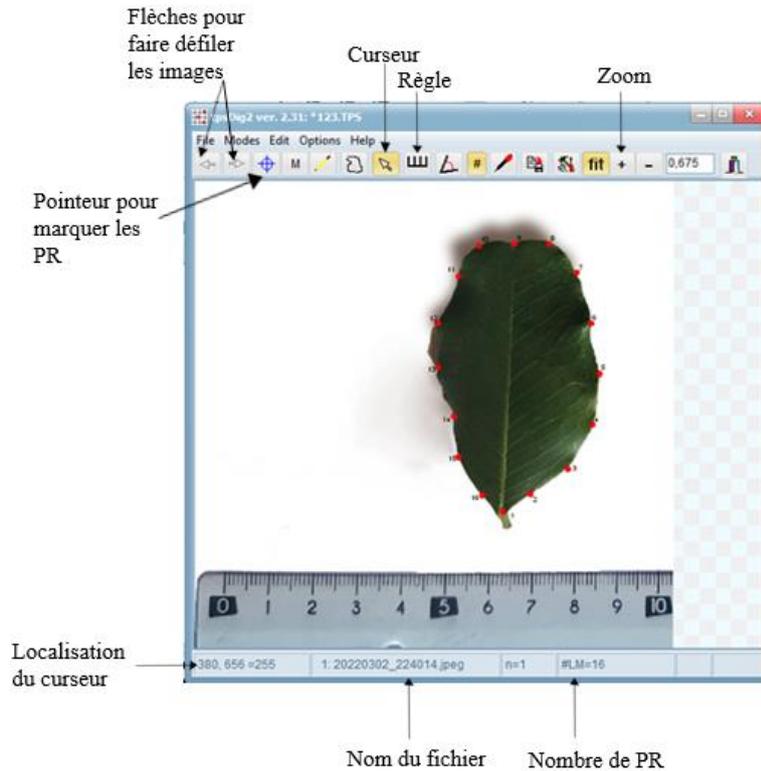


Figure 39. Interface graphique du logiciel tpsDig2

4.4. Vérification des données

Une fois les données récoltées, il faut procéder à des analyses préalables pour vérifier la compatibilité et les éventuelles erreurs de digitalisation.

5. Analyse statistique

Dans cette étude, nous avons retenu 16 points repères sur chaque image (foliole) en 2 dimensions. Ainsi, chaque points homologue est représenté avec ses coordonnées (x, y).

La première étape effectuée dans MorphoJ version 1.06 consiste à valider les données et à éliminer les données aberrantes. En fait, des erreurs d'inattention peuvent survenir lors de la numérisation, notamment la numérisation de repères interchangeable. Une fois enregistrés sous un format numérique, sont alignées et superposées grâce à la technique de la superposition Procruste. Cette étape permet de séparer les paramètres de taille et de conformation.

Après avoir lancé un ensemble de processus pour la digitalisation des feuilles, des tests statistiques ont été effectuées pour analyser les données. Une analyse de variance (ANOVA Procuste) a été utilisée pour tester la signification de la taille et la forme. La taille a été testée à

l'aide de statistiques descriptives et d'une teste post-HOC (Honestly Significant Difference) dit Tukey HSD afin d'étudier la comparaison deux à deux entre les populations de sexe différents à l'aide de programme R version 3.6.3. L'analyse des composantes principales (ACP) une méthode très courante en morphométrie géométrique utilisée pour explorer les tendances de forme et la variabilité entre les spécimens. La discrimination réalisée par l'analyse des variantes canonique (AC) a pour but d'expliquer les différences moyennes de variation de forme des folioles entre les différents sexes.

3^{ème} PARTIE

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Vérification des valeurs aberrantes

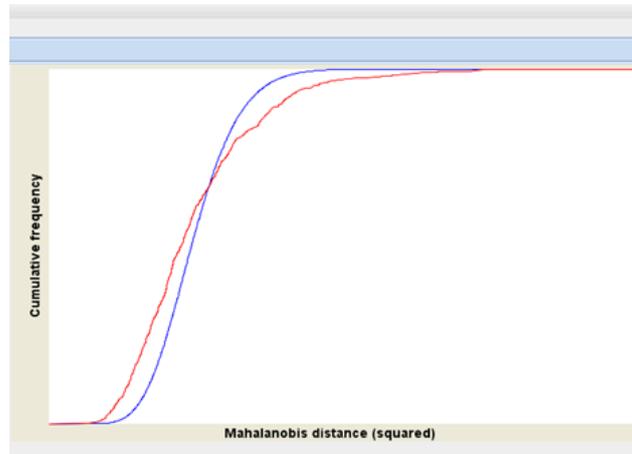


Figure 40. Diagramme de distribution cumulative des distances des échantillons individuels et de la forme moyenne de l'échantillon complet

Les données "rouges" de la Figure 40 ne sont pas éloignées de la distribution normale représentée par les données "bleues", et nous pouvons conclure qu'il n'y a pas de valeurs aberrantes et que les données suivent une distribution normale.

2. Superposition de Procruste

Après avoir superposé les Procrustes dans MorphoJ, nous obtenons le graphe représenté sur la Figure 41. Cette procédure nous a permis d'observer les différences de la forme entre tous les individus et ce en supprimant les trois effets : position, taille et rotation (Evin et al., 2008). Ces différences sont numériquement exprimées par les distances de Procruste.

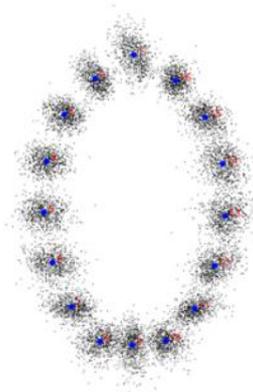


Figure 41. Résultat de la superposition de Procruste

Superposition de Procrustes a permis de créer une forme moyenne (consensus shape) en considérant tous les individus de l'échantillon et ceci par l'identification du point d'origine ou le centroïde à partir des points repères définis sur chaque image. Tous les outils morphométriques exigent, strictement, que tous les points repères numérisés (digitalisés) soient homologues à travers tous les spécimens. Autrement, ils représentent les mêmes emplacements biologiques sur chaque individu (Bookstein, 1991 ; Zelditch et al., 2004).

Chaque point de repère consensuel est représenté en bleu sur la Figure 40, entouré par des nuages de points représentant différentes coordonnées pour tous les spécimens. Les points repères (3,4,5,6,7,11,12,13,14,15) avec des nuages compacts et sombres nous indiquent qu'ils ont des coordonnées proches, tandis que les points repères (1,2,8,9,10,16) avec des nuages éparés et diffus nous indiquent que les points s'éloignent du consensus (forme moyenne) ce qui prouve une différence au niveau de l'apex et la base des folioles. Les coordonnées du "consensus" sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 06 : Cordonnées des points repères du consensus (nouvelles variables)

Landmarks	Axis 1 (X)	Axis 2 (Y)
LM1	-0,00040972	0,32838338
LM2	-0,08106558	0,27829474
LM3	-0,14601930	0,20239170
LM4	-0,18321947	0,10428243
LM5	-0,18892559	-0,00334524
LM6	-0,17048870	-0,10889984
LM7	-0,13124217	-0,20256673
LM8	-0,07112533	-0,27578391
LM9	-0,00334731	-0,28320568
LM10	0,06709518	-0,27486273
LM11	0,12714541	-0,20645439
LM12	0,16890205	-0,11599381
LM13	0,19076631	-0,01144302
LM14	0,18563963	0,09834782
LM15	0,14923983	0,19661350
LM16	0,08705478	0,27424178

3. ANOVA Procuste (analyse de la variance)

Pour analyser la variation morphologique des folioles par rapport au sexe, nous avons utilisé une analyse hiérarchique de la variance (ANOVA). Les résultats sont exposés dans le Tableau 7 et 9.

a. taille

A partir du tableau 7, on note que le facteur sexe est statistiquement significatif, $p = 0,0243$ (<0.05) influençant de ce fait sur la taille des folioles. Concernant la séparation des moyennes, une seule différence significative a été noté entre la taille des folioles hermaphrodites et mâles -0.68 cm ($p = 0.035$). Par contre, on n'a pas trouvé une différence significative entre les folioles mâles et femelles ($p = 0.224$), femelles et hermaphrodite ($p = 0.176$) (Tableau 08).

Tableau 7. Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance pour la taille du centroïde (Centroid size) pour les folioles de caroubier.

Source de variation	SS	MS	DF	F	P(value)
Individu	17,088	8,544	2	3,74	0,024*
Résidus	1779,088	2,286	778		

SS: Sum Squares (Somme des carrés); MS: Mean Squares (carré moyen); df: degree of freedom (ddl) (degré de liberté). * significative au seuil $\alpha=0.05$.

Tableau 8. Moyenne, minimum, maximum, de la taille centroïde des folioles pour chaque population.

populations	N	Moyenne \pm Erreur Standard	Min	Max	P-value
Femelle	378	8.88 \pm 0.08 ^{a,b}	4.09	14.16	0.224
Hermaphrodite	37	9.34 \pm 0.20 ^b	7.51	13.07	0.030
Mâle	366	8.69 \pm 0.08 ^a	4.76	13.07	0.176

NB : les moyennes suivies par différentes lettres sont significativement différentes.

b. forme

Le traitement des données statistiques par ANOVA a un seul facteur montre que la forme totale est hautement influencée par le sexe ($p=0.0001$).

L'indice Pillai tr égale 0.14, ce qui montre un effet de sexe sur la forme dans certain points géométriques ou parties anatomiques qui sont majoritairement l'apex et la base des folioles déjà confirmés dans l'étude de la superposition des Procuste.

Tableau 9. Résultat de l'analyse hiérarchique de la variance pour la forme (Shape) des folioles de caroubier.

Source de variation	SS	MS	Df (ddl)	F	P (val) ***	Pillai tr	P(val)
Individu	0,238	0,004	56	7,82	<0.0001	0,14	<0.0001
Résidus	11,840	0,0005	21784				

SS: Sum Squares (Somme des carrés); MS: Mean Squares (carré moyen); df: degree of freedom (ddl) (degré de liberté). *** Hautement significative au seuil $\alpha=0.05$.

4. Analyse en composantes principales (ACP)

4.1. Distribution de l'inertie

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) appliquée sur les données obtenues sur tous les échantillons nous a permis de retenir les 2 premières composantes principales (CP) expliquant respectivement 32,408% et 24,749% de la variation totale de la forme du foliole, soit une variance cumulée de 57,157 % (Figure 42, tableau 10).

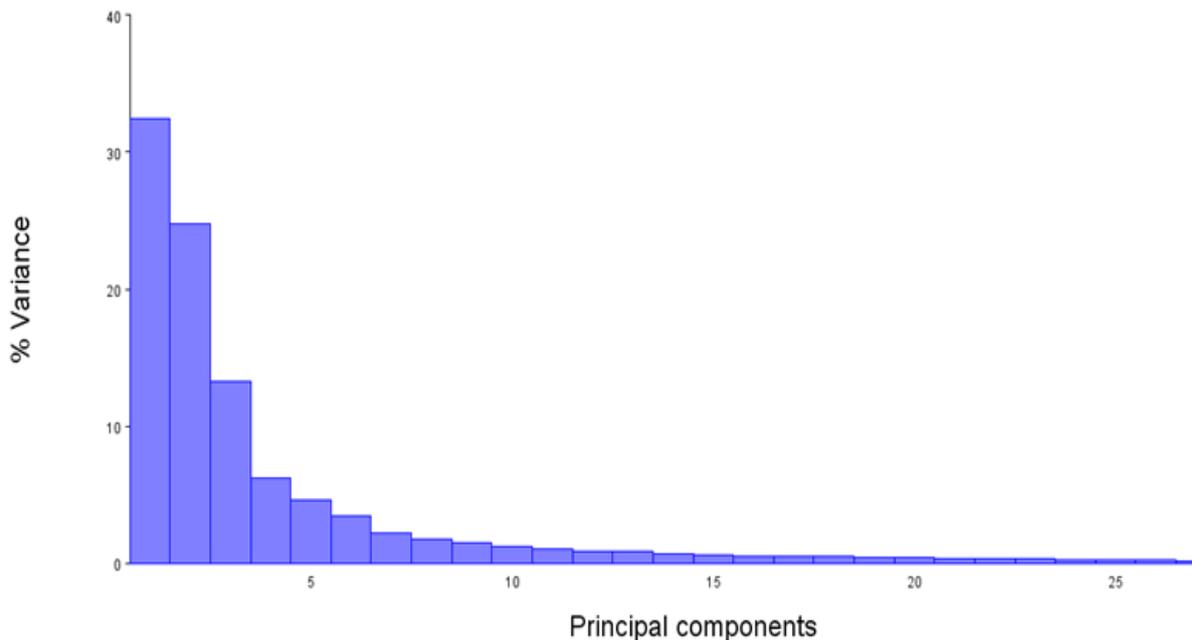


Figure 42. Pourcentage de la variation expliquée par les axes principaux

Tableau 10. Valeurs propres et pourcentages de la variance expliquée par les de l'ACP

	Eigenvalues	% Variance	Cumulative %
1	0,00493241	32,408	32,408
2	0,00376679	24,749	57,157
3	0,00202350	13,295	70,453
4	0,00094644	6,218	76,671

4.2. Description de l'ACP

les changements de conformation de la feuille selon la première et la deuxième composante principale, montre qu'il y a un chevauchement entre l'ensemble des groupe des formes, donc la visualisation des groupes de la forme selon leur moyenne comme une estimation de la tendance globale (global shape trends) et Les différences morphologiques de ces conformations sont mises en évidence dans le graphe morphologique (Shape Graph) (Figure 45).

4.2.1. Changement de conformation dans le premier axe

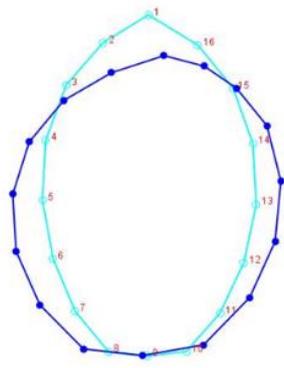
La première composante(PC1) contrôle la déformation d'une feuille selon l'extrême des points de côté positif et négative par mode de visualisation : wireframe graph (Figure 43).

La caractérisation de la conformation à gauche de l'ACP graphe (a1)

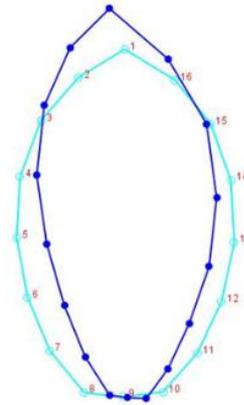
- forme générale : ovale
- l'épaisseur la base de la foliole(les points de repère 8.9.10) : base dispersé.
- Apex : triangle (les points de repère 2.1.156) angle ouvert (< 90°). (wide angle).

La caractérisation de la conformation à droite de l'ACP graphe (b1)

- forme générale : elliptique.
- l'épaisseur la base de la foliole(les points de repère 8.9.10) : base contractée (narrow).
- Apex : triangle (les points repère 2.1.16), angle fermé (>90°).



graphe (a1)



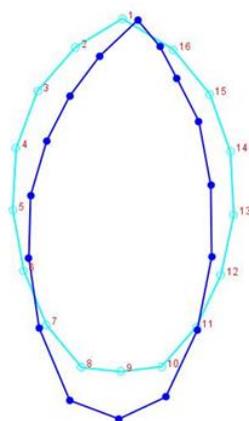
graphe (b1)

Figure 43. Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le premier axe

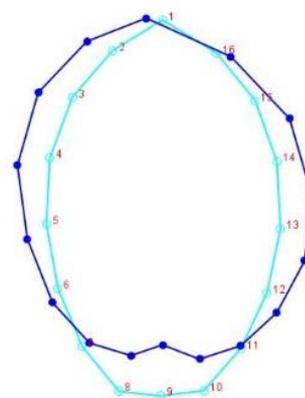
4.2.2. Changement de conformation dans le deuxième axe

La deuxième composante de l'ACP (PC2) a détecté une déformation de la feuille d'un niveau à l'autre par mode de visualisation : wireframe graph (Figure 44).

Les déformations au niveau de la base de la foliole sont caractérisées par décontractions avec des directions en nœud vers le bas (downward) pour l'ACP de gauche (a2) (PR : 8.9.10), et en nœud vers le haut (upward) pour l'ACP de droite (b2).



graphe (a2)



graphe (b2)

Figure 44. Visualisation du changement de conformation de la feuille selon le deuxième axe

L'analyse des composantes principales a détecté la variation morphologique foliaire du caroubier suivant les deux premiers axes principaux selon plusieurs critères. PC1 présente une déformation allant d'une forme elliptique avec une base contractée et un apex à angle fermé, vers une forme ovale à base dispersée avec un apex à angle ouvert. Tandis que le PC2 a détecté principalement une décontraction du triangle de la base foliaire (la direction du nœud, du haut vers le bas).

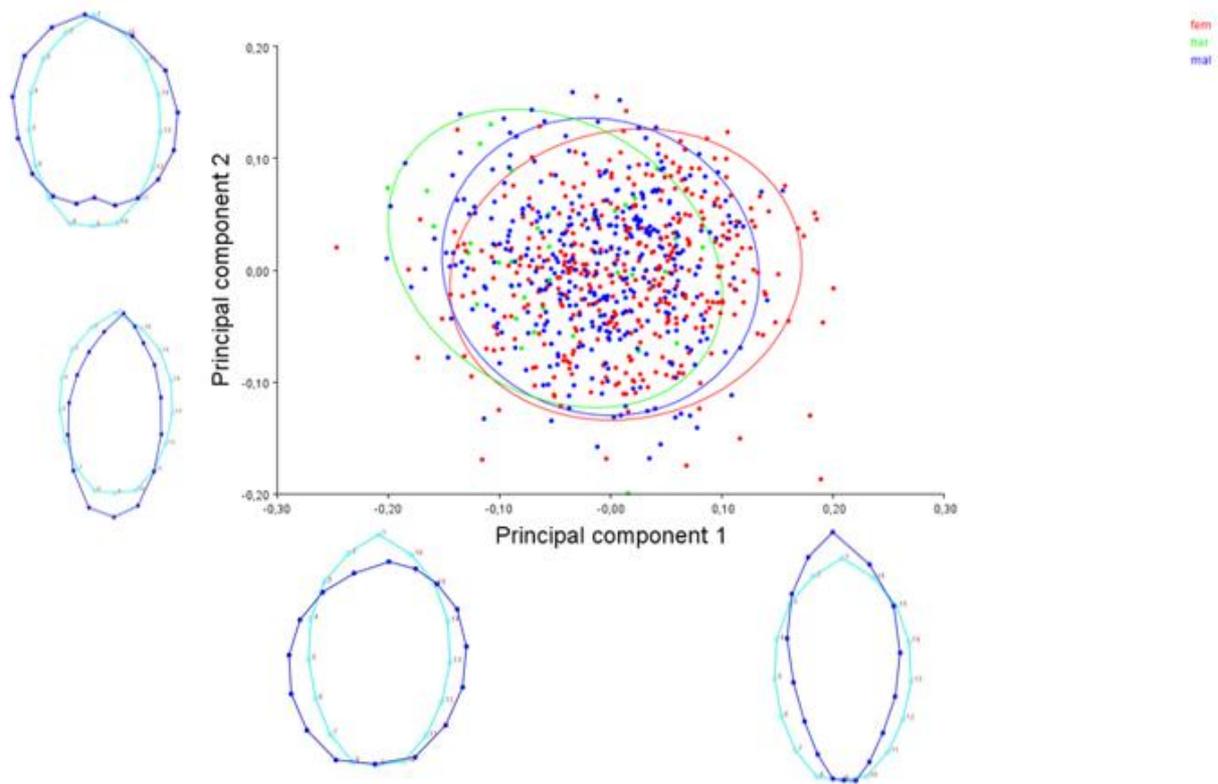
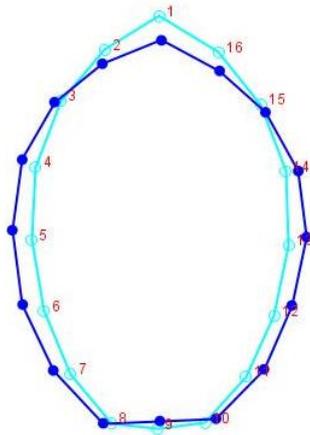


Figure 45. Projection des différentes formes des folioles de caroubier selon les deux premières composantes principales femelle (rouge), hermaphrodite(vert), mâle (bleu)

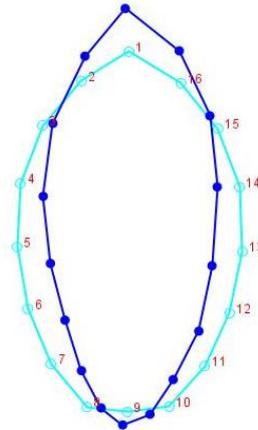
5. Analyses des variantes canoniques

La discrimination réalisée par l'analyse des variantes canonique a pour but d'expliquer les différences moyennes de variation de forme des feuilles entre les différents sexes (mâle, femelle, hermaphrodite). La représentation graphique dans le plan [CV1, CV2] indique la différence entre les sexes par individu de référence (Figure 48).

CV1 montre que la base, la forme générale de la feuille et l'apex jouent un rôle discriminant.



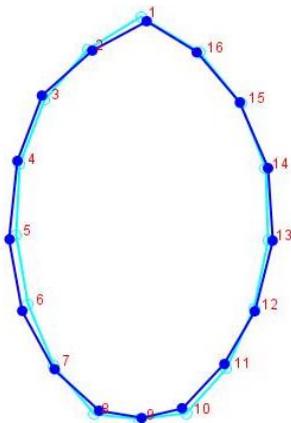
Graphe c 1 (à gauche)



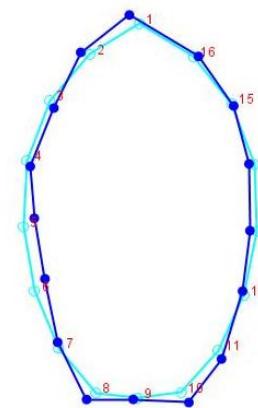
Graphe d 1 (à droite)

Figure 46. Visualisation du changement de la foliole selon le premier axe(CV1)

CV2 montre que la base de la feuille joue un rôle discriminant.



Graphe c 2 (à gauche)



Graphe d 2 (à droite)

Figure 47. Visualisation du changement de la foliole selon le deuxième axe(CV2)

La notion des populations en fonction des groupes d'observations a permis de distinguer les mâles des femelles et ce après visualisation du changement de la feuille selon le CV1. La foliole femelle tant vers une forme elliptique avec une base contractée en nœud vers le bas, (forme narrow) et avec apex caractérisé par un angle fermé (Graphe d1). Tandis que, la forme de la foliole mâle est en général ovale avec une base dispersée à apex caractérisé par un angle ouvert (wide angle) (Graphe c2).

Le deuxième groupe d'observation CV2 a permis de détecter les hermaphrodites. Principalement les folioles des hermaphrodites ressemblent aux folioles des mâles (ovale) mais avec une base aplatie (Graphe d2) (PR : 8-9-16).

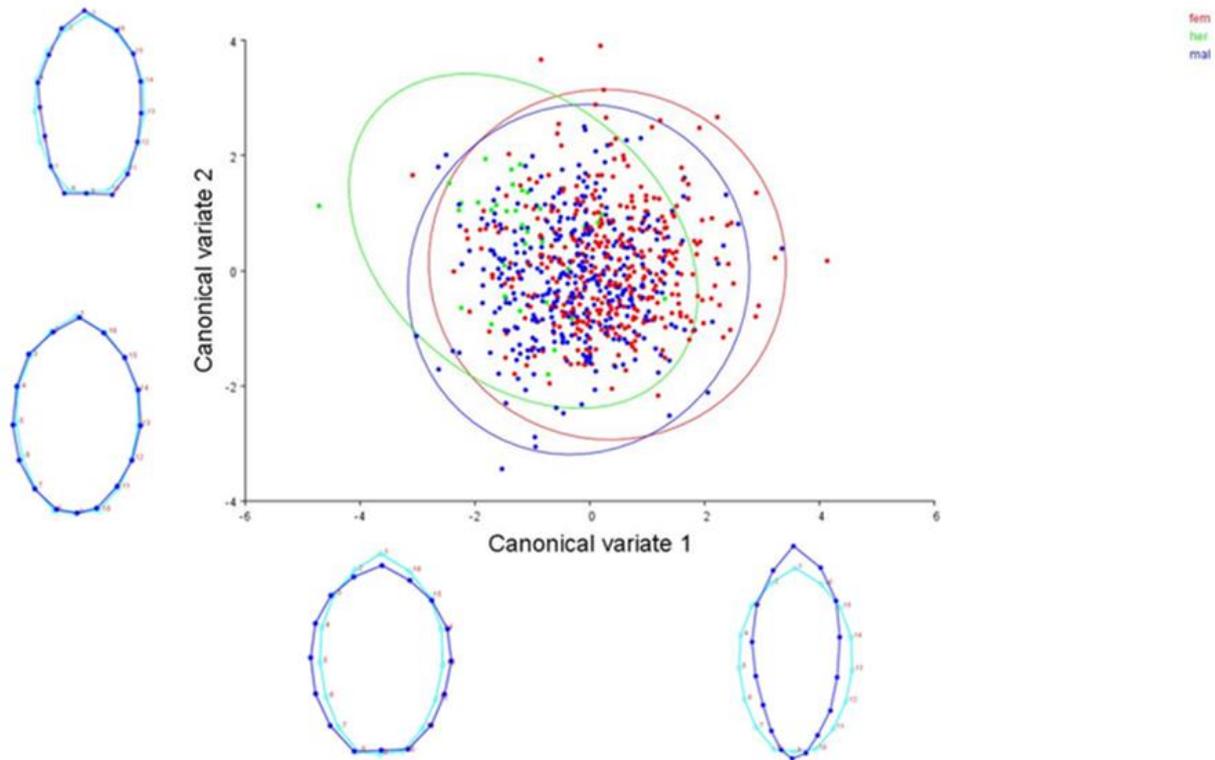


Figure 48. Représentation graphique des variantes canoniques 1 et 2, femelle (rouge), hermaphrodite (vert) et mâle (bleu)

6. Distance de Mahalanobis (D^2)

Une distance de Mahalanobis (D^2) a été utilisée pour examiner la similarité entre les groupes d'individus et montrer que tous les groupes sont significativement différents les uns des autres sur la base de 1000 permutations (tableau 11).

Tableau 11. Résultats des distances de Mahalanobis entre les groupes

	Femelle	Hermaphrodite
Hermaphrodite	1,51	
Mâle	0,55	1,16

La distance de Mahalanobis a montré une faible dissimilarité géométrique entre les folioles femelles et mâles ($D^2 = 0.55$) mais cela n'exclut pas l'existence d'une différence entre ces deux populations comme a été démontrée dans l'analyse précédente, et une dissimilarité moyenne entre les folioles hermaphrodites et femelles ($D^2 = 1,51$), et entre hermaphrodites et mâles ($D^2 = 1,16$), précisément une différence au niveau de la base des folioles.

Discussion

Notre étude montre une variabilité morpho-géométrique chez les folioles de caroubier selon leurs sexes mâles, femelles et hermaphrodites en Algérie. Alors que les folioles femelles tendent vers une forme elliptique, les folioles mâles sont généralement ovales, tandis que les folioles hermaphrodites ressemblent aux folioles mâles (ovale) mais avec une base aplatie.

Les résultats obtenus sont différents de l'étude de Gharnit (2003) au Maroc portant sur la caractérisation des feuilles du caroubier par la morphométrie classique (longueur, largeur, nombre de folioles et longueur du pétiole). En effet, notre étude montre que la population mâle non productive présente des feuilles plus longues et plus larges alors que la population femelle présente des folioles moins longues, moins larges et de forme plus allongée que celles de la population mâle.

Ainsi cette étude est basée sur la comparaison des distances linéaires et des angles entre des points homologues de différents objets, ces mesures sont soumises à des tests statistiques uni ou multivariés pour l'analyse de la variation morphologique (Rohlf et Bookstein, 1990 ; Bookstein, 1996), les relations géométriques entre les variables ne sont pas conservées, ce qui rend impossible la représentation graphique de la forme de l'objet. La morphométrie géométrique a été développée pour surmonter ces limitations, en préservant et en comparant très précisément les configurations de différents objets (Perrard, 2012).

En raison de ces inconvénients, Zelditch et al, (2012) affirment également qu'il est complexe de reconstruire la conformation d'un organisme à partir de mesures linéaires. En effet, un objet décrit par 16 repères, nécessite 120 mesures linéaires pour reconstruire sa conformation. Ces limites ont conduit plusieurs auteurs à préconiser la méthode de la morphométrie géométrique, notamment l'approche par les repères, qui une fois les repères bien choisis, permet de visualiser instantanément la conformation de l'objet à analyser (Cucchi et al., 2015). Cette méthode a fait ses preuves dans de nombreux domaines de la biologie dont la botanique, plusieurs taxonomistes et botanistes ont reconnu le potentiel de cette méthode dans leur domaine (Jensen, 2003).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude apporte une contribution dans la connaissance des différences existantes entre les pieds mâles, femelles et hermaphrodites via les caractères géométriques des folioles. L'étude indique une variabilité significative de la forme des folioles chez les trois populations (mâle, femelle et hermaphrodite) et aussi montre les différentes formes selon les tendances globales.

L'analyse morpho-géométrique a été essentiellement basée sur 16 points de repères. Parmi ces derniers les PR 1, 2, 8, 9, 10 et 16 ont été les plus discriminants pour identifier et caractériser ces populations de caroubier selon leur sexe.

Les résultats obtenus montrent trois types différents de foliole en fonction de leur sexe. La foliole femelle tant vers une forme elliptique avec une base contractée en nœud vers le bas, et avec apex caractérisé par un angle fermé. Tandis que les folioles mâles sont généralement ovales avec une base dispersée vers un apex caractérisé par un angle ouvert. Quant aux folioles hermaphrodites, elles ressemblent aux folioles des mâles (ovale) mais avec une base aplatie.

Par ailleurs, une différence significative entre la taille centroïde des folioles d'hermaphrodites et mâles a été enregistrée. La distance de Mahalanobis a révélé une faible dissimilarité géométrique entre les folioles femelles et mâles, et une dissimilarité moyenne entre les folioles hermaphrodites et femelles, et entre hermaphrodites et mâles, précisément une différence au niveau de la base des folioles.

La présente étude a permis de distinguer relativement entre les arbres adultes de sexe mâle, femelle et hermaphrodite à partir de la taille et surtout la forme des folioles. Ces résultats peuvent être utilisés comme moyen pour faire une sélection préliminaire des jeunes plants de caroubier. Cependant pour réaliser une sélection précise une étude génétique et indispensable, ayant comme objectif l'identification et le développement de marqueurs moléculaires (SSR et SNP) liées au déterminisme sexuel chez l'espèce.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

.....A.....

- Aafi, A. (1996). Le caroubier : Caractères botaniques et écologiques, groupements végétaux, techniques d'élevage en pépinière, traitement et soins culturaux, utilisation et production. Centre national de la recherche forestière. Maroc, pp 1-10.
- Aafi, A. (1996). Note technique sur le caroubier .Détermination of Chemical Composition of Carob (*Ceratonia siliqua*): Protein, Fat, Carbohydrates, and Tannins, Journal of food composition and analysis, Vol. 10, pp: 166-172.
- Ait Chitt, M., Belmir, H. & Lazrak, A. (2007). Production de plants sélectionnés et greffés de caroubier. Transfert de technologie en agriculture. Maroc. N° 153: 1-4.
- Albanell, E. (1990). Caracterización morfológica, composición química y valor nutritivo de distintas variedades de garrofa (*Ceratonia siliqua* L.) cultivadas en España. Tesis doctoral. Barcelona. España, pp. 209.
- Arribas, C., Pereira, E., Barros, L., Alves, M.J., Calhelha, R.C., Guillamón, E., & Ferreira, I.C. (2019). Healthy novel gluten-free formulations based on beans, carob fruit and rice: Extrusion effect on organic acids, tocopherols, phenolic compounds and bioactivity. Food chemistry, 292: 304-313.
- Avallone, R., Plessi, M., Baraldi, M., & Monzani, A. (1997). Determination of chemical composition of carob (*Ceratonia siliqua*): Protein, fat, carbohydrates, and tannins. Journal of Food Composition and Analysis, 10(2), 166–172, doi: 10.1006/jfca.1997.0528.
- Ayaz, F.A., Torum, H., Glew, R.H., Bak, Z.D., Chuang, L.T., Presley, J.M., & Andrews, R. (2009). Nutrient Content of Carob Pod (*Ceratonia siliqua* L.) Flour Prepared Commercially and Domestically. Plant Foods Hum Nutr 64, 286–292.

.....B.....

- Barracosa, P., Osório, J., & Cravador, A. (2007). Evaluation of fruit and seed diversity and characterization of carob (*Ceratonia siliqua* L.) cultivars in Algarve region. Scientia Horticulturae. 114: 250-257.
- Batista, M.T., Amaral, M.T., & Proença Da Cunha, A. (1996). Carob fruits as source of natural antioxidant. In Proceeding of the III International Carob Symposium. Cabanas-Tavira, Portugal.
- Battle, I. (1997). Current situation and possibilities of development of the carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in the Mediterranean region. Unpublished FAO Report. Rome. Italy.

- Battle, I., & Tous, J. (1997). Carob tree. *Ceratonia siliqua* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 17. Institute of Plant Genetic and Crops Plant.
- Baumel, A., Mirleau, P., Viruel, J., Bou Dagher Kharrat, M., La Malfa, S., Ouahmane, L., Diadema, K., Moakhar, M., Sanguin, H., & Médail, F. (2018). Assessment of plant species diversity associated with the carob tree (*Ceratonia siliqua*, Fabaceae) at the Mediterranean scale. *Plant Ecology and Evolution*, 151(2), 185–193, doi: 10.5091/plecevo.2018.1423.
- Biernacka, B., Dziki, D., Gawlik-Dziki, U., Różyło, R., & Siastała, M. (2017). Physical, sensorial, and antioxidant properties of common wheat pasta enriched with carob fiber. *LWT*, 77: 186- 192.
- Biner, B., Gubbuk, H., Karhan, M., Akus, M., & Pekmezei, M. (2007). «Sugar profiles of the pods of cultivated and wild types of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.) in Turkey». *Food chemistry* 100: pp. 1453-1455.
- Bolonos, M. (1955). Rapport sur le caroubier. Instituto forestal de Investigaciones y experiencias Madrid (Espagne), pp.9.
- Bookstein, F.L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. 2e éd. Cambridge : Cambridge University Press.
- Bookstein, F.L. (1996). Biometrics, biomathematics and the morphometric synthesis. *Bulletin of mathematical biology*, 58(2), 313-365.
- Boublenza, I. (2012). Contribution à l'étude de multiplication du caroubier : *Ceratonia siliqua* L. Mémoire de magistère. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- Boublenza, I. (2020). Etude des populations spontanées et cultivées du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) en Algérie. PhD thèse. Univ. Tlemcen, Algérie, pp. 115.
- Boublenza, I., El Haitoum, A., Ghezlaoui, S., Mahdad, M., Vasai, F., & Chemat, F. (2019). Algerian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations. Morphological and chemical variability of their fruits and seeds. *Scientia Horticulturae*, 256, 108537.

.....C.....

- Caja, G. (1985). La Garrofa: Composición, procesado y usos agroindustriales. Jornadas de la Garrofa. LLiria, Valencia - España.
- Coit, J.E. (1962). Carob culture in the semi-arid southwest. Vista, CA: J. Eliot Coit, pp 6.

- Correia, P.J., Gama, F., Pestana, M., & Martins-Loução, M.A. (2010). Tolerance of young (*Ceratonia siliqua* L.) carob rootstock to NaCl. *Agricultural Water Management*, 97: 910-916.
- Crosi, L., Avallone, R., Cosenza, F., Farina, F., Baraldi, C., & Baraldi, M. (2002). Antiproliferative effects of *Ceratonia siliqua* L. on mouse hepatocellular carcinoma cell line. *Fitoterapia* 73, p.674-684.
- Cucchi, T., Baylac, M., Evin, A., Bignon-Lau, O., & Vigne, J-D. (2015). Morphométrie géométrique et archéozoologie : Concepts, méthodes et applications. (Chap. 4).

.....D.....

- Dakia, P.A., Blecker, C., Robert, C., Wathelet, B., & Paquot, M. (2008). Composition and physicochemical properties of locust bean gum extracted from whole seeds by acid or water dehulling pre-treatment. *Food Hydrocolloids*, 22, 807e818.
- Durazzo, A., Turfani, V., Narducci, V., Azzini, E., Maiani, G., Carcea, M. (2014). Nutritional characterisation and bioactive components of commercial carobs flours. *Food Chemistry*, 153:109-113.

.....E.....

- Evin, A., Baylac, M., Pons, JM., & Cornette, R. (2008). Apports de la morphométrie géométrique à l'étude du crane de chauves-souris : l'exemple d'un complexe d'espèces du genre *Myotis*. *Symbiose*. 21 : 7-9.

.....F.....

- Fournier, P. (1977). Les quatre flores de la France (générale, alpine, méditerranéenne, littorale) Le Chevalier, Paris.

.....G.....

- García-Ochao, F., & Casas, J.A. (1992). Viscosity of locust bean (*Ceratonia siliqua*) gum solutions. *J. Sci. Food Agri*. 59: 97-100.

- Gharnit, N. (2003). Caractérisation et essai de régénération in vivo du caoubier (*Ceratonia siliqua* L.) originaire de la province de Chefchaouen (Nord-ouest du Maroc). Thèse de Doctorat en science. Université Abdelmalek Essaadi. Tanger.
- Gharnit, N., El Mtili, N., Ennabili, A., & Sayah, F. (2004). Floral characterization of carob tree (*Ceratonia siliqua* L) from the province of Chefchaouen (NW of Morocco). Moroccan J. Biol. 1:41-51.
- Gharnit, N., El Mtili, N., Ennabili, A., & Sayah, F. (2006). Pomological characterization of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) from the province of Chefchaouen (NW of Morocco). Moroccan J. Bio., Vol. 2-3, P.1-11.
- Gonçalves, S. & Romano, A. (2005). Locust bean gum (LBG) as a gelling agent for plant tissue culture media. Scientia Horticulturae, 106(1): 129-134.
- Gonçalves, S., Correia, P.J., Martins-Loução, M.A. & Romano, A. (2005). A new medium formulation for in vitro rooting of carob tree based on leaf macronutrients concentrations. Biologia Plantarum. 49: 277-280.

.....H.....

- Hariri, A., Ouis, N., Sahnouni, F., & Bouhadi, D. (2009). Mise en œuvre de la fermentation de certains ferments lactiques dans des milieux à base des extraits de caroube, rev. Microbiol. Ind. San et environ. Pp. 37-55.
- Haselberg, C. (1996). Factors influencing flowers and fruit development in carob (*Ceratonia siliqua* L.). In III International Carob Symposium. Cabanas- Tavira, Portugal. (in press).
- Haselberg, C. (1998). A contribution to the classification and characterisation of female and male varieties of *Ceratonia siliqua* L. Proceedings of the II International Carob Symposium. Valencia, pp. 137-151.
- Hillcoat, D., Lewis, G., & Verdcourt, B. (1980). A new species of *Ceratonia* (Leguminosae-Caesalpinoideae) from Arabia and the Somali Republic. Kew Bulletin, 35, 261–271, doi: 10.2307/4114570.

.....J.....

- Jensen, LT., Ajua-Alemanji, M., & Culotta Jensen, VC. (2003). The *Saccharomyces cerevisiae* high affinity phosphate transporter encoded by PHO84 also functions in manganese homeostasis. J Biol Chem. 278(43):42036-40.

.....K.....

- Kamal, E.M.Y., El-Manfaloty, M.M., & Hend, M.A. (2013). Assessment of Proximate Chemical Composition, Nutritional Status, Fatty Acid Composition and Phenolic Compounds of Carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Food and Public Health*. 3(6): 304-308.
- Klingenberg, C.P. (2005). MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics.
- Konate, I. (2007). Diversité Phénotypique et Moléculaire du Caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) et des Bactéries Endophytes qui lui sont Associées. PhD thèse. Univ. Mohammed v-Agdal. pp.196.

.....L.....

- Lateb, M. (2014). Contribution à l'étude des hybrides des chênes de la forêt de l'Akfadou, via l'approche « Geometric morphometrics ». Mémoire Magistère, UMMTO, 71 p.
- Lozzi, A., Abdelwahad, R., Mentag, R., & Abousalim, A. (2019). Development of a new culture medium and efficient protocol for in vitro micropropagation of *Ceratonia siliqua* L. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 55, 615–624, doi: 10.1007/s11627-019-09990-6.

.....M.....

- Mahdad, M.Y. (2013). Situation et perspectives d'amélioration du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) dans le Nord-ouest de l'Algérie. Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Algérie, pp. 83.
- Mahdad, M.Y. (2022). Caractérisation par l'outil morphométrique, physico-chimique et moléculaire de la diversité génétique chez *Ceratonia siliqua* L. : identification et sélection des premiers cultivars de caroubier en Algérie. Thèse doctorale, Université de Tlemcen, Algérie, pp. 120.
- Mahdad, M.Y., & Gaouar, S.B.S. (2016). Le Caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) dans le Nord-ouest de l'Algérie : Situation et perspectives d'amélioration. Editions Universitaires Européennes. Germany. ISBN-13: 978-3639542035.

- Mahdad, Y.M., Mediouni, R.M., Viruel, J., Selka, N., and Gaouar, S. B. S. (2022). Functional Diversity Based on Morphometric Analysis and Identification of the Algerian Carob Tree (*Ceratonia siliqua* L.) Cultivars. *Genetics & Biodiversity Journal*. 6(2), 1–20. <https://doi.org/10.46325/gabj.v6i2.238>.
- Makris, D.P., & Kefalas, P. (2004). Carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) as a source of polyphenolic antioxidant. *Food Technol. Biotechnol.* 42: 105-108.
- Melgarejo, P. & Salazar, D.M. (2003). Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas.
- Missbah, M.E.I., Aujjar, N., Belabed, A., Dessaux, Y., & Filali-Maltouf, A. (1996). Characterization of rhizobia isolated from carob (*Ceratonia siliqua* L.). *J. App. Bacteriol.* 80: 165-173.

.....N.....

- Naghmouchi, S., Khouja, M.L., Rejeb, M.N., & Boussaid, M. (2008). Effect of growth regulators and explant origin on in vitro propagation of *Ceratonia siliqua* L. via cuttings. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 12(3), 251–258.
- NAS. (1979). *Tropical Legumes: Resources for the Future*. National Academy of Sciences. Washington DC, USA, pp. 109-116.
- Nassar-Abbas, S.M., e-Huma, Z., Khan, M.K., Esbenshad, H., & Jayasena, V. (2016). Carob kibble: A bioactive-rich food ingredient. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15: 63-72.
- Neukom, H. (1988). Carob bean gum: properties and application. In: Fito P. and Mulet A., (Eds) *Proceedings of the II International Carob Symposium*. Valencia, Spain, pp. 551-555.
- Noblet, J., Fortune, H., Dubois, S., & Henry, Y. (1989). Nouvelles méthodes d'estimation de teneur en énergie digestible, métabolisable et nette des aliments pour le porc. INRA ed., Paris. 106p.

.....O.....

- Orphanos, P.I., & Papaconstantinou, J. (1969). The carob varieties of Cyprus. *Tech. Bull.* 5. Cyprus Agricultural Research Institute. Ministry of Agriculture and Natural Resources, Nicosia.
- Ortiz, P.L., Arista, M., & Talavera, S. (1996). Produccion de nectar y frecuencia de polinizadores en *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinaceae). *Anales del Jardin Botanico de Madrid* 54, pp: 540-546.

Owen, R.W., Haubner, R., Hull, W.E., Erben, G., Spiegelhalder, B., Bartsch, H., Haber, B. (2003). Isolation and structure elucidation of the major individual polyphenols in carob fibre. *Food and Chemical Toxicology*, 41: 1727-1738.

.....P.....

Perrard, A. (2012). *Systématique et morphométrie géométrique: l'évolution de la nervation alaire au sein du genre Vespa (Hyménoptères, Vespidae) (Doctoral dissertation, Paris, Muséum national d'histoire naturelle).*21

Priolo, A., Waghorn, G.C., Lanza, M., Biondi, L., & Pennisi, P. (2000). Polyethylene glycol as a means for reducing the impact of condensed tannins in carob pulp: Effects on lamb growth performance and meat quality. *J. Anim. Sci.* 78: 810-816.

Puhan, Z., & Wielinga, M.W. (1996). Products derived from carob pods with particular emphasis on carob bean gum (CBG). Report Technical Committee of INEC (unpublished).

.....R.....

Ramón-Laca, L., & Mabberley, D.J. (2004). The ecological status of the carob-tree (*Ceratonia siliqua*, Leguminosae) in the Mediterranean. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 144, 431–436, doi: 10.1111/j.1095-8339.2003.00254.x.

Rejeb, M.N. (1995). Le caroubier en Tunisie: Situations et perspectives d'amélioration. Dans: *Quel avenir pour l'amélioration des plantes*. Edit. AUPELF- UREF. John Libbey Eurotext. Paris. pp: 79-85.

Rejeb, M.N., Laffray, D., & Louguet, P. (1991). *Physiologie du caroubier (Ceratonia siliqua L.) en Tunisie*. Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides, Group d'étude de l'Arbre, Paris, France, pp: 417-426.

Retana, J., Ramoneda, J., & Garcia del Pino, F. (1990). Importancia de los insectos en la polinización del algarrobo. *Bol. San. Veg. Plagas*, 16:143-150.

Retana, J., Ramoneda, J., García del Pino, F., & Bosch, J. (1994). Flowering phenology of carob, *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinaceae). *J. Hort. Sci.* 69: 97-103.

Rivière, C.H., & Leco, H. (1900). *Manuel pratique de l'agriculteur algérien*. Editeur : Augustin CHALLAMEL. Paris, pp. 349-353.

Rohlf, F.J. (1990). Morphometrics. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 21, 299– 316.

Rohlf, F.J. (2015). The tps series of software. *Hystrix, Ital J Mammal [Internet]*. 26(1):9–12.

Rohlf, F.J., & Slice, D. (1990). Methods for comparison of sets of landmarks. *Systematic Zoology*. 39, 40-59.

.....S.....

Saïdi, R., El bouzdoudi, B., El Kbiach, M.B, Maouni, A., Badoc, A., & Lamarti, A. (2016). Micropropagation of Carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) by cotyledonary buds. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (12) 4850-4859. ISSN : 2028-2508.

Santos, M., Rodrigues, A., & Teixeira, J.A. (2005). Production of dextran and fructose from carob pod extract and cheese whey by *Leuconostoc mesenteroides* NRRL B512 (f), *Biochemical Engineering Journal* 25, 1–6.

Sbay, H. (2008). Le caroubier au Maroc un arbre d’avenir : Centre de recherche forestière charia Omar Ibn Khattab, BP.763, Agdal, Rabat, Maroc. PP : 44. PP : 07-31.

Sbay, H., & Abourouh, M. (2006). Apport des espèces à usages multiples pour le développement durable : cas du pin pignon et du caroubier. Centre de recherche forestière haut-commissariat aux eaux et forêts et à la lutte contre la désertification, Rabat, pp. 1-9.

Sidina, M.M., El Hansali, M., Wahid, N., Ouatmane, A., Boulli, A., & Haddioui, A. (2009). Fruit and seed diversity of domesticated carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. *Scientia Horticulturae*. 123: 110-116.

.....T.....

Thomson, P. (1971). The carob in California. *California Rare Fruit Growers Yearbook III*: 61-102.

Tsatsaragkou, K., Gounaropoulos, G., & Mandala, I. (2014). Development of gluten free bread containing carob flour and resistant starch. *LWT - Food Science and Technology*, 58: 124-129.

Turhan, T., Bialka, K.L., Demirci, A., & Karhan, M. (2010). Ethanol production from carob extract by using *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource technology*, 101 (14), 5290-5296.

Tucker, S.C. (1992). The developmental basis for sexual expression in *Ceratonia siliqua* (Leguminosae:Caesalpinoideae: Cassieae). *Am. J. Bot.* 79 (3): 367-327.

Tous, J. (1984). Cultivo del Algarrobo. *Hoja Divulgativa N2*: 10. Ministerio de Agricultura. Madrid. 16 p.

.....V.....

Vourdoubas, J., Makris, P., Kefalas, J., & Kaliakatsos, J. (2002). Studies on the production of bioethanol from carob. In The 12th National Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy. Industry and Climate Protection, Proceedings, Amsterdam (pp. 489 - 493).

.....W.....

Winer, N. (1980). The potencial of the carob (*Ceratonia siliqua* L). Int. Tree Crops J. 1: 15-26.

.....Y.....

Yousif, A.K., Alghzawi, H. M. (2000). Processing and characterization of carob powder: Food Chem. 69, 283–287.

.....Z.....

Zelditch, M.L., Swiderski, D., Sheets, H.D., & Fink, W. (2004). Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer. 10.1016/B978-012778460-1/50003-X.

Zelditch, M.L., Swiderski, D.L., & Sheets, H.D. (2012). Geometric morphometrics for biologists: a primer. Academic Press. 443 p.

Zouari, N., & El Mtili, N. (2020). In Vitro Propagation of Mature Carob Trees (*Ceratonia siliqua* L.) from the Axillary Buds. American Journal of Plant Sciences, 11, 1369–1382, doi: 10.4236/ajps.2020.119098.

Sitographie :

<http://dx.doi.org/10.4404/hystrix-26.1-11264>

<http://www.worldagroforestry.org/sea/products/afdbases/af/asp/speciesinfo.asp?spid=509>

www.faostat.fao.org.

<https://d-maps.com/index.php?lang>

Résumé

Le caroubier est une espèce agro-sylvo-pastorale présentant des enjeux socio-économiques et écologiques importants. Depuis de nombreuses années, la cértoniculture en Algérie est en régression, principalement à cause de l'effet des facteurs anthropiques. Néanmoins, cette régression a conduit à la hausse des prix du caroubier, rendant cette spéculation très lucrative pour les agriculteurs et les agro-industriels. Toutefois, la problématique du déterminisme sexuel chez le caroubier reste un inconvénient important pour la création de vergers et le développement des programmes d'amélioration génétique de l'espèce. D'où l'objectif de cette étude qui est d'identifier et distinguer, par une caractérisation morpho-géométrique des folioles, les caroubiers de sexe mâle, femelle et hermaphrodite, provenant de 21 régions différentes du nord Algérien. Au total 781 folioles ont fait l'objet de caractérisation à travers le choix de 16 points repères (Landmarks). Une fois enregistrées en format numérique (TPS), les conformations morpho-géométriques sont alignées et superposées à l'aide de technique de superposition de Procruste.

L'Analyse de variance (ANOVA) des données a révélé des différences hautement significative pour la forme ($p=0.0001$), et significative pour la taille centroïde ($p=0,0243$) entre les trois populations étudiées. L'analyse descriptive de la taille a montré une seule différence significative ($p=0.035$) entre la taille des folioles hermaphrodites et mâles. L'analyse en composantes principales (ACP) a présenté une inertie de 57,15% entre les deux premiers composants et a fait apparaître trois formes différentes. L'analyse des variantes canonique (AC) a distingué ces différentes formes, la foliole femelle tant vers une forme elliptique avec une base contractée en nœud vers le bas et avec apex caractérisé par un angle fermé. Tandis que la forme de la foliole mâle est en général ovale avec une base dispersée à apex caractérisé par un angle ouvert. Les folioles des hermaphrodites ressemblent aux folioles des mâles (ovale) mais avec une base aplatie. Ces résultats peuvent être utilisés comme moyen pour faire une sélection préliminaire des jeunes plants de caroubier.

Mots-clés : Caroubier, populations, folioles, caractérisation, morpho-géométrie, forme.

Abstract

The carob tree is an agro-salvo-pastoral species that has an important socio-economic and ecological role. For many years, the horticultural in Algeria has been in regression, mainly due to the effect of anthropic factors. this regression has led to the increase in carob tree prices, which makes this speculation gainful for farmers and agro-industrialists. However, the problem of sexual determinism in carob remains an important difficulty for the creation of orchards and the development of genetic improvement programs for the species. So, the object of this study is to identify and distinguish, by a morpho-geometric characterisation of the leaflets, the carob trees of male, female and hermaphrodite sex, from 21 different regions of the Algerian north with 781 leaflets characterized through the selection of 16 landmarks. Once recorded in digital format (TPS), the morpho-geometric conformations are aligned and superimposed using the Procrustean superposition technique.

Analysis of variance (ANOVA) of the data revealed highly significant differences in shape ($p=0.0001$), and significant centroid size ($p=0.0243$) between the three populations studied. Descriptive analysis of size showed only one significant difference ($p=0.035$) between the size of hermaphrodite and male leaflets. Principal component analysis (PCA) showed inertia of 57.15% between the first two components and revealed three different shapes. The analysis of canonical variants (CA) distinguished these different forms, the female leaflet so much towards an elliptical form with a base contracted in node downwards and with apex characterized by a closed-angle. While the shape of the male leaflet is generally oval with a scattered base and with apex characterized by an open-angle. The leaflets of hermaphrodites resemble the leaflets of males (oval) but with a flattened base. These results can be used as a means to make a preliminary selection of young carob plants.

Keywords: Carob tree, populations, leaflets, characterization, morpho-geometry, shape.

المخلص

شجرة الخروب هي نوع من الأشجار الزراعية والغابية والرعية ذات قيمة اقتصادية وبيئية مهمة. شهدت زراعة أشجار الخروب في الجزائر تدهورًا منذ سنوات عديدة، ويرجع ذلك أساسًا إلى تأثير العوامل البشرية. ومع ذلك، أدى هذا الانحدار إلى ارتفاع أسعار الخروب، مما جعل هذه المضاربة مربحة للغاية للمزارعين والصناعيين الزراعيين. ومع ذلك، فإن مشكلة تحديد جنس شجرة الخروب تظل عائقًا رئيسيًا لإنشاء البساتين وتطوير برامج التحسين الوراثي للأنواع.

من هنا فإن الهدف من هذه الدراسة هو التعرف والتمييز، من خلال التوصيف الهندسي للوريقات، لأشجار الخروب من الذكور والإناث والخنثى من 21 منطقة مختلفة من شمال الجزائر. تم تمييز 781 وريقة من خلال اختيار 16 معلمًا هندسيًا. بمجرد تسجيلها بتنسيق رقمي (TPS)، تتم محاذاة المطابقة المورفولوجية الهندسية وفرضها باستخدام تقنية التوافق التراكمي.

كشف تحليل التباين (ANOVA) من البيانات عن وجود فروق كبيرة ذات دلالة إحصائية بالنسبة للشكل ($p=0.0001$)، وكذلك فرق بالنسبة لحجم ($p=0.0243$) بين المجموعات السكانية الثلاثة المدروسة. أظهر تحليل الحجم الوصفي اختلافًا واحدًا فقط ($p=0.035$) بين حجم الوريقات الخنثوية والذكور. أظهر تحليل المكون الرئيسي (PCA) خملاً بنسبة 57.15% بين المكونين الأولين وكشف عن ثلاثة أشكال مختلفة. ميز تحليل المتغيرات (AC) هذه الأشكال المختلفة، الوريقات شجرة الأنثى باتجاه شكل بيضاوي مع قاعدة متقلصة في عقدة لأسفل وذات قمة تتميز بزواوية مغلقة. في حين أن شكل الوريقة الشجرة الذكرية بشكل عام بيضاوي مع قاعدة متناثرة ذات قمة تتميز بزواوية مفتوحة. وريقات الخنثى تشبه وريقات الذكور (بيضاوية) لكن بقاعدة مسطحة. حيث يمكن استخدام هذه النتائج كوسيلة لإجراء اختبار أولي لشتلات الخروب.

الكلمات المفتاحية: شجرة الخروب، المجموعات السكانية، المنشورات، التوصيف، الشكل الهندسي.

