

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Sciences Agronomiques



Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

Spécialité : Amélioration de la production végétale et biodiversité

Thème :

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

Elaborée par :

MAHDAD Moustafa Yassine

Soutenue le : 30/05/2022

Devant le jury, composé de :

Président :	Mr. MEDJAHDI Boumediene	Professeur	- Université de Tlemcen
Promoteur :	Mr. GAOUAR Semir Bechir Suheil	Professeur	- Université de Tlemcen
Examineur :	Mr. SEDDIKI Sidi Mohammed Lahbib	Professeur	- C. Universitaire de Naâma
Examineur :	Mme. BOUCHERIT Hafidha	Maître de conférences A	- C. Universitaire de Naâma
Examineur :	Mme. BELLATRECHE Amina	Maître de conférences A	- Université de Tlemcen
Examineur :	Mr. BENARADJ Abdelkrim	Maître de conférences A	- C. Universitaire de Naâma

2021-2022

DÉDICACES

A Mon Regretté Père,

A Ma Chère Mère,

A Ma Chère Epouse,

A Mon Yanis,

A Mon Frère, Mes Sœurs, Neveux et Nièces,

A Toute Ma Famille et Amis.....

REMERCIEMENTS

Au nom de Dieu, le Très Miséricordieux, le Tout Miséricordieux

Louange à Allah, Seigneur des univers de nous avoir donné la faculté de penser, de raisonner, et d'étudier.

Je tiens tout d'abord à exprimer mon éternelle reconnaissance et ma profonde gratitude à ma chère maman, ma chère épouse, mes neveux et nièces, Abdellah et Khadîdja, et tous les membres de ma famille pour leurs aides précieuses, leurs dévouements et leurs encouragements.

J'adresse mes sincères remerciements, et j'exprime ma profonde gratitude à **Mr GAOUAR Semir Bechir Suheil**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir bien voulu diriger cette thèse, pour sa pertinence, ses précieux conseils, et son aide qui m'ont été utiles tout au long de la réalisation de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à **Mr MEDJAHDI Boumediene**, Professeur à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de présider le jury.

Ma reconnaissance va aussi aux vénérables membres du jury à savoir :

Mme BOUCHERIT Hafidha, Maîtres de conférences au Centre Universitaire de Naâma, **Mme BELLATRECHE Amina**, Maîtres de conférences à l'Université de Tlemcen, **Mr SEDDIKI Sidi Mohammed Lahbib**, Professeur au Centre Universitaire de Naâma, **Mr BENARADJ Abdelkrim**, Maîtres de conférences au Centre Universitaire de Naâma, d'avoir bien voulu examiner ce travail.

Je tiens à exprimer ma grande considération et ma vive reconnaissance à **Mr BOUBLENZ A Chakib** Co-gérant de la société **BOUBLENZ A**, leader en Algérie de la transformation et de l'exportation de caroube, pour son aide précieuse, notamment pour les contacts avec les groupes de collecteurs de caroubes, que je remercie également pour le partage d'informations précieuses et pour leur disponibilité tout au long de l'échantillonnage.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement le **Dr Boublenza Ibtissem** pour sa disponibilité et son aide considérable, ainsi que mon ami et camarade de longue date **Mr SELKA Nassim**, avec qui j'ai partagé l'essentiel de mon parcours universitaire mais aussi, les innombrables aventures qui ont conduit à la réalisation de ce travail.

Résumé

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) est une espèce agro-sylvo-pastorale avec d'énormes intérêts socio-économiques et écologiques. En Algérie, la cératoniculture accuse un déclin depuis de nombreuses années, causé principalement par des facteurs anthropiques, qui risqueraient si aucune action n'est menée, de porter inéluctablement un grand préjudice à la diversité de l'espèce. Néanmoins, ce déclin a favorisé l'augmentation des prix de la caroube, qui suscite actuellement un réel engouement de la part des agro-industriels et agriculteurs. Toutefois, cet intérêt pour la création de vergers de caroubiers viables n'est envisageable que si elle est accompagnée d'une stratégie de vulgarisation et valorisation efficaces, visant essentiellement à sélectionner les cultivars les plus performants et les mieux adaptés aux différentes régions du pays. Et c'est justement dans ce contexte que vient s'inscrire la présente étude, dont l'objectif est d'identifier et sélectionner les premiers cultivars de caroubier en Algérie à travers une prospection sur terrain et une évaluation de la diversité génétique et des performances par des outils morphométriques, physico-chimiques, et moléculaires de plusieurs accessions de caroubiers échantillonnées de par le territoire national.

La prospection menée à travers l'Algérie a révélé que parmi les 33 sites visités, seuls deux sites pouvaient être considérés comme des vergers de caroubiers. Par ailleurs, seuls deux cultivars ont été localisés, connus sous les noms de 'Tlemsani' et 'Maricani'. Parmi les soixante-six accessions de caroubiers échantillonnées et évaluées par les caractéristiques des gousses et des graines, et analysées via la classification hiérarchique ascendante (CAH), l'analyse discriminante linéaire (ADL), et le profil de la carte thermique, 11 cultivars de caroubiers potentiels ont été identifiés et sélectionnés, 10 femelles et un hermaphrodite. En outre, la CAH (7 clusters) a révélé une diversité génétique importante parmi les accessions de caroubiers algériens étudiées et a indiqué que la distribution de ces accessions n'était pas influencée par le type d'étage bioclimatique, ce qui suggère que les traits morphométriques sont probablement plus contrôlés par les gènes que par l'environnement. Par ailleurs, l'analyse des corrélations entre les variables a montré que le rendement en graines pourrait être amélioré en sélectionnant des gousses de caroube légères, fines et étroites.

Les résultats des analyses physico-chimiques ont montré que la teneur en sucres totaux de la caroube algérienne est parmi la plus faible dans le bassin méditerranéen avec une moyenne de 43,78 %. En outre, les résultats de l'analyse de variance et l'analyse des correspondances multiples (ACM) ont révélés que les caroubiers sauvages se caractérisent par une plus faible teneur en sucre total par rapport aux caroubiers greffés.

L'analyse moléculaire par 10 RAPDs a dévoilé une importante diversité génétique entre les 11 cultivars de caroubiers identifiés et sélectionnés via les caractères morphométriques et a permis à travers l'indice de similarité de Jaccard de réduire au nombre de neuf les cultivars qui feront l'objet d'une évaluation agronomique et commerciale en conditions contrôlées. Parmi ces 9 cultivars, huit sont des femelles et un, hermaphrodite. De plus, il est à noter que les résultats des analyses moléculaires concordent significativement avec ceux exprimés par les analyses morphométriques, phénotypiques et physico-chimiques, confirmant de ce fait, la robustesse de ces marqueurs morphologiques dans l'estimation de la diversité génétique. Enfin, à l'aide de l'outil moléculaire, des marqueurs RAPDs spécifiques ont été révélés pour les différents cultivars de caroubier. Ces marqueurs peuvent être utilisés pour l'identification de ces cultivars et accessions qui leur sont apparentées et ce, dans la perspective d'utiliser judicieusement la variabilité existante pour la mise en place de programmes d'amélioration visant la création de variétés de caroubiers qui répondent aux attentes des agriculteurs et agro-industriels.

Mots clés : Caractérisation, identification, sélection, caroubier, cultivars, marqueurs morphométriques, paramètres physico-chimiques, RAPD, diversité génétique.

Abstract

The carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) is an agro-sylvo-pastoral species with enormous socio-economic and ecological interests. In Algeria, carob cultivation has been declining for many years, mainly due to anthropic factors, which, if no action is taken, could inevitably cause great damage to the species' diversity. Nevertheless, this decline has led to an increase in the price of carob, which is currently attracting a lot of interest from agribusinesses and farmers. However, this interest in the creation of viable carob orchards can only be envisaged if it is accompanied by an effective extension and development strategy, aimed essentially at selecting the best performing cultivars that are best adapted to the different regions of the country. It is precisely in this context that the present study was being carried out, with the objective of identifying and selecting the first carob cultivars in Algeria through a field survey and an evaluation of the genetic diversity and performance by morphometric, physico-chemical and molecular tools of several accessions of carob trees sampled throughout the national territory.

The survey carried out across Algeria revealed that of the 33 sites visited, only two sites could be considered as carob orchards. Furthermore, only two cultivars were located, known as 'Tlemsani' and 'Maricani'. Among the sixty-six carob accessions sampled and evaluated by pod and seed characteristics, and analysed via hierarchical ascending classification (HAC), linear discriminant analysis (LDA), and heat map profiling, 11 potential carob cultivars were identified and selected, 10 females and one hermaphrodite. In addition, the HAC (7 clusters) revealed significant genetic diversity among the Algerian carob accessions studied and indicated that the distribution of these accessions was not influenced by the type of bioclimatic stage, suggesting that morphometric traits are probably more controlled by genes than by the environment. Furthermore, the analysis of correlations between variables showed that seed yield could be improved by selecting light, thin and narrow carob pods.

The results of the physico-chemical analyses showed that the total sugar content of Algerian carob is among the lowest in the Mediterranean basin with an average of 43.78%. In addition, the results of the analysis of variance and multiple correspondence analysis (MCA) revealed that wild carob trees are characterised by a lower total sugar content than grafted carob trees.

Molecular analysis by 10 RAPDs revealed significant genetic diversity among the 11 carob cultivars identified and selected via morphometric traits and allowed, through Jaccard's similarity index, to reduce to nine the cultivars that will be subject to agronomic and commercial evaluation under controlled conditions. Of these nine cultivars, eight are female and one is hermaphrodite. Furthermore, it should be noted that the results of the molecular analyses are significantly in line with those expressed by the morphometric, phenotypic and physico-chemical analyses, thus confirming the robustness of these morphological markers in the estimation of genetic diversity.

Finally, using the molecular tool, specific RAPD markers were revealed for the different carob cultivars. These markers can be used to identify these cultivars and related accessions with a view to making judicious use of the existing genetic variability for the establishment of breeding programmes aimed at creating carob varieties that meet the expectations of farmers and agro-industrialists.

Key words: Characterisation, identification, selection, carob tree, cultivars, morphometric markers, physico-chemical parameters, RAPD, genetic diversity.

الملخص

شجرة الخروب هي نوع من الأشجار الزراعية والغابية و الرعوية ذات مصالح اجتماعية - اقتصادية و إيكولوجية مهمة. في الجزائر، ظلت زراعة الخروب في انخفاض و هذا منذ سنوات عديدة، بسبب عوامل بشرية، مما قد يهدد تنوعه الجيني إذا لم يتخذ أي إجراء. ومع ذلك، فقد أسهم هذا الانخفاض في زيادة أسعار الخروب، التي تجتذب حالياً اهتماماً حقيقياً من طرف قطاع الصناعات الزراعية والفلاحين. إلا أن هذا الاهتمام بإنشاء بساتين الخروب مستدامة لا يمكن تصوره إلا إذا صاحبه استراتيجية فعالة لتوعية و التطوير، هدفها الرئيسي اختيار الأصناف الأكثر كفاءة و التي تتكيف بشكل أفضل مع المناطق المختلفة للبلاد. وفي هذا السياق بالذات يتم إجراء هذه الدراسة التي تهدف إلى تحديد واختيار أول أصناف الخروب في الجزائر من خلال الاستطلاع الميداني وتقييم التنوع الوراثي والجودة باستخدام المقاييس المورفومترية، الفيزيو-كيميائية والجزيئية لعدة مدخلات لأشجار الخروب التي تم أخذ عينات منها في جميع أنحاء التراب الوطني.

كشف الاستطلاع الميداني في أنحاء الجزائر أنه من بين المواقع الـ 33 التي تمت زيارتها، لا يمكن اعتبار سوى موقعين كبساتين حقيقية للخروب. وبالإضافة إلى ذلك، لم يتم تحديد سوى صنفين من الخروب، هما "تلمساني" و"ماريكاني". من أصل ستة وستين مدخلات خروب تم أخذ عينات منها وتقييمها من خلال خصائص القرون و البذور، وتم تحليلها من خلال التصنيف الهرمي التصاعدي (CAH)، و التحليل التمييزي الخطي (ADL)، وملف خريطة الحرارة، تم تحديد واختيار 11 صنفاً محتملاً من الخروب، 10 أنثى و خنثى واحد. علاوة على ذلك، كشف (7مجموعات) CAH عن تنوع وراثي كبير بين مدخلات شجرة الخروب الجزائرية التي تمت دراستها وأشار إلى أن توزيع هذه المدخلات لم يتأثر بنوع المناخ الحيوي، مما يشير إلى أن القياسات الشكلية للسماوات ربما تتحكم فيها الجينات أكثر مما تتحكم بها البيئة. و من جهة أخرى، أظهر تحليل الارتباطات بين المتغيرات أنه يمكن تحسين محصول البذور عن طريق اختيار القرون الخفيفة والرقيقة والضيقة.

أظهرت نتائج التحليلات الفيزيائية والكيميائية أن محتوى السكريات الكلية للخروب الجزائري هي من بين الأدنى مقارنة مع الخروب المتواجد في بلدان البحر الأبيض المتوسط بمتوسط 43.78%. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت نتائج تحليل التباين والمراسلات المتعددة (ACM) أن أشجار الخروب البري تتميز بانخفاض محتوى السكر الكلي مقارنة بأشجار الخروب المطعمة.

أظهر التحليل الجيني بواسطة 10 من RAPDs تنوعاً وراثياً كبيراً بين 11 نوعاً من أصناف الخروب التي تم تحديدها واختيارها عن طريق الخصوصيات المورفومترية، وجعل من الممكن من خلال مؤشر تشابه Jaccard تقليص عدد هذه الأصناف إلى تسعة، من هذه الأصناف التسعة، ثمانية من الإناث و واحد خنثى. إضافة، تجدر الإشارة إلى أن نتائج التحليلات الجينية تتفق بشكل كبير مع تلك التي تم التعبير عنها من خلال التحليلات الشكلية والظاهرية و الفيزيو-كيميائية، مما يؤكد متانة هذه العلامات المورفولوجية في تقدير التنوع الجيني. أخيراً، باستخدام الاداة الجزئية RAPDs، تم الكشف عن علامات محددة لأصناف الخروب المختلفة. يمكن استخدام هذه العلامات لتحديد هذه الأصناف والمدخلات المتعلقة بها، بهدف الاستخدام الحكيم للتنوع الجيني الحالي لتنفيذ برامج التحسين التي تهدف إلى إنشاء أصناف من أشجار الخروب التي تلبي توقعات المزارعين وقطاع الصناعات الزراعية.

الكلمات المفتاحية: التوصيف، التحديد، الانتقاء، الخروب، الأصناف، العلامات المورفومترية، البارامترات الفيزيو-كيميائية، RAPD، التنوع الجيني.

SOMMAIRE

Introduction	01
---------------------------	----

CHAPITRE I : Présentation du caroubier

I Le caroubier	04
1. Taxonomie et terminologie commune.....	04
2. Origine, distribution et domestication de l'espèce	05
2.1 Origine du caroubier.....	05
2.2 Distribution et domestication	05
3. Aire de production du caroubier dans le monde.....	11
4. Aire de production en Algérie	11
5. Description botanique	13
5.1 Racines	13
5.2 Tronc	14
5.3 Branches	14
5.4 Feuilles	15
5.5 Fleurs	15
5.6 Fruits.....	17
5.7 Graines	18
6. Reproduction du caroubier	25
7. Ecologie du caroubier.....	27
8. Exigences édaphoclimatiques	27
8.1 Climat.....	27
8.2 Températures basses.....	28
8.3 Sol.....	29
8.4 Eau.....	29
9. Multiplication du caroubier	29
9.1 Par semis	29
9.2 Par bouturage.....	30
9.3 Par greffage	30
9.4 Par culture in vitro	30

10. Réalisation de verger de caroubier	31
11. Propriétés et utilisations du caroubier	32
11.1 Propriétés.....	32
11.2 Utilisations	34
12. Maladies et ravageurs.....	37
13. Ressources génétiques et variabilité.....	39
14. Sélection et amélioration du caroubier	41
15. Marqueurs génétiques	42
15.1 Marqueurs morphologiques.....	42
15.2 Marqueurs moléculaires	43
16. Types de marqueurs moléculaires	43
16.1 Marqueurs biochimiques	43
16.2 Marqueurs basés sur l'ADN	44
16.2.1 Restriction Fragment Length Polymorphism (RFLP).....	44
16.2.2 Random Amplified Polymorphic DNA (RAPD)	44
16.2.3 Amplified Fragment Length Polymorphism (AFLP).....	45
16.2.4 Sequence-Characterized Amplified Region (SCAR).....	45
16.2.5 Cleaved Amplified Polymorphic Sequence (CAPS).....	46
16.2.6 Microsatellites ou Simple Sequence Repeat (SSR).....	46
16.2.7 Inter Simple Sequence Repeats (ISSR)	47
16.2.8 Single Nucleotide Polymorphism (SNP).....	47
17. Applications des marqueurs moléculaires.....	47
18. Marqueurs moléculaires utilisés chez le caroubier.....	48

CHAPITRE II : Caractérisation morphométrique du caroubier

II Caractérisation morphométrique du caroubier	50
1. Matériels et méthodes.....	50
1.1 Prospection sur terrain.....	50
1.2 Matériel végétal.....	50
1.3 Analyse statistique des données	51
2. Résultats	52
2.1 Prospection sur terrain.....	52

2.2	Analyse morphométrique	52
2.3	Analyse des corrélations.....	53
2.4	Analyses multivariées	58
3.	Discussion	71

CHAPITRE III : Caractérisation physico-chimique du caroubier

III	Caractérisation physico-chimique du caroubier	75
1.	Matériels et méthodes.....	75
1.1	Analyses physico-chimiques	75
1.1.1	Détermination de l'humidité	75
1.1.2	Dosage des cendres	76
1.1.3	Dosage des sucres totaux.....	77
1.1.4	Dosage des fibres brutes.....	78
2.	Analyse statistique des données	80
3.	Résultats et discussion.....	82
3.1	Analyses physico-chimiques	82
3.2	Analyse des corrélations.....	83
3.3	Analyses multivariées	83

CHAPITRE IV : Caractérisation moléculaire du caroubier

IV	Caractérisation moléculaire du caroubier	91
1.	Matériels et méthodes.....	91
1.1	Extraction de l'ADN génomique.....	91
1.2	Amplification PCR-RAPD	92
1.3	Analyse des données	93
2.	Résultats et discussion.....	93

Conclusion et perspectives	101
---	------------

Références bibliographiques	104
--	------------

LISTE DES ABREVIATIONS, ACRONYMES ET SYMBOLES

%	Pourcentage
°C	Degré Celsius
µg	Microgramme
ACM	Analyse des Correspondances Multiples
ACoP	Analyse des Coordonnées Principales
ACP	Analyse en Composantes Principales
ADL	Analyse Discriminante Linéaire
ADN	Acide désoxyribonucléique
AIB	Acide indole-3-butyrique
ANOVA	Analysis of Variance
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
Apr. J.-C.	Après Jesus-Christ
ARN	Acide Ribonucléique
Av. J.-C.	Avant Jesus-Christ
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
cm	centimètre
CTAB	Bromure de cetyltriméthylammonium
Da	Dinar Algérien
DSAT	Direction des Services Agricoles de Tlemcen
E410	Additif alimentaire (Gomme de caroube)
ERH	Est Refugium Hypothesis
EST-SSR	Expressed Sequence Tags-Simple Sequence Repeat
FAO	Food and Agriculture Organization
g	gramme
GC	Guanine - Cytosine
H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
ha	hectare
Kb	Kilo-base

Kg	Kilo gramme
L	Linné
mg	milligramme
ml	millilitre
mm	millimètre
NaCl	Chlorure de sodium
nm	nanomètre
pb	paire de base
PC	Tampon de liaison
PCR	Polymerase Chain Reaction
PE	Tampon d'éluion
pH	potentiel Hydrogène
PL	Tampon de Lyse
PW	Tampon de Lavage
RAPD	Random Amplified Polymorphic DNA
RNase	Ribonucléase
SARL	Société à responsabilité limitée
T	Température
t	tonne
Tris/HCl	Tris hydrochloride
UPGMA	Unweighted pair group method with arithmetic mean
UV	Ultra violet
µL	microlitre
µm	Micromètre

LISTE DES FIGURES

Figure 01. Origine tropicale pré-méditerranée du caroubier	10
Figure 02. Distribution du caroubier dans le monde	10
Figure 03. Production mondiale de la caroube, année 2017	12
Figure 04. Les différents aspects généraux du caroubier	19
Figure 05. Densités du houppier chez le caroubier	20
Figure 06. Caroubier imposant de plus de 12 mètres de hauteur	20
Figure 07. Racines du caroubier	21
Figure 08. Tronc du caroubier	21
Figure 09. Branches du caroubier	22
Figure 10. Feuille de caroubier	22
Figure 11. Différents types d'inflorescences chez le caroubier	23
Figure 12. Inflorescences hermaphrodites à étamines rouges et jaunes chez le caroubier	24
Figure 13. Gousse de caroubier mesurant plus de 24 centimètres de longueur	24
Figure 14. Graines de caroubier	24
Figure 15. Gousses matures d'un caroubier situé à M'Sila au début du mois de Juillet	26
Figure 16. Fructification du caroubier sur des rameaux secondaires, rameau principal et sur le tronc	26
Figure 17. Effets des températures basses sur les feuilles du caroubier	28
Figure 18. Dispositif de plantation de caroubier avec 11% de pieds pollinisateurs	32
Figure 19. Composants de la graine du caroubier	34
Figure 20. Principaux ravageurs du caroubier	38
Figure 21. Différents types de marqueurs génétiques	49
Figure 22. Carte de distribution des soixante-six accessions de caroubier échantillonnées dans 19 localités avec différents stades bioclimatiques du nord de l'Algérie	54
Figure 23. Différents caractères quantitatifs mesurés à partir de la feuille de caroubier	55
Figure 24. Différents caractères quantitatifs mesurés à partir de la gousse et graine de caroubier	55
Figure 25. Verger de caroubier situé à Tipaza	56
Figure 26. Variabilité des gousses et graines de quelques accessions de caroubiers algériens	56

Figure 27. Coefficient de corrélation entre les paramètres morphologiques des gousses et graines de 66 accessions de caroubiers algériens	60
Figure 28. Analyse des Correspondances Multiples de six variables de feuilles appartenant à 66 accessions de caroubiers algériens	61
Figure 29. Variabilité des feuilles chez le caroubier	62
Figure 30. Analyse en Composantes Principales de 12 traits morphologiques (gousses et graines) de 66 accessions de caroubiers algériens	63
Figure 31. Classification Ascendante Hiérarchique de 66 accessions de caroubiers algériens basée sur leurs 12 traits morphologiques	64
Figure 32. Carte thermique des performances morphologiques de 66 accessions de caroubiers algériens	65
Figure 33. Analyse Discriminante Linéaire de 66 accessions de caroubiers algériens	66
Figure 34. Etapes de mesure de l'humidité d'un échantillon dans une balance thermique.....	75
Figure 35. Détermination du taux des cendres dans un four à moufle	76
Figure 36. Courbe d'étalonnage pour le calcul du pourcentage des sucres totaux chez le caroubier.....	77
Figure 37. Etapes du dosage des fibres brutes selon la méthode de Weende.....	79
Figure 38. Coefficients de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des gousses de 66 accessions de caroubiers algériens	85
Figure 39. Analyse des Correspondances Multiples de 2 variables physico-chimiques et 6 phénotypiques de gousses appartenant à 66 accessions de caroubiers algériens	86
Figure 40. Plotellipses basé sur l'analyse des correspondances multiples (ACM) illustrant des ellipses de confiance autour des modalités de toutes les variables étudiées.....	87
Figure 41. Classification Ascendante Hiérarchique de 66 accessions de caroubiers algériens basée sur 2 traits physico-chimiques et 7 traits phénotypiques de leurs gousses.....	88
Figure 42. Ressemblance phénotypique remarquable (gousse et graines) entre les accessions A06, A08 et A09 et le cultivar Maricani représenté par les accessions A47 et A49	89
Figure 43. Exemple de produits d'amplification obtenus par les amorces OPA-17 et OPA-16.....	97
Figure 44. Dendrogramme produit par le coefficient de Jaccard et la méthode de regroupement UPGMA appliquée à 92 fragments polymorphes RAPD de 11 cultivars de caroubiers	98

Figure 45. Analyse des Coordonnées Principales basée sur 92 fragments polymorphes RAPD de 11 cultivars de caroubiers	99
Figure 46. Spécificité des marqueurs de type RAPD produits par les amorces OPJ-04 et OPJ-08 pour six cultivars de caroubiers analysés	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01. Estimation de la superficie récoltée, la production et le rendement de la caroube dans le monde, année 2017	12
Tableau 02. Principaux produits de la caroube et leurs utilisations majeures.....	36
Tableau 03. Utilisations de la gomme de caroube et ses applications techniques	36
Tableau 04. Principaux cultivars de caroubiers cultivés en Espagne.....	40
Tableau 05. Principaux cultivars de caroubiers cultivés dans le monde.....	41
Tableau 06. Localisation géographique et étage bioclimatique des accessions de caroubier étudiées.....	57
Tableau 07. Caractéristiques foliaires de 66 accessions de caroubiers algériens.....	67
Tableau 08. Caractéristiques des gousses de 66 accessions de caroubiers algériens.....	68
Tableau 09. Caractéristiques des graines de 66 accessions de caroubiers algériens.....	69
Tableau 10. Classification de 66 accessions de caroubiers algériens selon l'Analyse Discriminante Linéaire	70
Tableau 11. Comparaison des caractéristiques morphologiques (gousse et graine) des caroubiers des pays du bassin méditerranéen.....	74
Tableau 12. Caractéristiques phénotypiques des gousses de 66 accessions de caroubiers algériens et leur origine de multiplication.....	81
Tableau 13. Caractéristiques physico-chimiques de 66 accessions de caroubiers algériens ..	90
Tableau 14. Amorces oligonucléotidiques des RAPD utilisés et nombre de produits amplifiés à partir des réactions PCR des 11 cultivars présélectionnés parmi 66 accessions de caroubiers étudiées.....	96
Tableau 15. Matrice des indices de similitude de Jaccard entre les 11 cultivars de caroubiers calculés à partir des données moléculaires de type RAPD	96

INTRODUCTION

Introduction

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) est une espèce sclérophylle, xérophile, thermophile, héliophile et calcicole (Mahdad et Gaouar, 2016) appartenant à la famille des Fabaceae. Les données génétiques et fossiles soutiennent une origine pré-méditerranéenne du caroubier, la scission entre *C. oreothauma* et *C. siliqua* étant estimée à 6,4 Ma (Bessedik et al., 1984 ; Viruel et al., 2020), et ses ancêtres étaient probablement répartis autour de la mer de Téthys à l'époque paléogène (Palamarev, 1989). Son centre de diversification est bien connu et est incontestablement le bassin méditerranéen (Batlle et Tous, 1997 ; Melgarejo et Salazar, 2003 ; Viruel et al., 2020). Cette espèce agroforestière rustique peut jouer un rôle socio-économique et écologique primordial, notamment dans les régions sèches et les zones où les processus de désertification prennent des ampleurs de plus en plus alarmantes, notamment en Algérie. On la trouve généralement dans les régions à climat méditerranéen (Baumel et al., 2018), mais aussi dans les régions à 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).

Toutes les parties du caroubier ont une valeur économique et des avantages considérables pour la santé et peuvent être utilisées dans plusieurs domaines. Ses racines latérales permettent à l'arbre de pousser sur des terrains rocheux au sol peu profond et dans des conditions arides, ce qui serait contraignant pour d'autres cultures (Albanell, 1990). Le bois du caroubier est utilisé dans la fabrication d'ustensiles et la production de combustible (Batlle et Tous, 1997). L'écorce de l'arbre est utilisée en tannerie, notamment pour la finition et l'émaillage des peaux (Batlle, 1997) et est très riche en substances antioxydantes (El Hajaji et al, 2011). Les feuilles de caroube ont des propriétés anticancéreuses, antioxydantes, bactéricides et anti-neurodégénératives (Corsi et al., 2002 ; El Hajaji et al., 2010 ; Meziani et al., 2015 ; Ben Othmen et al., 2020 ; Abidar et al., 2020). Son miel a une activité diurétique, natriurétique et kaliurétique et est riche en molécules bioactives avec des propriétés antioxydantes et anti-radicalaires (El-Haskoury et al., 2018).

La gomme de caroube reste le produit le plus important parmi ceux dérivés de la graine. Elle est riche en galactomannane et est utilisée dans l'industrie alimentaire comme agent épaississant, stabilisant, liant et gélifiant ou comme agent dispersant (Batlle et Tous, 1997). Elle est également utilisée dans l'imprimerie, la photographie, les textiles, les produits pharmaceutiques, les cosmétiques, les produits chimiques...etc. (Tous et al., 2013).

Les gousses de caroube sont traditionnellement utilisées comme aliment pour les ruminants (Louca et Papas, 1973) et les non-ruminants (Sahle et al., 1992), mais aussi pour la consommation humaine (Azab, 2017). Sa pulpe est utilisée comme substitut du cacao dans la production de chocolat car elle est moins calorifique et ne contient ni caféine ni théobromine (Craig et Nguyen, 1984). Les gousses ont des propriétés antioxydantes, analgésiques, antiparasitaires et antidiarrhéiques (Makris et Kefalas, 2004 ; Ben Ayache et al., 2020 ; Min et Hart, 2003 ; Serairi-Béji et al., 2000). En général, elles sont très bénéfiques pour le traitement des troubles gastro-intestinaux (Rtibi et al., 2017). En outre, il a été démontré que le fruit du caroubier peut prévenir la dyslipidémie et le déficit de mémoire à court terme (Valero-Muñoz et al., 2017 ; Alzoubi et al., 2018).

De nombreuses études ont été menées au cours des deux dernières décennies visant à évaluer la diversité chez *C. siliqua*, en utilisant des outils morphométriques (Russo et D'Andrea, 2002 ; Barracosa et al., 2007 ; Sidina et al., 2009), enzymatiques (Batlle et al., 1996 ; Makrem et al., 2006), chimiques (Ayaz et al., 2007 ; Khelifa et al., 2013 ; Tetik et al., 2011), cytologiques (Bureš et al., 2004) et moléculaires (Caruso et al., 2008 a,b ; Konate et al., 2009 ; La Malfa et al., 2014 ; Viruel et al., 2018). En Algérie, il existe très peu d'études sur la diversité du caroubier. Ces dernières sont récentes et ont été menées sur la diversité des semences pour les populations occidentales (Zemouri et al., 2020), sur les populations de caroubiers sauvages (Kocherane et al., 2019), et sur la diversité morphologique et chimique de populations échantillonnées de manière aléatoire (Boublenza et al., 2019). Par ailleurs, aucune étude moléculaire n'a été réalisée sur le caroubier algérien.

Actuellement, il y a un intérêt substantiel pour la culture du caroubier en Algérie alimenté d'une part, par une demande croissante de la part des industriels du domaine agroalimentaire et d'autre part, par une diminution de l'offre, provoquée par la chute de la production nationale 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. Conséquences, les prix de la caroube sur le marché se sont envolés, passant du double au triple en seulement 2 ans. En effet, et alors que le kilogramme de la caroube se négociait en 2019 autour des 70 Da, en 2021 son prix a atteint 210 Da le kilo, transformant le caroubier en une spéculation très lucrative et avec une rentabilité supérieure à celle de nombreuses cultures pérennes, telle que l'olivier.

Cette forte tendance haussière des prix de la caroube en Algérie commence à susciter l'engouement non seulement des transformateurs de ce produit mais aussi des agriculteurs, qui veulent tous investir dans la culture du caroubier moyennant des fonds considérables. Toutefois, cet intérêt porté notamment par les agriculteurs pour la création de vergers de caroubiers viables n'est envisageable, que si elle est accompagnée d'une stratégie de vulgarisation et valorisation efficaces, visant essentiellement à sélectionner les cultivars les plus performants et les mieux adaptés aux conditions climatiques des différentes régions du pays.

Cependant, et contrairement à de nombreux pays méditerranéens (Tous et al., 2013), il n'existe pas d'informations sur les cultivars de caroubiers algériens, dont la plupart, datent de la période coloniale et pour lesquelles il n'existe pas d'archives, d'où l'objectif de cette étude, qui se veut pionnière dans la détermination et sélection des premiers cultivars de caroubier en Algérie à travers une prospection sur terrain et une évaluation de la diversité génétique et des performances par des outils morphométriques, physico-chimiques, et moléculaires de plusieurs accessions de caroubiers, permettant de sélectionner des cultivars potentiellement performants ; lesquelles feront l'objet d'une évaluation agronomique et commerciale en conditions contrôlées, et ce dans la perspective de créer des vergers de caroubier compétitifs et viables à travers le territoire national.

Le présent travail est subdivisé en quatre chapitres. Le premier est consacré à la présentation détaillée de l'espèce caroubier. Le deuxième chapitre s'articule autour de la caractérisation morphométrique des accessions de caroubiers échantillonnées grâce à des prospections sur terrain, menées dans une trentaine de wilaya et dont l'objectif est d'évaluer la variabilité génétique, d'identifier et de sélectionner parmi ces accessions, les premiers cultivars de caroubier algériens qui pourraient être utilisés comme germoplasme pour les programmes de sélection. Le troisième chapitre est dédié à la caractérisation physico-chimique, où il est question d'estimer et de comparer la richesse des gousses des accessions échantillonnées à partir de l'analyse des paramètres physico-chimiques, tels que les cendres, les sucres totaux ainsi que les fibres brutes. Enfin, le dernier chapitre est consacré à l'évaluation de la diversité génétique par l'outil moléculaire des cultivars sélectionnés dans le chapitre 2 à travers des indices de similarité et ce dans le but de fixer le nombre final de cultivars qui seront évalués dans des conditions contrôlées.

CHAPITRE 1

I Le caroubier

1. Taxonomie et terminologie commune

Le nom scientifique du caroubier, *Ceratonia siliqua*, proposé par Linné est dérivé du mot grec ‘Keras’ = corne et du latin ‘siliqua’ (gousse), en allusion à la dureté et la forme de la gousse (Mahdad, 2013). La dénomination de l’espèce *C. siliqua* L. dans différents pays et langues découle d’une forme générale du nom arabe *Al kharroub* ou *kharroub*, comme c’est le cas *del algarrobo* ou *garrofero* en espagnol (Albanell, 1990), *kharuv* en hébreu, *carrubo* en italien, *caroubier* en français, *garrofer* ou *garrover* en catalan, *alfarrobeira* en portugais...etc.

En raison de leur uniformité, les graines du caroubier sont appelées ‘carats’ et ont pendant longtemps servi aux joailliers comme unité de poids pour la pesée des diamants, des perles et d’autres pierres précieuses (1 carat = 205,3 mg) (Rejeb, 1995). On attribue aux arabes l’utilisation des graines entières du caroubier comme unité de poids dans le commerce de substances et matériels précieux. Il apparait donc que ‘el kilate’ en espagnol ou ‘carat’ en français (0,2 g) vient du nom arabe (Al-karat ou qirât) donné à la graine, laquelle est caractérisée par sa relative constance de poids (Albanell, 1990).

Le genre *Ceratonia* appartient à la famille des *Légumineuses* de l’ordre des *Rosales*, sous-famille des *Cesalpinoïdæ*, tribu des *Cassieæ*. Toutefois, cette position taxonomique demeure controversée (Mahdad, 2013). En effet, Tucker (1992 a) suggère que *C. siliqua* peut avoir un lien avec la sous-famille des *Mimosoïdæ*. En outre, certains auteurs ont conclu que le genre *Ceratonia* est isolé morphologiquement des autres genres de *Cassieæ* (Hillcoat et al., 1980; Tucker, 1992 a et b) et que de ce fait, il doit être exclu de la tribu des *Cassieæ* (Irwin et Barneby, 1981; Tucker, 1992 b). De plus, des études cytologiques ont révélé que le genre *Ceratonia* avec un nombre total de chromosome $2n = 24$ (Frahm-Leliveld, 1957; Goldblatt, 1981; Arista et Talavera, 1990; Bureš et al., 2004) est éloigné des autres membres des *Cassieæ* dont le nombre de chromosome est de $2n = 28$ (Goldblatt, 1981).

Le caroubier n’est pas l’unique espèce qui représente le genre *Ceratonia*. En effet, une seconde espèce a été découverte par Hillcoat et al. (1980), à laquelle on a donné le nom scientifique de *Ceratonia oreothauma* Hillcoat, Lewis et Verdc. Selon ses origines, cette espèce se subdivise en deux sous-espèces différentes : la sous-espèce *oreothauma* native de l’Arabie (Oman) et la sous-espèce *somalensis* originaire du nord de la Somalie (Batlle et Tous, 1997).

Ceratonia oreoethauma est morphologiquement distincte de *C. siliqua*. En outre, son pollen est plus petit que celui de *C. siliqua* et il est tricolporé au lieu de tetracolporé (Ferguson, 1980). Hillcoat et al. (1980) suggèrent que *C. oreoethauma* est l'ancêtre sauvage de l'espèce cultivée *C. siliqua*. Nonobstant, les enregistrements de pollen fossile de *C. siliqua* trouvés au Miocène en Méditerranée sont morphologiquement différentes du pollen de son espèce sœur *C. oreoethauma*, par le nombre d'ouvertures et l'ornementation de surface, de plus, les analyses des temps de divergence à travers les données moléculaires ont estimé une scission entre *C. siliqua* et *C. oreoethauma* autour du Miocène tardif, estimée à 6,4 Millions d'années (Viruel et al., 2020).

2. Origine, distribution et domestication de l'espèce

2.1 Origine du caroubier

Les données génétiques et fossiles soutiennent une origine pré-méditerranéenne du caroubier (Bessedik et al., 1984; Viruel et al., 2020) et ses ancêtres étaient probablement distribués largement autour de la mer de Téthys au cours du paléogène (Palamarev, 1989) dans des forêts tropicales qui ont été appauvries par les extinctions successives pendant la transition vers le climat méditerranéen (Suc, 1984; Mijarra et al., 2009; Suc et al., 2018). *C. siliqua* semble avoir conservée des traits physiologiques propres aux espèces tropicales notamment, l'existence d'une période de floraison tardive (Juillet-Octobre), inhabituelle chez les arbres et arbustes méditerranéens et la présence d'un contenu enzymatique photosynthétique de "type C4" (caractéristique des plantes de climat chaud) durant les premières étapes de son développement et qui par la suite est inhibé une fois la plante adulte (Catarino et Bento-Pereira, 1976). En outre, les feuilles du caroubier ont une longévité qui est quasiment le double que chez la majorité des espèces méditerranéennes les plus communes (Catarino, 1993). Tous ces arguments tendent à confirmer l'origine tropicale pré-méditerranéenne de l'espèce (Figure 01).

2.2 Distribution et domestication

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 (Ramon-Laca et Maberley, 2004). Cette "hypothèse du refugium oriental" (ERH, Est Refugium Hypothesis),

largement acceptée, postule l'existence d'un seul refuge pour le caroubier, situé à l'Est de la Méditerranée, et une dissémination par l'homme concomitante à sa domestication vers l'Ouest de la région, ce qui laisse à penser que les populations de caroubiers sauvages de la Méditerranée occidentale auraient une origine récente et férale (Batlle et Tous, 1997; Zohary, 2002).

Les arguments avancés par les partisans de l'ERH unique semblent être cohérents puisqu'ils reposent sur des évidences: i) écologiques avec la découverte de *C. oreoethauma*, espèce étroitement apparentée et co-occurrence avec le caroubier au Yémen (Hillcoat et al., 1980) ; ii) paléobotaniques soutenant l'existence de *C. siliqua* dans l'Est à la fin du Pléistocène et au début de l'Holocène (Zohary, 2002) ; iii) philologiques, où à l'exception de la Grèce et de l'Italie du Sud, la plupart des noms attribués aujourd'hui à l'arbre dans les langues européennes sont liés à l'arabe (Ramon-Laca et Mabberley, 2004), et iv) historiques avec des documentations juives et arabes sur l'utilisation et la domestication du caroubier datant de l'époque mishnaïque (1 av. J-C. Au 2 ap. J-C.) (Zohary, 2002) et de la période médiévale avec l'ouvrage *Kitāb al-Filāḥa al-Nabaṭeyya*, l'agriculture nabatéenne, qui fut le premier livre écrit sur l'agriculture en arabe et le plus influant non seulement dans toute la région Est de la Méditerranée mais aussi en Andalousie musulmane. En outre, Amar (2000) cité par Zohary (2002), affirme que la culture du caroubier dans le bassin méditerranéen semble avoir atteint son apogée après la conquête arabe, notamment dans les pays du levant.

Cependant, les résultats récents des analyses phylogéographiques et fossiles (Viruel et al., 2020) ont révélé l'existence d'un refuge occidental, étayée à la fois par des archives fossiles de *C. siliqua* datées du Pléistocène trouvées en Méditerranée occidentale et orientale et par la mise en évidence de deux grandes lignées de *C. siliqua*. La première regroupe deux lignées, SM (Sud du Maroc) et SS (Sud de l'Espagne), située dans la partie la plus occidentale de la Méditerranée, et la deuxième est représentée par deux lignées, l'une au Centre et l'autre à l'Est de la Méditerranée. La divergence entre ces deux grandes lignées de *C. siliqua* a été estimée à 116 mille années, ce qui ramène leur origine à un temps qui a largement précédé la domestication de l'espèce (Viruel et al., 2020), dont l'avènement est situé entre 3000 à 2000 ans, période du développement des techniques de greffage des scions dans le bassin méditerranéen (Meyer et al., 2012).

Viruel et al. (2020) estiment donc, que l'hypothèse de l'unique refugium Est ou oriental doit être réfutée et quand même bien il ne fallait pas nier le rôle important qu'a joué les agriculteurs grecs, romains et arabes dans l'histoire du caroubier notamment dans la diffusion des pratiques de culture et des cultivars du caroubier, il n'en demeure pas moins que les résultats soutiennent

une utilisation locale et une domestication du caroubier à partir des populations indigènes de toute la Méditerranée. Cette conclusion nous semble réaliste et approuvable et ce en vue des arguments susmentionnés et ceux que l'on va présenter ci-dessous.

Dans la partie centrale du bassin méditerranéen, le caroubier fut mentionné pour la première fois à Rome par Columelle (4 av. J.-C. – 70 apr. J.-C.) qu'il appela *siliqaa Graeca* et que certains gens le désignèrent sous le nom de *ceration*. Pline l'Ancien (23 – 79 apr. J.-C.) décrit l'arbre en détail et dit que les Ioniens l'appelaient *ceronia* (Meyer, 1980). Ces appellations non rien en commun avec ceux donnés à l'Est de la Méditerranée (*Kharroub* en arabe, *Kharuv* en hébreu).

Quant à la partie occidentale de la Méditerranée, les premières et plus importantes sources sur le caroubier et sa culture nous viennent de l'Andalousie musulmane, que l'on trouve dans des œuvres magistrales sur l'agriculture en général écrites entre autres par Ibn Ḥajjāj al-Ishbīlī (11^{ème} siècle) ; Abū al-Kḥayr al-Ishbīlī (11^{ème} siècle) et Ibn al-'Awwām (12^{ème} siècle). Ce dernier en citant Abū al-Kḥayr, mentionna dans son fameux livre *Kitāb al-filāḥa* (Banqueri, 1802) les noms de cultivars de caroubier, tel que 'El-Andaloussi', dont les gousses sont larges et longues (probablement sélectionné à partir de caroubier local), 'El-Amlissi' (qui veut dire le très lisse, très probable qu'il soit aussi issu d'une sélection, car beaucoup de cultivars et variétés contemporains présentent ce trait), "Daneb El-Fa'r" (queue de la souris), 'El-Shami' présentant de petits fruits de forme ronde (cultivar éventuellement introduit de Syrie) et 'Kharoub El-Djabali', caroubier de montagne ou sauvage. Les types de multiplication de l'espèce y sont aussi présents et bien détaillés, multiplication par semis, par bouturage en crossette et par écussonnage (greffe en écusson).

La mention par Abū al-Kḥayr al-Ishbīlī de la présence de caroubier sauvage en Andalousie semble conforter considérablement l'idée d'un caroubier native de l'occident à l'instar des *C. siliqua* natives du Centre et de l'Est de la Méditerranée. Toutefois, comment peut-on expliquer l'absence d'appellations locales pour cette espèce dans la péninsule ibérique ? Les réponses à cette question semblent être d'ordre écologique, historique et socio-culturel. Ecologique du faite que le caroubier avec son intolérance au froid, poussait uniquement dans les régions côtières chaudes et la zone méridionale du pays (à Valence et dans le Sud du pays), et quand bien même on le trouvait dans les régions tempérées, ces derniers ne pouvaient fructifier, et ne survivaient pas dans les zones froides comme la signalé de Herrera en 1513, premier agronome du temps de l'Espagne des rois catholiques à écrire sur le caroubier (RSEM, 1818). Il semblerait donc que l'espèce n'était pas usuelle chez toute la population ibérique.

Historique, la présence d'appellations d'origine locale chez le caroubier notamment dans la partie méridionale de la péninsule ibérique n'est pas à écarter, surtout à l'époque de la conquête romaine (-196 av. J-C. – 411 ap. J-C.) comme c'en est le cas en Algérie et au Maroc où on continue d'attribuer jusqu'à présent chez certaines populations berbérophones des appellations qui semblent vraisemblablement dérivées du nom latin 'Siliqaa' tels que 'Taslighoua', 'Taslaghwa' et 'Slighwa' (Baba Aissa, 2000; Bertrand, 1991). Cependant, l'invasion de la péninsule par les wisigothes (418 – 711 ap. J-C.), peuples germanique d'occident, originaire du Nord de l'Europe et donc ne connaissant pas l'espèce, aurait peut-être fait disparaître les noms originels du caroubier, il s'en est suivi la conquête des musulmans (710 – 1492 ap. J-C.) où l'absence des noms locaux dans les écrits d'agronomes andalous est bien notable, aussitôt étayée par les appellations données au caroubier dans les différentes langues d'Espagne et qui dérivent toutes de l'arabe (algarrobo en castillan et en basque, garrofer en catalan, alfarrobeira en galicien...). Quoi qu'il en soit, ce n'est pas parce que tous les noms attribués au caroubier en Espagne découlent de l'arabe que ce dernier est de facto aurait été introduit par les Arabes et l'exemple de l'olivier en est un. En effet, la présence de l'olivier, sa culture et son utilisation dans la péninsule ibérique est beaucoup plus antérieure à l'arrivée des Arabo-berbères et pourtant, le nom que l'on donne à l'olivier sauvage en Espagne est 'El Acebuche' nom dérivant du berbère 'Azebouche' ou 'Zeboudj' ou encore le fruit de l'olivier nommé 'Aceituna' en castillan, terme qui provient de l'arabe 'Al-zaytūna'. Ces exemples témoignent de l'important héritage agronomique laissé par la civilisation musulmane en Espagne que ce soit via l'introduction de nouvelles espèces telles que le riz, le coton, canne à sucre, aubergine...(Banqueri, 1802; Ruas et al., 2015) ou à travers les techniques et pratiques culturelles ingénieuses et innovatrices (Hernández Bermejo et García Sánchez, 2000; García Sánchez, 2013), lesquelles ont permis la valorisation et l'essor de cultures autochtones, tel que le caroubier, dont sa culture a incontestablement atteint son apogée durant le règne des Andalous dans la péninsule de l'Hispanie, et qu'il est fort probable que l'initiation de sa multiplication et donc sa domestication dans la région soit l'œuvre des Arabo-musulmans.

Socio-culturel, par le fait que le caroubier a toujours été associé à la misère, à la faim, au manque de pain, ces gousses étaient consommées dans les moments de disette. de Herrera, mentionna qu'une fois la période de pénurie surmontée, ses gousses pourraient faire usages de complément pour l'entretien des bœufs et bêtes (RSEM, 1818). Tout pense à croire que la population ibérique ne portait pas cet arbre dans le cœur, et ce sentiment de rejet envers cette espèce a perduré jusqu'au début du 19^{ème} siècle, comme l'a signalé J. Álvarez Guerra dans l'un des 17 volumes qu'il a traduit du dictionnaire sur l'agriculture universelle de J-B François

Rozier (RSEM, 1818). Les valenciens dit-il, dans de nombreuses régions poursuivirent à mort aux caroubiers mâles (car improductifs), auxquels, en preuve de leur haine, ils donnèrent l'épithète de juifs ; appellation qui persiste de nos jours en Espagne (Albanell, 1990). Puis il ajouta, ce serait mieux s'ils gardaient ces arbres interdits par leur ignorance, et ainsi ils obtiendraient de plus en plus de fruits. Cette ignorance est la conséquence de l'expulsion des mauresques en 1609, descendant des musulmans de l'Andalousie, qui représentaient le tiers de la population valencienne, maîtrisant agriculture, art, artisanat et architecture. Si *C. siliqua* est considéré par les Juifs et Italiens comme l'arbre de la mémoire (Cairati, 2013), pour certain Ibériens et Espagnols, le caroubier est "l'arbre de la malédiction".

En Algérie et au Maroc, *C. siliqua* semble être présent avant les conquêtes Romaines et Arabes comme l'atteste les noms amazighs donnés à l'espèce, 'Tikida', 'Tissit' et 'Ikidu' (Bertrand, 1991; Baba Aissa, 2000), mais on pense que sa culture et donc sa domestication dans la région fut l'œuvre des civilisations musulmanes qui se sont succédées. Enfin, en France, *C. siliqua* a été décrit pour la première fois par le fameux botaniste et agronome Rozier (1787) où il mentionna que l'espèce est propice à la culture en Provence (Sud-est de la France) mais à condition qu'elle soit mise à l'abri du froid. Par ailleurs, Thouin et al. (1840) proposèrent l'établissement de prairies permanentes avec entre autres le caroubier, chose qui est insensée vue la difficulté de germination de sa graine. Cette suggestion émanant des membres de la section de l'agriculture de l'institut de France est déraisonnable et démontre une méconnaissance totale de ce qu'est la culture du caroubier. De ce fait, il est très probable que *C. siliqua* ait été cultivée très récemment en France et que c'est probablement dans le Sud de ce pays qu'a lieu la dernière domestication de l'espèce au niveau du bassin Méditerranéen.

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. 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* (Batlle et Tous, 1997 ; Melgarejo et Salazar, 2003 ; Viruel et al., 2020) 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.



Figure 01. Origine tropicale pré-méditerranée du caroubier.

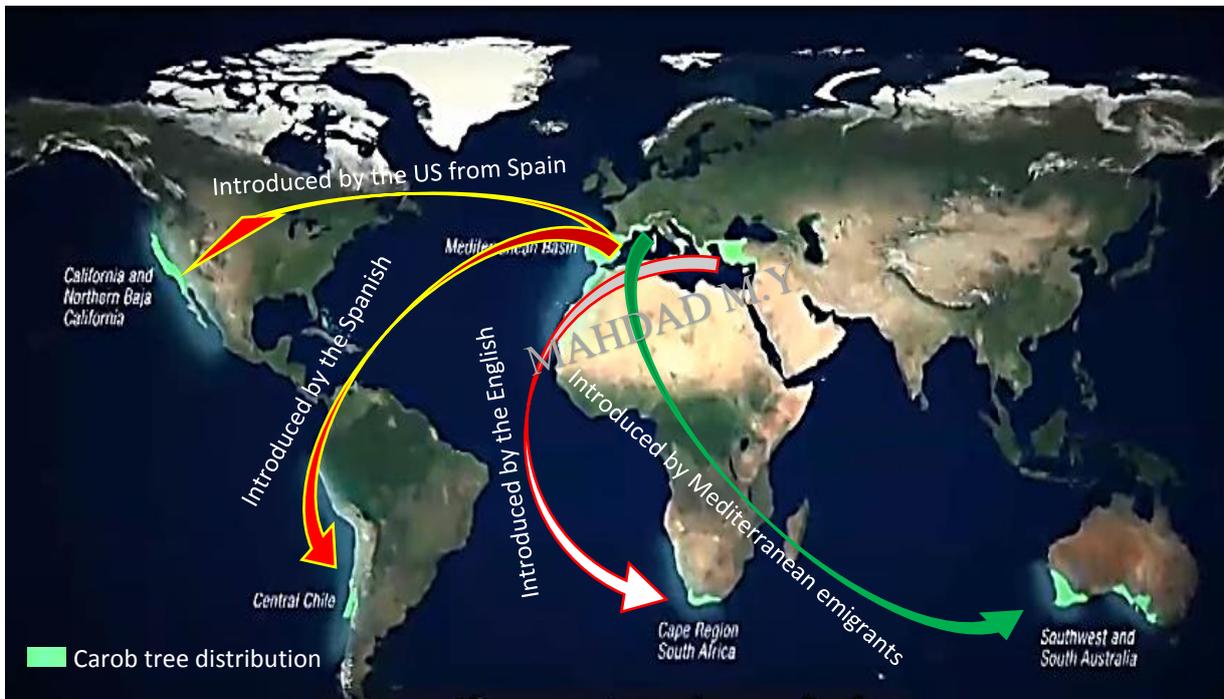


Figure 02. Distribution du caroubier dans le monde.

3. Aire de production du caroubier 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.

La production mondiale de la caroube a diminué d'une façon drastique au cours des 70 dernières années, passant de 650.000 tonnes en 1945 (Orphanos et Papaconstantinou, 1969) à 173.423 tonnes en 2017. Rien qu'en Espagne, la production a chuté de 383.632 t, passant de 420.000 t en 1945 (AEA, 1987) à 36.368 t en 2017. En Algérie, la production de la caroube s'est vue réduite de 83% entre 1961 (24.000 t) et 2017 (4042 t) (FAOSTAT). Cette baisse considérable en production est due principalement au vieillissement des vergers de caroubier dans tout le bassin méditerranéen, mais aussi, à l'absence de programmes de renouvellement et d'installation de nouvelles plantations.

4. Aire de production en Algérie

La superficie récoltée du caroubier en Algérie a fortement baissé, passant de 11000 ha en 1961 à 732 ha en 2019 (FAOSTAT). En 2009, la superficie cultivée de la caroube était de 927 ha dont 645 ha, soit 69,58 % de la superficie totale se trouvent dans la wilaya de Bejaia. La production nationale de la caroube était estimée à 3384 tonnes et se concentrait principalement dans la wilaya de Bejaia avec une production de 1842 tonnes, ce qui représentait 54,42 % de la production nationale, suivie par la wilaya de Blida (23,79 %) et Tipaza (16,55 %) (DSA de Tlemcen). En 2018, la production nationale de la caroube a été estimée par les acteurs économiques dont la SARL Boublenza, qui est leader national dans la transformation et exportation des dérivés de la caroube, à 11.500 tonnes, soit une augmentation en quantité de 340 % par rapport à l'année 2009. Cette nette augmentation n'est nullement liée à un accroissement de l'aire de production, laquelle est à contrario en baisse continue depuis l'indépendance, mais due à l'augmentation de l'exploitation de la caroube par les collecteurs de plus en plus motivés par des prix qui augmentent considérablement d'année en année et ce grâce à l'intensification de la concurrence suite à l'installation de nouveaux acteurs économiques dans le secteur de la transformation et exportation de la caroube.

Tableau 01. Estimation de la superficie récoltée, la production et le rendement de la caroube dans le monde, année 2017 (tableau établi à partir des données de la FAOSTAT et du Ministère Espagnol de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation).

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
Israël	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).

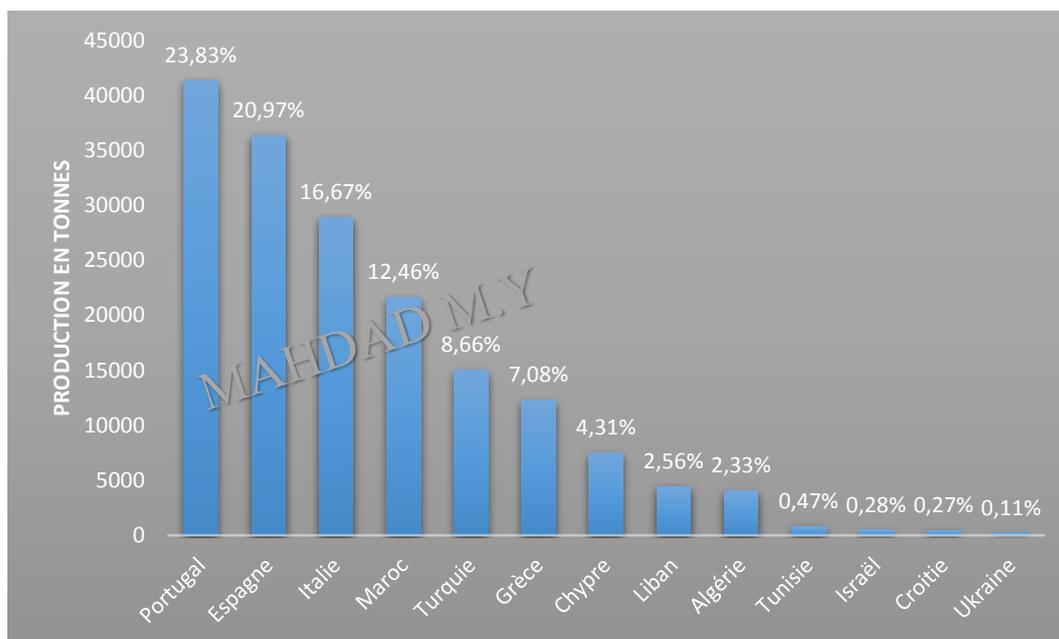


Figure 03. Production mondiale de la caroube, année 2017 (Histogramme établi à partir des données de la FAOSTAT et du Ministère Espagnol de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation).

5. Description botanique

Le caroubier est un arbre présentant un aspect général qui peut être ouvert, érigé ou pleureur (Figure 04) avec un feuillage abondant et persistant. Son houppier est généralement peu dense à dense chez les pieds femelles et dense à très dense chez les arbres mâles (Figure 05) et se caractérise par des branches solides. Il peut atteindre dans des conditions propices une hauteur de 12 mètres (Figure 06) et enregistrer une circonférence au niveau de la base du tronc pouvant atteindre les 4 mètres. C'est une espèce rustique avec une longévité considérable (jusqu'à 300 ans selon les dires d'agriculteurs cités par Ibn al-'Awwām dans Banqueri, 1802). Elle présente un système racinaire puissant, très étendu et généralement distribué en surface, surtout dans les sols peu profonds. Sa croissance est très lente, en particulier durant les 5 premières années.

5.1 Racines

La racine du caroubier est très ramifiée en surface (Figure 07), avec des formations épaisses dans sa partie supérieure qui en se séparant du tronc vont prendre une direction oblique par géotropisme positif. Ces formations caractérisent la majeure partie du système racinaire du caroubier et forment un socle considérable même s'il est moins marqué que celui formé chez l'olivier (Mahdad, 2013).

Les racines se caractérisent par une croissance lente mais avec un développement important au niveau des extrémités, de sorte que le volume des racines dépasse rapidement le double ou le triple de celui de l'houppier, ce qui permet de classer cette espèce parmi celles qui présentent un système racinaire très étendu et spécialement distribué en surface (Melgarejo et Salazar, 2003).

La racine principale est ramifiée en plusieurs racines latérales ou secondaires de grande longueur et avec une tendance à être superficielles, en particulier sur les sols compacts ou peu profonds. Les racines latérales très ramifiées et avec de nombreux poils absorbants sont capables de s'étendre sur une longueur de 30 à 40 m (Tous, 1984) et peuvent atteindre un développement quatre fois supérieur à celui des rameaux (Albanell, 1990).

En plus de fixer vigoureusement l'arbre dans le sol, ce système racinaire permet l'absorption de l'humidité et des éléments nutritifs sur une grande surface de terrain, particulièrement à partir de la couche la plus superficielle du sol, laquelle présente les niveaux les plus élevés de fertilité, d'aération et de matière organique. C'est probablement l'une des

raisons principales pour laquelle cet arbre peut croître dans un terrain rocailleux avec des sols peu profonds et dans des conditions arides qui seraient contraignantes pour d'autres cultures (Albanell, 1990).

Bien que le caroubier ait été classé dans la "famille des légumineuses" grâce aux caractéristiques de son fruit, cependant, il n'a pas été possible de démontrer qu'il possédait des nodules symbiotiques de rhizobium excepté dans un seul cas (Mahdad, 2013). En effet, selon Martins-Loução et Rodríguez-Barrueco (1982), Martins-Loução et al. (1996) et Hirsch et al. (2001), le caroubier est une légumineuse non nodulante. Toutefois, Missbah et al (1996) ont pu isoler dans la région de Debdou (Maroc) des souches de rhizobium nodulant le caroubier. Nonobstant, Konate (2007) réactiva et purifia la collection des souches isolées par Missbah et al. (1996) ensuite il procéda à un test d'authentification en les inoculant sur deux accessions de caroubier cultivées dans des conditions axéniques. L'examen du système racinaire des plantes n'a montré aucune formation de nodosité. En outre, les données de l'étude menée par La Malfa et al. (2010) ont révélé que les caroubiers cultivés en plein champ n'utilisaient pas de l'azote dérivé de la fixation symbiotique.

5.2 Tronc

Le tronc du caroubier est épais, robuste avec de clairs canaux de circulation de la sève associés aux racines les plus épaisses, ce qui leur donne un aspect tortueux, particulièrement marqué chez certaines variétés (Melgarejo et Salazar, 2003). L'écorce est rugueuse à la base et lisse sur la partie supérieure du tronc et à la base des branches (Mahdad, 2013), sa couleur est généralement brin-grisâtre et occasionnellement grise ou brune.

Le tronc chez les arbres épais et vieux est tortueux et sinusoïdal (Figure 08), le diamètre moyen est de 50 centimètres en fonction de l'âge de l'arbre (Albanell, 1990), sa circonférence est comprise entre 1,5 et 4 mètres.

5.3 Branches

Selon leur âge, les branches présentent les différentes caractéristiques suivantes (Albanell, 1990) :

- Les branches principales d'âge avancé sont généralement épaisses, tortueuses et avec une tendance à l'horizontalité (Figure 09) due à leur poids et aux tailles de formation.

Leur rôle principal est celui de servir comme élément support à d'autres branches, même si elles peuvent occasionnellement être productives ;

- Les branches secondaires sont de taille moyenne avec une tendance à être plus au moins érigées selon leur âge en particulier dans la partie supérieure de la couronne. Elles constituent les principales branches de production ;
- Les jeunes branches ou rameaux, de taille plus petite, sont situées dans la partie externe de la couronne ou zone de croissance. Elles sont flexibles et ont une écorce lisse recouverte de lenticelles qui permettent les échanges gazeux avec l'atmosphère. Elles présentent généralement et selon les variétés des tons jaune-verdâtres ou rougeâtres dans la zone de bourgeonnement.

5.4 Feuilles

Les feuilles (Figure 10) persistantes, d'une longueur de 12 à 25 cm, se caractérisent par un rachis mesurant 9 à 22 cm et portant 5 à 12 folioles opposées. Elles sont coriaces, entières, de forme ovale, lobée ou elliptique, avec une couleur vert foncé, verte ou vert clair.

Occasionnellement chez les arbres cultivés et plus fréquemment chez les caroubiers sauvages, le nombre de folioles peut être impair chez quelques feuilles (Albanell, 1990). Le caroubier ne perd pas ses feuilles en automne sauf en juillet chaque deux ans, lesquelles sont renouvelées au printemps de la même année, en avril et mai (Ait Chitt et al., 2007).

5.5 Fleurs

Le caroubier est un arbre polygame-trioïque ; cette dénomination fut donnée par Linné (Mahdad, 2013). D'un point de vue sexuel, *C. siliqua* se caractérise par l'existence de quatre types d'arbre. Ainsi, il est possible de rencontrer des pieds :

- ❖ Mâles avec des fleurs caractérisées par des étamines à filaments longs et avec un pistil non développé (Figure 11-A). Ces pieds utilisés comme pollinisateurs sont habituellement nommés en espagnol "borrers" ou "judíos", signifiant juifs en français (Albanell, 1990) ;
- ❖ Femelles avec un pistil bien développé et des étamines rudimentaires (Figure 11-B) ; ils sont les plus abondants ;
- ❖ Hermaphrodites à fleurs avec étamines et pistils bien développés (Figure 11-C) ; peu abondants ;

- ❖ Polygames avec des fleurs femelles, mâles et hermaphrodites (Figure 11-D) ; ils sont rares.

Selon Tucker (1990a), les fleurs du caroubier sont initialement bisexuelles et ce n'est que durant le développement et le fonctionnement des cellules qu'on assiste à la suppression d'un axe pour aboutir à des fleurs mâles ou femelles.

Les fleurs naissent à partir de quelques bourgeons floraux, volumineux et caractéristiques du caroubier. Ces fleurs se produisent sur du vieux bois ou sur des branches de plus de 3 à 5 ans. Les inflorescences apparaissent entre juillet et décembre (Tous, 1984).

Les fleurs du caroubier sont nombreuses et petites, de 6 à 12 mm de long (Batlle et Tous, 1997) ; elles sont regroupées en grappes latérales, généralement érigées ou ascendantes, brièvement pétiolées, disposées le long d'un axe ou rachis d'une couleur vert-jaunâtre ou rougeâtre de 4 à 10 cm de longueur sur lequel sont insérées entre 10 à 30 fleurs, voire plus (Albanell, 1990).

Les fleurs sont pentamères, présentant un seul ovaire supère chez les fleurs femelles et hermaphrodites. Les étamines sont aux nombres de cinq chez les fleurs mâles et hermaphrodites. D'une couleur verte teintée de rouge, les fleurs ne présentent pas de corolle, elles sont par conséquent visuellement peu attractives (Albanell, 1990). En général, les inflorescences mâles sont plus courtes que celles des femelles et aussi plus compactes et nombreuses (Melgarejo et Salazar, 2003).

Les fleurs mâles possèdent cinq sépales bien développés ou rudimentaires selon les variétés et présentent des nectars à leur base soudés aux sépales formant un disque charnu (3-5 mm de diamètre, couleur verte). Le nombre des étamines est généralement de 5 mais il est fréquemment possible de trouver des anomalies de la symétrie pentamère (4, 6, 8 étamines) (Albanell, 1990).

Les fleurs femelles ont un pistil plus ou moins long, courbe en forme de légume d'un ton blanc-verdâtre avec un style court et épais et un stigmate persistant très épais de couleur vert riche en mucilage. Le pistil est entouré par un disque résultant de la soudure des pétales rudimentaires, le disque nectarifère est entouré par cinq sépales pileux et présente quelques étamines rudimentaires à son sommet (Albanell, 1990).

Les fleurs hermaphrodites sont caractérisées par un pistil et étamines fonctionnelles au sein d'une même fleur, laquelle est considérée comme une fleur parfaite ou complète. Sa taille et son apparence sont semblables à celles des fleurs unisexuées, elle présente du nectar sur la surface du disque et une large gamme de variation en ce qui concerne la longueur et la couleur des inflorescences (Albanell, 1990).

Traditionnellement, le caroubier a été classé en fonction de la couleur de ses fleurs, distinguant ainsi entre arbres à "fleurs jaunes et rouges", mais ce critère semble être insuffisant et indépendant des autres caractéristiques florales (Haselberg, 1998).

Il existe au sein des caroubiers à inflorescences mâles des variétés à fleurs jaunes et d'autres à fleurs rouges. Ces dernières sont plus intéressantes à cultiver car elles produisent une plus grande quantité de pollen, mais en revanche, elles sont plus sensibles au froid (Tous, 1984). On trouve aussi chez des caroubiers hermaphrodites des inflorescences à étamines jaunes et d'autres à étamines rouges (Figure 12).

5.6 Fruits

Le fruit du caroubier connu sous le nom de kharrouba en arabe, algarroba en castillan et caroube en français est classifié habituellement compte tenu de sa faible teneur en eau au moment de sa collecte comme un fruit sec et cela malgré son aspect pulpeux (Albanell, 1990).

La caroube est un fruit indéhiscent, allongé d'une grande taille de 7 à 25 cm de long (Figure 13) et de 1 à 3,5 cm de large, et environ 0,9 cm d'épaisseur. Il est vert puis brun et au moment de la maturité d'un ton brun, brun foncé, brun rougeâtre ou noir selon les variétés. Il est sinueux autour des bordures, courbé, torsadé ou droit et présente un tissu pulpeux riche en sucre.

La gousse est divisée à l'intérieur par des cloisons pulpeuses contenant 3 à 16 graines, soit 3,5 à 36,5 % du poids de la gousse en fonction de la variété et des conditions environnementales.

Le fruit du caroubier croît très lentement à ses débuts durant l'automne. Sa croissance s'accélère au printemps et croît d'une manière visible jusqu'au début de l'été où il atteint sa taille maximale. La maturité est atteinte à partir du début septembre. Entre la nouaison et la maturité, peut s'écouler une période de 11 mois (Melgarejo et Salazar, 2003). Le nombre de fruits résultant de chaque inflorescence est variable selon la variété et il est généralement compris entre 1 et 6 fruits (Melgarejo et Salazar, 2003).

Du fruit, on peut distinguer trois parties (Caja, 1985) :

1. Epicarpe ou peau, de nature fibreuse et coloré ;
2. Mésocarpe ou pulpe, de nature charnue, riche en sucres. Il représente environ 70 à 95% du fruit entier ;
3. Endocarpe, de nature fibreuse ; il recouvre l'intérieur du fruit en le divisant en segments ou loges carpellaires où se situent les graines.

5.7 Graines

Les graines du caroubier sont petites et aplaties, d'une forme ovale, ronde ou amorphe avec un pôle basal tronqué et écrasé en zone apicale (Figure 14). Son tégument est lisse ou rugueux, dur et de couleur marron, brun, rougeâtre ou brun rougeâtre. Elles présentent des dimensions de 7 à 12 mm de long sur 5 à 9 mm de largeur avec 1 à 6 mm d'épaisseur.

La graine du caroubier est composée de trois parties (Melgarejo et Salazar, 2003) :

1. Episperme ou tégument, il recouvre la graine et est constitué principalement de cellulose, de lignine et de tanin. Il se compose de deux enveloppes distinguées, l'une externe appelée testa, colorée et dure et l'autre interne nommée tegmen qui est plus blanche et moue. Le tégument représente 30 à 33 % de la graine ;
2. Endosperme ou albumen, il se situe sous l'épisperme et constitue le tissu de réserve pour la germination de l'embryon. Economiquement, c'est la partie la plus intéressante de la graine grâce à sa teneur élevée en galactomannane ou gomme de caroube. L'endosperme représente 42 à 46 % de la graine ;
3. Germe ou embryon, représente 23 à 25 % de la graine.



Figure 04. Les différents aspects généraux du caroubier : A) Ouvert ; B) Erigé ; C) Pleureur.



Figure 05. Densités du houppier chez le caroubier : A) Pieds femelle à houppier peu dense ; B) Pieds mâle à houppier très dense.



Figure 06. Caroubier imposant de plus de 12 mètres de hauteur.



Figure 07. Racines du caroubier.



Figure 08. Tronc du caroubier.



Figure 09. Branches du caroubier : la flèche rouge indique une branche principale produisant des gousses.



Figure 10. Feuille de caroubier comprenant 8 folioles.



Figure 11. Différents types d'inflorescences chez le caroubier : Inflorescence A) Femelle ; B) Mâle ; C) Hermaphrodite ; D) Polygames.



Figure 12. Inflorescences hermaphrodites à étamines A) rouges et B) jaunes chez le caroubier.



Figure 13. Gousse de caroubier mesurant plus de 24 centimètres de longueur.



Figure 14. Graines de caroubier.

6. Reproduction du caroubier

À l'instar de nombreuses plantes tropicales, le caroubier est l'unique arbre méditerranéen dont la saison de floraison est en été - automne. Cependant, le temps et la durée de la période de floraison dépendent des conditions climatiques locales (Batlle et Tous, 1997). En effet, nous avons observé une floraison précoce, en Juin, chez les caroubiers des régions côtières (climat doux) surtout chez les pieds mâles et hermaphrodites et occasionnellement chez les femelles, tandis que ce phénomène était absent chez les caroubiers des zones intérieures à climat continental où les conditions environnementales sont plus rudes.

La pollinisation chez le caroubier est assurée en grande partie par les insectes (Retana et al., 1990; Rejeb et al., 1991; Ortiz et al., 1996). En effet, Retana et al. (1990) ont pu observer que l'intervention du vent dans la pollinisation était pratiquement nulle. Toutefois, l'action du vent dans le transport du pollen depuis les fleurs mâles jusqu'aux fleurs femelles n'est pas à exclure (Thomson, 1971; Tous, 1984; Batlle et Tous, 1997).

Les fleurs femelles présentent un grand volume de nectar et une grande quantité de sucre (concentration des oses dans le nectar) par rapport aux fleurs mâles. Néanmoins, 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), la variation dans l'intensité de la production des inflorescences et des gousses est plus liée à des facteurs endogènes qu'à des conditions climatiques. Toutefois, des conditions environnementales défavorables peuvent réduire de façon significative le rendement par la diminution de la nouaison (Batlle et Tous, 1997).

La durée de maturité des gousses est réduite sous des températures élevées, ainsi il est possible d'avoir en Algérie deux récoltes par an, la première s'étale entre Juin et Juillet, et est réalisée dans les zones chaudes, telles que les hauts plateaux (Figure 15) et le Nord du Sahara ; la deuxième est accomplie entre Août et Septembre dans les régions du Nord.

La fructification se produit essentiellement sur des rameaux secondaires, occasionnellement sur des rameaux principaux et rarement sur le tronc (Figure 16).



Figure 15. Gousses mures d'un caroubier situé à M'Sila au début du mois de Juillet.



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

7. Ecologie du caroubier

Le caroubier appartient à l'écosystème "garrigue du littoral méditerranéen" sur sols calcaires. C'est une espèce thermophile, xérophile et héliophile. Elle croît bien dans certaines régions tempérées et subtropicales et tolère les zones côtières chaudes et humides, mais elle est très sensible au froid d'hiver, de sorte qu'elle peut vivre seulement à proximité des côtes avec des altitudes de moins de 700 m, bien qu'elle soit dans certaines zones présente sur des terrains plus élevés (1168 m) mais toujours avec des expositions adéquates (Mahdad, 2013).

Le caroubier et l'oranger ont des exigences en température similaires, mais le caroubier tolère des sols plus pauvres et nécessite beaucoup moins d'eau (Batlle, 1997).

Le caroubier est une espèce qui résiste très bien à la sécheresse (Rejeb, 1995 ; Zouhair, 1996 ; Sbay et Abourouh, 2006), il n'est devancé que par le pistachier (Evreinoff, 1955). De plus, il est caractérisé par sa grande tolérance à la salinité, avec 2 g/l de NaCl, le caroubier supporte mieux la salinité que le palmier dattier, le pistachier et l'olivier (Gil-Albert, 1998). Il a été révélé dans une étude réalisée par Correia et al. (2010) que le caroubier peut tolérer et maintenir la majorité de ses processus physiologiques à une concentration de NaCl = 2,32 g/l.

Ceratonia siliqua L. avec *Pistacia lentiscus* L. et *Olea europaea* L. var. *sylvestris*, constituent une des associations les plus caractéristiques de la zone inférieure de la végétation méditerranéenne et pour autant elle est considérée comme une communauté climacique (*Oleo-Ceratonion*) (Batlle et Tous, 1997).

8. Exigences édaphoclimatiques

8.1 Climat

Les zones propices à la culture du caroubier doivent être caractérisées par un climat méditerranéen subtropical, avec des hivers doux, des printemps doux à chauds et des étés chauds à très chauds et secs (Batlle et Tous, 1997).

Les arbres adultes ne nécessitent pas de froid hivernal pour la vernalisation, bien au contraire, ils peuvent être endommagés lorsque les températures chutent en deçà de - 2 °C ou - 4 °C selon les variétés. Le caroubier ne peut supporter des températures hivernales inférieures à - 7 °C (Batlle et Tous, 1997).

Le caroubier est une espèce très sensible aux gelées, ces dernières sont capables de détruire des plantations toutes entières comme en témoignent les importantes gelées de février 1956 et celles de janvier 1985, qui ont entraîné la mort de plusieurs arbres dans de nombreuses régions d'Espagne (Mahdad, 2013). Cependant, les arbres peuvent supporter en été des vents chauds et secs et des températures élevées allant de 40 à 45 °C, voire jusqu'à 50 °C, mais dans des conditions d'humidité suffisante (Albanell, 1990).

De 5000 à 6000 heures au-dessus de 9 °C sont requises pour la maturité des fruits. Le caroubier est sensible aux vents forts, aux pluies d'automne qui coïncident avec la période de floraison et aux humidités élevées au printemps (Batlle et Tous, 1997).

8.2 Températures basses

C. siliqua est considéré comme l'une des espèces méditerranéennes la plus vulnérable aux dommages causés par les basses températures (Mitrakos, 1981; Albanell, 1990). Bien qu'il existe des différences vis-à-vis de la tolérance au froid chez les variétés, les arbres adultes ne sont pas en mesure de surmonter de longues périodes d'exposition à - 9 °C, provoquant même si l'exposition est de courte durée une défoliation complète de l'arbre (Albanell, 1990). Les températures de - 4 °C endommagent sérieusement les plantules et les jeunes arbres, y compris les bourgeons, feuilles (Figure 17), fleurs et les jeunes fruits (Batlle et Tous, 1997).



Figure 17. Effets des températures basses sur les feuilles du caroubier : A) Feuilles d'un jeune arbre ; B) Feuilles d'un arbre adulte.

8.3 Sol

Le caroubier est un arbre peu exigeant quant au type de sol qu'il nécessite. Ainsi, il a été traditionnellement cultivé sur des terres marginales et cela grâce à sa capacité à produire dans des circonstances très défavorables et dans des endroits où il n'est pas possible de cultiver d'autres espèces faute de rentabilité (Albanell, 1990).

En général, le caroubier végète convenablement sur des sols pauvres, rocheux, sablonneux, limoneux lourds, argileux tout en préférant les terrains calcaires avec une texture équilibrée, accompagnés toujours d'un bon drainage ; il ne supporte ni les sols acides, ni les sols hydromorphes (risque d'asphyxie et de putréfaction du système racinaire) (Albanell, 1990; Sbay et Abourouh, 2006) et a tendance à affectionner les sols superficiels (Aafi, 1996).

Melgarejo et Salazar (2003) ont pu localiser (la zone du Levant Espagnol) des plantations du caroubier dans des zones où le carbonate de calcium a atteint les 60% avec des teneurs en calcaire actif pouvant dépasser les 22%, tout en observant que le caroubier de ces régions végète sans montrer d'évidents symptômes de chlorose ferrique qui serait normal chez d'autres espèces. À Chypre, une grande plantation de caroubier a été développée avec succès sur un sol calcaire avec un pH = 9 (Morton, 1987).

8.4 Eau

Le caroubier est un arbre xérophile, pouvant survivre sous des climats secs et sans irrigations ; il peut très bien s'adapter à des milieux présentant des pluviométries moyennes comprises entre 250 et 500 mm par an (Batlle et Tous, 1997). Bien qu'ils soient résistants à la sécheresse, les arbres ont besoin d'un minimum de précipitations moyennant les 550 mm afin de garantir une production rentable (NAS, 1979). Toutefois, de nombreux auteurs considèrent que des précipitations annuelles allant de 300 à 350 mm sont suffisantes pour une production acceptable (Albanell, 1990; Batlle et Tous, 1997).

9. Multiplication du caroubier

9.1 Par semis

Cette technique de multiplication par voie sexuée est la plus utilisée en Algérie, toutefois elle présente des inconvénients non négligeables. En effet, le semis chez le caroubier, espèce dioïque, donne un ratio de 50% de femelles et 50% de mâles improductifs, de plus, la

descendance issue des semences et donc d'une ségrégation allélique est très hétérogène et est génétiquement non conforme au parent femelle sélectionné. Enfin, l'entrée en production des arbres issus de semis est très tardive, pouvant prendre plus de 7 ans.

9.2 Par bouturage

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), 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), 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).

9.3 Par greffage

La propagation par greffage chez le caroubier est une technique efficace et dominée. Elle fut pratiquée en Andalousie musulmane via la technique de la greffe grec ou en écusson, laquelle et selon Ibn al-‘Awwām (12^{ème} siècle) convient le mieux au caroubier par rapport aux autres techniques (greffe en fente, en flûte et greffe romaine !) (Banqueri, 1802). Au Maroc, c'est la technique en fente apicale qui est adoptée pour la multiplication du caroubier et ce en raison du gain de temps que procure cette approche en comparaison avec la greffe en écusson (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.

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.

9.4 Par culture in vitro

C'est l'une des voies de multiplication asexuée les plus prometteuses, essentiellement depuis le développement de protocoles d'organogénèse via des explants issus de semences germées in vitro, 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 restent 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.

10. Réalisation de verger de caroubier

Le caroubier est un arbre exigeant en lumière et pour autant, il ne supporte pas les fortes densités (Mahdad, 2013). Ces dernières vont de 10×10 (100 arbres/ha) à 6×4 (240 arbres/ha) en Espagne, et sont en fonction de la disponibilité en eau, de la richesse du sol et l'architecture de l'arbre qui est très distinguée selon les clones (Melgarejo et Salazar, 2003).

Ait Chitt et al. (2007) préconisent une densité de plantation de 8×8 (156 arbres/ha), tandis que Melgarejo et Salazar, 2003 considèrent une densité de 9×9 (123 arbres/ha) comme une plantation économiquement acceptable. En Algérie, il serait recommandable d'opter pour une densité extensive (10×10) et ce, en raison des multitudes de facteurs limitant (raréfaction d'eau, des sols fertiles, et de la main d'œuvre qualifiée) la production agricole nationale.

La qualité et surtout le rendement des variétés hermaphrodites ne sont pas toujours les plus satisfaisants, raison pour laquelle on continue à planter des variétés d'inflorescences femelles. Néanmoins, ce sont en général les variétés hermaphrodites que l'on utilise comme pollinisateurs, car elles assurent une plus grande efficacité dans la nouaison par rapport à quelques pollinisateurs mâles traditionnels (Melgarejo et Salazar, 2003).

La proportion idéale d'arbres staminés ou hermaphrodites par rapport aux pistillés dépend vraisemblablement de l'activité des insectes et du vent dans le verger pendant la floraison, ainsi que de la capacité de germination du pollen (Tous et al., 2013). En principe, il est suffisant d'installer un pied mâle ou hermaphrodite au centre, entouré de 8 arbres femelles (Melgarejo et Salazar, 2003; Tous et al., 2013), ce qui représente un total de 11% de pieds pollinisateurs au sein de la plantation (Figure 18).

Il existe une autre alternative de pollinisation qui consiste à greffer des rameaux de fleurs mâles (pratiquée naguère) ou hermaphrodites (la plus courante actuellement) sur les 25 ou 50 % des arbres femelles du verger (Melgarejo et Salazar, 2003).

Les vergers de caroubier sont connus pour leur entrée tardive en production. Les plantations installées dans les zones marginales commencent à porter des fruits après 6 à 8 ans,

alors que dans de meilleures conditions, la culture commence à donner des fruits dès la 3^{ème} ou 4^{ème} année (Batlle et Tous, 1997).

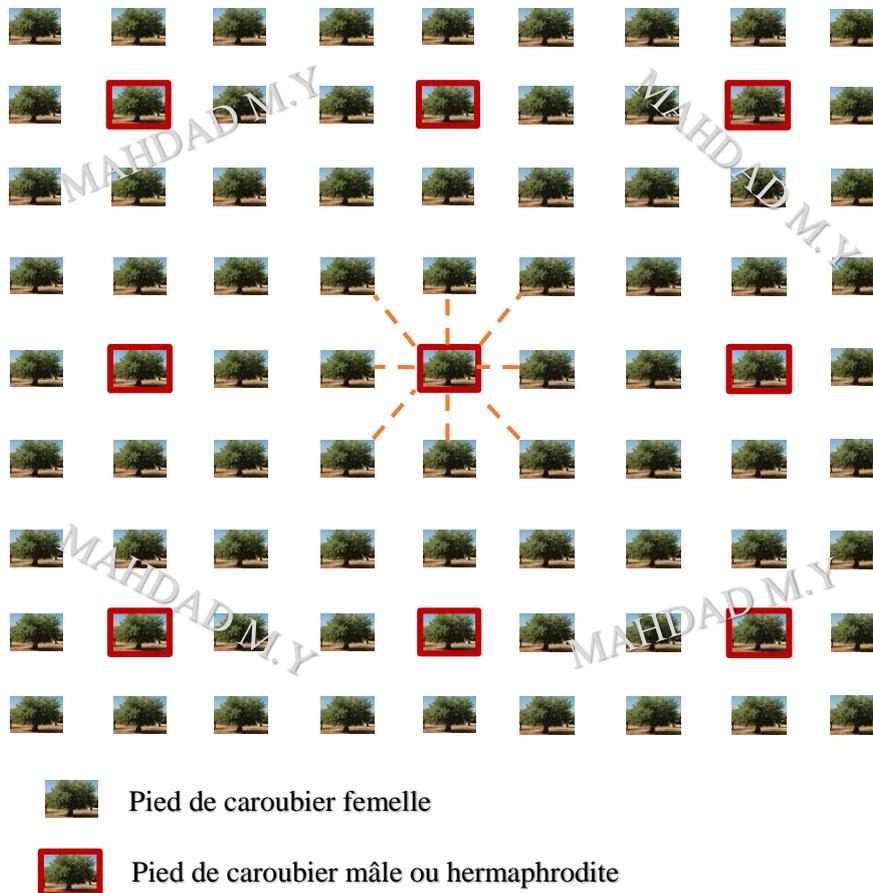


Figure 18. Dispositif de plantation de caroubier avec 11% de pieds pollinisateurs.

11. Propriétés et utilisations du caroubier

11.1 Propriétés

La pulpe et les graines sont les deux composants majeurs de la gousse du caroubier et représentent respectivement 90% et 10% de son poids total (Mahdad, 2013). La composition chimique de la pulpe dépend du cultivar, son origine, de l'époque de la récolte, de l'environnement et des conditions de stockage (Orphanos et Papaconstantinou, 1969; Albanell et al., 1991; Avallone et al., 1997; Ayaz et al., 2007; Iipumbu, 2008).

La pulpe de la caroube possède une teneur élevée en sucre (48-56%) (Ayaz et al., 2007) et peut même atteindre 89% (Haddarah et al., 2013). En outre, elle contient environ 18% de cellulose et d'hémicellulose (Batlle et Tous, 1997). 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).

La composition minérale (en mg/100g du poids sec) est la suivante : K = 970 ; Ca = 300 ; P = 71 ; Mg = 60 ; Fe = 1,88, Mn 1,29 ; Cu = 0,85 ; Zn = 0,75 (Ayaz et al., 2007). La richesse de la pulpe en potassium et calcium est très intéressante pour la nutrition humaine et animale, la concentration du calcium y est quasiment le triple comparé à celle du lait entier (Mahdad, 2013).

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. (2007) 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.

Les gousses mures du caroubier contiennent une grande quantité de tanins condensés (16-20% du poids sec). En valeur alimentaire, les caroubes sont similaires à la plupart des graines de céréales (NAS, 1979).

La graine (Figure 19) est composée de 30 à 33% de tégument, 42 à 46% d'albumen et 23 à 25% d'embryon (Neukom, 1988). L'épisperme est considéré comme une source naturelle pour la production de polyphénols antioxydants (Makris et Kefalas, 2004). L'endosperme est constitué essentiellement d'une gomme nommée galactomannane. C'est une molécule de polysaccharide composée de deux unités de sucre : la mannose et la galactose dans un rapport de 4 : 1 (Mahdad, 2013). La propriété principale de ce polysaccharide naturel est la viscosité élevée qu'il procure à la solution une fois mélangé à l'eau, et cela dans une large gamme de température et de pH (García-Ochoa et Casas, 1992).

La farine du germe obtenue à partir des cotylédons a une teneur en protéines de 50% ; 27% d'hydrates de carbone ; 8% de lipides (neutres) ; 7% d'eau et 6% de cendres ; cette farine est recommandable pour l'alimentation humaine et animale (Puhan et Wielinga, 1996 dans Batlle et Tous, 1997).

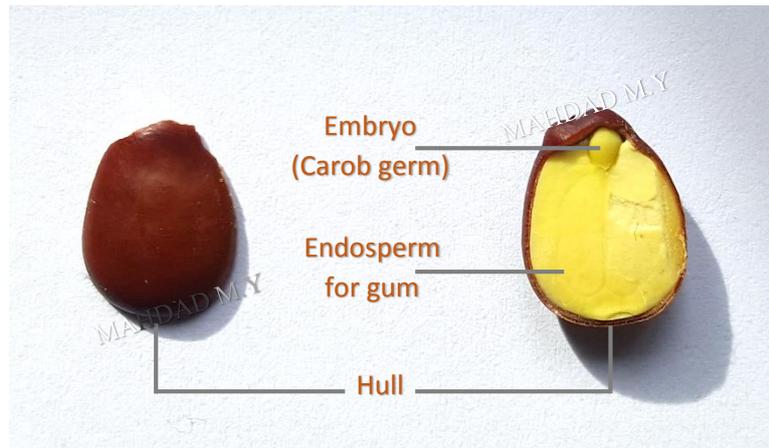


Figure 19. Composants de la graine du caroubier.

11.2 Utilisations

Le caroubier est une essence agroforestière d'une grande importance économique, écologique et sociale.

Le caroubier est largement utilisé comme arbre d'ornement et d'ombrage tout au long des allées de la Californie, de l'Australie et d'ailleurs. Sur la base de sa faible exigence et sa grande tolérance pour les sols pauvres, le caroubier est de plus en plus recommandé pour le reboisement des zones côtières dégradées sous l'effet de l'érosion ou de la désertification (Batlle et Tous, 1997).

Toutes les parties du caroubier (racines, bois, écorce, feuilles, fleurs et fruits) ont une valeur économique et des avantages considérables pour la santé et peuvent être utilisées dans plusieurs secteurs (Tableau 02). Ses racines latérales, ramifiées avec de nombreux poils radiculaires permettent à l'arbre de pousser sur des terrains rocheux au sol peu profond et dans des conditions arides (Albanell, 1990).

Le bois du caroubier, appelé carouge (Rivière et Leco, 1900) est dur à grain fin, il est utilisé dans la fabrication d'ustensiles et la production de combustible (Batlle et Tous, 1997). L'écorce de l'arbre est utilisée en tannerie, notamment pour la finition et l'émaillage des peaux (Batlle, 1997) et est très riche en substances antioxydantes (El Hajaji et al., 2011).

Les feuilles du caroubier ont des propriétés anticancéreuses, antioxydantes, bactéricides et anti-neurodégénératives (Corsi et al., 2002 ; El Hajaji et al., 2010 ; Meziani et al., 2015 ; Ben Othmen et al., 2020 ; Abidar et al., 2020). El-Haskoury et al. (2015) ont découvert que le miel du caroubier a une activité diurétique, natriurétique et kaliurétique sans les effets secondaires d'hypokaliémie ; le miel est également riche en molécules bioactives avec des propriétés antioxydantes et anti-radicalaires (El-Haskoury et al., 2018).

Compte tenu de son énorme intérêt économique, la gomme de caroube reste le produit le plus important parmi ceux dérivés de la graine (Tableau 03). Elle constitue un tiers du poids total de la graine (Jones, 1953). Cette gomme mucilagineuse, riche en galactomannane connue sous le code E-410, est utilisée dans l'industrie alimentaire comme épaississant, stabilisant, liant et gélifiant ou comme agent dispersant (Batlle et Tous, 1997). Il est également utilisé dans l'impression, la photographie, les textiles, les produits pharmaceutiques, les cosmétiques, les produits chimiques, le pétrole, les explosifs et les aliments mixtes (Tous et al., 2013). Par ailleurs, Ben Ayache et al. (2020) ont observé que les graines présentent les propriétés anticarcinogènes les plus puissantes sur tous les carcinomes cellulaires humains testés.

Les gousses de caroube sont traditionnellement utilisées comme aliment pour les ruminants (Louca et Papas, 1973) et les non-ruminants (Sahle et al., 1992), mais aussi pour la consommation humaine (Azab, 2017). Sa pulpe est utilisée comme substituant du cacao dans la production de chocolat car elle est moins calorifique et ne contient pas de caféine ni de théobromine (Craig et Nguyen, 1984). Elle peut être utilisée comme ingrédient dans certains aliments, tels que les gâteaux, bonbons, crèmes glacées, boissons, pâte à pizza, café, pâte à tartiner, confiture...etc.

Les caroubes ont des propriétés antioxydantes, analgésiques, antiparasitaires et antidiarrhéiques (Makris et Kefalas, 2004 ; Ben Ayache et al., 2020 ; Min et Hart, 2003 ; Serairi-Béji et al., 2000). En général, elles sont très bénéfiques pour le traitement des troubles gastro-intestinaux (Rtibi et al., 2017). En outre, il a été démontré que le fruit du caroubier peut prévenir la dyslipidémie et le déficit de mémoire à court terme (Valero-Muñoz et al., 2017 ; Alzoubi et al., 2018).

Tableau 02. Principaux produits de la caroube (*pulpe et graines*) et leurs utilisations majeures

Produits	Traitement reçu	Utilisations
Pulpe		
Brute	Aucun	Alimentation animale (Cheval et ruminants)
	Moulage	Alimentation humaine et animale (ruminants et non ruminants)
	Extraction et purification	Sucre et mélasse
	Fermentation et distillation	Alcool et production de protéines microbiennes
	Extraction	Tanins comme anti-diarrhée
Poudre	Lavage, séchage, torréfaction et moulage	Ingrédients alimentaires; substituant du cacao; préparation de produits diététiques et pharmaceutiques
Graines		
Endosperme	Moulage	CBG ou E-410; aditifs alimentaires; fibre diététique; aliments pour mascottes ; produits pharmaceutiques et cosmétiques
Embryon	Moulage	Farine de germe; nutrition humaine et animale
Episperme	Extraction	Tanins pour le tannage des cuirs

Source : Batlle et Tous, (1997).

Tableau 03. Utilisations de la gomme de caroube et ses applications techniques.

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

Droste (1993) mentionné dans (Batlle et Tous, 1997).

12. Maladies et ravageurs

Le caroubier est normalement exempt de graves problèmes d'insectes et de maladies. Néanmoins, il existe des champignons, des insectes et des rongeurs qui peuvent occasionner de graves dommages à l'arbre et par conséquent causer des pertes considérables dans les vergers, si jamais une lutte n'est pas engagée dans les moments opportuns.

Tous et al. (2013) rapportent qu'en Espagne, l'insecte le plus nuisible est la larve polyphage du papillon léopard (*Zeuzera pyrina*), qui s'attaque au bois du tronc et des branches, causant de graves dommages aux jeunes arbres. Par ailleurs, les gousses peuvent être infestées par la petite larve polyphage de la pyrale du caroubier (*Ectomyelois ceratoniae* Z.) (Figure 20-A), pendant la maturation et avant la fin de la récolte, aussi, elle s'attaque fréquemment aux caroubes stockées, contre lesquelles il est possible de lutter par fumigation (Batlle et Tous, 1997; Gugliuzzo et al., 2019).

Les pucerons noirs attaquent principalement les pousses terminales des jeunes arbres (Tous et al., 1996). Le tronc peut être attaqué par *Cossus gâte-bois* (*Cossus ligniperda* F.) qui creuse des galeries dans le tronc provoquant le dépérissement de l'arbre (Boublenza, 2020). Cet insecte (Figure 20-C) fut observé et mentionné pour la première fois en Algérie sur un tronc de caroubier dans les années 1840 par Lucas (1849). Quant au moucheron du caroubier (*Asphondylia* spp.), il s'attaque aux gousses à un stade très précoce, provoquant leur rabougrissement (Orphanos, 1980). Quant au *Xylosandrus compactus* (Black twig borer) (Figure 20-B), coléoptère pouvant infester le caroubier, provoquant plusieurs trous d'entrée, une nécrose du bois et une émission de sève (Gugliuzzo et al., 2019).

Le mildiou du caroubier causé par *Oidium ceratoniae* C. attaque les gousses, les feuilles et les rameaux à différentes périodes de l'année, principalement au printemps et à l'automne et constitue la plus importante maladie du caroubier (Tous et al., 2013). Un autre champignon, le *Polyporus sulphureus*, peut détruire les branches des vieux arbres (Batlle et Tous, 1997).

D'autres ravageurs qui causent occasionnellement des dommages importants aux vergers de caroubiers sont les petits rongeurs comme les géomys (*Pitymys* spp.), les lapins et les rats (*Rattus* spp.). Les géomys peuvent gravement endommager le système racinaire des jeunes arbres (Batlle et Tous, 1997). Les rats peuvent arracher l'écorce des jeunes pousses, mais aussi des branches plus âgées, provoquant ainsi la mort de l'arbre (Tous et al., 2013).

La lutte contre ces ravageurs et maladies implique l'utilisation de moyens physiques, chimiques et biologiques. Physique, en usant d'un fil introduit dans les galeries pour détruire les larves ou en remplissant les trous avec une pâte pesticide (Tous et al., 2013). Chimique, par des pulvérisation à base de pyréthroïdes ou permanganate de potassium (Batlle et Tous, 1997; Boublenza, 2020). Physico-chimique, à l'aide d'un dispositif de piégeage sexuel contenant des phéromones pour la confusion sexuelle. Biologique, en contrôlant les ravageurs tels que les pucerons, via l'introduction d'auxiliaires de culture comme les coccinelles, et la préservation des prédateurs naturels indigènes, indispensables au contrôle de la population des rongeurs. Une pulvérisation à l'aide d'une solution bio-insecticide à base de Bt (*Bacillus thuringiensis*) est aussi envisageable pour lutter contre la pyrale du caroubier.

En Algérie, le caroubier est actuellement épargné par les maladies et ravageurs, non pas grâce à une bonne stratégie de lutte ou bien par la présence de résistance chez les génotypes de caroubier, mais dû à la raréfaction des vergers et l'importante dispersion qui caractérisent les individus et populations du caroubier algérien.



Figure 20. Principaux ravageurs du caroubier : A) Pyrale du caroubier (*Ectomyelois ceratoniae* Z.) ; B) *Xylosandrus compactus* ; C) Cossus gâte-bois (*Cossus ligniperda* F.).

13. Ressources génétiques et variabilité

Le caroubier est une espèce diploïde avec une formule chromosomique $2n = 24$. La découverte au sein de *C. siliqua* de génotypes triploïdes et tétraploïdes (Bureš et al., 2004), témoigne de l'existence du phénomène de la polyploïdisation naturelle chez l'espèce, conduisant à l'augmentation de la variabilité génétique.

Depuis l'antiquité, le caroubier cultivé a été propagé d'abord par semis et plus tard par greffage. Ainsi, les cultivars et variétés de caroubier actuels proviennent d'une sélection parmi des populations locales et installés par multiplication asexuée dans des vergers commerciaux.

Les cultivars et populations de caroubier montrent une variabilité élevée pour les caractères morphologiques, agronomiques et technologiques (Albanell et al., 1996; Barracosa et al., 2007; Naghmouchi et al., 2009; Sidina et al., 2009; Haddarah et al., 2013; Boublenza et al., 2019). Toutefois, *C. siliqua* présente une diversité génétique faible, notamment chez les cultivars. Des études basées sur l'analyse enzymatique (isoenzymes) ont révélé des niveaux de polymorphisme très faibles entre les cultivars de différentes origines (Batlle et al., 1996) et ceux du même origine (Barracosa et al., 1996). Aussi, La Malfa et al. (2014) ont constaté un faible niveau de diversification chez le caroubier de trois pays méditerranéen en utilisant des microsatellites (EST-SSR). En outre, l'utilisation des SSRs dans une récente étude a révélé une faible diversité génétique au sein de caroubiers greffés (Kyratzis et al., 2021). Ainsi, il apparait que la dérive génétique et la pression de sélection qui conduisent à l'érosion génétique (Batlle et Tous, 1997), mais aussi la contamination du pool génétique originel par des ressources génétiques non indigènes propagées principalement par greffage (La Malfa et al., 2014), semblent avoir occasionné d'énormes inconvénients dans la conservation de la variabilité génétique chez le caroubier. A cela vient s'ajouter le scénario du fort déclin démographique qu'a subi l'espèce dans le passé et qui a été confirmé par l'étude de Viruel et al. (2020), laquelle a révélé via des marqueurs nucléaires (SSR) et plastidiques de faibles niveaux de richesse allélique chez *C. siliqua*.

Des siècles de culture ont donné naissance à un certain nombre de cultivars locaux qui diffèrent par leur port, leur vigueur, la taille et la qualité des gousses, le rendement des graines, la productivité et la résistance aux maladies et aux parasites. La plupart des cultivars qui représentent le germoplasme de chaque région ont une origine inconnue (Tous et al., 2013).

Il a été démontré que les caroubiers sauvages produisent plus de graines que les caroubiers cultivés (Marakis et al., 1988; Tous et al., 1995; Biner et al., 2007) et pour autant une plus grande quantité de galactomannane (gomme de caroube).

Les principaux cultivars installés dans les vergers d'Espagne et d'autres pays méditerranéens traditionnels ont une teneur élevée en pulpe et un faible rendement en graines et ne sont donc pas adaptés aux nouvelles utilisations industrielles (Tous et al., 2013), lesquelles se focalisent de plus en plus sur les dérivés de la graine, notamment la gomme de caroube qui présente une bien meilleure rentabilité comparé aux produits de la pulpe.

Dans le monde entier, on ne recense pas plus de 50 cultivars nommés avec des distributions limités dans la littérature (Tous et al., 2013). La majorité d'entre eux se trouve en Espagne (Tableau 04), les autres sont réparties dans le reste des pays du bassin méditerranéen et les pays où l'espèce fut récemment introduite (Tableau 05).

En Algérie, le nombre de cultivars de caroubier est très restreint et à défaut de caractérisations morphométriques et agronomiques, les appellations qu'ils leur sont attribués ne font pas l'unanimité, tel est l'exemple du caroubier greffé de Bejaia, à qui on donne, tantôt le nom de 'Bougi', tantôt 'Tounsi', et parfois l'appellation 'Hor'. De ce fait, l'un des objectifs de cette étude est de parvenir à déterminer via une prospection les cultivars qui présentent à la fois un nom unanime et des caractéristiques phénotypiques distinctives, lesquelles seront approuvées ou non par l'étude de caractérisation morphométrique.

Tableau 04. Principaux cultivars de caroubiers cultivés en Espagne.

Region	Province	Cultivars (in order of crop importance)
Catalonia	Barcelona	Negra, Banya de Cabra, Banya de Marrà, Molla Negra
	Tarragona	Negra, Rojal, Costella de Ruc, Llei dAldover
Balearic islands	Majorca	Bugadera, De la mel, Duraió, Vera, Costella, Rossa
	Ibiza	Panesca, Boval, Uraiona, Fina, Rotja ^a
C. Valenciana	Castellón	Negra, Ralladora, Banyeta, Casuda, Del pom, Murtera
	Valencia	Matalafera, Melera, Costella, Llisa, Casuda, Catxa
	Alicante	Lindar, Costella de Bou, Vera, Borrera, Sta. Maria, Fornera
Murcia		Mollar, Ramillete, ^a Mojonera
Andalusia	Málaga	Sayalonga, Rubia, Bravia wild trees
	Granada	Fina, Laesa, Vacta
	Huelva	Blanca

Source : Tous et al. (2013).

Tableau 05. Principaux cultivars de caroubiers cultivés dans le monde.

Country	Region or district	Cultivar or type (in order of importance)
Italy	Sicily	Gibiliana (syn. Latinissima), Racemosa, Saccarata
	Puglia	Amele di Bari, Cavallaro, Schiovinisca
Portugal	Algarve	Mulata, Galhosa, Canela, Aida
Morocco	Rif, Fes, Marrakech, Agadir	Ungrafted wild trees (90%)
Greece	Crete	Hemere (80%, syn. Imera), ZacharoharupaKatsunia
Cyprus		Tylliria, Koundourka, Koumbouta
Turkey	Mediterranean and Aegian basin	Wild and Cultivated (fleshy and sisam) types
Tunisia	Coastal and inland areas	Sfax, and wild types
Israel	Coastal and inland areas	Tylliria, Sandalawi, Habati, Aaronsohn
Lebanon	Coastal area	Ahmar, Makdissi, Sandali, Khachabi
Croacia	Adriatic coast	Komiski, Sipanski, Mekis
USA ^a	California	Sta. Fe ^b , Clifford ^b , Bolser ^b , Gabriel ^b , Molino
Mexico ^a	Northwest region (Baja Calif.)	Badam, Santa Fe ^b , Amele, Tylliria
South Africa ^a	Western Cape	Tylliria, Sfax, Aaronshon, Sta. Fe ^b
Australia ^a	South Australia	Sfax, Clifford ^b , Sta. Fe ^b , Tylliria, Irlam, Wait
	Western Australia	Sfax, Sta. Fe ^b , Kp-1, Clifford ^b , Tylliria

Source : Tous et al. (2013).

14. Sélection et amélioration du caroubier

À ce jour, l'amélioration chez le caroubier est réalisée de façon classique par les cultivateurs et/ou améliorateurs, en sélectionnant des greffons issus de germoplasme présentant des potentielles agronomiques ou technologiques, et utilisant des porte-greffes de caroubier franc, issus de semis, qui en général, se caractérisent par une importante vigueur et adaptation aux contraintes édaphiques.

L'absence de programme d'amélioration génétique via les techniques de culture in vitro, de biologie moléculaire, et de génie génétique chez le caroubier est due aux difficultés liées aux caractéristiques relatives à l'espèce, telles que sa récalcitrance à la régénération et son entrée tardive en production retardant l'étape de sélection de la descendance issue du plan d'amélioration.

Les critères de sélection du caroubier ont été peu étudiés, néanmoins, il existe quelques caractéristiques souhaitables pour améliorer l'espèce. Ces caractères qui font l'unanimité auprès des chercheurs et techniciens du secteur sont (Melgarejo et Salazar, 2003) :

- Tolérance aux températures basses ;
- Entrée rapide en production ;
- Faible ou absence d'alternance de production ;
- Floraison groupée ;
- Maturité homogène ;
- Rendement élevé en graines ;
- Contenu élevé de gomme dans les graines ;
- Bonne teneur en sucre dans la pulpe ;
- Faible sensibilité aux ravageurs et aux maladies (oïdium, Zeuzera) ;
- Bonne aptitude pour la conservation initiale du fruit dans les entrepôts.

Les principaux enjeux actuels pour l'amélioration du caroubier sont : accroître la tolérance au froid, réduire la période végétative (c.-à-d., augmenter la précocité d'entrée en production) et augmenter le rendement en graines.

15. Marqueurs génétiques

Ce sont toutes variations détectables, contrôlées génétiquement et utilisées dans l'analyse génétique. Ces variations sont basées sur des changements dans la séquence d'ADN. Les marqueurs génétiques peuvent être divisés en deux groupes : marqueurs morphologiques et marqueurs moléculaires (Figure 21).

15.1 Marqueurs morphologiques

Ce sont des marqueurs qui s'expriment dans les tissus différenciés, tels que les fruits, feuilles, plante entière. Ils peuvent être qualitatifs, marqueurs observables, de nature nominale ou ordinale et sont en général monogéniques ; ou quantitatifs, marqueurs mesurables ou dénombrables, qui se caractérisent par une transmission polygénique. Ils présentent des inconvénients quant à l'évaluation de la diversité génétique, les rendant moins attractifs comparés aux marqueurs moléculaires. Ces contraintes se manifestent dans les observations et

notations tardives effectuées seulement une fois que la plante arrive à un stade de développement et/ou croissance appropriée, mais aussi par les interactions possibles avec d'autres gènes et/ou l'environnement masquant l'expression du marqueur.

15.2 Marqueurs moléculaires

Ce sont des marqueurs génétiques composés de séquences d'ADN ou de produits issus de la transcription et traduction de l'ADN en des molécules biochimiques de nature protéique, dites marqueurs biochimiques. Ces derniers, sont généralement neutres et plus abondants que les marqueurs morphologiques, présent dans des tissus spécifiques : feuilles, anthères, graines...et leur expression (des protéines) est soumise à des changements dus aux stades de développement, des facteurs environnementaux...etc. Quant aux marqueurs basés sur l'ADN, ils sont théoriquement illimités, non spécifique aux tissus, car chaque cellule de l'organisme contient le même ADN, neutre et surtout indépendant des changements environnementaux et du stade de développement de la plante. En outre, l'ADN peut être extrait de petits échantillons de tissus et conservé pendant des années.

16. Types de marqueurs moléculaires

16.1 Marqueurs biochimiques

Selon Schlötterer (2004), les premiers véritables marqueurs moléculaires à avoir été établis sont les allozymes. Le principe des marqueurs allozymes est que les variantes protéiques des enzymes peuvent être distinguées par électrophorèse sur gel natif en fonction des différences de taille et de charge causées par des substitutions d'acides aminés. Quant aux isozymes, ils sont définis comme étant des variants du même enzyme ayant des fonctions identiques et présents chez le même individu (Hunter et Merkert, 1957). Cette définition englobe les variants d'enzymes qui sont le produit de différents gènes, tandis que les enzymes qui sont le produit de différents allèles du même gène sont dits allozymes. En d'autres termes, les allozymes sont les multiples formes d'un enzyme qui sont codés par différents allèles d'un seul et même gène, alors que les isozymes sont les multiples formes d'un enzyme qui sont codés par différents gènes.

16.2 Marqueurs basés sur l'ADN

16.2.1 Restriction Fragment Length Polymorphism (RFLP)

La RFLP est une technique qui n'est pas basée sur la PCR, elle permet de différencier les organismes en analysant les motifs dérivés du clivage de leur ADN. Le clivage est principalement basé sur une classe spéciale d'enzymes, appelées les endonucléases de restriction. Si deux organismes diffèrent par la distance entre les sites de clivage de certaines endonucléases de restriction, alors la longueur des fragments produits sera différente lors de l'analyse de l'ADN (Kumar et al., 2009).

Les RFLPs sont des marqueurs moléculaires moyennement polymorphes, leur technique nécessite une quantité d'ADN importante (en µg), et est chronophage et coûteuse ; mais ils présentent les avantages d'être des marqueurs à reproductibilité très élevée, avec une transférabilité importante entre les populations, et codominants permettant de distinguer entre génotypes homozygotes et hétérozygotes pour un caractère donnée.

16.2.2 Random Amplified Polymorphic DNA (RAPD)

La RAPD est la première technique utilisant la PCR, elle est basée sur l'amplification de l'ADN génomique avec des amorces uniques de séquence nucléotidique arbitraire. Ces amorces détectent les polymorphismes en l'absence d'informations spécifiques sur la séquence de nucléotides (Williams et al., 1990). Basée sur l'utilisation d'une seule amorce de 10 bases de séquence arbitraire avec un contenu GC de 60% ou plus. L'amplification par PCR n'est attendue que lorsque le site d'amorçage apparaît deux fois dans une orientation opposée sur environ 2000 bases. Les polymorphismes RAPD résultent de la variation de la séquence au niveau des sites d'amorces et/ou de la variation de la longueur de la séquence cible située entre les sites de liaison des amorces (Grover et Sharma, 2016).

Contrairement à la RFLP, la RAPD est une technique simple, rapide et peu onéreuse ; comme la séquence cible à amplifier est inconnue, les amorces des RAPDs ne nécessitent pas de développement, étape très coûteuse, et sont choisies arbitrairement. De plus, et grâce à la PCR, la RAPD requiert une très faible quantité d'ADN (en ng).

Hormis son application dans les études sur la diversité génétique (Sedra et al., 1998 ; Mir et al., 2021), l'élaboration de cartographie génétique (Laucou et al., 1998), l'analyse de ségrégation en vrac (Barua et al., 1993), le développement d'empreinte digitale à ADN (Dinesh et al., 1993 ;

Jones et Kortenkamp, 2000), le test RAPD a été utilisé par plusieurs groupes comme un outil efficace pour l'identification de marqueurs liés à des caractéristiques agronomiques importantes, qui sont introgressés pendant le développement de lignées quasi isogéniques (Kumar et al., 2009). Un autre avantage des RAPDs est que l'on peut obtenir plusieurs loci à partir d'une seule séquence d'amorce. Nonobstant, ces marqueurs sont dominants, ce qui ne permet pas de distinguer entre individu homozygotes et hétérozygotes et les régions mutées ne sont pas amplifiées ; ils ne sont pas reproductibles et sont généralement non transférables.

16.2.3 Amplified Fragment Length Polymorphism (AFLP)

La technique AFLP est basée sur l'amplification sélective par PCR de fragments de restriction à partir d'une digestion totale de l'ADN génomique, l'amplification par PCR des fragments de restriction est réalisée en utilisant l'adaptateur et la séquence du site de restriction comme sites cibles pour l'hybridation des amorces (Vos et al., 1995).

Les AFLPs sont plus polymorphes que les RFLPs et les RAPDs, présentent une meilleure reproductibilité que les RAPDs et leurs amorces ne nécessitent pas de développement, néanmoins, ils sont dominants, leur technique est laborieuse, chronophage et nécessite une certaine expérience pour une analyse optimale des résultats.

16.2.4 Sequence-Characterized Amplified Region (SCAR)

Les SCARs sont des marqueurs basés sur la PCR qui représentent des loci uniques, génétiquement définis, identifiés par l'amplification par PCR de l'ADN du génome avec des paires d'amorces oligonucléotidiques spécifiques. Les SCARs sont dérivés du clonage et séquençage des deux extrémités des produits amplifiés des marqueurs RAPDs (Paran et Michelmore, 1993). La séquence RAPD a été utilisée pour concevoir des paires d'amorces de 24-30 nucléotides permettant l'amplification reproductible de loci uniques liés à un caractère d'intérêt (Paran et Michelmore, 1993 ; Kumar et al., 2009).

En utilisant des amorces PCR plus longues, les SCARs ne sont pas confrontés au problème de faible reproductibilité généralement rencontré avec les RAPDs (Kumar et al., 2009), leur amplification est moins sensible aux conditions de réaction et ils peuvent potentiellement être convertis en marqueurs codominants (Paran et Michelmore, 1993). Cependant, la conception des amorces de ces marqueurs nécessitent deux étapes fondamentales à savoir, le clonage et le séquençage des séquences RAPDs.

16.2.5 Cleaved Amplified Polymorphic Sequence (CAPS)

Les CAPS sont des fragments d'ADN amplifiés par PCR (Konieczny et Ausubel, 1993) à l'aide d'amorces spécifiques pouvant être dérivées de marqueurs RAPDs (Zheng et al., 1999), suivis par la digestion des produits PCR avec une enzyme de restriction. Ces polymorphismes de longueur résultant de la variation de l'occurrence des sites de restriction sont identifiés par électrophorèse sur gel des produits digérés (Kumar et al., 2009).

Les avantages de CAPS incluent l'implication de la PCR qui ne nécessite que de faibles quantités d'ADN matrice, la codominance des allèles et la haute reproductibilité. Par rapport aux RFLP, l'analyse CAPS ne comprend pas les étapes laborieuses et techniquement exigeantes de l'hybridation par la Southern plot et des procédures de détection radioactive (Kumar et al., 2009). Cependant, cette technique nécessite les données de séquences pour la synthèse d'amorces.

16.2.6 Microsatellites ou Simple Sequence Repeat (SSR)

Appelés aussi Short Tandem Repeat (STR) par Edward et al. (1991), le terme microsatellite fut mentionné pour la première fois par Litt et Luty (1989). Les SSRs sont des séquences d'ADN de mono- (A)_n, di- (CT)_n, tri- (GGC)_n, tétra- (AAGC)_n, penta- (CGAGC)_n ou hexanucléotides répétées en tandem. Ce sont des marqueurs génétiques très informatifs et représentent une partie importante des génomes des eucaryotes supérieurs (Powell et al., 1996). En raison de la variation du nombre de leurs répétitions, les SSRs sont hautement polymorphes, ils sont amplifiés via la PCR en utilisant les séquences uniques et conservées qui flanquent les microsatellites. Ces régions flanquantes qui servent d'amorces sont obtenues à partir de données de séquences publiées ou des bibliothèques génomiques. Selon Kumar et al. (2009), il est rare de disposer d'informations relatives à la fonction des marqueurs microsatellites développés à partir de bibliothèques génomiques.

Les SSRs présentent des avantages considérables leur permettant de devenir des marqueurs de choix dans les études génétiques, notamment chez les plantes. Hormis leur polymorphisme important, ce sont des marqueurs codominants, reproductibles et transférables, leurs régions flanquantes sont souvent conservées et ils sont faciles à tester par PCR. L'unique désavantage, est le coût élevé pour développer chaque marqueur SSR à partir d'une bibliothèque d'ADN.

16.2.7 Inter Simple Sequence Repeats (ISSR)

Les ISSRs sont des fragments d'ADN d'environ 100-3000 pb situés entre des régions microsatellites adjacentes, orientées de façon opposée (Kumar et al., 2009). Connus aussi sous le nom de Single Primer Amplification Reactions (SPARs), cette technique décrite par Zietkiewicz et al. (1994), repose sur l'utilisation de séquences microsatellites comme amorces dans une réaction en chaîne par polymérase pour générer des marqueurs multi-locus (Reddy et al., 2002). Cette technique combine la plupart des avantages de l'analyse AFLP et des microsatellites avec l'universalité de la RAPD. Les ISSR présentent une reproductibilité élevée, probablement due à l'utilisation d'amorces plus longues (16-25 pb) par rapport aux amorces RAPD (10- pb), ce qui permet l'utilisation ultérieure de températures d'hybridation élevées (45-60 °C) conduisant à une plus grande rigueur (Reddy et al., 2002). Les ISSRs sont hautement polymorphes, mais sont généralement des marqueurs dominants.

16.2.8 Single Nucleotide Polymorphism (SNP)

SNP est une variation de la séquence d'ADN qui se produit lorsqu'un seul nucléotide (A, T, G ou C) diffère entre les membres d'une espèce (Idrees et Irshad, 2014). Dans de nombreux organismes, la plupart des polymorphismes résultent de changements dans la position d'un seul nucléotide (mutations ponctuelles) ce qui a conduit au développement de techniques pour étudier les polymorphismes d'un seul nucléotide (Kumar et al., 2009). Les SNPs sont obtenus après séquençage de l'ADN de différents individus ou avec des technologies spécifiques, telles que la chromatographie liquide à haute performance sur gel dénaturant (DHPLC) (Hoogendoorn et al., 2000), Microarrays, Polymorphismes à caractéristique unique (SFP) (Saxena et al., 2011), Illumina arrays (Mason et al., 2017)...etc. Les SNPs sont des marqueurs hautement polymorphes, codominants (bi-alléliques), reproductibles, beaucoup moins chronophages, mais coûteux si on les compare aux autres marqueurs moléculaires.

17. Applications des marqueurs moléculaires

Les marqueurs moléculaires constituent en raison de leur efficacité, stabilité, rentabilité et facilité d'utilisation un outil largement populaire pour une multitude d'applications dans le domaine de la génomique, de l'agronomie, de la médecine... ; ils sont utilisés pour l'analyse de la diversité génétique (Idrees et Irshad, 2014), identification des cultivars (Koller et al., 1993), construction de cartes génétiques (Rafalski, 2002), de cartes physiques (Leitch et Heslop-Harrison, 1992), cartographie comparative (Zhang et al., 2001), clonage positionnel (Martin et al., 1993), développement d'empreinte digitale à ADN (Dinesh et al., 1993), étude

phylogénétique (Patwardhan et al., 2014), sélection assistée par marqueurs (Collard et al., 2005), détection de mutations (Musolino et al., 2007), et de QTL (Quantitative Trait Loci) pour les caractères complexes (Bernardo, 2008)...etc.

18. Marqueurs moléculaires utilisés chez le caroubier

Le caroubier et contrairement à d'autres espèces arboricoles méditerranéennes, notamment l'olivier, auquel plus d'une cinquantaine de publications moléculaires ont été consacrées (Sion et al., 2021), n'a fait l'objet que de peu d'études dans ce sens-là. Parmi les marqueurs moléculaires cités ci-dessus, les RAPDs sont les plus utilisés chez *C. siliqua*, principalement pour l'étude de la diversité génétique (Talhok et al., 2005 ; Konaté et al., 2007 ; Afif et al., 2008 ; Barracosa et al., 2008 ; Mahfoud et al., 2018). Par ailleurs, ces marqueurs ont récemment été utilisés pour une étude relative au déterminisme sexuel chez l'espèce (Kaya et Dalkiliç, 2021). Les AFLPs ont aussi été utilisés pour l'évaluation de la variabilité génétique chez le caroubier (Caruso et al., 2008a ; Barracosa et al., 2008 ; Caruso et al., 2009 ; Bolarić et al., 2021). Quant aux microsatellites (SSRs), ils ont été récemment développés (Caruso et al., 2008b ; Viruel et al., 2018) et utilisés pour évaluer le niveau de diversité génétique (La Malfa et al., 2014 ; Kyratzis et al., 2021), étudier la structure génétique (Di Guardo et al., 2019) et phylogéographiques de l'espèce (Viruel et al., 2020). Les ISSRs ont été utilisés pour l'évaluation de la diversité moléculaire chez les accessions de caroubiers marocains (Konaté et al., 2009). Par ailleurs, des marqueurs de séquences exprimées (ESTs) ont été conçus chez le caroubier dans le but d'identifier les gènes responsables de l'expression des traits floraux et de développer des marqueurs de type EST-SSR (Expressed Sequence Tags-Simple Sequence Repeat) (Caruso et al., 2008b), utilisés pour l'étude de la diversité génétique de caroubiers issus de trois pays méditerranéens (La Malfa et al., 2014).

Les isozymes (Tous et al., 1992 ; Makrem et al., 2006 ; Sidina et al., 2011) et les isoenzymes (Batlle et al., 1996) ont été utilisés comme marqueurs pour étudier la diversité génétique chez le caroubier.

En Algérie, il n'y a aucune étude moléculaire réalisée sur le caroubier, d'où l'objectif de ce travail qui se veut pionnier en matière de l'évaluation via l'outil moléculaire de la diversité génétique chez les accessions de caroubiers algériens.

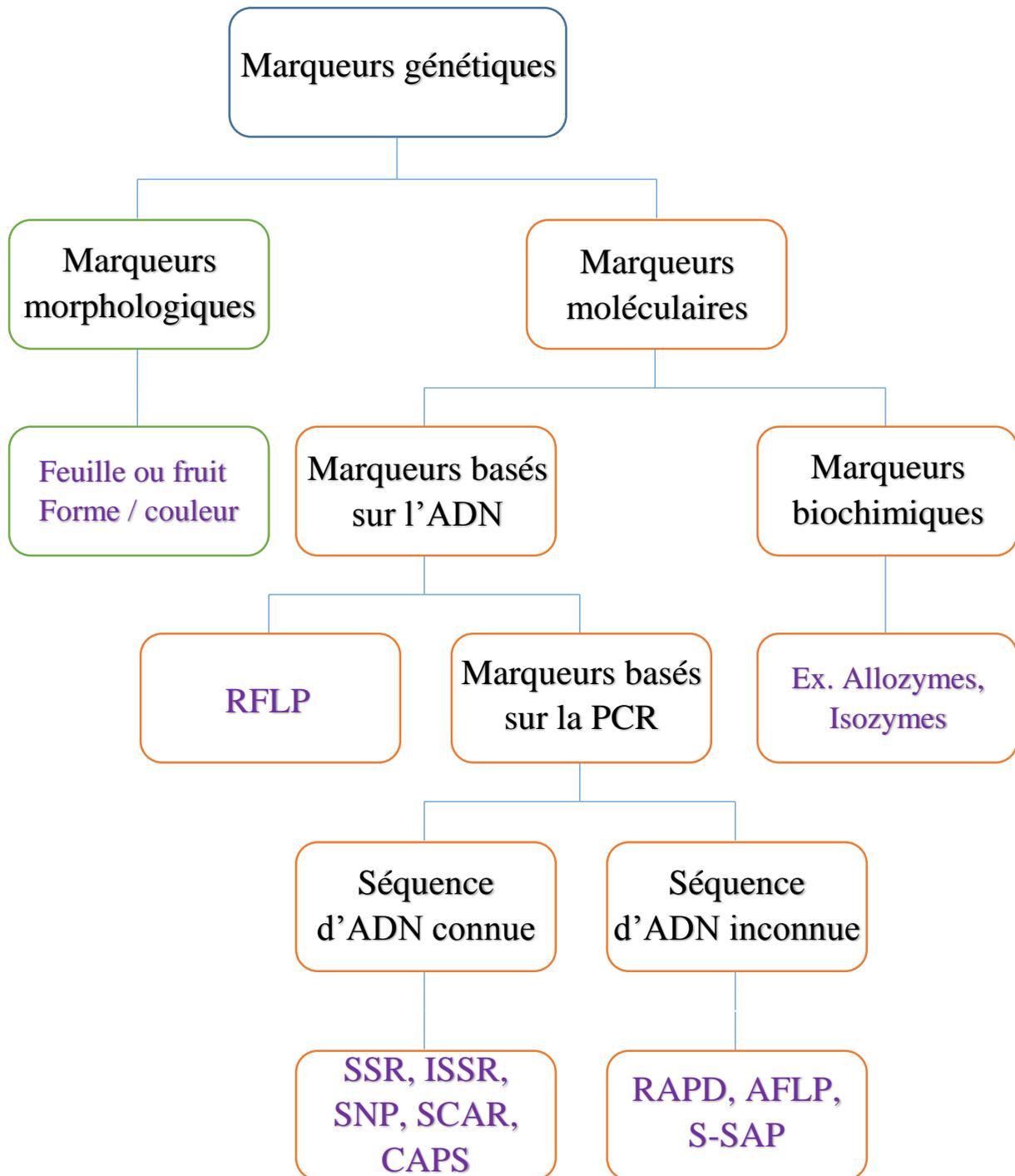


Figure 21. Différents types de marqueurs génétiques.

CHAPITRE 2

II Caractérisation morphométrique du caroubier

L'objectif de ce chapitre est de réaliser une caractérisation morphométrique pour les différentes accessions de caroubier échantillonnées à travers le territoire national et ce, afin d'évaluer leur variabilité génétique, identifier et sélectionner via leurs performances et les outils statistiques les premiers cultivars de caroubier algérien, qui pourront constituer, une fois évalués dans des conditions contrôlées, la base des variétés utilisées pour la création de vergers de caroubier performants et viables.

1. Matériels et méthodes

1.1 Prospection sur terrain

La prospection sur terrain a été réalisée sur 33 sites appartenant à 26 wilayas. L'objectif principal de cette prospection est d'établir un inventaire primaire sur la base des informations disponibles concernant la situation des cultivars de caroubier en Algérie. La majorité des personnes questionnées sont des collecteurs de caroubiers ayant une expérience de plus de 25 ans dans le domaine.

1.2 Matériel végétal

Dans cette étude, soixante-six accessions ont été échantillonnées à partir de 19 sites à travers l'Algérie (Figure 22). Les arbres échantillonnés (Tableau 06) couvraient une large zone géographique (15 wilayas) comprenant quatre étages bioclimatiques (aride, semi-aride, semi-humide et humide ; Roumieux (2012)). Pour chaque accession, cinq feuilles ont été prélevées aléatoirement en juin 2020 et ont été caractérisées à l'aide de deux traits qualitatifs (couleur et forme) et de quatre traits quantitatifs (longueur du rachis, nombre de folioles/feuilles, surface des folioles et longueur/largeur des folioles) (Figure 23). Trente gousses et trois graines par gousse pour chaque arbre (récoltées d'août à septembre 2020) ont été collectées au hasard et caractérisées via douze traits morphométriques (longueur de la gousse, largeur de la gousse, épaisseur de la gousse, poids de la gousse, poids de la pulpe, pourcentage de la pulpe, longueur de la graine, largeur de la graine, épaisseur de la graine, poids des graines par gousse, nombre de graines et pourcentage de graines) (Figure 24). La sélection des caractères continus pour la caractérisation morphologique a été faite sur la base de la liste des descripteurs pour les cultivars de caroubier (Tous et al., 2013).

1.3 Analyse statistique des données

Les données morphologiques des traits quantitatifs ont été analysées par le test ANOVA (Analyse de Variance) à l'aide du logiciel GenStat Discovery Edition 3, avec comparaison par paires de "Duncan" entre les moyennes à un niveau de signification $\alpha = 0,05$.

Afin d'examiner les variations entre les différents ensembles de paramètres quantitatifs et qualitatifs, une gamme d'outils d'analyses multivariées a été utilisée, notamment l'analyse en composantes principales (ACP), une technique qui utilise les covariances et les corrélations pour identifier les relations entre les variables quantitatives, et l'analyse des correspondances multiples (ACM) pour analyser la relation entre les variables qualitatives des feuilles. Toutes les variables quantitatives des feuilles ont été transformées pour l'analyse ACM en variables qualitatives représentées par trois modalités selon des classes créées à partir des quartiles suivants : <25%, [25% - 75%], >75%.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée selon la méthode de clustering agglomératif hiérarchique "ward.D2", qui est basée sur la distance euclidienne. Deux indices "Dunn" et "DB" (Dunn, 1974 ; Davies et Bouldin, 1979) ont été utilisés via le package "NbClust" du logiciel R pour déterminer le meilleur nombre de clusters. En outre, une carte thermique (Heatmap) a été créée comme moyen de visualiser la performance de chaque accession et le regroupement hiérarchique pour identifier les variables qui semblent être caractéristiques pour chaque cluster.

Les analyses ont été réalisées avec le programme RStudio (v. 1.3.1093), en utilisant les packages "FactoMineR" pour l'analyse exploratoire multidimensionnelle des données et "Factoextra" pour une visualisation élégante des résultats des analyses. Les fonctions utilisées pour chaque analyse multivariée étaient "princomp" pour l'ACP, "hclust" pour le clustering, "ACM" pour l'analyse des correspondances multiples et "heatmap" pour le tracé des cartes thermiques.

Le coefficient de corrélation entre les paramètres morphologiques des gousses et des graines a été analysé à l'aide du logiciel PAST 4.03 (Hammer et al., 2001) avec test de Bonferroni comme correction de comparaison multiple. Enfin, l'analyse discriminante linéaire (ADL) exécutée par le logiciel PAST 4.03 a été utilisée pour séparer et classer les accessions

en fonction de leurs caractéristiques morphologiques et de leurs régions, et la méthode Jackknife a été utilisée pour la correction des biais.

2. Résultats

2.1 Prospection sur terrain

La prospection menée à travers l'Algérie a révélé que sur les 33 sites visités, entre zones de reboisement (21 sites), d'alignement (3 sites) et d'ornementation (7 sites), seuls deux d'entre eux étaient de véritables vergers de caroubiers (plus de 100 arbres), l'un situé à Blida, l'autre à Tipaza (Figure 25). Sur ces deux sites, deux cultivars sont connus : "Tlemsani" (accession A43) faisant référence à la région de Tlemcen, et "Maricani" (accessions A47 et A49), qui signifie "Américain" (Figure 26).

Dans tous les sites visités, les caroubiers issus de la multiplication par greffage sont appelés "Hor" ou "Hora" (nom féminin) signifiant "pur", alors que les arbres dispersés par graines (multiplication sexuée) sont nommés selon leur région. Les noms locaux utilisés sont "Akajout", "Akachkach", "Adjout", "Berhoucha", "Belhoucha" et "Hartani", tous ces noms vernaculaires signifient "sauvage". De plus, deux accessions hermaphrodites (A25 et A26) ont été échantillonnées, et ont été nommées "Tarfi" en référence à la région d'El Taref.

En outre, cette prospection a révélé que 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.

2.2 Analyse morphométrique

L'analyse de la variance (ANOVA) a montré des différences hautement significatives ($P < 0,001$) entre les accessions pour tous les traits quantitatifs (Tableau 07, 08 et 09). Les dimensions des feuilles (longueur du rachis, surface des folioles et rapport longueur/largeur) de toutes les accessions de caroubier (Tableau 07) variaient respectivement de 9,04 cm (A24) à 22,16 cm (A14), de 11,49 cm² (A34) à 33,93 cm² (A14) et de 1,23 (A61) à 1,73 (A62). Le rachis et les folioles étaient respectivement de longueur (13,70 cm) et de surface (19,68 cm²) moyennes, tandis que le rapport longueur/largeur donnait des folioles de forme allongée, avec une moyenne

de 1,50. Le nombre de folioles par feuille variait de 6,0 (A58) à 11,2 (A26 "Tarfi") pour une moyenne de 8,32.

Les dimensions des gousses (longueur et largeur) (Tableau 08) variaient de 11,20 cm (A34) à 19,36 cm (A60) et de 1,54 cm (A44) à 3,07 cm (A01), respectivement. Les deux traits présentaient des moyennes de 15,05 cm et 2,13 cm respectivement. L'épaisseur des gousses était fine, de 0,63 cm en moyenne, et variait de 0,29 cm (A61) à 0,97 cm (A47 "Maricani"). Les dimensions des graines (longueur, largeur et épaisseur) (Tableau 09) variaient respectivement de 0,81 cm (A24) à 1,10 cm (A45), de 0,59 cm (A08) à 0,81 cm (A01) et de 0,23 cm (A25 "Tarfi") à 0,50 cm (A18 et A49 "Maricani"). Ces caractéristiques des graines présentaient respectivement des moyennes de 0,93 cm, 0,71 cm et 0,41 cm.

Le poids des gousses variait entre 5,8 g (A18) et 27,4 g (A11), avec une valeur moyenne de 15,17 g. Le nombre de graines par gousse variait de 6,43 (A34) à 13,97 (A19), avec une moyenne de 10,97. Le rendement en graines a varié de 6,20 % (A26 "Tarfi") à 28,63 % (A18), et a enregistré une moyenne de 14,88 %.

2.3 Analyse des corrélations

Les corrélations entre les 12 caractères morphologiques analysés (gousses et graines) sont résumées dans la figure 27. Les résultats montrent qu'il existe des corrélations entre tous les caractères, sauf entre le trait de la largeur des graines et le nombre de graines, le pourcentage de pulpe, le rendement (% de graines) et l'épaisseur des graines. Le poids de la pulpe présentait une corrélation fortement positive avec la longueur, la largeur et l'épaisseur des gousses, avec des coefficients de corrélation respectifs de $r = 0,63$, $0,75$, $0,64$, mais une corrélation faiblement positive avec le nombre de graines ($r = 0,27$), la longueur des graines ($r = 0,38$), la largeur des graines ($r = 0,28$) et le poids des graines ($r = 0,31$). En outre, le poids de la pulpe était négativement corrélé avec le rendement ($r = -0,63$) et l'épaisseur des graines ($r = -0,31$). Le rendement (% de graines) était négativement corrélé avec la majorité des caractères, la longueur de la gousse, la largeur de la gousse, l'épaisseur de la gousse, le poids de la gousse et la longueur de la graine avec des coefficients de corrélation respectifs de $r = -0,16$, $-0,51$, $-0,44$, $-0,55$ et $-0,14$, tandis qu'il était positivement corrélé avec le nombre de graines ($r = 0,28$), l'épaisseur de la graine ($r = 0,27$) et le poids de la graine ($r = 0,40$).

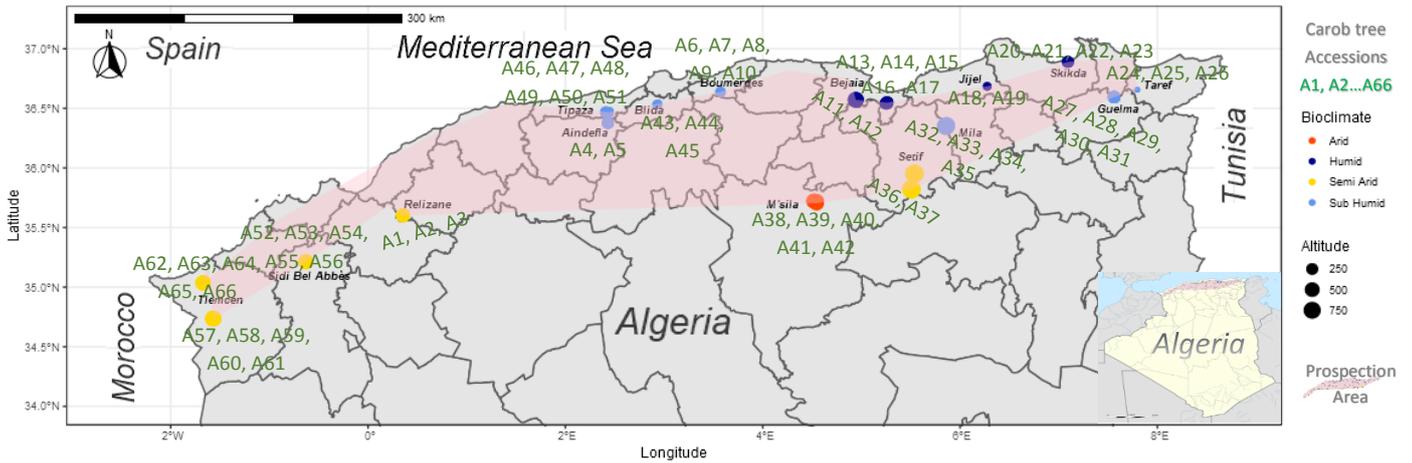


Figure 22. Carte de distribution des soixante-six accessions de caroubier échantillonnées dans 19 localités avec différents stades bioclimatiques du nord de l'Algérie.

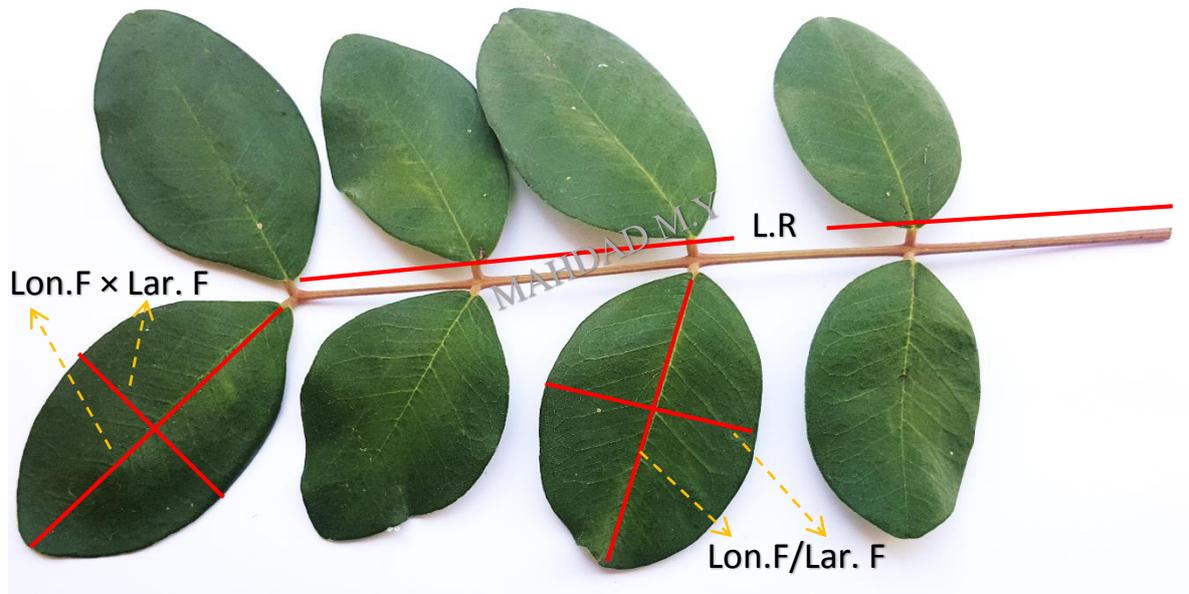


Figure 23. Différents caractères quantitatifs mesurés à partir de la feuille de caroubier : L.R = Longueur du Rachis ; Lon.F/Lar.F = Rapport longueur foliole sur largeur foliole ; Lon.F × Lar.F = Surface de la foliole.

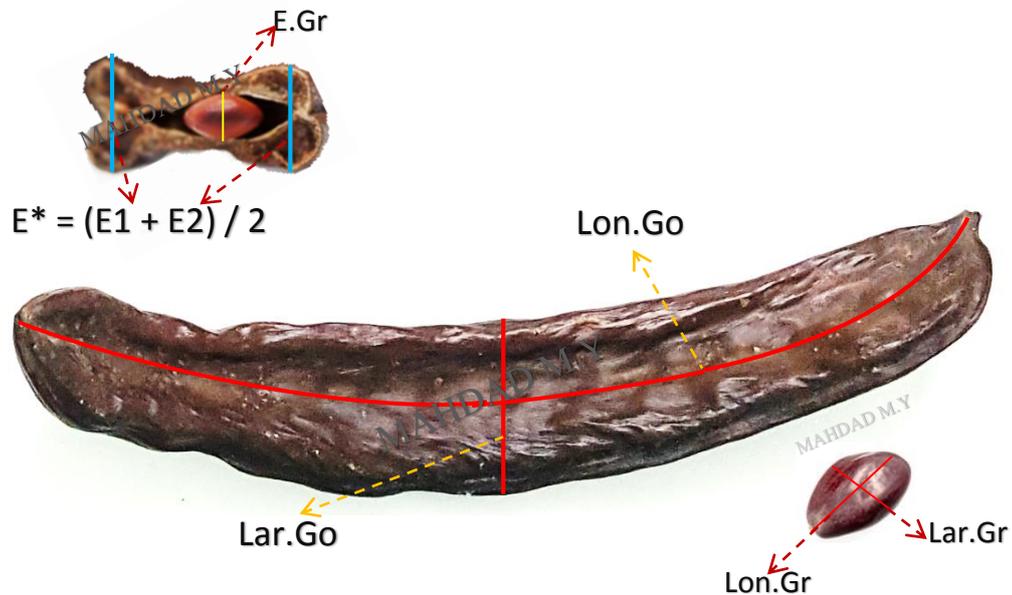


Figure 24. Différents caractères quantitatifs mesurés à partir de la gousse et graine de caroubier : Lon.Go = Longueur de la gousse ; Lar.Go = Largeur de la gousse ; E* = Epaisseur de la gousse ; Lon.Gr = Longueur de la graine ; Lar.Gr = Largeur de la graine ; E.Gr = Epaisseur de la graine.



Figure 25. Verger de caroubier situé à Tipaza.



Figure 26. Variabilité des gousses et graines de quelques accessions de caroubiers algériens.

Tableau 06. Localisation géographique et étage bioclimatique des accessions de caroubier étudiées.

Accession	Région	Site	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Etage bioclimatique
A01	Relizane	Aïn Derdja	35°36'09"N	0°21'14"E	397	Semi-aride
A02	Relizane	Aïn Derdja	35°36'09"N	0°21'14"E	397	Semi-aride
A03	Relizane	Aïn Derdja	35°36'08"N	0°21'14"E	399	Semi-aride
A04	Aindefla	Boumedfaa	36°22'35"N	2°25'51"E	262	Subhumide
A05	Aindefla	Boumedfaa	36°22'38"N	2°25'50"E	269	Subhumide
A06	Boumerdes	Ammal	36°38'02"N	3°34'47"E	92	Subhumide
A07	Boumerdes	Ammal	36°38'16"N	3°34'25"E	130	Subhumide
A08	Boumerdes	Ammal	36°38'18"N	3°34'23"E	152	Subhumide
A09	Boumerdes	Ammal	36°38'17"N	3°34'21"E	143	Subhumide
A10	Boumerdes	Ammal	36°38'04"N	3°34'51"E	70	Subhumide
A11	Bejaia	Barbacha	36°34'19"N	4°56'35"E	603	Humide
A12	Bejaia	Barbacha	36°34'19"N	4°56'37"E	607	Humide
A13	Bejaia	Bordj-Mira	36°32'54"N	5°15'39"E	289	Humide
A14	Bejaia	Bordj-Mira	36°32'55"N	5°15'39"E	298	Humide
A15	Bejaia	Bordj-Mira	36°32'33"N	5°15'07"E	303	Humide
A16	Bejaia	Bordj-Mira	36°32'32"N	5°15'08"E	285	Humide
A17	Bejaia	Bordj-Mira	36°32'41"N	5°15'24"E	307	Humide
A18	Jijel	El Milia	36°41'04"N	6°16'28"E	74	Humide
A19	Jijel	El Milia	36°41'05"N	6°16'31"E	84	Humide
A20	Skikda	Filfila	36°53'24"N	7°05'32"E	236	Humide
A21	Skikda	Filfila	36°53'24"N	7°05'33"E	241	Humide
A22	Skikda	Filfila	36°53'23"N	7°05'29"E	231	Humide
A23	Skikda	Filfila	36°53'22"N	7°05'33"E	233	Humide
A24	El Taref	Chihani	36°39'22"N	7°47'44"E	31	Subhumide
A25*	El Taref	Chihani	36°39'22"N	7°47'45"E	31	Subhumide
A26*	El Taref	Chihani	36°39'22"N	7°47'44"E	31	Subhumide
A27	Guelma	Selmoun d'El Hachemi	36°35'39"N	7°33'42"E	284	Subhumide
A28	Guelma	Selmoun d'El Hachemi	36°35'39"N	7°33'43"E	278	Subhumide
A29	Guelma	Selmoun d'El Hachemi	36°35'40"N	7°33'41"E	286	Subhumide
A30	Guelma	Selmoun d'El Hachemi	36°35'40"N	7°33'40"E	291	Subhumide
A31	Guelma	Selmoun d'El Hachemi	36°35'40"N	7°33'40"E	291	Subhumide
A32	Mila	Aïn Beida Ahriche	36°21'16"N	5°51'38"E	753	Subhumide
A33	Mila	Aïn Beida Ahriche	36°21'16"N	5°51'38"E	753	Subhumide
A34	Mila	Aïn Beida Ahriche	36°21'14"N	5°51'38"E	763	Subhumide
A35	Mila	Aïn Beida Ahriche	36°21'00"N	5°51'18"E	827	Subhumide
A36	Setif	Aïn Azel	35°49'13"N	5°30'26"E	955	Semi-aride
A37	Setif	Aïn Lahdjar	35°57'08"N	5°32'15"E	940	Semi-aride
A38	M'sila	M'sila	35°43'21"N	4°31'07"E	490	Aride
A39	M'sila	M'sila	35°43'21"N	4°31'07"E	490	Aride
A40	M'sila	M'sila	35°43'22"N	4°31'07"E	490	Aride
A41	M'sila	M'sila	35°42'16"N	4°32'46"E	477	Aride
A42	M'sila	M'sila	35°43'16"N	4°32'46"E	488	Aride
A43	Blida	Guerouaou	36°31'53"N	2°55'46"E	114	Subhumide
A44	Blida	Guerouaou	36°31'53"N	2°55'48"E	113	Subhumide
A45	Blida	Guerouaou	36°32'15"N	2°56'14"E	97	Subhumide
A46	Tipaza	Merad	36°28'05"N	2°26'10"E	186	Subhumide
A47	Tipaza	Merad	36°28'03"N	2°26'08"E	188	Subhumide
A48	Tipaza	Merad	36°28'01"N	2°26'05"E	192	Subhumide
A49	Tipaza	Boudjebroune	36°28'03"N	2°24'40"E	218	Subhumide
A50	Tipaza	Boudjebroune	36°28'04"N	2°24'43"E	216	Subhumide
A51	Tipaza	Boudjebroune	36°28'04"N	2°24'41"E	217	Subhumide
A52	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès	35°12'50"N	0°37'47"W	472	Semi-aride
A53	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès	35°12'50"N	0°37'44"W	471	Semi-aride
A54	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès	35°12'50"N	0°37'44"W	471	Semi-aride
A55	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès	35°12'43"N	0°37'47"W	473	Semi-aride
A56	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès	35°12'38"N	0°37'48"W	470	Semi-aride
A57	Tlemcen	El Kef	34°44'13"N	1°34'07"W	617	Semi-aride
A58	Tlemcen	El Kef	34°44'12"N	1°34'10"W	619	Semi-aride
A59	Tlemcen	El Kef	34°44'05"N	1°34'08"W	567	Semi-aride
A60	Tlemcen	El Kef	34°44'05"N	1°34'08"W	567	Semi-aride
A61	Tlemcen	El Kef	34°44'05"N	1°34'08"W	567	Semi-aride
A62	Tlemcen	Aïn Kebira	35°02'10"N	1°40'17"W	503	Semi-aride
A63	Tlemcen	Aïn Kebira	35°02'11"N	1°40'18"W	497	Semi-aride
A64	Tlemcen	Aïn Kebira	35°02'09"N	1°40'18"W	513	Semi-aride
A65	Tlemcen	Aïn Kebira	35°02'07"N	1°40'17"W	524	Semi-aride
A66	Tlemcen	Aïn Kebira	35°02'09"N	1°40'17"W	510	Semi-aride

* Cultivar hermaphrodite.

2.4 Analyses multivariées

L'analyse des correspondances multiples (ACM) pour les variables concernant les feuilles est illustrée dans la figure 28. Les deux dimensions de l'ACM expliquent 30,22 % du total de la variance pour 18 modalités. L'ACM a permis de regrouper les feuilles de caroubier en trois classes distinctes : i) des feuilles à rachis court, à faible nombre de folioles, petites, lobées, étroites et de couleur verte ; ii) des feuilles à rachis moyen, avec un nombre moyen de folioles, de taille moyenne, ovales, courtes et de couleur vert clair ; et iii) des feuilles à rachis long, avec des folioles nombreuses et grandes, elliptiques, longues et de couleur vert foncé (Figure 29).

L'analyse en composantes principales (ACP) des 12 caractères morphologiques des gousses et des graines est présentée dans la figure 30. Les deux premières composantes principales ont expliqué 67,5 % de la variance totale, le premier axe a expliqué 49,6 %, et 17,9 % pour le second. Les variables les mieux représentées dans la première composante étaient le poids des gousses ($\text{Cos}^2 = 0,96$), le poids de la pulpe ($\text{Cos}^2 = 0,95$), le rendement ($\text{Cos}^2 = 0,73$), le pourcentage de pulpe ($\text{Cos}^2 = 0,73$), la largeur des gousses ($\text{Cos}^2 = 0,7$) et la longueur des gousses ($\text{Cos}^2 = 0,52$). Dans la deuxième composante, le poids des graines, le nombre de graines et la longueur des graines étaient les variables les plus significatives, avec une qualité de représentation de $\text{Cos}^2 = 0,56$, $0,37$ et $0,24$, respectivement. L'ACP montre une corrélation négative entre la plupart des caractères des gousses et le rendement en graines, et une corrélation nulle entre ce dernier caractère et les autres caractères de la graine. Ce dernier résultat semble être en contradiction avec ceux de l'analyse de corrélation entre variables, cependant cette ambiguïté peut être expliquée par la perte d'information enregistrée par l'ACP, qui est de 32,5 %.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) des différentes accessions en fonction de leurs mesures morphométriques est présentée dans la figure 31. Le meilleur nombre de clusters déterminé par les indices "Dunn" et "DB" était de sept. Le groupe qui s'est distingué est celui des accessions hermaphrodites (A25 et A26 "Tarfi"). Le cluster VII comprenait trois accessions : deux (A32 et A34) situées sur le même site à l'est du pays avec un étage bioclimatique subhumide, et la troisième accession (A61) située à l'extrême ouest avec un bioclimat semi-aride. Le sixième groupe comprenait quatre accessions, deux de l'ouest (A57 et A58) avec un bioclimat semi-aride, une au centre du pays (A44) avec un bioclimat subhumide, et la dernière située à l'est (A18) avec un bioclimat humide. Le cluster IV regroupait le cultivar "Maricani" (A47 et A49) avec des accessions de la région de Boumerdes (A06, A08 et A09), tandis que le

cultivar "Tlemsani" (A43) et l'accession (A04) située dans la région d'Aindefla était très proche dans le troisième cluster. Toutes les accessions (A02, A03 et A01) de la région de Relizane et la plupart des accessions (A27, A28 et A31) de la région de Guelma ont été regroupées dans le premier cluster. Enfin, le cluster V a regroupé le plus grand nombre d'accessions, distribuées à travers tout le pays et avec tous les types d'étages bioclimatiques.

La carte thermique (Figure 32) montre que le cluster I est caractérisé par des accessions présentant un pourcentage élevé de pulpe et un faible rendement en graines. Le cluster II, qui regroupe les deux accessions hermaphrodites est caractérisé par un faible pourcentage de graines, un poids élevé de la pulpe, ainsi que par des graines fines. Le cluster III est caractérisé par un poids élevé de la pulpe et des graines, et un nombre élevé de graines, tandis qu'une gousse épaisse et des graines étroites distinguaient les accessions du cluster IV. Le groupe V, regroupant la plupart des accessions, est caractérisé par un rendement en graines moyen à élevé et un pourcentage de pulpe moyen à faible. Le cluster VI se distingue par des accessions ayant plusieurs caractéristiques telles qu'un pourcentage élevé de graines, un faible pourcentage de pulpe et des gousses courtes avec de faible poids. Enfin, le cluster VII comprenant des accessions caractérisées par un petit nombre de graines courtes et un faible poids des gousses et des graines.

L'analyse discriminante linéaire (ADL) pour la séparation et classification des accessions par région est présentée dans la figure 33 et le tableau 10. L'ADL a identifié deux discriminants linéaires qui ont expliqué 57,37 % de la variance totale et présenté clairement trois groupes distincts d'accessions appartenant à trois régions différentes : El Taref, Relizane et Guelma. L'ADL a montré que 69,7 % des accessions étaient correctement classées selon leur origine, mais seulement 39,39 % en utilisant la correction de biais via la méthode Jackknife, ce qui représente 26 accessions sur un total de 66 accessions étudiées. Ces 26 accessions sont originaires de 11 régions : Relizane (A01, A02 et A03), Boumerdes (A06, A08 et A09), Bejaia (A16 et A17), Skikda (A21 et A22), El Taref (A25 et A26, "Tarfi"), Guelma (A27, A28, A29 et A31), Mila (A32 et A35), M'sila (A40 et A42), Tipaza (A47 et A49, "Maricani"), Sidi Bel Abbès (A54) et Tlemcen (A59, A63 et A65).

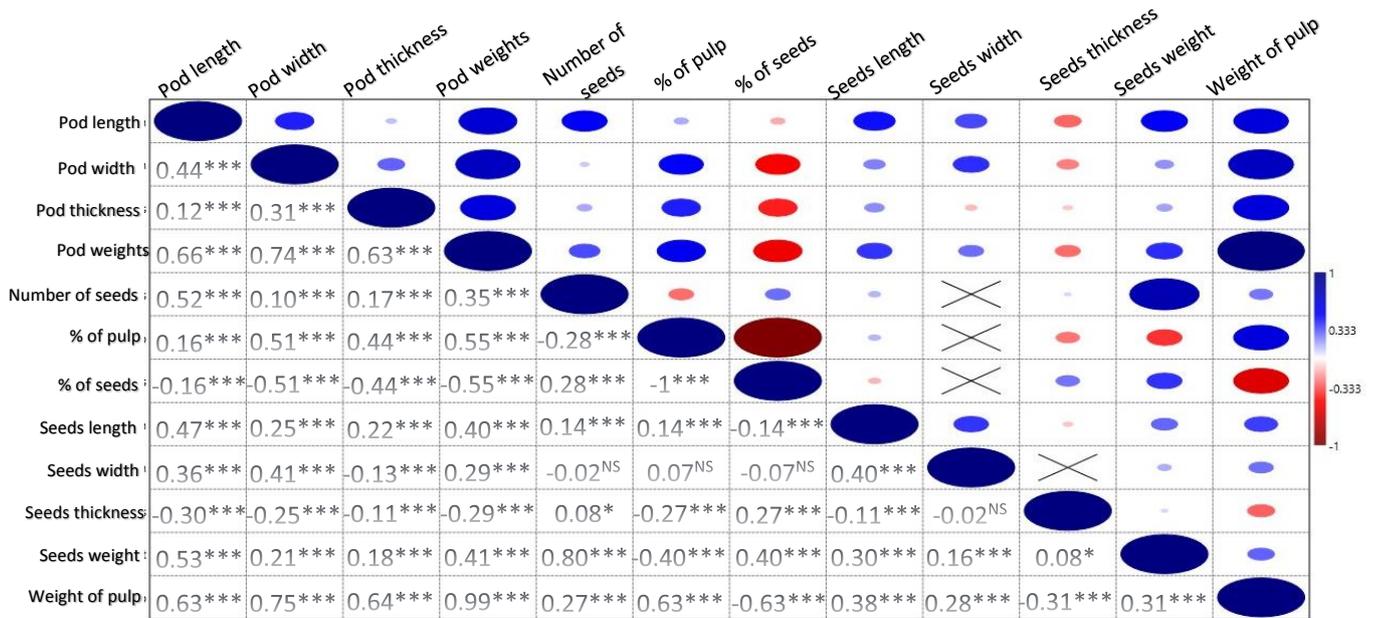


Figure 27. Coefficient de corrélation entre les paramètres morphologiques des gousses et graines de 66 accessions de caroubiers algériens (Niveau de signification statistique : *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, NS : $P > 0.05$ (non significatif)).

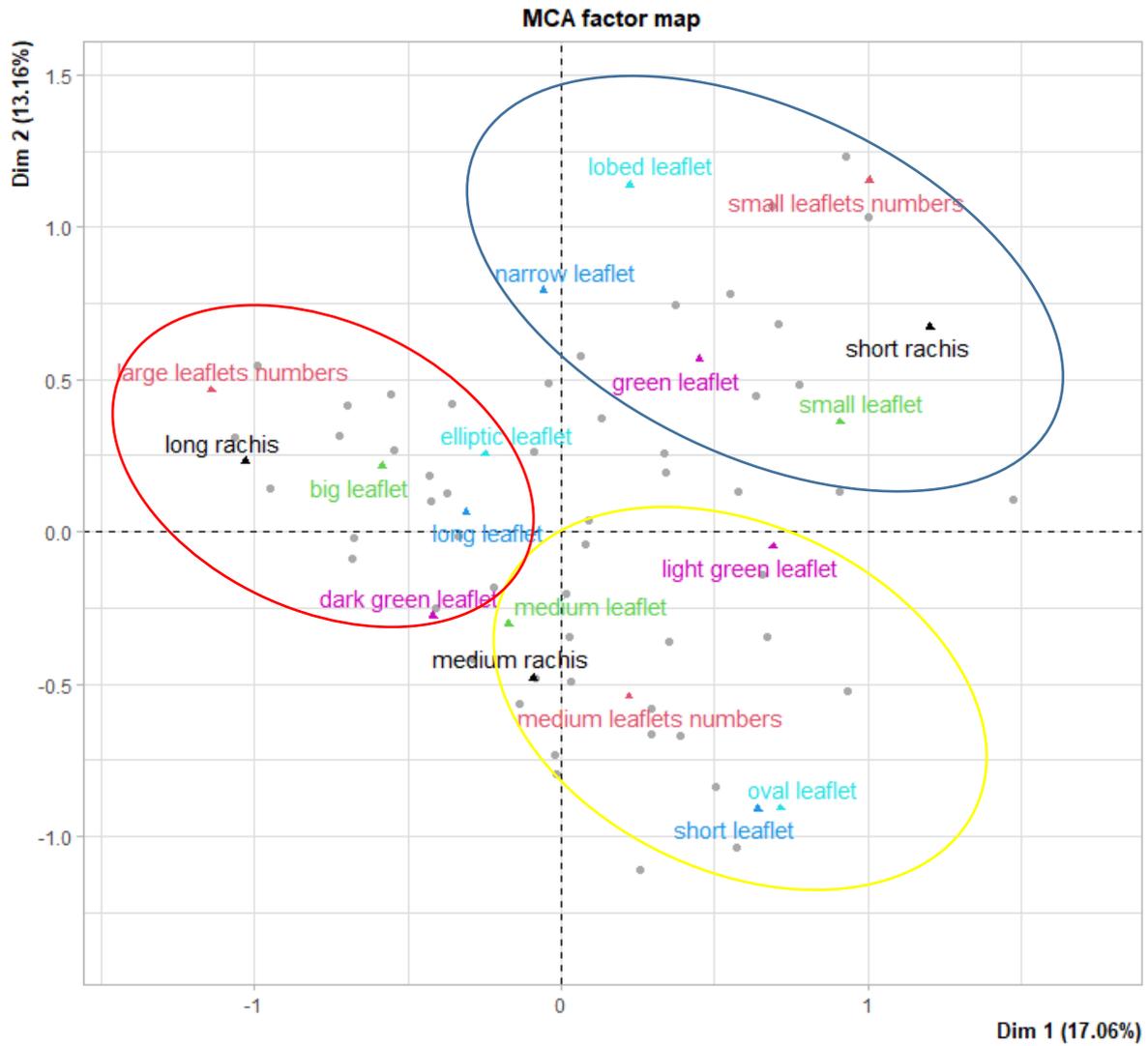


Figure 28. Analyse des Correspondances Multiples de six variables de feuilles appartenant à 66 accessions de caroubiers algériens. L'ACM a regroupé les feuilles de caroubier en trois classes distinctes.

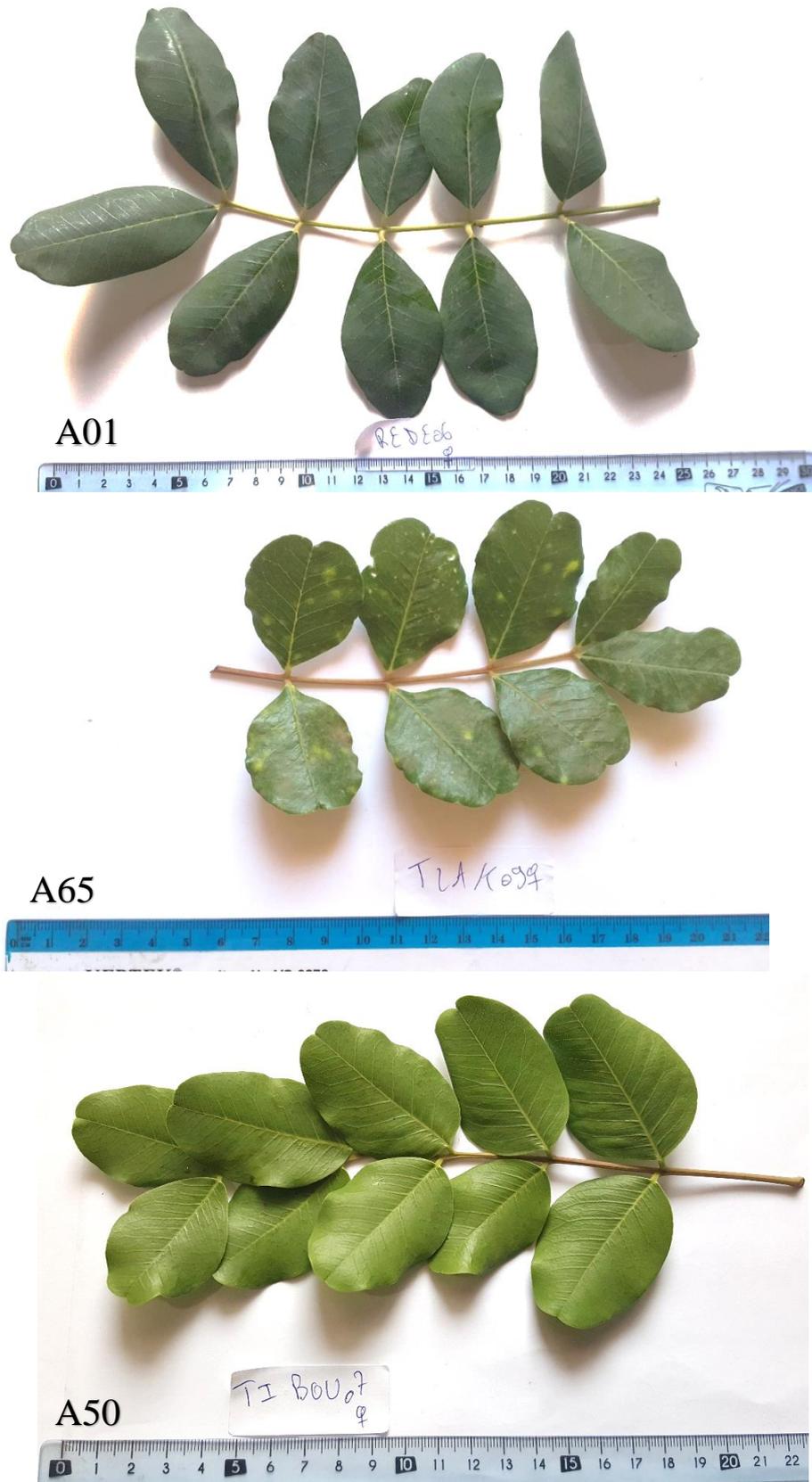


Figure 29. Variabilité des feuilles chez le caroubier (A01 : feuille elliptique de couleur vert foncé ; A65 : feuille lobée de couleur verte ; A50 : feuille ovale de couleur vert clair).

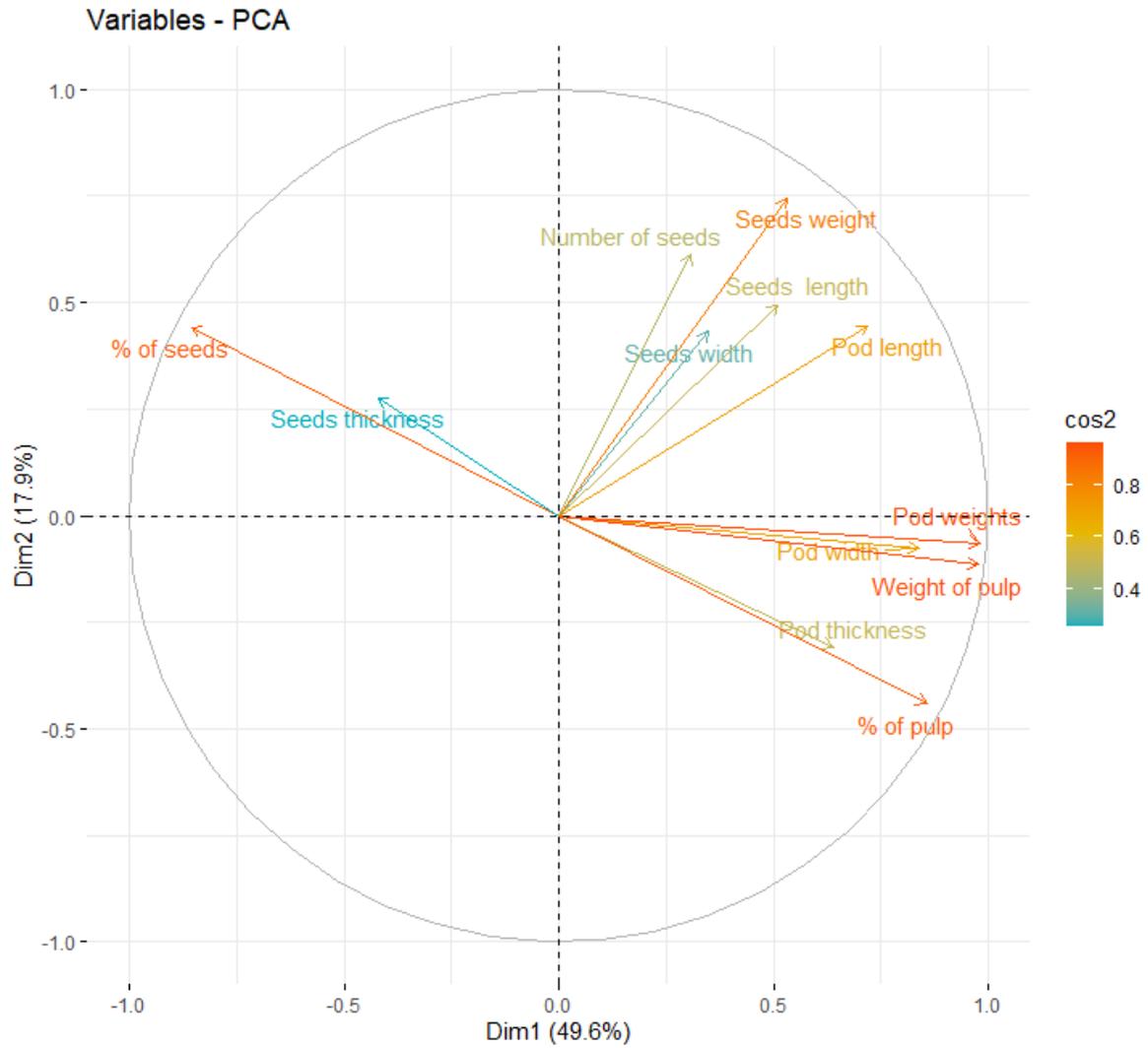


Figure 30. Analyse en Composantes Principales de 12 traits morphologiques (gousses et graines) de 66 accessions de caroubiers algériens.

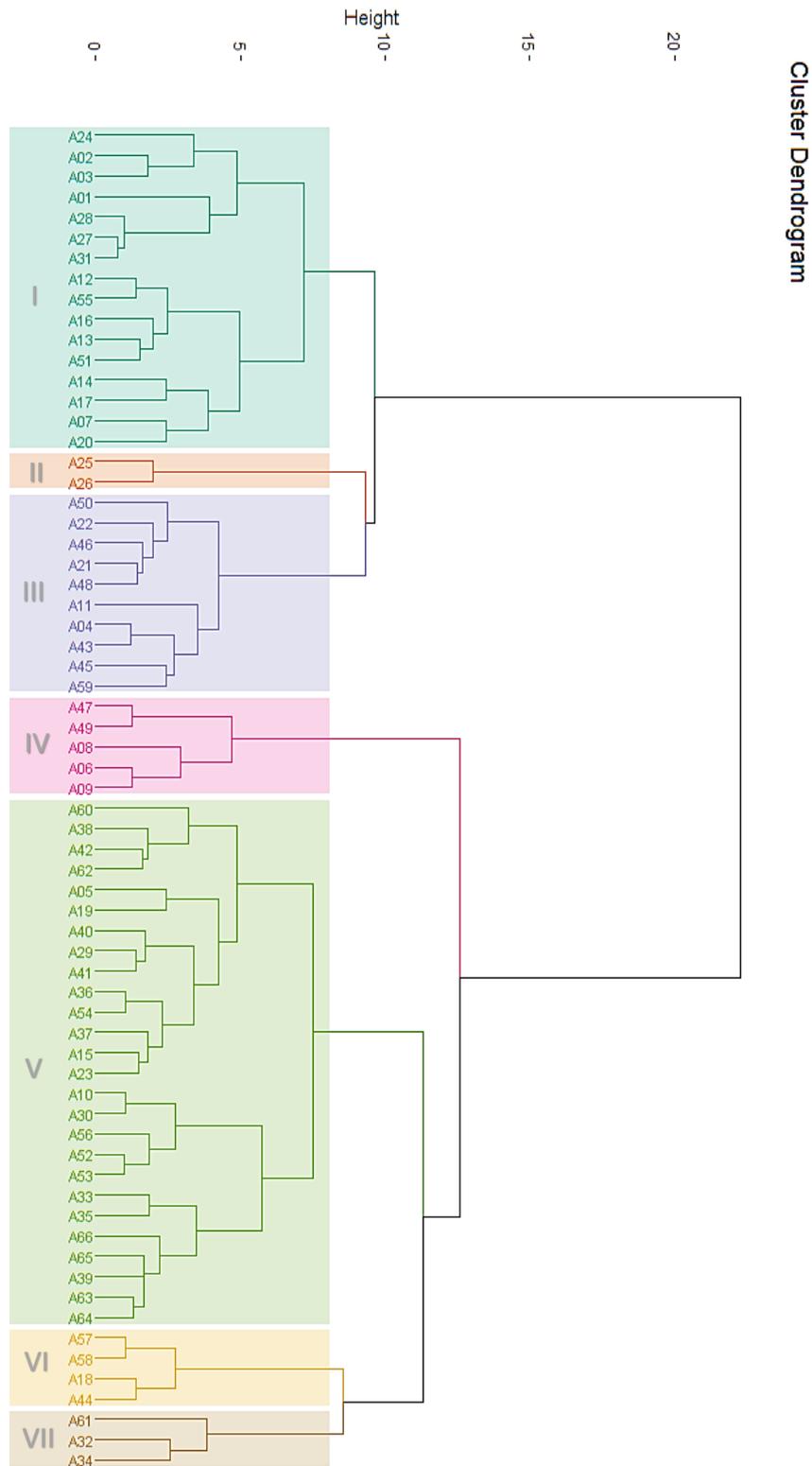


Figure 31. Classification Ascendante Hiérarchique de 66 accessions de caroubiers algériens basée sur leurs 12 traits morphologiques.

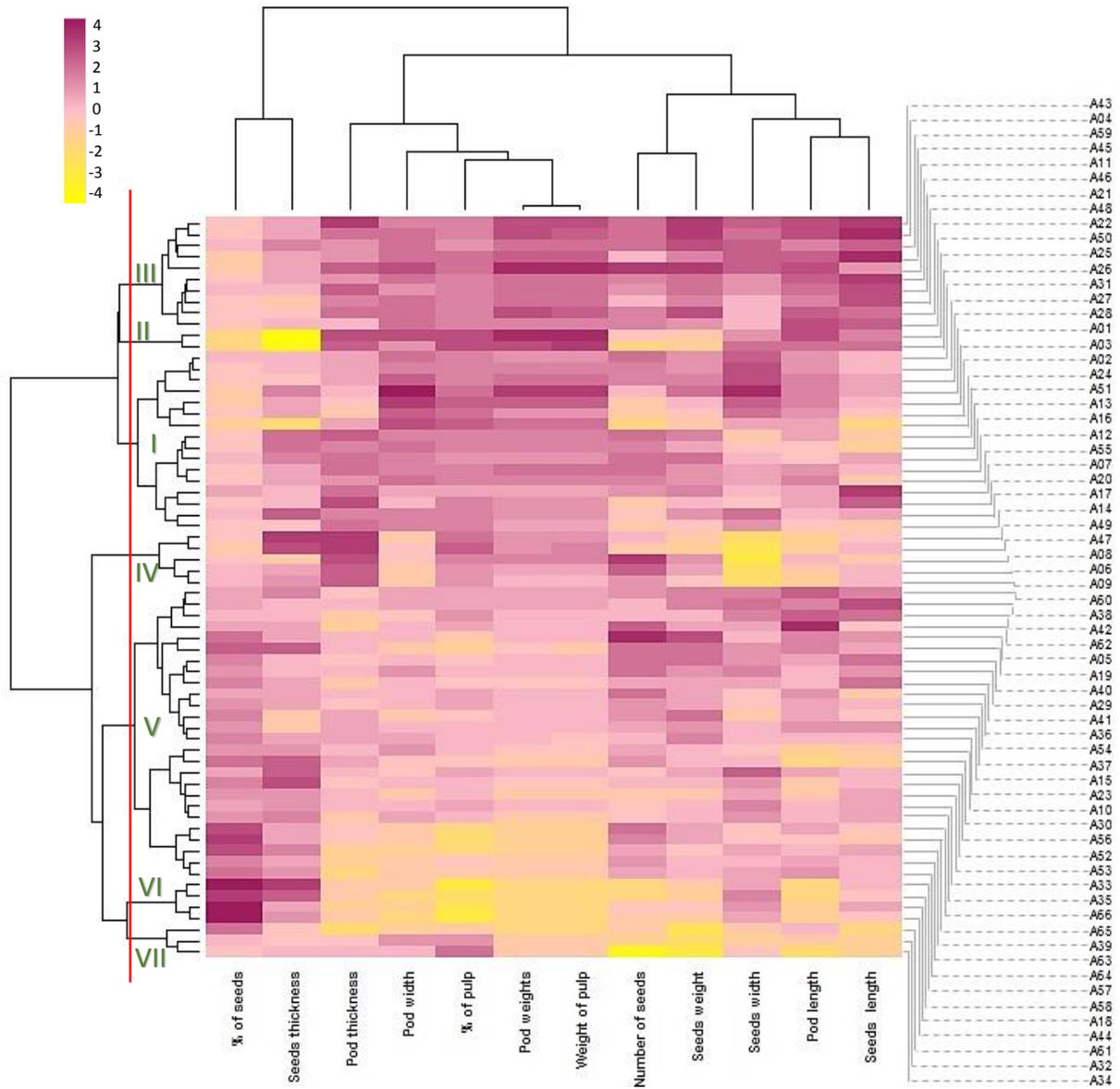


Figure 32. Carte thermique des performances morphologiques de 66 accessions de caroubiers algériens.

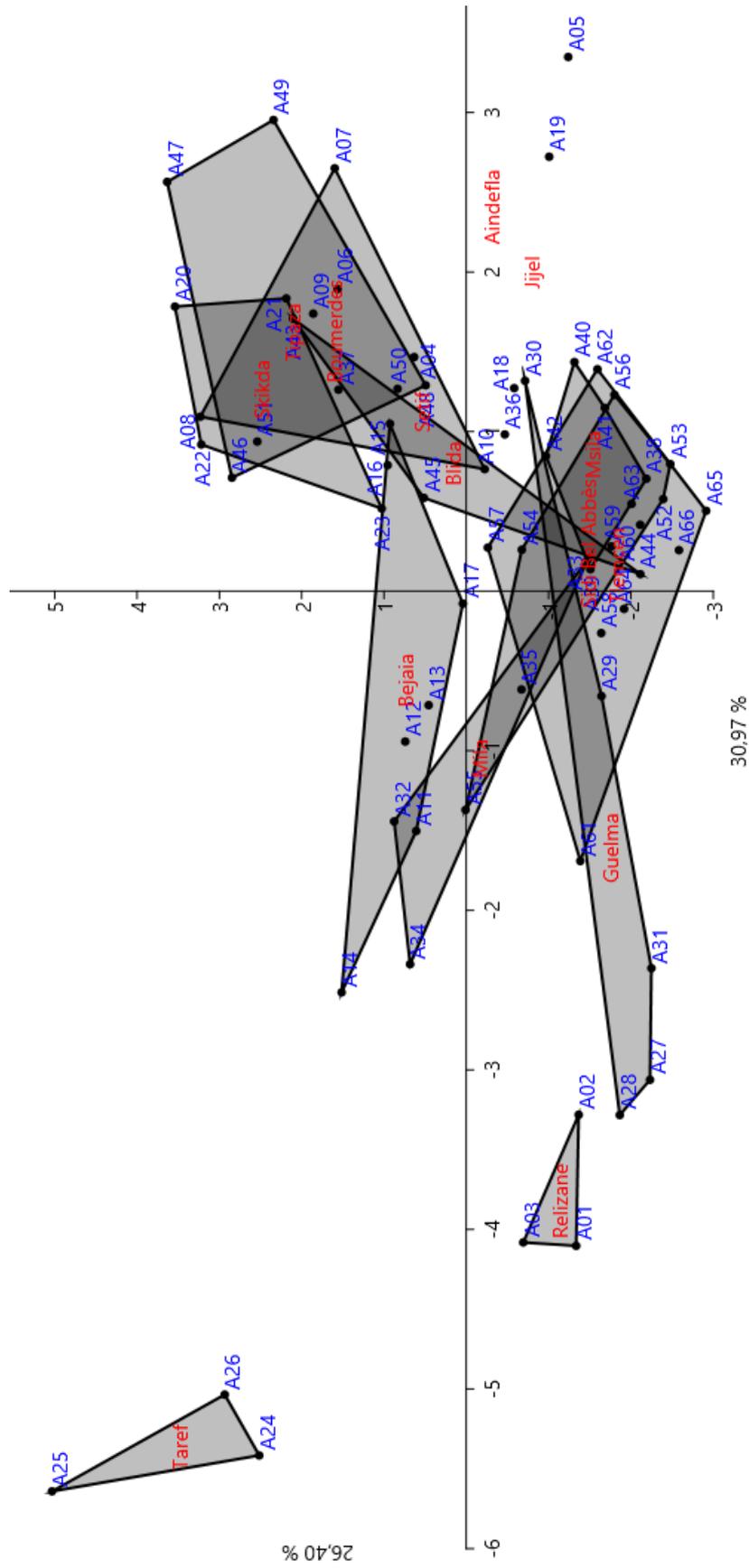


Figure 33. Analyse Discriminante Linéaire de 66 accessions de caroubiers algériens.

Tableau 07. Caractéristiques foliaires de 66 accessions de caroubiers algériens.

Acc	Longueur du Rachis (cm)*	Nombre des folioles*	Surface des folioles (cm ²)*	Longueur / Largeur des folioles*	Forme des folioles	Couleur des folioles
A01	17.26 ±0.82 ^{cdef}	10.0 ±0.00 ^{abc}	27.00 ±1.96 ^{bcdef}	1.73 ±0.02 ^a	elliptique	vert foncé
A02	14.80 ±0.82 ^{efghijklmnopq}	8.8 ±0.49 ^{bcdefgh}	30.36 ±2.86 ^{ab}	1.66 ±0.04 ^{abcde}	elliptique	vert foncé
A03	11.90 ±0.76 ^{klmnopqrstuv}	8.6 ±0.40 ^{bcdefghi}	19.93 ±1.11 ^{hijklmnopq}	1.70 ±0.02 ^{abc}	elliptique	vert foncé
A04	15.22 ±2.37 ^{defghijklmno}	8.4 ±0.75 ^{cdefghij}	23.41 ±3.14 ^{defghijkl}	1.43 ±0.03 ^{lmnopqrstuvwxy}	elliptique	vert foncé
A05	15.12 ±0.49 ^{defghijklmno}	7.8 ±0.66 ^{efghijkl}	20.51 ±3.34 ^{efghijklmnopq}	1.41 ±0.04 ^{opqrstuvwxy}	elliptique	vert foncé
A06	12.46 ±1.21 ^{hijklmnopqrstuv}	8.2 ±0.66 ^{defghij}	20.82 ±2.00 ^{efghijklmnop}	1.34 ±0.05 ^{wxyza'b'}	elliptique	vert foncé
A07	14.44 ±0.96 ^{efghijklmnopqr}	7.0 ±0.63 ^{ijklm}	25.36 ±1.09 ^{bcdefgh}	1.38 ±0.05 ^{rstuvwxyza'}	elliptique	vert
A08	13.44 ±0.88 ^{efghijklmnopqrstu}	6.8 ±0.49 ^{ijklm}	25.26 ±2.96 ^{bcdefghi}	1.46 ±0.03 ^{hijklmnopqrstuvw}	elliptique	vert clair
A09	14.52 ±1.78 ^{efghijklmnopqr}	7.2 ±0.49 ^{hijklm}	23.84 ±2.11 ^{cdefghij}	1.46 ±0.03 ^{hijklmnopqrstuvw}	elliptique	vert
A10	14.92 ±1.23 ^{defghijklmnop}	7.8 ±0.49 ^{efghijkl}	30.19 ±2.03 ^{abc}	1.63 ±0.04 ^{bcdef}	elliptique	vert
A11	15.60 ±1.45 ^{defghijklm}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	20.60 ±2.23 ^{efghijklmnopq}	1.61 ±0.04 ^{abcdefghij}	elliptique	vert clair
A12	11.48 ±1.37 ^{mnpqrstuv}	8.8 ±0.49 ^{bcdefgh}	12.94 ±0.63 ^{rstu}	1.42 ±0.04 ^{mnpqrstuvwxy}	elliptique	vert foncé
A13	12.20 ±1.74 ^{ijklmnopqrstuv}	7.8 ±0.49 ^{efghijkl}	17.80 ±1.93 ^{ijklmnopqrstu}	1.48 ±0.07 ^{efghijklmnopqrstuv}	elliptique	vert clair
A14	22.16 ±1.30 ^a	9.6 ±0.24 ^{abcde}	33.93 ±2.67 ^a	1.67 ±0.07 ^{abcd}	elliptique	vert foncé
A15	14.78 ±0.97 ^{efghijklmnopq}	7.8 ±0.49 ^{efghijkl}	22.02 ±0.16 ^{defghijklmno}	1.28 ±0.02 ^{za'b'}	ovale	vert
A16	10.36 ±0.52 ^{rstuv}	6.4 ±0.51 ^{klm}	20.31 ±0.74 ^{efghijklmnopq}	1.55 ±0.03 ^{cdefghijklmnop}	elliptique	vert
A17	16.65 ±1.51 ^{cdefgh}	9.8 ±0.66 ^{abcd}	23.23 ±1.16 ^{defghijkl}	1.57 ±0.03 ^{bcdefghijklmn}	elliptique	vert foncé
A18	12.74 ±0.62 ^{ghijklmnopqrstuv}	9.6 ±0.24 ^{abcde}	17.54 ±1.55 ^{ijklmnopqrstu}	1.51 ±0.02 ^{efghijklmnopqrs}	elliptique	vert foncé
A19	13.52 ±1.88 ^{efghijklmnopqrstu}	9.0 ±1.00 ^{bcdefg}	24.68 ±2.53 ^{bcdefghi}	1.35 ±0.02 ^{vwxyzza'b'}	ovale	vert
A20	14.40 ±2.26 ^{efghijklmnopqr}	7.2 ±0.49 ^{hijklm}	27.89 ±2.98 ^{bcd}	1.45 ±0.04 ^{klmnopqrstuvw}	elliptique	vert foncé
A21	17.48 ±0.94 ^{bcde}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	27.00 ±3.28 ^{bcde}	1.56 ±0.03 ^{cdefghijklmno}	elliptique	vert foncé
A22	13.50 ±0.82 ^{efghijklmnopqrstu}	8.0 ±0.32 ^{efghijk}	17.87 ±1.39 ^{ijklmnopqrstu}	1.34 ±0.03 ^{vwxyzza'b'}	ovale	vert
A23	15.68 ±0.72 ^{defghijklm}	8.6 ±0.24 ^{bcdefghi}	23.48 ±2.12 ^{defghijk}	1.47 ±0.06 ^{hijklmnopqrstuvw}	elliptique	vert foncé
A24	9.04 ±1.27 ^v	6.4 ±0.75 ^{klm}	12.75 ±0.79 ^{stu}	1.35 ±0.03 ^{tuvwxyzza'b'}	ovale	vert clair
A25	21.08 ±1.23 ^{ab}	10.0 ±0.89 ^{abc}	21.36 ±2.28 ^{defghijklmno}	1.43 ±0.06 ^{mnpqrstuvwxy}	elliptique	vert foncé
A26	19.98 ±1.09 ^{abc}	11.2 ±0.49 ^a	20.83 ±2.71 ^{efghijklmnop}	1.44 ±0.03 ^{klmnopqrstuvwxy}	elliptique	vert foncé
A27	14.02 ±1.62 ^{efghijklmnopqrs}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	19.29 ±2.05 ^{hijklmnopqrs}	1.62 ±0.07 ^{bcdefg}	elliptique	vert foncé
A28	13.30 ±1.38 ^{efghijklmnopqrstu}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	20.29 ±2.09 ^{efghijklmnopq}	1.59 ±0.02 ^{abcdefghijkl}	elliptique	vert foncé
A29	11.74 ±1.28 ^{lmnopqrstuv}	8.0 ±0.55 ^{efghijk}	17.38 ±1.31 ^{ijklmnopqrstu}	1.58 ±0.04 ^{abcdefghijklm}	elliptique	vert foncé
A30	16.56 ±1.76 ^{cdefghi}	8.0 ±0.84 ^{efghijk}	13.83 ±1.73 ^{qrstu}	1.36 ±0.04 ^{stuvwxyzza'b'}	ovale	vert foncé
A31	12.00 ±0.62 ^{ijklmnopqrstu}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	15.76 ±1.20 ^{mnpqrstu}	1.61 ±0.07 ^{abcdefghij}	elliptique	vert foncé
A32	10.42 ±1.63 ^{rstuv}	8.8 ±0.49 ^{bcdefgh}	17.10 ±1.93 ^{ijklmnopqrstu}	1.60 ±0.07 ^{abcdefghijk}	elliptique	vert foncé
A33	10.62 ±0.48 ^{qrstuv}	8.0 ±0.00 ^{efghijk}	13.74 ±1.01 ^{qrstu}	1.59 ±0.04 ^{abcdefghijkl}	elliptique	vert
A34	9.36 ±0.83 ^{uv}	7.0 ±0.63 ^{ijklm}	11.49 ±0.47 ^u	1.61 ±0.04 ^{abcdefghij}	elliptique	vert clair
A35	9.36 ±0.72 ^{uv}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	13.91 ±1.48 ^{qrstu}	1.72 ±0.03 ^{ab}	elliptique	vert clair
A36	20.06 ±2.04 ^{abc}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	22.56 ±1.62 ^{efghijklmno}	1.50 ±0.03 ^{ghijklmnopqrst}	elliptique	vert foncé
A37	9.48 ±0.81 ^{uv}	7.6 ±0.24 ^{ghijklm}	15.83 ±0.89 ^{mnpqrstu}	1.32 ±0.07 ^{wxyzza'b'}	ovale	vert foncé
A38	13.22 ±0.75 ^{efghijklmnopqrstu}	8.2 ±0.66 ^{defghij}	13.96 ±1.19 ^{pqrstu}	1.62 ±0.07 ^{abcdefgh}	elliptique	vert foncé
A39	16.16 ±0.74 ^{cdefghijk}	10.2 ±0.20 ^{ab}	17.38 ±2.56 ^{ijklmnopqrstu}	1.49 ±0.04 ^{efghijklmnopqrstu}	elliptique	vert
A40	13.58 ±2.81 ^{efghijklmnopqrstu}	7.6 ±0.68 ^{ghijklm}	25.12 ±4.48 ^{bcdefghi}	1.35 ±0.06 ^{vwxyzza'b'}	elliptique	vert foncé
A41	13.18 ±0.31 ^{efghijklmnopqrstu}	10.0 ±0.00 ^{abc}	14.07 ±0.51 ^{pqrstu}	1.44 ±0.04 ^{klmnopqrstuvwxy}	elliptique	vert foncé
A42	13.92 ±1.10 ^{efghijklmnopqrs}	8.2 ±0.66 ^{defghij}	17.72 ±1.66 ^{ijklmnopqrstu}	1.45 ±0.02 ^{klmnopqrstuvw}	ovale	vert foncé
A43	15.34 ±1.49 ^{defghijklmn}	10.2 ±0.20 ^{ab}	22.85 ±2.04 ^{defghijklm}	1.72 ±0.08 ^{ab}	elliptique	vert foncé
A44	10.08 ±0.48 ^{uv}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	15.36 ±0.78 ^{opqrstu}	1.41 ±0.02 ^{opqrstuvwxy}	elliptique	vert
A45	11.94 ±1.36 ^{klmnopqrstu}	8.6 ±0.60 ^{bcdefghi}	16.10 ±1.11 ^{mnpqrstu}	1.49 ±0.04 ^{efghijklmnopqrstu}	elliptique	vert foncé
A46	12.34 ±1.28 ^{ijklmnopqrstu}	8.6 ±0.60 ^{bcdefghi}	15.77 ±1.93 ^{mnpqrstu}	1.45 ±0.02 ^{klmnopqrstuvw}	ovale	vert foncé
A47	11.56 ±1.33 ^{mnpqrstu}	8.2 ±0.37 ^{defghij}	18.49 ±2.05 ^{ijklmnopqrstu}	1.25 ±0.02 ^{a'b'}	ovale	vert clair
A48	12.06 ±0.70 ^{ijklmnopqrstu}	8.6 ±0.40 ^{bcdefghi}	15.85 ±1.61 ^{mnpqrstu}	1.46 ±0.05 ^{ijklmnopqrstuvw}	elliptique	vert foncé
A49	12.10 ±0.24 ^{ijklmnopqrstu}	7.2 ±0.49 ^{hijklm}	26.95 ±1.52 ^{bcdefg}	1.43 ±0.03 ^{mnpqrstuvwxy}	ovale	vert
A50	16.86 ±0.85 ^{cdefg}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	20.82 ±0.99 ^{efghijklmnop}	1.40 ±0.02 ^{pqrstuvwxy}	ovale	vert clair
A51	15.58 ±0.65 ^{defghijklm}	10.0 ±0.63 ^{abc}	18.71 ±1.18 ^{hijklmnopqrstu}	1.52 ±0.03 ^{defghijklmnopqr}	elliptique	vert foncé
A52	9.10 ±0.51 ^v	6.2 ±0.20 ^{lm}	17.50 ±2.52 ^{ijklmnopqrstu}	1.55 ±0.06 ^{defghijklmnopq}	ovale	vert foncé
A53	11.38 ±0.56 ^{mnpqrstu}	7.6 ±0.24 ^{ghijklm}	19.83 ±0.93 ^{hijklmnopq}	1.29 ±0.03 ^{yzza'b'}	elliptique	vert foncé
A54	11.24 ±1.09 ^{mnpqrstu}	7.2 ±0.49 ^{hijklm}	18.60 ±1.52 ^{hijklmnopqrstu}	1.66 ±0.04 ^{abcde}	elliptique	vert foncé
A55	16.28 ±0.58 ^{cdefghij}	10.0 ±0.32 ^{abc}	15.33 ±0.54 ^{opqrstu}	1.72 ±0.04 ^{ab}	ovale	vert
A56	18.96 ±0.66 ^{abcd}	9.4 ±0.40 ^{bcdef}	25.02 ±1.99 ^{bcdefghi}	1.39 ±0.04 ^{qrstuvwxyza'}	elliptique	vert
A57	10.62 ±0.36 ^{pqrstuv}	8.0 ±0.00 ^{efghijk}	11.91 ±1.17 ^{tu}	1.62 ±0.04 ^{abcdefghi}	elliptique	vert
A58	9.04 ±0.42 ^v	6.0 ±0.00 ^m	15.21 ±1.15 ^{opqrstu}	1.61 ±0.02 ^{abcdefghi}	elliptique	vert
A59	13.88 ±0.85 ^{efghijklmnopqrs}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	16.72 ±1.88 ^{klmnopqrstu}	1.54 ±0.03 ^{defghijklmnopq}	elliptique	vert
A60	17.00 ±1.25 ^{cdefg}	8.4 ±0.24 ^{defghij}	20.27 ±0.99 ^{ghijklmnopq}	1.43 ±0.04 ^{mnpqrstuvwxy}	lobée	vert foncé
A61	14.16 ±0.48 ^{efghijklmnopqrs}	8.0 ±0.32 ^{efghijk}	17.41 ±0.88 ^{ijklmnopqrstu}	1.23 ±0.04 ^{b'}	ovale	vert foncé
A62	13.70 ±1.41 ^{efghijklmnopqrstu}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	16.60 ±1.14 ^{lmnopqrstu}	1.73 ±0.08 ^a	elliptique	vert
A63	10.96 ±1.07 ^{opqrstu}	8.2 ±0.49 ^{defghij}	19.70 ±2.76 ^{hijklmnopqr}	1.54 ±0.04 ^{defghijklmnopq}	ovale	vert clair
A64	11.00 ±0.71 ^{opqrstu}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	15.44 ±0.90 ^{opqrstu}	1.57 ±0.04 ^{bcdefghijklmn}	elliptique	vert
A65	11.16 ±1.40 ^{mnpqrstu}	6.4 ±0.51 ^{klm}	17.44 ±1.42 ^{ijklmnopqrstu}	1.46 ±0.05 ^{ijklmnopqrstuvw}	lobée	vert
A66	15.92 ±1.62 ^{defghijkl}	9.0 ±0.45 ^{bcdefg}	20.61 ±3.42 ^{efghijklmnopq}	1.60 ±0.01 ^{abcdefghij}	ovale	vert clair
Mini	9.04	6.0	11.49	1.23		
Max	22.16	11.2	33.93	1.73		
Mean	13.70	8.32	19.68	1.50		
CV%	21.85	13.74	24.41	8.41		

Acc: Accession. Les moyennes avec des lettres distinctes dans la même colonne sont significativement différentes ($P < 0.05$).* Différence hautement significative ($P < 0.001$).

Tableau 08. Caractéristiques des gousses de 66 accessions de caroubiers algériens.

Acc	Longueur (cm)*	Largeur (cm)*	Épaisseur (cm)*	Poids des gousses (g)*	Poids de la pulpe (g)*	% de la pulpe*
A01	16.41 ±0.22 ^{fg hij}	3.07 ±0.03 ^a	0.56 ±0.02 ^{stuvw}	25.10 ±0.61 ^b	22.76 ±0.59 ^b	90.59 ±0.39 ^{bcd}
A02	15.39 ±0.27 ^{klmn}	2.61 ±0.05 ^{cd}	0.47 ±0.02 ^{c'd'e'f}	16.43 ±0.67 ^{lmnop}	14.72 ±0.59 ^{ijkl}	89.74 ±0.67 ^{bcdefg}
A03	16.51 ±0.35 ^{ghij}	2.83 ±0.06 ^b	0.51 ±0.02 ^{wxyz a'b'c'}	21.55 ±1.06 ^{de}	19.70 ±0.98 ^{cd}	91.46 ±0.63 ^{abc}
A04	18.04 ±0.26 ^{bcd}	2.47 ±0.02 ^{ef}	0.77 ±0.02 ^{hij}	23.13 ±0.62 ^{cd}	20.49 ±0.54 ^c	88.67 ±0.39 ^{bcdefghij}
A05	16.63 ±0.28 ^{fg hi}	1.74 ±0.02 ^{yz a'}	0.57 ±0.01 ^{stuvw}	10.87 ±0.37 ^{yz b'c'}	8.51 ±0.34 ^{yz}	78.00 ±1.15 ^{yz a'}
A06	12.85 ±0.18 ^{tuv}	1.74 ±0.03 ^{yz a'}	0.87 ±0.02 ^{cdef}	15.03 ±0.44 ^{opqrs}	13.09 ±0.40 ^{mnop}	87.00 ±0.63 ^{ghijklmnop}
A07	14.87 ±0.27 ^{mno pq}	2.08 ±0.02 ^{no p}	0.78 ±0.01 ^{ghij}	14.73 ±0.43 ^{qrst}	12.47 ±0.34 ^{nopqr}	84.85 ±0.95 ^{nopqrstuv}
A08	14.44 ±0.21 ^{nopqr}	1.92 ±0.03 ^{tuv}	0.89 ±0.02 ^{cd}	19.30 ±0.58 ^{fg hi}	17.17 ±0.53 ^{fg h}	88.92 ±0.67 ^{bcdefghi}
A09	12.14 ±0.18 ^{vwxy}	1.75 ±0.02 ^{yz a'}	0.87 ±0.02 ^{cdef}	13.80 ±0.40 ^{rstv}	12.04 ±0.36 ^{nopqrs}	87.28 ±0.94 ^{fg hijklmno}
A10	13.59 ±0.25 ^{rst}	1.76 ±0.02 ^{yz a'}	0.50 ±0.02 ^{xyz a'b'c'}	7.83 ±0.25 ^{c'}	5.87 ±0.26 ^{b'c'd'}	74.19 ±1.55 ^{b'c'}
A11	18.42 ±0.21 ^{bc}	2.67 ±0.03 ^c	0.84 ±0.02 ^{ef}	27.40 ±0.55 ^a	24.73 ±0.51 ^a	90.22 ±0.30 ^{bcdef}
A12	15.50 ±0.18 ^{ijklm}	2.37 ±0.03 ^{fg hij}	0.82 ±0.02 ^{efg}	19.77 ±0.40 ^{efgh}	17.63 ±0.37 ^{fg}	89.20 ±0.60 ^{bcdefghi}
A13	13.46 ±0.31 ^{stu}	2.45 ±0.06 ^{ef}	0.73 ±0.02 ^{jk}	17.93 ±0.80 ^{ijkl}	15.96 ±0.71 ^{hijk}	89.11 ±0.77 ^{bcdefghi}
A14	13.43 ±0.26 ^{stu}	2.34 ±0.04 ^{ghij}	0.79 ±0.03 ^{ghi}	15.40 ±0.71 ^{nopqr}	13.60 ±0.65 ^{lmn}	88.06 ±0.98 ^{cefghijklm}
A15	14.26 ±0.22 ^{opqrs}	2.08 ±0.02 ^{no p}	0.60 ±0.02 ^{pqrst}	12.43 ±0.48 ^{xy}	10.23 ±0.38 ^{uvwxy}	82.52 ±0.75 ^{rstuvwxy}
A16	13.91 ±0.22 ^{qrs}	2.37 ±0.03 ^{fg h}	0.80 ±0.01 ^{ghi}	17.27 ±0.38 ^{ijklm}	14.90 ±0.34 ^{ijkl}	86.28 ±0.39 ^{ijklmnopq}
A17	14.14 ±0.23 ^{pqrs}	2.39 ±0.03 ^{fg}	0.75 ±0.01 ^{ijk}	16.77 ±0.49 ^{klmno}	14.69 ±0.42 ^{jkl}	87.78 ±0.79 ^{efghijklm}
A18	11.34 ±0.19 ^{yz}	1.74 ±0.04 ^{yz a'}	0.44 ±0.01 ^{d'e'f'g'h'}	5.80 ±0.21 ^f	4.17 ±0.19 ^{e'}	71.37 ±1.59 ^{d'}
A19	16.56 ±0.25 ^{ghi}	1.95 ±0.03 ^{rstuv}	0.55 ±0.01 ^{vwxyz a'}	13.20 ±0.31 ^{uwxy}	10.61 ±0.27 ^{stuvw}	80.39 ±0.68 ^{yz a'}
A20	15.19 ±0.41 ^{lmno}	2.02 ±0.05 ^{opqrst}	0.92 ±0.02 ^{abc}	17.03 ±0.88 ^{ijklmno}	15.20 ±0.83 ^{ijk}	89.14 ±0.83 ^{bcdefghi}
A21	16.86 ±0.37 ^{fg hi}	2.19 ±0.04 ^{kl}	0.86 ±0.02 ^{def}	20.00 ±0.88 ^{efg}	17.67 ±0.87 ^{efg}	87.84 ±0.85 ^{efghijklm}
A22	17.88 ±0.38 ^{bcde}	2.42 ±0.03 ^{fg}	0.80 ±0.03 ^{fg h}	23.07 ±1.04 ^{cd}	20.47 ±0.94 ^c	88.79 ±0.58 ^{bcdefghi}
A23	15.39 ±0.31 ^{klmn}	1.98 ±0.02 ^{qrstu}	0.63 ±0.02 ^{nopqr}	13.60 ±0.54 ^{rstvw}	11.46 ±0.51 ^{qrstu}	83.98 ±1.05 ^{pqrstuvw}
A24	14.94 ±0.26 ^{mno p}	2.64 ±0.03 ^c	0.64 ±0.01 ^{mnopqr}	20.10 ±0.53 ^{ef}	18.46 ±0.52 ^{def}	91.69 ±0.18 ^{ab}
A25	18.34 ±0.36 ^{bc}	2.70 ±0.06 ^c	0.91 ±0.02 ^{bcd}	26.67 ±1.20 ^a	25.03 ±1.17 ^a	93.66 ±0.54 ^a
A26	16.99 ±0.37 ^{efgh}	2.27 ±0.04 ^{hijk}	0.84 ±0.02 ^{efg}	24.03 ±0.86 ^{bc}	22.56 ±0.82 ^b	93.80 ±0.24 ^a
A27	15.49 ±0.21 ^{ijklm}	2.39 ±0.02 ^{fg}	0.63 ±0.01 ^{nopqr}	18.20 ±0.44 ^{hijkl}	16.09 ±0.39 ^{hij}	88.43 ±0.39 ^{cdefghijk}
A28	16.03 ±0.24 ^{ijkl}	2.55 ±0.02 ^{de}	0.63 ±0.02 ^{opqr}	19.87 ±0.55 ^{efgh}	17.69 ±0.49 ^{efg}	89.13 ±0.47 ^{bcdefghi}
A29	14.14 ±0.28 ^{pqrs}	2.19 ±0.02 ^{kl}	0.59 ±0.01 ^{qrstuv}	12.70 ±0.32 ^{tuwxy}	10.56 ±0.27 ^{stuvw}	83.13 ±0.49 ^{rstuvwxy}
A30	14.91 ±0.23 ^{mno p}	1.73 ±0.02 ^{yz a'}	0.49 ±0.01 ^{c'd'e'}	8.63 ±0.23 ^{d'e'}	6.63 ±0.21 ^{a'b'}	76.85 ±1.31 ^{z a'}
A31	15.94 ±0.29 ^{ijkl}	2.41 ±0.02 ^{fg}	0.60 ±0.01 ^{pqrstuv}	17.37 ±0.46 ^{ijklm}	15.21 ±0.39 ^{ijk}	87.72 ±0.43 ^{efghijklm}
A32	12.89 ±0.31 ^{tuv}	2.18 ±0.03 ^{klmn}	0.49 ±0.01 ^{ya'b'c'}	9.70 ±0.39 ^{c'd'}	8.40 ±0.34 ^{yz}	86.63 ±0.72 ^{ghijklmnopq}
A33	11.64 ±0.30 ^{xyz}	1.86 ±0.03 ^{vwxy}	0.61 ±0.01 ^{pqrst}	9.67 ±0.40 ^{c'd'}	7.76 ±0.31 ^{yz a'}	80.75 ±1.02 ^{xyz}
A34	11.20 ±0.30 ^z	2.00 ±0.04 ^{pqrst}	0.57 ±0.02 ^{stuvw}	9.60 ±0.37 ^{c'd'}	8.57 ±0.31 ^{yz}	89.45 ±0.48 ^{bcdefgh}
A35	12.56 ±0.26 ^{vwxy}	2.18 ±0.03 ^{klm}	0.55 ±0.01 ^{tuvwxyz}	11.23 ±0.33 ^{xyb'c'}	9.35 ±0.24 ^{vwxyz}	83.82 ±1.29 ^{qrstuvwxy}
A36	15.12 ±0.35 ^{lmno}	1.98 ±0.05 ^{pqrst}	0.50 ±0.02 ^{yz a'b'c'}	12.93 ±0.55 ^{tuwxy}	10.89 ±0.47 ^{rstuv}	84.20 ±0.60 ^{pqrstuvw}
A37	14.67 ±0.25 ^{mno p}	1.80 ±0.02 ^{wxyz}	0.62 ±0.01 ^{pqrs}	13.23 ±0.41 ^{tuwxy}	10.84 ±0.34 ^{stuv}	82.03 ±0.95 ^{stuvwxy}
A38	17.94 ±0.43 ^{bcd}	1.93 ±0.02 ^{stuv}	0.43 ±0.01 ^{e'f'g'h'}	13.90 ±0.55 ^{qrstv}	11.98 ±0.45 ^{opqrst}	86.50 ±0.69 ^{hijklmnopq}
A39	12.71 ±0.31 ^{tuv}	1.80 ±0.03 ^{wxyz}	0.57 ±0.01 ^{stuvw}	10.03 ±0.46 ^{a'c'd'}	8.40 ±0.43 ^{yz}	83.24 ±1.09 ^{rstuvwxy}
A40	14.51 ±0.22 ^{opqrs}	1.95 ±0.02 ^{rstuv}	0.48 ±0.01 ^{c'd'e'f}	11.17 ±0.35 ^{z b'c'}	9.13 ±0.27 ^{wxy}	82.07 ±0.98 ^{stuvwxy}
A41	15.29 ±0.29 ^{lmn}	2.03 ±0.02 ^{opqrs}	0.50 ±0.02 ^{xyz a'b'c'}	12.70 ±0.53 ^{tuwxy}	10.37 ±0.46 ^{tuvwxy}	81.38 ±0.69 ^{wxyz}
A42	16.30 ±0.27 ^{hijk}	2.11 ±0.02 ^{lmno}	0.59 ±0.02 ^{pqrstuv}	15.07 ±0.42 ^{opqrs}	12.86 ±0.42 ^{no pq}	85.08 ±0.66 ^{mnopqrstuv}
A43	18.38 ±0.40 ^{bc}	2.37 ±0.03 ^{fg hi}	0.95 ±0.02 ^{ab}	24.67 ±0.66 ^{bc}	21.96 ±0.63 ^b	88.88 ±0.31 ^{bcdefghi}
A44	11.75 ±0.23 ^{wxyz}	1.54 ±0.04 ^{b'}	0.45 ±0.01 ^{c'd'e'f'g'}	6.17 ±0.20 ^{e'f'}	4.60 ±0.20 ^{c'd'e'}	74.35 ±1.60 ^{b'c'}
A45	17.50 ±0.37 ^{cdef}	2.45 ±0.03 ^{ef}	0.71 ±0.02 ^k	21.48 ±0.87 ^{de}	19.28 ±0.77 ^{cde}	89.88 ±0.74 ^{bcdefg}
A46	16.32 ±0.29 ^{hijk}	2.44 ±0.03 ^{fg}	0.76 ±0.02 ^{ij}	20.30 ±0.44 ^{ef}	18.06 ±0.42 ^{def}	88.86 ±0.43 ^{bcdefghi}
A47	12.21 ±0.19 ^{vwxy}	1.88 ±0.02 ^{uvw}	0.97 ±0.02 ^a	17.27 ±0.48 ^{ijklmno}	15.77 ±0.45 ^{hijk}	91.31 ±0.46 ^{abcd}
A48	17.52 ±0.34 ^{cdef}	2.44 ±0.02 ^{fg}	0.69 ±0.02 ^{kl}	20.33 ±0.62 ^{ef}	18.03 ±0.52 ^{def}	88.81 ±0.48 ^{bcdefghi}
A49	12.04 ±0.15 ^{wxyz}	1.76 ±0.02 ^{xyz a'}	0.97 ±0.02 ^a	16.10 ±0.36 ^{mnopq}	14.41 ±0.30 ^{klm}	89.64 ±0.60 ^{bcdefgh}
A50	18.65 ±0.31 ^{ab}	2.47 ±0.02 ^{ef}	0.55 ±0.02 ^{tuvwxyz}	17.93 ±0.55 ^{ijkl}	15.82 ±0.49 ^{hijk}	88.26 ±0.56 ^{cdefghijkl}
A51	14.83 ±0.22 ^{mno p}	2.37 ±0.03 ^{fg}	0.88 ±0.02 ^{cde}	18.67 ±0.49 ^{fg hij}	16.43 ±0.44 ^{ghi}	88.11 ±0.72 ^{cefghijklm}
A52	15.58 ±0.30 ^{ijklm}	1.77 ±0.03 ^{xyz}	0.34 ±0.02 ^{jk'}	9.03 ±0.38 ^{d'e'}	7.17 ±0.30 ^{z a'b'}	79.68 ±1.17 ^{yz a'}
A53	15.25 ±0.22 ^{lmn}	1.74 ±0.03 ^{yz a'}	0.39 ±0.02 ^{hi'}	10.00 ±0.32 ^{c'd'}	8.17 ±0.29 ^{yz}	81.55 ±1.23 ^{wxyz}
A54	15.94 ±0.24 ^{ijkl}	1.99 ±0.05 ^{pqrst}	0.55 ±0.03 ^{tuvwxy}	13.50 ±0.48 ^{stvwxy}	11.49 ±0.49 ^{pqrst}	84.62 ±0.93 ^{opqrstuv}
A55	16.01 ±0.21 ^{ijkl}	2.44 ±0.04 ^{fg}	0.66 ±0.01 ^{klm}	18.33 ±0.50 ^{ghijk}	16.23 ±0.49 ^{ghij}	88.42 ±0.68 ^{cdefghijk}
A56	14.63 ±0.27 ^{mno p}	1.71 ±0.04 ^{z a'}	0.38 ±0.02 ^{ij'}	7.73 ±0.47 ^{c'}	5.98 ±0.43 ^{b'c'}	75.91 ±1.69 ^{a'b'}
A57	12.55 ±0.22 ^{vwxy}	1.57 ±0.02 ^{b'}	0.47 ±0.01 ^{c'd'e'f}	6.03 ±0.16 ^{f'}	4.34 ±0.17 ^{d'e'}	71.47 ±1.57 ^{d'}
A58	12.10 ±0.22 ^{wxyz}	1.66 ±0.02 ^{a'}	0.39 ±0.01 ^{hi'}	6.63 ±0.32 ^{e'f'}	4.84 ±0.29 ^{c'd'e'}	72.30 ±1.66 ^{c'd'}
A59	16.10 ±0.26 ^{hijkl}	2.43 ±0.03 ^{fg}	0.65 ±0.02 ^{lmnopq}	20.32 ±0.60 ^{ef}	17.79 ±0.54 ^{efg}	87.53 ±0.52 ^{efghijklmno}
A60	19.36 ±0.35 ^a	2.06 ±0.03 ^{opqr}	0.40 ±0.02 ^{gh'i'}	13.61 ±0.44 ^{pqrst}	11.61 ±0.45 ^{pqrst}	85.10 ±0.92 ^{lmnopqrstu}
A61	14.27 ±0.13 ^{opqrs}	1.71 ±0.02 ^{z a'}	0.29 ±0.02 ^{k'}	5.97 ±0.15 ^{f'}	4.80 ±0.16 ^{c'd'e'}	80.51 ±1.74 ^{xyz}
A62	17.35 ±0.38 ^{defg}	2.12 ±0.04 ^{lmno}	0.48 ±0.02 ^{c'd'e'f}	15.75 ±0.81 ^{mnopqr}	13.50 ±0.76 ^{lmno}	85.35 ±0.95 ^{klmnopqrst}
A63	14.47 ±0.69 ^{opqrs}	2.08 ±0.04 ^{mnopq}	0.42 ±0.01 ^{f'g'h'i'}	10.19 ±0.73 ^{z a'c'd'}	8.34 ±0.57 ^{yz}	82.96 ±1.07 ^{rstuvwxy}
A64	14.05 ±0.34 ^{pqrs}	1.97 ±0.03 ^{qrst}	0.54 ±0.01 ^{vwxyz a'b'}	12.64 ±0.55 ^{uwx}	10.80 ±0.47 ^{stuv}	85.60 ±0.80 ^{ijklmnopqr}
A65	12.63 ±0.34 ^{uvw}	1.96 ±0.03 ^{stuv}	0.49 ±0.01 ^{b'c'd'}	10.83 ±0.43 ^{z a'c'}	8.92 ±0.35 ^{xy}	82.66 ±1.09 ^{rstuvwxy}
A66	14.89 ±0.62 ^{lmnopq}	1.85 ±0.05 ^{vwxyz}	0.58 ±0.03 ^{rstuvw}	13.60 ±1.21 ^{stvwxy}	11.60 ±1.02 ^{opqrst}	85.43 ±0.70 ^{ijklmnopqr}

Acc: Accession.

Les moyennes avec des lettres distinctes dans la même colonne sont significativement différentes ($P < 0,05$).

* Différence hautement significative ($P < 0.001$).

Tableau 09. Caractéristiques des graines de 66 accessions de caroubiers algériens.

Acc	Longueur (cm)*	Largeur (cm)*	Épaisseur (cm)*	Poids des graines*	Nombre de graine*	% des graines*
A01	0.92 ±0.01 ^{lmnopq}	0.81 ±0.00 ^a	0.44 ±0.00 ^{efg}	2.34 ±0.09 ^{abcdeh}	10.40 ±0.23 ^{qrstuvw}	9.41 ±0.39 ^{xyza'}
A02	0.87 ±0.01 ^{xyza'b'c'd'}	0.74 ±0.00 ^{dthijkl}	0.41 ±0.00 ^{klmnopq}	1.71 ±0.13 ^{rstuvwxy}	9.60 ±0.35 ^{wxyza'b'c'd'}	10.26 ±0.67 ^{vwxzya'}
A03	0.90 ±0.01 ^{qrstuvw}	0.77 ±0.01 ^{bcd}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrst}	1.85 ±0.15 ^{ijklmnopqrstuvw}	9.55 ±0.48 ^{wxyza'b'c'd'}	8.54 ±0.63 ^{zya'b'}
A04	1.09 ±0.01 ^{ab}	0.75 ±0.01 ^{cdefghij}	0.41 ±0.00 ^{ijklmn}	2.64 ±0.12 ^{abc}	12.20 ±0.29 ^{cdefg}	11.33 ±0.39 ^{stuvwxyza'}
A05	0.94 ±0.01 ^{klmn}	0.72 ±0.00 ^{mnopqr}	0.47 ±0.00 ^b	2.36 ±0.11 ^{abcdefg}	12.20 ±0.35 ^{cdefg}	22.00 ±1.15 ^{de}
A06	0.89 ±0.01 ^{stuvwxy}	0.61 ±0.01 ^{lm'}	0.41 ±0.01 ^{klmnopqrstuv}	1.95 ±0.10 ^{ghijklmnopqrstuv}	12.83 ±0.35 ^{abcd}	13.00 ±0.63 ^{lmnopqrstuv}
A07	1.07 ±0.01 ^b	0.70 ±0.00 ^{uvwxyza'}	0.39 ±0.00 ^{wxyz}	2.27 ±0.16 ^{bcdefghijk}	11.17 ±0.39 ^{ghijklmnopqrstu}	15.15 ±0.95 ^{ijklmn}
A08	0.86 ±0.01 ^{c'd'e'}	0.59 ±0.01 ^{n'}	0.36 ±0.01 ^{b'c'd'e'}	2.13 ±0.14 ^{efghijklmnopq}	13.50 ±0.46 ^{ab}	11.08 ±0.67 ^{rtuvwxyza'}
A09	0.90 ±0.00 ^{stuvw}	0.62 ±0.00 ^{ij'k'}	0.42 ±0.00 ^{ijkl}	1.76 ±0.14 ^{pqrstuvw}	11.43 ±0.39 ^{defghijklmnopqrs}	12.72 ±0.94 ^{lmnopqrstuv}
A10	0.86 ±0.01 ^{c'd'e'f'}	0.68 ±0.01 ^{b'c'd'e'f'}	0.41 ±0.00 ^{ijklmnop}	1.97 ±0.11 ^{efghijklmnopqrstuv}	11.83 ±0.40 ^{defghijklmno}	25.81 ±1.55 ^{bc}
A11	0.95 ±0.01 ^{ijkl}	0.77 ±0.01 ^{bcd}	0.41 ±0.00 ^{ijklmnopq}	2.67 ±0.08 ^{ab}	13.43 ±0.26 ^{abc}	9.78 ±0.30 ^{wxyza'}
A12	0.92 ±0.01 ^{mnopqrs}	0.71 ±0.01 ^{opqrstuvw}	0.40 ±0.00 ^{mnopqrstuvw}	2.14 ±0.13 ^{efghijklmnopq}	12.40 ±0.32 ^{bcde}	10.80 ±0.60 ^{rtuvwxyza'}
A13	0.84 ±0.01 ^{e'f'g'}	0.67 ±0.01 ^{e'f'g'}	0.46 ±0.01 ^{cd}	1.97 ±0.17 ^{ghijklmnopqrstuv}	11.79 ±0.66 ^{defghijklmnop}	10.89 ±0.77 ^{rtuvwxyza'}
A14	0.87 ±0.01 ^{ya'b'c'd'}	0.72 ±0.01 ^{lmnopqr}	0.38 ±0.01 ^{yz'}	1.80 ±0.14 ^{lmnopqrstuvw}	9.50 ±0.41 ^{xyza'b'c'd'}	11.94 ±0.98 ^{opqrstuvwxy}
A15	0.91 ±0.01 ^{opqrst}	0.69 ±0.01 ^{zya'b'c'd'e'}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrs}	2.20 ±0.14 ^{defghijklmno}	10.43 ±0.42 ^{rstuvw}	17.48 ±0.75 ^{ghij}
A16	0.93 ±0.01 ^{lmnop}	0.69 ±0.01 ^{wxyza'b'c'd'}	0.43 ±0.00 ^{fgh}	2.36 ±0.08 ^{abcdeh}	12.40 ±0.28 ^{bcde}	13.72 ±0.39 ^{klmnopqrst}
A17	0.94 ±0.01 ^{klmno}	0.75 ±0.00 ^{d'fghijk}	0.47 ±0.00 ^{bc}	2.08 ±0.15 ^{ghijklmnopqr}	10.00 ±0.44 ^{tuvwxyzb'c'd'}	12.22 ±0.79 ^{opqrstuvwxy}
A18	0.91 ±0.01 ^{pqrstuv}	0.71 ±0.01 ^{opqrstuv}	0.50 ±0.00 ^a	1.63 ±0.09 ^{stuvwxy}	8.47 ±0.27 ^{b'd'}	28.63 ±1.59 ^a
A19	0.96 ±0.00 ^{ij}	0.69 ±0.00 ^{za'b'c'd'e'}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqr}	2.59 ±0.10 ^{abcd}	13.97 ±0.45 ^a	19.61 ±0.68 ^{efg}
A20	1.02 ±0.01 ^{ef}	0.67 ±0.01 ^{c'd'e'f'g'}	0.39 ±0.00 ^{wxyza'}	1.83 ±0.16 ^{klmnopqrstuvw}	9.77 ±0.56 ^{wxyza'b'c'd'}	10.86 ±0.83 ^{rtuvwxyza'}
A21	1.05 ±0.01 ^c	0.71 ±0.01 ^{opqrst}	0.40 ±0.00 ^{rstuvwxy}	2.33 ±0.14 ^{abcdeh}	11.43 ±0.44 ^{defghijklmnopqrs}	12.16 ±0.85 ^{opqrstuvwxy}
A22	0.99 ±0.01 ^{egh}	0.70 ±0.01 ^{uvwxy}	0.37 ±0.01 ^{za'b'c'}	2.59 ±0.17 ^{abcd}	11.70 ±0.42 ^{defghijklmnop}	11.21 ±0.58 ^{rtuvwxyza'}
A23	0.95 ±0.01 ^{ijkl}	0.69 ±0.00 ^{wxyza'b'c'}	0.36 ±0.00 ^{d'e'}	2.14 ±0.15 ^{efghijklmnopq}	10.77 ±0.43 ^{lmnopqrstuvw}	16.02 ±1.05 ^{hijkl}
A24	0.81 ±0.01 ^{h'}	0.70 ±0.01 ^{tuwxyz}	0.31 ±0.00 ^f	1.64 ±0.02 ^{stuvwxy}	8.80 ±0.22 ^{zya'b'c'd'}	8.31 ±0.18 ^{a'b'}
A25	0.97 ±0.01 ^{ij}	0.73 ±0.01 ^{lmnopq}	0.23 ±0.01 ^{h'}	1.63 ±0.13 ^{stuvwxy}	9.83 ±0.43 ^{tuwxyzza'b'c'd'}	6.34 ±0.54 ^{b'}
A26	0.99 ±0.01 ^{gh}	0.74 ±0.01 ^{d'fghijk}	0.25 ±0.01 ^{g'}	1.48 ±0.07 ^{xyz}	8.77 ±0.31 ^{zb'c'd'}	6.20 ±0.24 ^{b'}
A27	0.90 ±0.01 ^{qrstuv}	0.78 ±0.00 ^b	0.39 ±0.00 ^{vwxyz}	2.11 ±0.09 ^{efghijklmnopqr}	11.67 ±0.27 ^{defghijklmnopq}	11.57 ±0.39 ^{qrstuvwxy}
A28	0.92 ±0.01 ^{mnopqr}	0.78 ±0.00 ^b	0.38 ±0.00 ^{xyza'}	2.17 ±0.12 ^{defghijklmnop}	11.87 ±0.30 ^{defghijklmn}	10.87 ±0.47 ^{rtuvwxyza'}
A29	0.96 ±0.01 ^{ijk}	0.74 ±0.00 ^{ijklmn}	0.39 ±0.00 ^{wxyza'}	2.14 ±0.09 ^{efghijklmnopq}	12.07 ±0.33 ^{defghijk}	16.87 ±0.49 ^{ghij}
A30	0.88 ±0.01 ^{wxyza'b'c'd'}	0.68 ±0.00 ^{b'c'd'e'f'}	0.41 ±0.00 ^{ijklmnop}	2.00 ±0.12 ^{ghijklmnopqrstu}	12.07 ±0.27 ^{defghijkl}	23.15 ±1.31 ^{cd}
A31	0.91 ±0.00 ^{pqrstuv}	0.76 ±0.00 ^{bcdefg}	0.39 ±0.00 ^{rstuvwxy}	2.15 ±0.10 ^{efghijklmnop}	12.33 ±0.32 ^{bcdef}	12.28 ±0.43 ^{opqrstuvwxy}
A32	0.84 ±0.01 ^{f'g'}	0.64 ±0.01 ^{i'}	0.38 ±0.00 ^{xyza'}	1.30 ±0.09 ^{zya'}	9.00 ±0.34 ^{zya'b'c'd'}	13.37 ±0.72 ^{klmnopqrstuv}
A33	0.82 ±0.01 ^{g'h'}	0.69 ±0.01 ^{zya'b'c'd'}	0.47 ±0.00 ^{bc}	1.90 ±0.14 ^{ijklmnopqrstuvw}	11.33 ±0.45 ^{efghijklmnopqrstu}	19.25 ±1.02 ^{efg}
A34	0.82 ±0.01 ^{g'h'}	0.67 ±0.01 ^{c'd'e'f'g'}	0.40 ±0.00 ^{opqrstuvw}	1.03 ±0.08 ^{t'}	6.43 ±0.42 ^{e'}	10.55 ±0.48 ^{uvwxyza'}
A35	0.86 ±0.00 ^{d'e'f'}	0.68 ±0.00 ^{za'b'c'd'e'f'}	0.42 ±0.00 ^{h'ijkl}	1.88 ±0.17 ^{ijklmnopqrstuvw}	10.93 ±0.37 ^{ghijklmnopqrstuv}	16.18 ±1.29 ^{hijk}
A36	0.90 ±0.01 ^{rstuvw}	0.67 ±0.01 ^{f'g'}	0.41 ±0.00 ^{ijklmnop}	2.05 ±0.11 ^{efghijklmnopqrs}	11.27 ±0.45 ^{efghijklmnopqrstu}	15.80 ±0.60 ^{hijkl}
A37	0.88 ±0.01 ^{uvwxyza'b'c'}	0.66 ±0.01 ^{h'}	0.36 ±0.01 ^{d'e'}	2.39 ±0.15 ^{abcdeh}	11.27 ±0.29 ^{efghijklmnopqrstu}	17.97 ±0.95 ^{fghi}
A38	1.01 ±0.00 ^{efg}	0.74 ±0.00 ^{f'ijklm}	0.39 ±0.00 ^{stuvwxy}	1.92 ±0.14 ^{hijklmnopqrstuvw}	10.60 ±0.43 ^{nopqrstuv}	13.50 ±0.69 ^{klmnopqrstuv}
A39	0.93 ±0.01 ^{klmno}	0.71 ±0.01 ^{opqrstuv}	0.43 ±0.00 ^{ghij}	1.63 ±0.11 ^{stuvwxy}	9.73 ±0.36 ^{tuwxyzza'b'c'd'}	16.76 ±1.09 ^{ghij}
A40	1.01 ±0.00 ^{efg}	0.71 ±0.00 ^{rstuvwxy}	0.40 ±0.00 ^{lmnopqrstuv}	2.03 ±0.14 ^{efghijklmnopqrs}	10.90 ±0.33 ^{hijklmnopqrstuv}	17.93 ±0.98 ^{fghi}
A41	1.01 ±0.01 ^{efg}	0.72 ±0.00 ^{mnopqr}	0.39 ±0.00 ^{twxyz}	2.33 ±0.10 ^{abcdeh}	12.20 ±0.32 ^{cdefgh}	18.62 ±0.69 ^{fgh}
A42	1.04 ±0.01 ^{cd}	0.76 ±0.00 ^{cdefghi}	0.40 ±0.00 ^{mnopqrstuvw}	2.21 ±0.09 ^{defghijklmno}	10.67 ±0.25 ^{lmnopqrstuvw}	14.92 ±0.66 ^{ijklmno}
A43	1.09 ±0.01 ^{ab}	0.76 ±0.01 ^{bcdefgh}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrs}	2.71 ±0.07 ^a	12.13 ±0.36 ^{bcdefghij}	11.12 ±0.31 ^{rtuvwxyza'}
A44	0.87 ±0.01 ^{xyza'b'c'd'}	0.74 ±0.01 ^{ijklmn}	0.47 ±0.01 ^b	1.57 ±0.10 ^{tuwxyz}	8.77 ±0.31 ^{b'c'd'}	25.65 ±1.60 ^{bc}
A45	1.10 ±0.01 ^a	0.76 ±0.01 ^{bcdefgh}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrstu}	2.20 ±0.17 ^{defghijklmnop}	10.26 ±0.43 ^{stuvwxy}	10.12 ±0.74 ^{vwxzya'}
A46	1.04 ±0.01 ^c	0.70 ±0.01 ^{uvwxyza'b'}	0.37 ±0.01 ^{a'b'c'd'e'}	2.25 ±0.09 ^{cdefghijklm}	10.57 ±0.30 ^{opqrstuv}	11.14 ±0.43 ^{rtuvwxyza'}
A47	0.91 ±0.01 ^{pqrst}	0.60 ±0.01 ^{m'n'}	0.48 ±0.01 ^b	1.50 ±0.09 ^{wxyz}	9.73 ±0.43 ^{wxyza'b'c'd'}	8.69 ±0.46 ^{za'b'}
A48	1.07 ±0.01 ^b	0.72 ±0.00 ^{mnopqrs}	0.40 ±0.00 ^{lmnopqrstuvw}	2.31 ±0.13 ^{abcdeh}	12.00 ±0.40 ^{defghijklm}	11.19 ±0.48 ^{rtuvwxyza'}
A49	0.89 ±0.01 ^{tuwxyz}	0.62 ±0.00 ^{jk'l'}	0.50 ±0.00 ^a	1.69 ±0.11 ^{stuvwxy}	10.63 ±0.45 ^{lmnopqrstuvw}	10.36 ±0.60 ^{uvwxyza'}
A50	1.02 ±0.01 ^{ef}	0.69 ±0.01 ^{zya'b'c'd'}	0.40 ±0.00 ^{rstuvwxy}	2.12 ±0.13 ^{efghijklmnopqr}	11.70 ±0.46 ^{defghijklmnop}	11.74 ±0.56 ^{pqrstuvwxy}
A51	0.85 ±0.01 ^{d'e'f'}	0.66 ±0.01 ^{i'}	0.45 ±0.01 ^{de}	2.23 ±0.15 ^{cdefghijklmn}	12.43 ±0.41 ^{bcde}	11.89 ±0.72 ^{opqrstuvwxy}
A52	0.91 ±0.01 ^{pqrstuv}	0.71 ±0.01 ^{opqrstuvw}	0.42 ±0.00 ^{ijkl}	1.86 ±0.14 ^{klmnopqrstuvw}	10.77 ±0.47 ^{hklmnopqrstuv}	20.32 ±1.17 ^{ef}
A53	0.91 ±0.01 ^{opqrst}	0.69 ±0.01 ^{zya'b'c'd'}	0.41 ±0.00 ^{ijklm}	1.83 ±0.13 ^{lmnopqrstuvw}	11.57 ±0.34 ^{defghijklmnopqr}	18.45 ±1.23 ^{fgh}
A54	0.87 ±0.01 ^{b'c'd'}	0.68 ±0.01 ^{a'b'c'd'e'f'}	0.41 ±0.01 ^{lmnopqrstuv}	2.01 ±0.11 ^{efghijklmnopqrs}	12.27 ±0.32 ^{bcdefg}	15.38 ±0.93 ^{ijklm}
A55	0.86 ±0.01 ^{b'c'd'e'}	0.71 ±0.01 ^{pqrstuvwxy}	0.41 ±0.00 ^{ijklmno}	2.10 ±0.12 ^{efghijklmnopqr}	11.93 ±0.27 ^{defghijklm}	11.58 ±0.68 ^{qrstuvwxy}
A56	0.92 ±0.01 ^{lmnopq}	0.70 ±0.01 ^{stuvwxy}	0.44 ±0.00 ^{ef}	1.75 ±0.12 ^{pqrstuvw}	10.70 ±0.39 ^{lmnopqrstuvw}	24.09 ±1.69 ^{cd}
A57	0.88 ±0.00 ^{uvwxyza'b'c'}	0.71 ±0.00 ^{rstuvwxy}	0.42 ±0.00 ^{ijkl}	1.69 ±0.08 ^{stuvwxy}	9.67 ±0.25 ^{wxyza'b'c'd'}	28.53 ±1.57 ^a
A58	0.92 ±0.01 ^{mnopqr}	0.72 ±0.01 ^{nopqrst}	0.40 ±0.00 ^{lmnopqrstuv}	1.79 ±0.11 ^{lopqrstuvw}	10.10 ±0.24 ^{pqrstuvwxy}	27.70 ±1.66 ^{ab}
A59	1.02 ±0.01 ^{de}	0.77 ±0.01 ^{bc}	0.44 ±0.01 ^{ef}	2.53 ±0.13 ^{abcde}	12.16 ±0.34 ^{bcdefghij}	12.47 ±0.52 ^{lmnopqrstuvw}
A60	0.89 ±0.00 ^{stuvwxyza'}	0.71 ±0.00 ^{opqrstuvw}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrs}	2.00 ±0.12 ^{efghijklmnopqrstu}	12.74 ±0.38 ^{abcde}	14.90 ±0.92 ^{ijklmnop}
A61	0.82 ±0.00 ^{g'h'}	0.67 ±0.01 ^{g'h'}	0.37 ±0.00 ^{za'b'c'd'}	1.17 ±0.11 ^{za'}	9.37 ±0.37 ^{zya'b'c'd'}	19.49 ±1.74 ^{efg}
A62	0.98 ±0.01 ^{hi}	0.73 ±0.01 ^{klmnop}	0.44 ±0.01 ^{efg}	2.25 ±0.14 ^{bcdeh}	11.38 ±0.41 ^{defghijklmnopqrs}	14.65 ±0.95 ^{ijklmnop}
A63	0.94 ±0.01 ^{klm}	0.72 ±0.01 ^{mnopqrs}	0.44 ±0.00 ^{ef}	1.85 ±0.18 ^{klmnopqrstuvw}	10.04 ±0.73 ^{tuwxyzb'c'}	17.04 ±1.07 ^{ghij}
A64	0.94 ±0.01 ^{klmno}	0.73 ±0.00 ^{klmno}	0.43 ±0.00 ^{fghi}	1.85 ±0.14 ^{klmnopqrstuvw}	10.07 ±0.37 ^{uvwxyb'}	14.40 ±0.80 ^{ijklmnopqrs}
A65	0.91 ±0.01 ^{pqrst}	0.72 ±0.01 ^{mnopqr}	0.48 ±0.00 ^b	1.91 ±0.15 ^{hijklmnopqrstuv}	10.63 ±0.38 ^{lmnopqrstuvw}	17.34 ±1.09 ^{ghij}
A66	0.91 ±0.01 ^{opqrstu}	0.76 ±0.01 ^{bcdef}	0.47 ±0.01 ^{bc}	2.00 ±0.21 ^{efghijklmnopqrstu}	10.00 ±0.69 ^{uvwxyza'b'c'd'}	14.57 ±0.70 ^{ijklmnopqr}

Acc: Accession.

Les moyennes avec des lettres distinctes dans la même colonne sont significativement différentes ($P < 0,05$).

* Différence hautement significative ($P < 0.001$).

Tableau 10. Classification de 66 accessions de caroubiers algériens selon l'Analyse Discriminante Linéaire.

Accession	Groupe donné*	Classification**	Jackknifed***
A01	Relizane	Relizane	Relizane
A02	Relizane	Relizane	Relizane
A03	Relizane	Relizane	Relizane
A04	Aindefla	Jijel	Blida
A05	Aindefla	Aindefla	M'sila
A06	Boumerdes	Boumerdes	Boumerdes
A07	Boumerdes	Skikda	Jijel
A08	Boumerdes	Boumerdes	Boumerdes
A09	Boumerdes	Boumerdes	Boumerdes
A10	Boumerdes	Jijel	Jijel
A11	Bejaia	Bejaia	Blida
A12	Bejaia	Bejaia	Guelma
A13	Bejaia	Bejaia	Mila
A14	Bejaia	Bejaia	Mila
A15	Bejaia	Setif	Setif
A16	Bejaia	Bejaia	Bejaia
A17	Bejaia	Bejaia	Bejaia
A18	Jijel	Blida	Blida
A19	Jijel	Jijel	Skikda
A20	Skikda	Skikda	Tipaza
A21	Skikda	Skikda	Skikda
A22	Skikda	Skikda	Skikda
A23	Skikda	Skikda	Jijel
A24	Taref	Taref	Jijel
A25	Taref	Taref	Taref
A26	Taref	Taref	Taref
A27	Guelma	Guelma	Guelma
A28	Guelma	Guelma	Guelma
A29	Guelma	Guelma	Guelma
A30	Guelma	Skikda	Bejaia
A31	Guelma	Guelma	Guelma
A32	Mila	Mila	Mila
A33	Mila	Bejaia	Bejaia
A34	Mila	Mila	Taref
A35	Mila	Mila	Mila
A36	Setif	Setif	Sidi Bel Abbès
A37	Setif	Setif	Taref
A38	M'sila	M'sila	Tlemcen
A39	M'sila	M'sila	Tlemcen
A40	M'sila	M'sila	M'sila
A41	M'sila	M'sila	Jijel
A42	M'sila	M'sila	M'sila
A43	Blida	Jijel	Skikda
A44	Blida	Tlemcen	Tlemcen
A45	Blida	Blida	Jijel
A46	Tipaza	Jijel	Boumerdes
A47	Tipaza	Tipaza	Tipaza
A48	Tipaza	Jijel	Sidi Bel Abbès
A49	Tipaza	Tipaza	Tipaza
A50	Tipaza	Jijel	Jijel
A51	Tipaza	Bejaia	Bejaia
A52	Sidi Bel Abbès	Tlemcen	Tlemcen
A53	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès	Jijel
A54	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès
A55	Sidi Bel Abbès	Jijel	Jijel
A56	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès	Taref
A57	Tlemcen	Boumerdes	Blida
A58	Tlemcen	Tlemcen	Taref
A59	Tlemcen	M'sila	Tlemcen
A60	Tlemcen	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès
A61	Tlemcen	Sidi Bel Abbès	Sidi Bel Abbès
A62	Tlemcen	Jijel	Jijel
A63	Tlemcen	Tlemcen	Tlemcen
A64	Tlemcen	Tlemcen	M'sila
A65	Tlemcen	Tlemcen	Tlemcen
A66	Tlemcen	Tlemcen	Taref

*Origine des accessions.

** 69.7 % correctement classées.

***39.39% classées selon la méthode de correction du biais Jackknife.

3. Discussion

Notre étude démontre l'énorme variabilité morphologique des accessions de caroubier à travers l'Algérie, avec des traits qui se chevauchent avec les caroubiers d'autres pays du bassin méditerranéen (Tableau 11). Par exemple, les accessions de caroubier étudiées ici ont des gousses similaires (longueur = 15,05 cm, largeur = 2,13 cm, épaisseur = 0,63 cm) à d'autres accessions ou cultivars méditerranéens, comme les gousses chypriotes avec une longueur moyenne de 15,24 cm (Kyrtzis et al., 2021), les gousses espagnoles avec une largeur moyenne de 2,11 cm (Albanell et al., 1996) et les gousses marocaines avec une épaisseur moyenne de 0,64 cm (El Kahkahi et al., 2014). Les dimensions des graines (longueur = [0,81 - 1,10 cm], largeur = [0,59 - 0,81 cm]) dans la présente étude étaient très similaires à celles des cultivars espagnols, qui ont des valeurs extrêmes de 0,75 à 1,10 cm et 0,59 à 0,80 cm et des moyennes de 0,96 cm et 0,70 cm respectivement (Albanell et al., 1996). Pour l'épaisseur des graines, cette étude a enregistré la plus grande variation par rapport aux autres caroubiers méditerranéens (Tableau 11), elle était de 0,23 cm (A25 "Tarfi") à 0,50 cm (A18 et A49), et son coefficient de variation était de 11,35 %. Ceci indique probablement que, pour ce caractère, la diversité génétique au sein des cultivars algériens est élevée. Sa moyenne était de 0,41 cm, coïncidant avec celles observées parmi les populations tunisiennes et les accessions syriennes (Naghmouchi et al., 2009; Mahfoud et al., 2018). La comparaison entre ces mesures morphométriques et celles des caroubiers d'autres pays méditerranéens est résumée dans le tableau 11.

Le poids des gousses algériennes ([5,8 - 27,4 g] ; moyenne = 15,17 g) est similaire avec celui observé par Albanell et al. (1996), qui ont obtenu une fourchette de 5,09 g à 29,84 g, avec un poids moyen de 14,88 g chez les gousses espagnoles. Le nombre de graines algériennes (10,97) était proche de la moyenne enregistrée parmi les accessions libanaises (10,93) (Chami et al. 2018). Enfin, le rendement en graines de ces accessions algériennes, avec une moyenne de 14,88 %, pourrait être considéré comme satisfaisant par rapport au rendement en graines enregistré chez d'autres caroubiers du bassin méditerranéen. En conclusion, il ressort de cette comparaison que les gousses de caroubier du bassin méditerranéen les plus similaires à celles de l'Algérie sont les gousses de caroubier espagnol.

Le nombre de folioles par feuille (moyenne = 8,32) était significativement plus élevé que ceux enregistrés par Chami et al. (2018) pour les accessions du Liban (moyenne = 7,88), par El

Bakkali et al. (2019) pour les populations marocaines (moyenne = 7,2) et par Korkmaz et al. (2020) pour les arbres sauvages turcs (moyenne = 6,43).

Selon Albanell et al. (1996), pour améliorer le rendement en graines et en gomme, il est possible de sélectionner une gousse de caroube légère, fine et étroite avec un nombre élevé de graines épaisses et courtes. Les caractéristiques de la longueur de la gousse et de la largeur des graines ne sont pas importantes car elles ne sont pas corrélées au rendement en graines. Ces conclusions ont été confirmées par nos résultats de l'analyse des paramètres morphométriques et de leurs corrélations. Par ailleurs, pour obtenir un poids de pulpe élevé, il faut choisir une gousse lourde, longue, large et épaisse avec un nombre élevé de graines longues, larges et fines.

L'analyse en composantes principales a montré deux groupes de variables, l'un représente les caractères des gousses, tandis que l'autre représente les caractères des graines. Selon la même analyse multivariée, un poids de pulpe élevé entraîne un rendement en graines plus faible, ce qui est similaire aux résultats de Boublenza et al. (2019).

La classification ascendante hiérarchique a révélé une diversité génétique importante parmi les accessions de caroubiers algériens étudiées. Elle a également montré que la distribution de ces accessions n'était pas influencée par le type d'étage bioclimatique. Ceci suggère que les traits morphométriques sont probablement plus contrôlés par les gènes que par l'environnement ; en effet, les résultats d'une étude menée par Kyrtzis et al. (2021) suggèrent la même hypothèse.

Il ressort des résultats de l'analyse discriminante linéaire et de la classification hiérarchique et de la performance des traits morphologiques de chaque accession pour chaque cluster (analyse Heatmap) que parmi les soixante-six accessions étudiées, onze sont des cultivars potentiels. Deux cultivars sont déjà connus et confirmés par cette étude - "Tlemsani" (A43) et "Maricani" (A47 ; A49) - et neuf autres cultivars ont été identifiés dans la présente étude : le cultivar hermaphrodite "Tarfi" (A25 ; A26) qui pourrait être utilisé comme cultivar pollinisateur au niveau des vergers et les cultivars femelles qui ont reçu les noms suivants : "Relizani" (A01 ; A02 ; A03), "Bumerdas" (A08), "Bejaoui" (A11), "Skikdi" (A21 ; A22), "Guelmi" (A27 ; A28 ; A31), "Msili" (A42), "Abassi" (A54) et "Zayanid" (A59). Ces cultivars pourraient être utilisés comme germoplasme pour des programmes de reboisement et pour l'établissement de vergers de caroubiers algériens à haut rendement.

En conclusion, ces résultats sont très prometteurs et pourraient constituer le point de départ de programmes de reboisement et d'établissement de vergers de caroubiers efficaces et viables, mais avant cette étape, ces cultivars doivent être analysés par des marqueurs moléculaires (notamment les RAPDs) afin de déterminer le degré de similitude génétique qui existe entre eux (voir chapitre IV). Cette étape est fondamentale pour réduire le nombre de cultivars qui seront évalués en conditions contrôlées, et ce dans le but de sélectionner les meilleures d'entre eux, en fonction de leur valeur agronomique et commerciale.

Tableau 11. Comparaison des caractéristiques morphologiques (gousse et graine) des caroubiers des pays du bassin méditerranéen.

Trait morphologique		Accessions algériennes (N=66) (Présente étude)	Cultivars espagnoles (N=182) (Albanell et al., 1996)	Cultivars italiens (N=54) (Russo & D'Andrea, 2002)	Cultivars portugais (N=15) (Barracosa et al., 2007)	Populations tunisiennes (N=19) (Naghmouchi et al., 2009)	Génotypes greffés turcs (N=32) (Tetik et al., 2011)	Accessions marocaines (N=47) (El Kahkahi et al., 2014)	Accessions syriennes (N=24) (Mahfoud et al., 2018)	Accessions libanaises (N=59) (Chami et al., 2018)	Accessions chypriotes (N=124) (Kytratzis et al., 2021)
Gousse :											
Longueur (cm)	Mini	11.20	7.71	13.30	12.95	14.10	14.25	10.11	12.87	10.83	7.34*
Courte (<14) **	Max	19.36	27.28	21.10	20.36	20.57	19.08	16.63	22.32	23.42	20.20*
Moyenne (14-18)	Mean	15.05	15.83	17.10	17.07*	16.89	16.91	13.85	17.46*	16.19	15.24*
Longue (>18)	CV%	13.41	n.m	7.70	12.33*	12.10	7.00	10.81*	13.08*	21.26	15.41*
Largeur (cm)	Mini	1.54	1.44	1.50	1.62	1.53	1.98	1.21	1.98	1.43	1.62*
Etroite (<1.85) **	Max	3.07	2.68	2.67	2.34	2.51	2.35	1.81	3.12	2.70	2.71*
Moyenne (1.85-2.25)	Mean	2.13	2.11	2.30	2.05*	2.05	2.18	1.57	2.47*	2.21	2.32*
Large (>2.25)	CV%	15.85	n.m	5.80	8.36*	9.50	5.00	11.23*	11.36*	14.64	8.53*
Épaisseur (cm)	Mini	0.29	0.54	0.50	0.72	0.60	0.52	0.45	0.58	0.46	0.59*
Fine (<0.75) **	Max	0.97	1.32	1.33	1.10	1.20	1.12	0.87	1.26	1.22	1.28*
Moyenne (0.75-0.95)	Mean	0.63	0.85	0.96	0.98*	0.83	0.88	0.64	0.89*	0.83	1.00*
Épaisse (>0.95)	CV%	27.56	n.m	9.20	13.05*	17.65	14.00	13.45*	20.91*	19.13	13.49*
Poids (g)	Mini	5.8	5.09	n.m	11.46	9.45	14.34*	n.m	8.99	5.90	5.29*
Faible (<12) **	Max	27.4	29.84	n.m	26.39	29.68	29.58*	n.m	26.33	37.65	30.46*
Moyen (12-17)	Mean	15.17	14.88	n.m	18.67*	16.39	21.52*	n.m	16.42*	20.34	17.35*
Elevé (>17)	CV%	35.65	n.m	n.m	19.13*	30.67	3.80*	n.m	29.76*	39.33	29.13*
Poids de la pulpe(g)	Mini	4.17	3.74	n.m	n.m	n.m	12.37*	3.41	n.m	4.49	n.m
	Max	25.03	27.43	n.m	n.m	n.m	27.24*	7.42	n.m	34.67	n.m
	Mean	13.16	13.00	n.m	n.m	n.m	19.70*	5.96*	n.m	18.00	n.m
	CV%	39.87	n.m	n.m	n.m	n.m	4.00*	17.04*	n.m	42.94	n.m
N° de graines	Mini	6.43	2.88	n.m	10.15	9.54	7.67*	8.43	8.26	7.86	n.m
Faible (<8.5) **	Max	13.97	14.76	n.m	13.69	14.49	12.3*	15.53	16.11	14.30	n.m
Moyen (8.5-10.5)	Mean	10.97	10.00	n.m	12.17*	12.26	10.45*	12.26	11.81*	10.93	n.m
Elevé (>10.5)	CV%	12.49	n.m	n.m	9.56*	18.68	2.40*	11.73*	17.94*	13.45	n.m
Rdmt graines (%)	Mini	6.20	3.55	n.m	10.85	8.89	5.17	17.4	n.m	6.7	4.24*
Faible (<10) **	Max	28.63	29.41	n.m	18.14	24.50	14.01	27.83	n.m	36.6	16.9*
Moyen (10-15)	Mean	14.82	12.11	n.m	13.11*	17.20	8.79	23.02*	n.m	13.13	8.64*
Elevé (>15)	CV%	35.44	n.m	n.m	15.93*	30.06	27.00	10.51*	n.m	44.63	32.84*
Graine :											
Longueur (cm)	Mini	0.81	0.75	0.73	0.87	0.80	n.m	0.75	0.81	0.77	n.m
Courte (<0.85) **	Max	1.10	1.10	1.12	1.02	0.97	n.m	0.92	1.14	1.15	n.m
Moyenne (0.85-0.95)	Mean	0.93	0.96	0.93	0.96*	0.91	n.m	0.82*	0.99*	0.97	n.m
Longue (>0.95)	CV%	7.78	n.m	4.40	4.40*	5.52	n.m	5.00*	8.62*	8.96	n.m
Largeur (cm)	Mini	0.59	0.59	0.62	0.64	0.65	n.m	0.57	0.62	0.60	n.m
Etroite (<0.675) **	Max	0.81	0.80	0.78	0.77	0.74	n.m	0.72	0.83	0.86	n.m
Moyenne (0.67-0.72)	Mean	0.71	0.70	0.68	0.71*	0.69	n.m	0.63*	0.72*	0.74	n.m
Large (>0.72)	CV%	6.32	n.m	4.40	4.92*	4.18	n.m	6.32*	6.60*	9.43	n.m
Épaisseur (cm)	Mini	0.23	0.31	0.32	0.38	0.35	n.m	0.32	0.37	0.37	n.m
Fine (<0.38) **	Max	0.50	0.47	0.47	0.52	0.47	n.m	0.45	0.46	0.53	n.m
Moyenne (0.38-0.45)	Mean	0.41	0.38	0.39	0.42*	0.41	n.m	0.40*	0.41*	0.43	n.m
Épaisse (>0.45)	CV%	11.35	n.m	7.20	8.13*	9.81	n.m	7.07*	7.06*	8.67	n.m
Poids / gousse (g)	Mini	1.03	0.35	n.m	1.84	n.m	1.15*	1.09	n.m	1.36	n.m
	Max	2.71	3.13	n.m	2.99	n.m	2.34*	2.62	n.m	3.05	n.m
	Mean	2.00	1.88	n.m	2.36*	n.m	1.82*	1.76	n.m	2.24	n.m
	CV%	17.20	n.m	n.m	11.79*	n.m	n.m	18.97*	n.m	20.09	n.m

** Intervalles des caractères morphologiques du caroubier (Tous et al. 2013).

* Valeurs calculées à partir des données des auteurs.

 n.m: non mentionnés. **Rdmt** : Rendement.

CHAPITRE 3

III Caractérisation physico-chimique du caroubier

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer et de comparer la richesse des gousses de caroubier de plusieurs accessions à partir de l'analyse des paramètres physico-chimiques, tel que l'humidité, paramètre indispensable pour la mesure des cendres correspondant au taux de matière minérale d'un produit comprenant, des macroéléments (potassium, calcium,...) et d'oligoéléments (zinc, fer, cuivre,...) ; les sucres totaux ainsi que les fibres brutes. Par ailleurs, une analyse des correspondances multiples (ACM) sera réalisée pour la détermination d'éventuelles corrélations ou liaisons pouvant exister entre ces paramètres physico-chimiques et les caractères phénotypiques de la gousse ainsi que leur origine (sauvage ou greffé) (Tableau 12). Enfin, une classification hiérarchique ascendante (CAH) sera effectuée afin de grouper les accessions selon les variables physico-chimiques et phénotypiques.

1. Matériels et méthodes

1.1 Analyses physico-chimiques

1.1.1 Détermination de l'humidité

La pulpe a été nettoyée, séchée, puis broyée en poudre avec des particules de taille inférieure à 500 μm . Pour la détermination de l'humidité, une tasse en aluminium a été remplie de 3 g de poudre et placée dans une balance infrarouge (Shimadzu MOC63u, Japon), fonctionnant sur la base du principe thermogravimétrique, qui consiste à mesurer la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température donnée. Le poids initial de l'échantillon a été enregistré avant la dessiccation via la lampe infrarouge (Figure 34). La balance intégrée a mesuré en continu le poids de la tasse en aluminium, et la perte de poids globale a été interprétée comme étant l'humidité correspondante.



Figure 34. Etapes de mesure de l'humidité d'un échantillon dans une balance thermique.

1.1.2 Dosage des cendres

Pour le dosage des cendres (Figure 35), technique basée sur la destruction de la matière organique sous l'effet de température élevée et qui est déterminée par la méthode officielle AOAC 972.15 (Association of Official Analytical Chemists) (Horwitz & Latimer, 2005), des creusets vides sont pesés (PV) après être restés pendant 1 heure dans le four à moufle à une température de 560 °C et 30 minutes dans le dessiccateur. Trois grammes de poudre de caroube (PI) sont versés dans les creusets, et mises dans le four à moufle pendant 4 heures à 560 °C, puis dans le dessiccateur pendant 30 minutes, ensuite le tout est pesé (PC), et le pourcentage des cendres à partir du résidu sec ou matière sèche (MS) est calculé suivant la formule ci-dessous :

$$\% \text{ Cendres/MS} = \frac{\% \text{ Cendres (H\% + MS)} *}{\text{MS}} \times 100$$

$$* \% \text{ Cendres (H\% + MS)} = \frac{PC - PV}{PI} \times 100$$

PC : poids ou masse (g) du creuset avec cendre après incinération ;

PV : poids (g) du creuset vide ;

PI : poids (g) initial de la poudre de caroube ;

H% : taux d'humidité ;

MS : matière sèche (100% – H%).



Figure 35. Détermination du taux des cendres dans un four à moufle.

1.1.3 Dosage des sucres totaux

La teneur en sucres totaux a été déterminée selon la méthode de DuBois et al. (1956). Elle consiste à hydrolyser à chaud les liaisons glycosidiques par du phénol et l'acide sulfurique concentré jusqu'à obtenir une solution de coloration jaune-orangée. L'absorbance de la solution est mesurée par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 485 nm. Les résultats de l'absorbance seront révélés en concentration (g/l) à partir de la courbe d'étalonnage réalisée au préalable avec neuf solutions glucosées de différentes concentrations (Figure 36).

Le protocole du dosage des sucres totaux est comme suit : mettre dans une fiole jaugée, 1 g de poudre de caroube et 100 ml d'eau distillé, puis transférer la solution dans un erlenmeyer, lequel sera posé sur un agitateur pendant 1 heure, ensuite filtrer le mélange et prendre 1 ml de la solution mère que l'on met dans une fiole de 100 ml tout en y ajoutant de l'eau distillé jusqu'au trait de jauge afin d'obtenir une solution de 0,01 g/l. Ensuite, mettre dans un tube à essai, 2 ml de la solution + 1 ml de phénol à 5% + 5 ml de H₂SO₄ (acide sulfurique), le tout est mis au bain-marie (25 à 30 °C) pendant 20 minutes, puis refroidi dans l'eau à 20 °C. Enfin, mesurer l'absorbance des solutions à 485 nm.

Les analyses de l'humidité, des cendres et des sucres totaux ont été répétées trois fois et ce pour chacune des accessions.

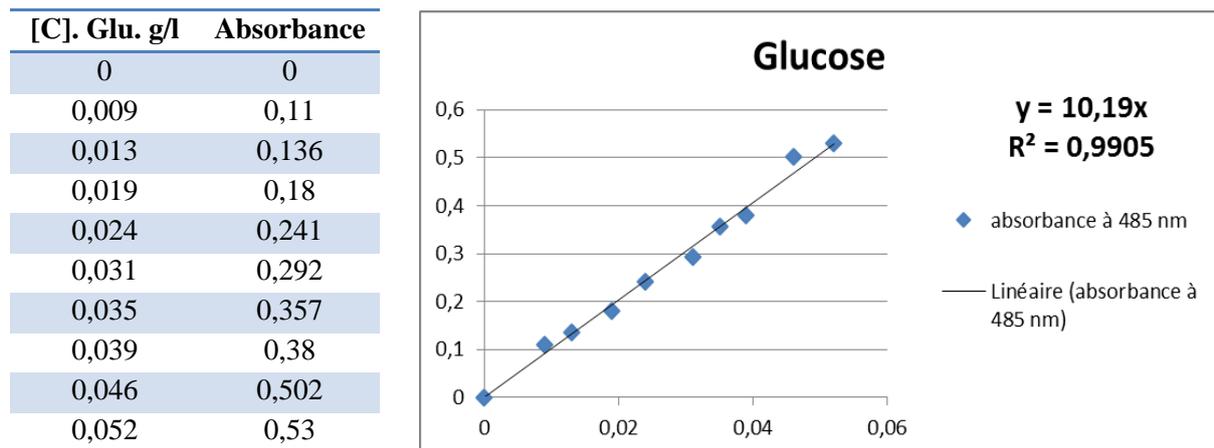


Figure 36. Courbe d'étalonnage pour le calcul du pourcentage des sucres totaux chez le caroubier.

1.1.4 Dosage des fibres brutes

Le dosage des fibres brutes a été déterminé selon la méthode de Weende (Figure 37) dont le procédé consiste à hydrolyser à l'aide de l'acide sulfurique et la potasse, tous les composants d'un échantillon organique à l'exception des fibres brutes et les sels minéraux. Pour le protocole, peser le fiberbag (sac filtrant) (α) et les creusets vides (β) après les avoir séchés dans l'étuve à 105 °C pendant 1 heure et dans le dessiccateur pendant 30 minutes. Insérer l'entretoise en verre dans le fiberbag, puis déposer 1 g d'échantillon (γ).

Pour le premier lavage (I), verser 360 ml d'acide sulfurique avec une concentration de 0.13 mol/l sur l'échantillon et placer le tout dans un bécher sur une plaque chauffante. Dès que la solution atteint le point d'ébullition, l'arrangement doit être réduit et ce durant 30 minutes, puis jeter l'acide et les solubles et rincer l'entretoise en verre avec de l'eau chaude. Pour le deuxième lavage (II), verser 360 ml d'hydroxyde de potassium à 0,23 mol/l et mettre le tout sur la plaque chauffante. Une fois à ébullition, ajouter 3 gouttes de N-octanol (agent anti mousse) tout en réduisant l'arrangement de la plaque chauffante durant 30 minutes. Ensuite, jeter l'alcali et les solubles et rincer l'entretoise en verre avec de l'eau chaude puis avec l'acétone.

Peser les fiberbags (X) après les avoir séchés dans les creusets dans une étuve à 105°C pendant toute une nuit, puis dans le dessiccateur pendant 30 minutes. Enfin, peser les fiberbags (Y) après les avoir incinérés dans un four à moufle à 600 °C pendant 4 heures, puis dans le dessiccateur durant 30 minutes. Le pourcentage des fibres brutes est calculé suivant la formule ci-dessous :

$$\% \text{ Fibres brutes} = \frac{((X - \alpha) - (Y - \mu)) \times 100}{\gamma}$$

X : poids (g) du creuset et des fiberbags après séchage dans l'étuve et le dessiccateur ;

α : poids (g) du fiberbags ;

Y : poids (g) du creuset et des cendres après incinération et séchage dans l'étuve et le dessiccateur ;

μ : poids (g) des cendres ($Y - \beta$) ;

γ : poids (g) de l'échantillon ;

β : poids (g) du creuset vide.

Les quatre analyses physico-chimiques ont été réalisées au laboratoire du centre de recherche de la SARL Boublenza, Agadir, Tlemcen.

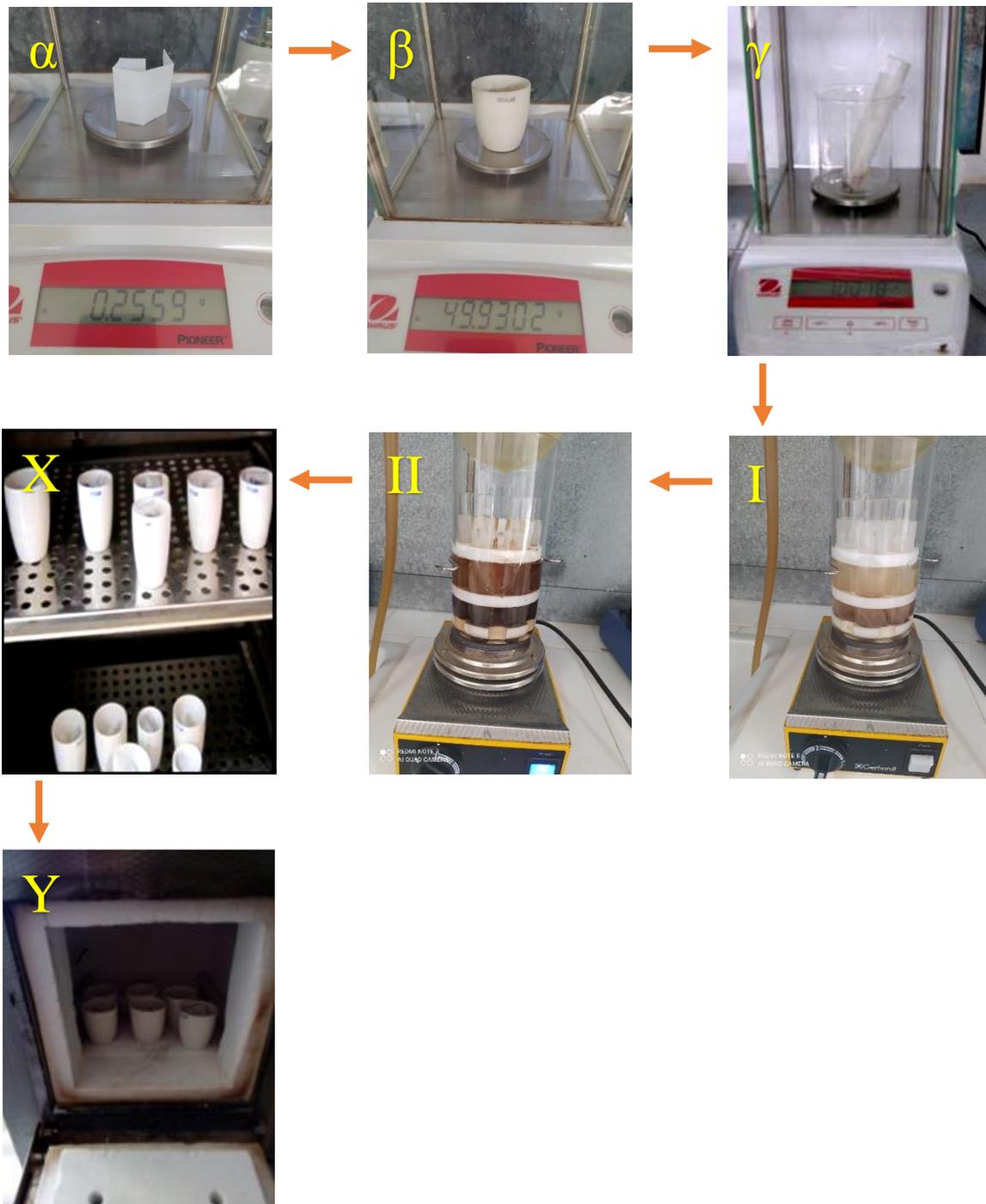


Figure 37. Etapes du dosage des fibres brutes selon la méthode de Weende.

2. Analyse statistique des données

Les résultats de l'analyse physico-chimiques ont été analysées par le test ANOVA (Analyse de Variance) à l'aide du logiciel GenStat Discovery Edition 3, avec comparaison par paires de "Duncan" entre les moyennes à un niveau de signification $\alpha = 0,05$.

Les coefficients de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des gousses ont été déterminés à l'aide du programme RStudio (v. 1.3.1093) en utilisant la fonction "corrplot".

L'analyse des correspondances multiples (ACM) pour analyser la relation entre les variables quantitatives chimiques (% des sucres totaux et % des fibres brutes), morphologiques (la longueur, la largeur et l'épaisseur de la gousse) et les variables qualitatives, à savoir la couleur, la forme de la gousse et l'origine de la multiplication des accessions (accession greffée ou sauvage à partir de semis). Les cinq variables quantitatives ont été transformées en variables qualitatives représentées par trois modalités selon des classes créées à partir des quartiles suivants : <25%, [25% - 75%], >75%. En outre, un plotellipse basé sur les données ACM est réalisé à l'aide de la fonction "plotellipses" via le logiciel R, et ce dans le but de tracer des ellipses de confiance autour des modalités des variables qualitatives étudiées. L'objectif est de voir si les modalités d'une variable qualitative sont significativement différentes les unes des autres.

Enfin, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée à partir des données des variables susmentionnées.

L'analyse ACM et CAH ont été réalisées à l'aide du programme RStudio (v. 1.3.1093), en utilisant les packages "FactoMineR" et "Factoextra". Les fonctions utilisées sont, "MCA" pour l'ACM, et "HCPC" pour la CAH.

Tableau 12. Caractéristiques phénotypiques des gousses de 66 accessions de caroubiers algériens et leur origine de multiplication.

Accessions	Forme	Surface	Couleur	Type de multiplication
A01	droite	rugueux	brun	accession greffée
A02	torsadée	rugueux	marron	accession greffée
A03	courbée	rugueux	marron	accession greffée
A04	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A05	courbée	lisse	brun	accession greffée
A06	courbée	très rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A07	droite	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A08	courbée	très rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A09	droite	très rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A10	torsadée	rugueux	marron	accession sauvage
A11	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A12	courbée	rugueux	brun	accession greffée
A13	droite	rugueux	brun	accession greffée
A14	droite	rugueux	brun	accession greffée
A15	courbée	rugueux	brun	accession greffée
A16	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A17	droite	rugueux	brun	accession greffée
A18	courbée	rugueux	brun	accession sauvage
A19	droite	rugueux	brun rougeâtre	accession sauvage
A20	courbée	rugueux	brun	accession greffée
A21	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A22	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A23	torsadée	rugueux	marron	accession sauvage
A24	courbée	lisse	brun rougeâtre	accession greffée
A25	droite	rugueux	brun	accession greffée
A26	droite	rugueux	brun	accession greffée
A27	droite	rugueux	brun	accession greffée
A28	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A29	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A30	courbée	rugueux	marron	accession sauvage
A31	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A32	torsadée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A33	courbée	rugueux	brun	accession greffée
A34	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A35	courbée	rugueux	marron	accession greffée
A36	torsadée	lisse	brun rougeâtre	accession greffée
A37	torsadée	rugueux	marron	accession sauvage
A38	torsadée	rugueux	brun rougeâtre	accession sauvage
A39	torsadée	rugueux	marron	accession sauvage
A40	torsadée	rugueux	brun	accession sauvage
A41	courbée	rugueux	brun	accession sauvage
A42	droite	rugueux	brun	accession sauvage
A43	torsadée	rugueux	brun	accession greffée
A44	droite	rugueux	marron	accession sauvage
A45	torsadée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A46	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A47	droite	très rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A48	courbée	rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A49	courbée	très rugueux	brun rougeâtre	accession greffée
A50	courbée	rugueux	brun	accession greffée
A51	torsadée	rugueux	brun	accession greffée
A52	torsadée	rugueux	marron rougeâtre	accession sauvage
A53	torsadée	rugueux	marron rougeâtre	accession sauvage
A54	droite	très rugueux	brun	accession sauvage
A55	droite	très rugueux	brun	accession sauvage
A56	courbée	rugueux	marron	accession sauvage
A57	courbée	rugueux	brun	accession sauvage
A58	courbée	rugueux	marron	accession sauvage
A59	courbée	lisse	brun	accession greffée
A60	droite	rugueux	brun	accession sauvage
A61	torsadée	rugueux	marron	accession sauvage
A62	torsadée	rugueux	brun	accession greffée
A63	torsadée	rugueux	brun	accession sauvage
A64	torsadée	rugueux	brun	accession sauvage
A65	torsadée	rugueux	marron rougeâtre	accession sauvage
A66	torsadée	rugueux	marron rougeâtre	accession sauvage

3. Résultats et discussion

3.1 Analyses physico-chimiques

L'analyse de la variance (ANOVA) a montré des différences hautement significatives ($P < 0,001$) entre les accessions pour toutes les variables (Tableau 13), à l'exception de la variable fibres brutes, laquelle et à défaut de répétitions (chronophages et onéreuses) n'a pu être soumise à une ANOVA.

Les résultats des analyses physico-chimiques des gousses des 66 accessions sont résumés dans le tableau 13. La teneur en sucres totaux de toutes les accessions variait de 36,28 % (A36) à 50,98 % (A37) avec une moyenne de 43,78 %, celle des fibres brutes était comprise entre 6,23 % (A24) et 8,91 % (A46) pour une moyenne de 7,50 %, tandis qu'on a enregistré pour la teneur en cendres un intervalle situé entre 2,25 % (A43) et 3,87 % (A58) avec une moyenne de 3,04 %. Enfin, l'humidité variait de 5,70 % (A33) à 11,62 % (A24) avec une moyenne de 8,11 %. En comparaison avec les teneurs enregistrées à partir des caroubes des autres pays méditerranéens, on a observé que celles qui se rapprochaient le plus de nos résultats pour ce qui est du paramètre sucre, étaient les gousses marocaines avec un taux de sucre allant de 31,5 % à 50,1 % (El Batal et al., 2011) ainsi que les gousses espagnoles, avec une moyenne de sucre total de 46,95 % \pm 3% (Albanell et al., 1991). Par ailleurs, et selon la bibliographie, le minimum de taux de sucre enregistré est de 25,70 % (Albanell et al., 1991), et le maximum a été déterminé chez les variétés de caroubier libanais avec un taux de 89,46 % (Haddarah et al., 2013). En outre, on a constaté via nos résultats et ceux de Boublenza (2020) que la richesse en sucres totaux de la caroube algérienne est parmi la plus faible dans le bassin méditerranéen. Ce constat peut être expliqué d'une part, par le fait que la majorité du caroubier en Algérie se trouve dans des zones de garrigue caractérisées par des sols très hétérogènes et pauvres dû à leur nature de type calcaire rocailleux, la sécheresse, les dégradations anthropiques liées aux surpâturages et les incendies ; et d'autres part, au fait que la plupart des pieds de caroubier présents dans ces zones sont de type sauvage, disséminés via les graines et qui se caractérisent par une plus faible teneur en sucre total par rapport aux caroubiers greffés. Cette différence en teneur de sucre a été constatée par Biner et al. (2007) et Turhan (2014) et confirmée par la présente étude, où la moyenne des sucres totaux était de 44,39 % \pm 0,39 % pour les caroubes issues de greffage et de 42,78 % \pm 0,45 % pour les caroubes sauvages avec une *P-value* de 0,011 < au seuil critique $\alpha = 0,05$.

Les teneurs de fibres brutes enregistrées dans le présent travail sont similaires à celles trouvées chez la caroube marocaine avec un intervalle de variation de 6,79 % à 7,12 % (Khlifa et al., 2013) ainsi que chez la caroube espagnole avec une moyenne de 8,01 % \pm 0,08 % (Albanell et al., 1991). Par ailleurs, et contrairement à ce qui a été rapporté par Turhan (2014), aucune différence significative (P -value = 0,42) n'a été notée dans la présente étude quant au taux de fibres exprimés entre les pieds de caroubier greffés (7,47 % \pm 0,1 %) et sauvages (7,57 % \pm 0,1 %). Concernant les résultats des cendres, les gousses algériennes affichent des taux comparables avec ceux observés chez les gousses espagnoles, avec une teneur minimale de 2,25 %, coïncidant avec le résultat présent, et une moyenne de 3,27 % (Albanell et al., 1991); ainsi que chez la caroube marocaine avec une moyenne de 3,00 % \pm 0,05 % (Khlifa et al., 2013). La différence de teneur en cendres entre les caroubiers greffés (2,99 % \pm 0,05 %) et sauvage (3,12 % \pm 0,06 %) fut statistiquement non significative (P -value = 0,08). Quant à l'humidité, l'analyse de variance n'a indiqué aucune différence significative (P -value = 0,56) entre sujets sauvages (8,21 % \pm 0,17 %) et greffés (8,05 % \pm 0,20 %).

3.2 Analyse des corrélations

Les résultats de cette analyse bivariée ont montré des corrélations non significatives entre les 4 paramètres physico-chimiques de la gousse (Figure 38). Une non-signification statistique quant aux corrélations entre ces 4 variables a également été signalée dans l'étude réalisée par Haddarah et al. (2013).

3.3 Analyses multivariées

L'analyse des correspondances multiples (ACM) pour les variables physico-chimiques et phénotypiques sont illustrées dans les figures 39 et 40. Les deux dimensions de l'ACM ont expliqué 30,29 % du total de la variance pour 24 modalités. L'ACM des modalités (Figure 39) ainsi que le plotellipse (Figure 40) ont permis de distinguer clairement entre les caroubiers greffés et les caroubiers sauvages. Ces derniers, sont caractérisés par des gousses marron de forme torsadée, de dimension mince et étroite, exprimant une faible teneur en sucres et un pourcentage moyen en fibres brutes. Quant aux caroubiers greffés, ils se caractérisent par des gousses de couleur brun rougeâtre, de forme courbée, de dimension longue, large et épaisse, avec une teneur en sucres élevée, et un faible pourcentage en fibres brutes. De ces résultats, il en ressort que la sélection empirique a permis non seulement d'augmenter le rendement à partir des traits phénotypiques (observables), mais aussi d'améliorer par conséquent le taux des sucres totaux chez le caroubier.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) des différentes accessions en fonction de leurs traits phénotypiques et physico-chimiques est présentée dans la figure 41. La CAH a regroupé les différentes accessions en 4 clusters. Le cluster I comprend exclusivement les accessions de type sauvage, alors que le cluster IV regroupe seulement les accessions greffées à l'exception du génotype A19. Quant au cluster III, il réunit les 2 types de caroubier, sauvages et greffés. Par ailleurs, le cluster II est composé des deux accessions appartenant au cultivar Maricani (A47 et A49), ainsi que les accessions de Boumerdes A06, A08 et A09. Ce cluster est identique à celui noté dans la CAH basée sur les 12 caractères morphométriques (voir chapitre II), où ces cinq accessions se sont vues regroupées dans un seul et même cluster (IV), ceci suggère fort probablement que les accessions A06, A08 et A09 appartiennent elles aussi au cultivar Maricani. La figure 42 qui réunit les images des gousses et graines de ces 5 accessions, vient conforter la suggestion faite à partir des résultats des deux CAH. En conclusion, les paramètres phénotypiques, morphométriques et chimiques sont des outils incontournables non seulement pour la caractérisation et l'identification des cultivars, mais aussi pour l'évaluation de la diversité génétique chez l'espèce.

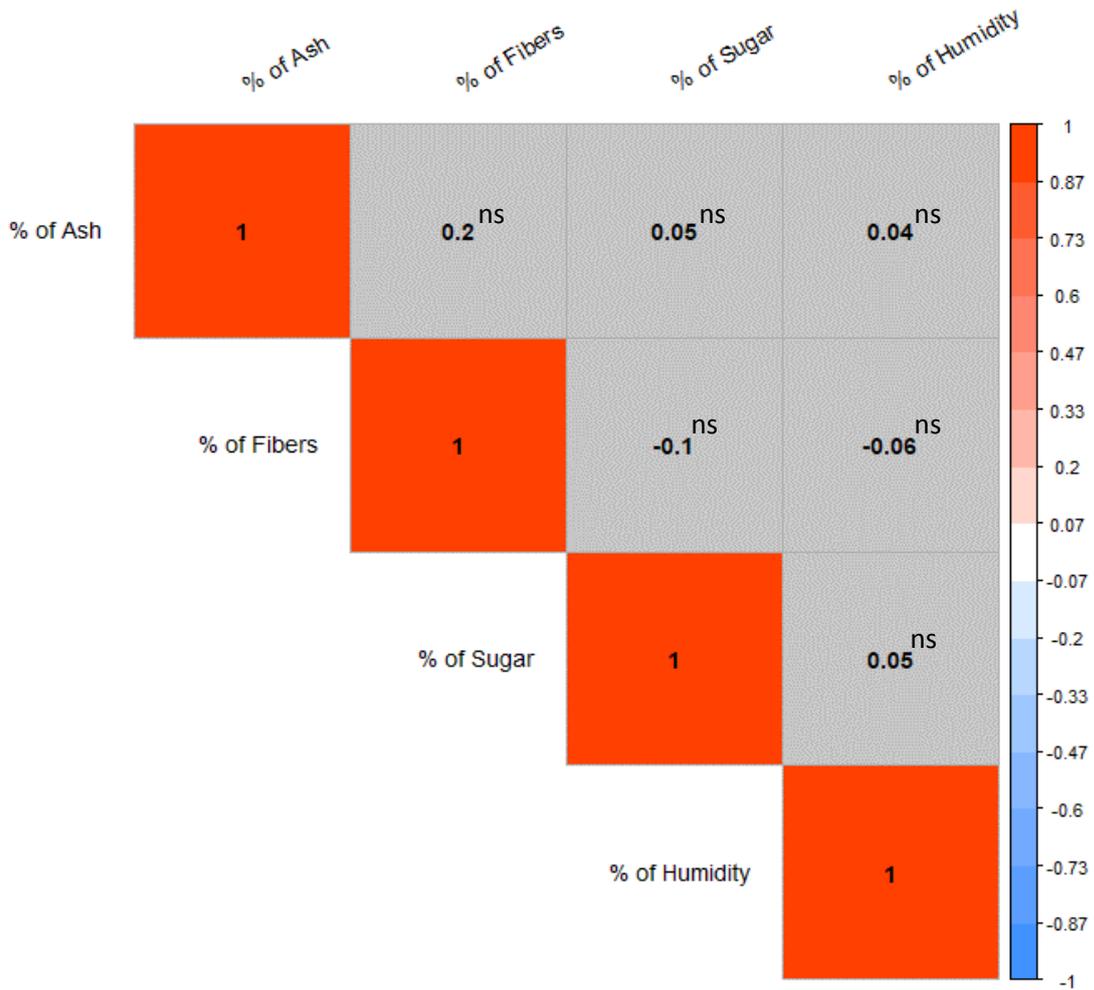


Figure 38. Coefficients de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des gousses de 66 accessions de caroubiers algériens (ns : non significative ($P > 0,05$)).

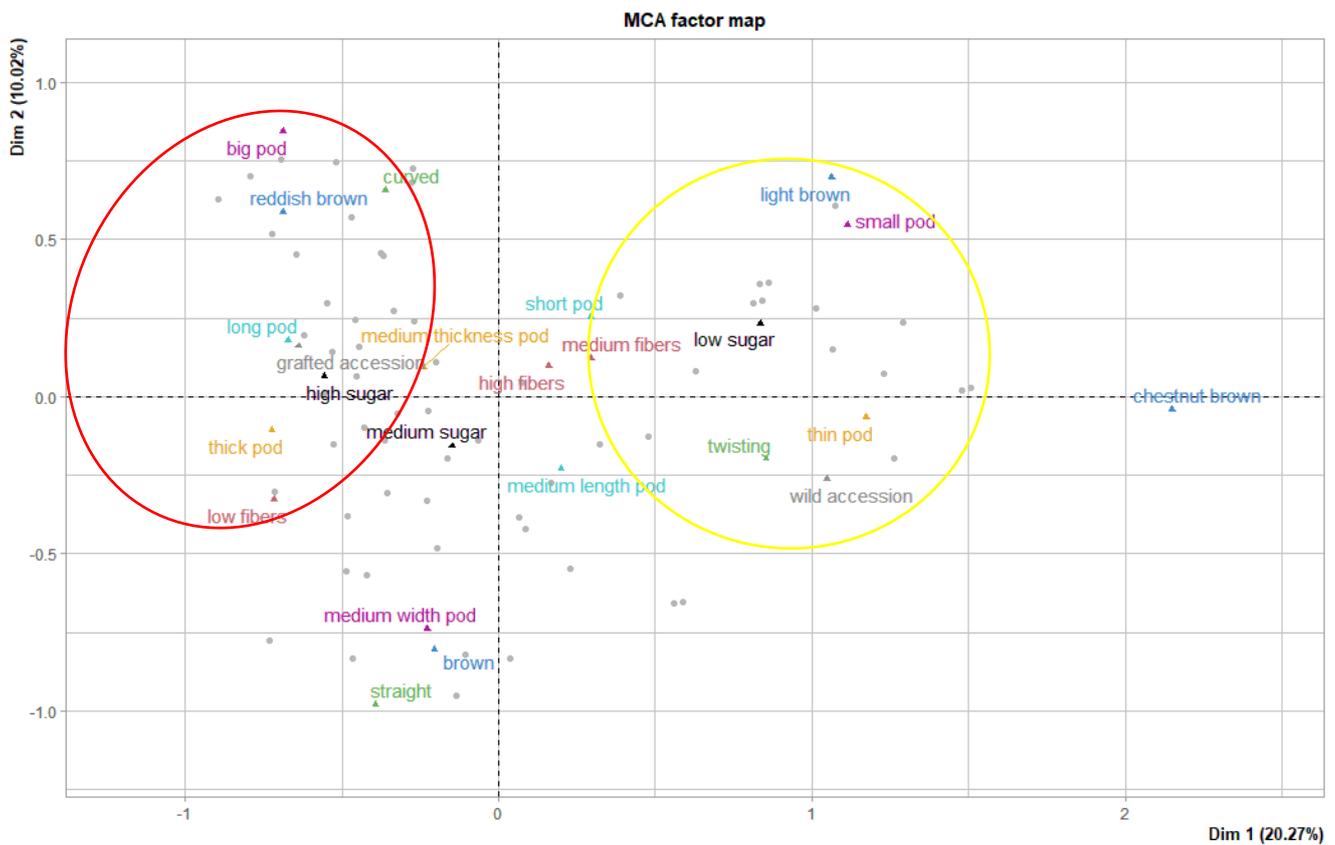


Figure 39. Analyse des Correspondances Multiples de 2 variables physico-chimiques et 6 phénotypiques de gousses appartenant à 66 accessions de caroubiers algériens. L'ACM montre clairement deux groupes de gousses ayant des caractéristiques distincts selon l'origine de la multiplication (accessions greffées ou sauvages).

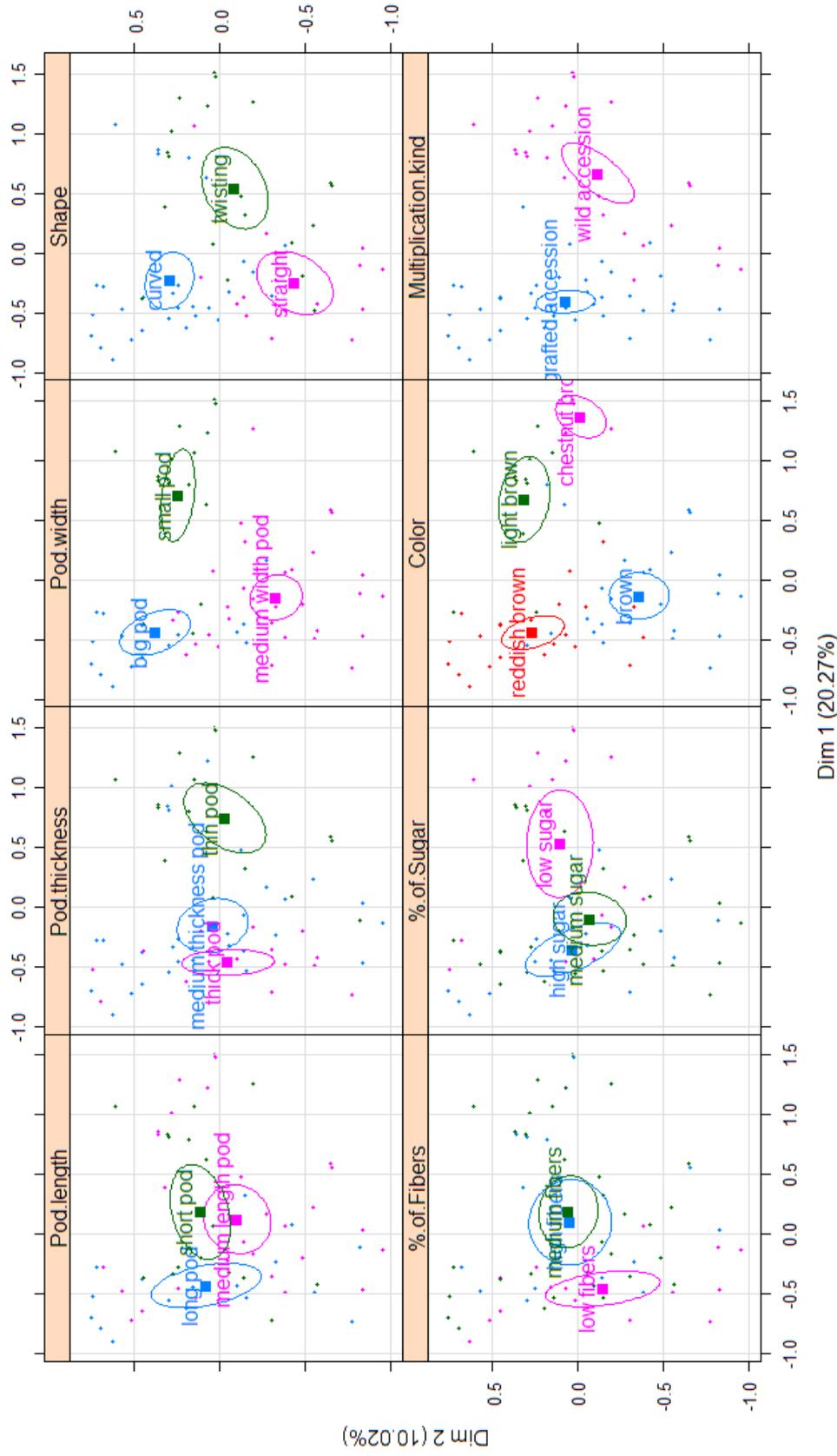


Figure 40. Plotellipses basé sur l'analyse des correspondances multiples (ACM) illustrant des ellipses de confiance autour des modalités de toutes les variables étudiées. Le plot a permis de voir les séparations significatives observées entre modalités au sein de la majorité des variables de discriminer nettement les gousses issues de greffage de celles issues de semis (sauvages)

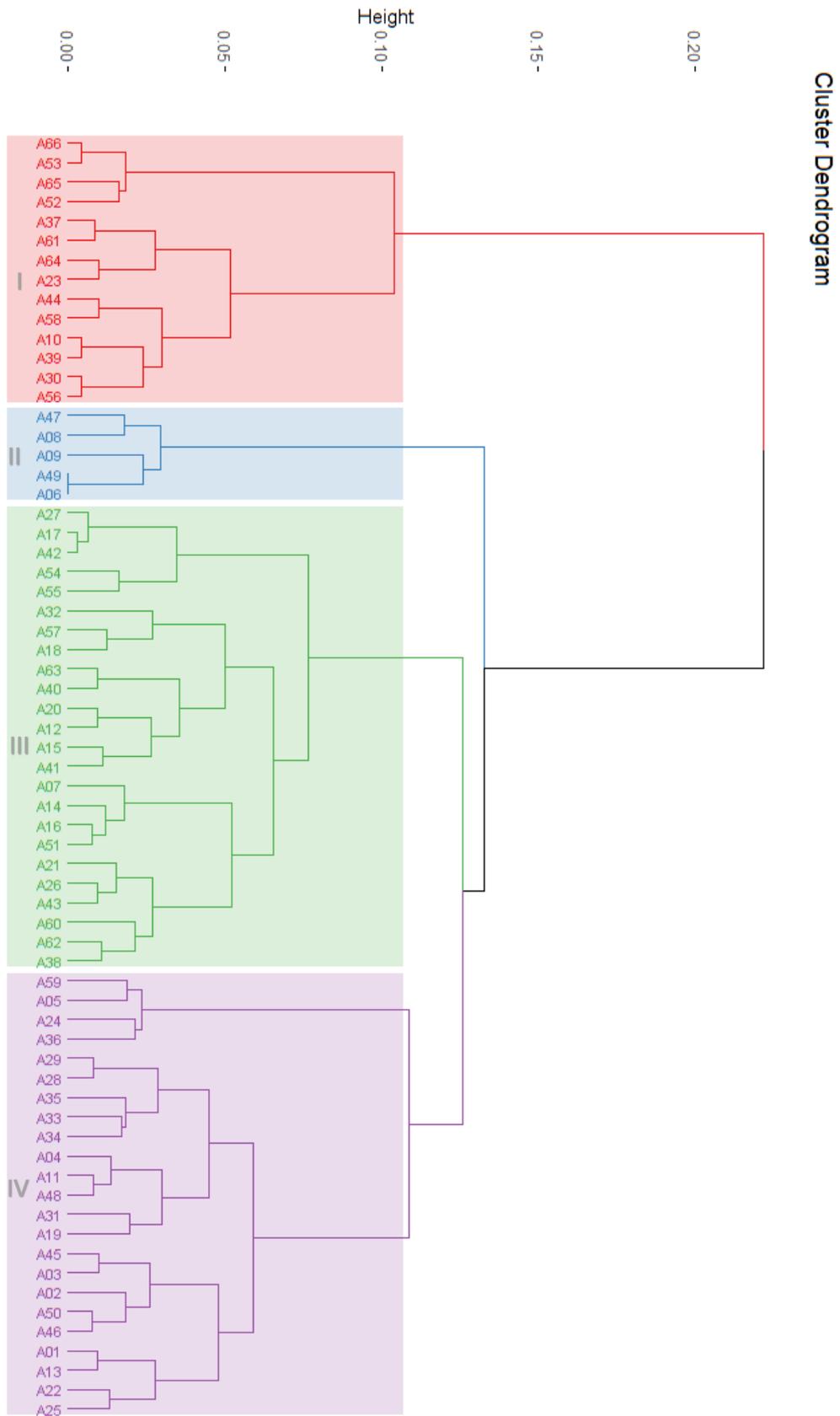


Figure 41. Classification Ascendante Hiérarchique de 66 accessions de caroubiers algériens basée sur 2 traits physico-chimiques et 7 traits phénotypiques de leurs gousses.

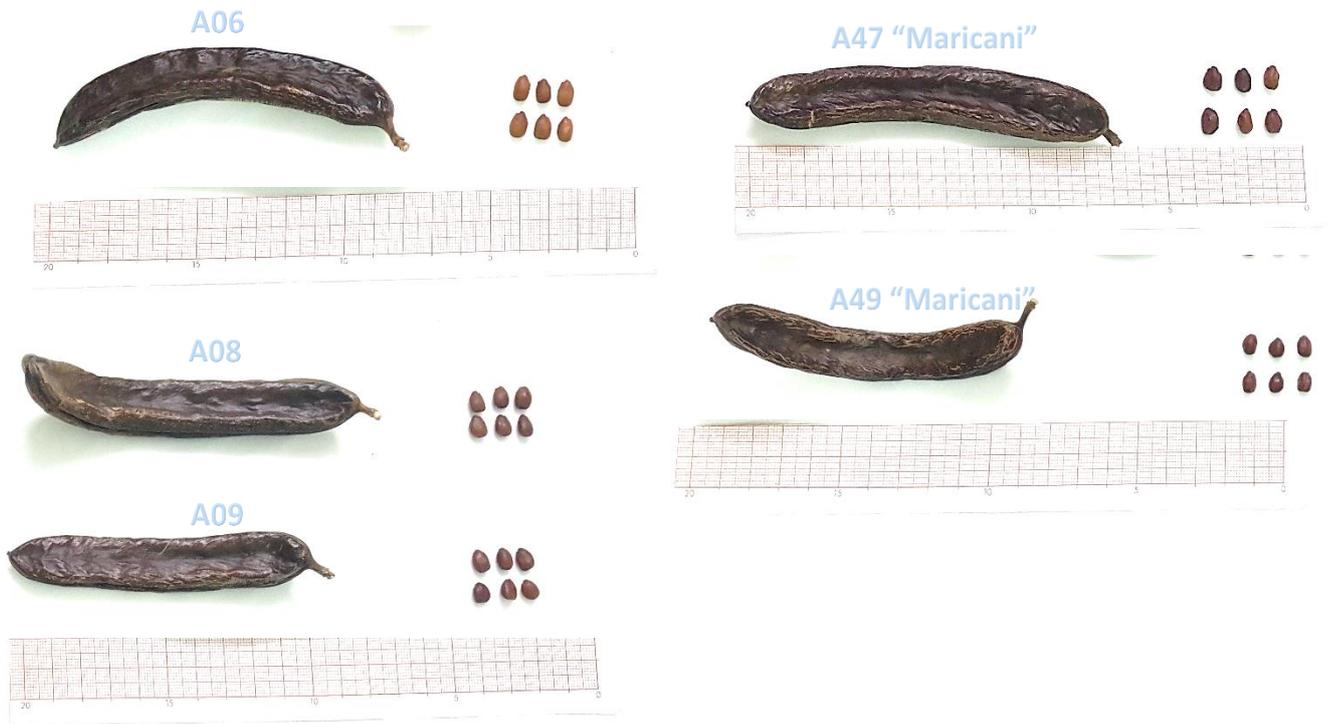


Figure 42. Ressemblance phénotypique remarquable (gousse et graines) entre les accessions A06, A08 et A09 et le cultivar Maricani représenté par les accessions A47 et A49. La classification hiérarchique ascendante à partir des caractères morphométriques et celle via les traits morphométriques et physico-chimiques classent ces 5 accessions dans un seul et même groupe. Conclusion, les accessions A06, A08 et A09 sont des caroubiers du cultivar Maricani.

Tableau 13. Caractéristiques physico-chimiques de 66 accessions de caroubiers algériens.

Accessions	Total sugars (%) *	Humidity (%) *	Ash (%) *	Fiber (%)
A01	44,63 ± 0,26 ^{ghijklmno}	8,38 ± 0,04 ^{hijklmno}	2,81 ± 0,07 ^{qrstuvwxy}	7,15
A02	44,78 ± 0,26 ^{ghijklm}	8,69 ± 0,07 ^{ghij}	3,13 ± 0,10 ^{efghijklmno}	8,39
A03	44,25 ± 0,39 ^{ghijklmnop}	8,54 ± 0,10 ^{hijklmn}	3,00 ± 0,08 ^{ijklmnopqrst}	7,65
A04	45,04 ± 0,44 ^{efghijkl}	7,70 ± 0,09 ^{rstu}	3,16 ± 0,13 ^{efghijklm}	6,82
A05	48,80 ± 0,26 ^{bc}	8,24 ± 0,08 ^{ijklmnop}	2,62 ± 0,05 ^{xy}	6,93
A06	44,17 ± 0,25 ^{ghijklmnopq}	7,44 ± 0,21 ^{tuvwxyz}	3,04 ± 0,07 ^{ghijklmnopqrs}	6,83
A07	43,13 ± 0,18 ^{klmnopqrstuv}	8,48 ± 0,03 ^{hijklmno}	3,12 ± 0,05 ^{efghijklmno}	8,74
A08	37,58 ± 0,21 ^z	7,36 ± 0,11 ^{uvwxyzza'}	2,33 ± 0,03 ^{za'}	6,85
A09	42,90 ± 0,35 ^{lmnopqrstuv}	7,66 ± 0,08 ^{rstuvw}	3,37 ± 0,04 ^{cde}	8,04
A10	42,51 ± 0,55 ^{opqrstuvw}	8,14 ± 0,04 ^{mnpq}	3,65 ± 0,03 ^{ab}	8,09
A11	47,58 ± 0,18 ^{cd}	7,18 ± 0,03 ^{xyza'b'}	3,05 ± 0,05 ^{ghijklmnopqrs}	7,17
A12	42,00 ± 0,15 ^{stuvwxy}	7,40 ± 0,17 ^{uvwxyz}	2,63 ± 0,02 ^{xy}	7,95
A13	44,55 ± 0,26 ^{ghijklmno}	8,22 ± 0,07 ^{ijklmnopq}	2,87 ± 0,03 ^{nopqrstuvw}	8,15
A14	45,51 ± 0,13 ^{efgh}	7,78 ± 0,08 ^{qrst}	3,10 ± 0,07 ^{efghijklmnopq}	7,23
A15	40,67 ± 0,33 ^{wxy}	9,04 ± 0,13 ^{def}	3,23 ± 0,05 ^{efghijk}	7,82
A16	46,99 ± 0,18 ^{cde}	7,56 ± 0,05 ^{stuvwxy}	3,10 ± 0,04 ^{efghijklmnopqr}	7,09
A17	42,67 ± 0,39 ^{mnpqrstuv}	8,27 ± 0,06 ^{ijklmnop}	2,93 ± 0,05 ^{lmnopqrstuvw}	6,89
A18	40,49 ± 0,36 ^{xy}	9,79 ± 0,05 ^c	2,70 ± 0,10 ^{uvwxyz}	8,33
A19	42,58 ± 0,25 ^{opqrstuvw}	7,23 ± 0,11 ^{wxyza'b'}	3,61 ± 0,09 ^{bc}	8,17
A20	42,81 ± 0,18 ^{mnpqrstuv}	6,91 ± 0,03 ^{b'c'}	3,32 ± 0,06 ^{efg}	7,45
A21	44,78 ± 0,26 ^{ghijklm}	8,68 ± 0,01 ^{ghij}	3,04 ± 0,09 ^{ghijklmnopqrs}	7,87
A22	40,69 ± 0,18 ^{wxy}	7,62 ± 0,07 ^{stuvw}	2,55 ± 0,21 ^{yz}	7,56
A23	45,27 ± 0,56 ^{efghij}	8,19 ± 0,04 ^{mnpq}	3,02 ± 0,13 ^{hijklmnopqrst}	7,38
A24	48,31 ± 0,72 ^{bc}	11,62 ± 0,17 ^a	3,58 ± 0,04 ^{bed}	6,23
A25	41,39 ± 0,07 ^{uvwxyz}	8,20 ± 0,03 ^{mnpq}	3,22 ± 0,08 ^{efghijk}	7,42
A26	42,52 ± 0,42 ^{opqrstuvw}	10,65 ± 0,64 ^b	2,96 ± 0,05 ^{klmnopqrstu}	6,85
A27	44,05 ± 0,25 ^{ghijklmnopqr}	7,19 ± 0,10 ^{xyza'b'}	2,97 ± 0,10 ^{ijklmnopqrstu}	6,87
A28	43,02 ± 0,22 ^{klmnopqrstuv}	8,08 ± 0,10 ^{nopqr}	2,76 ± 0,08 ^{stuvwxy}	6,87
A29	43,60 ± 0,25 ^{hijklmnopqrst}	6,22 ± 0,12 ^{d'e'f}	2,67 ± 0,05 ^{wxy}	6,57
A30	42,73 ± 0,25 ^{mnpqrstuvw}	7,57 ± 0,06 ^{stuvwxy}	3,18 ± 0,07 ^{efghijkl}	8,31
A31	42,00 ± 0,06 ^{stuvwxy}	7,25 ± 0,05 ^{wxyza'b'}	3,66 ± 0,02 ^{ab}	8,23
A32	45,44 ± 0,26 ^{efghi}	10,01 ± 0,09 ^c	2,87 ± 0,14 ^{mnpqrstuvw}	8,19
A33	45,82 ± 0,72 ^{defg}	5,70 ± 0,04 ^{g'}	2,67 ± 0,03 ^{wxy}	7,43
A34	44,21 ± 0,26 ^{ghijklmno}	7,50 ± 0,11 ^{stuvwxyz}	3,29 ± 0,06 ^{efghi}	7,12
A35	45,90 ± 0,16 ^{defg}	8,27 ± 0,06 ^{ijklmnop}	2,96 ± 0,02 ^{klmnopqrstuv}	6,85
A36	50,91 ± 0,13 ^a	8,57 ± 0,03 ^{ghijklm}	3,15 ± 0,16 ^{efghijklmn}	8,08
A37	36,28 ± 0,15 ^z	8,19 ± 0,15 ^{mnpq}	3,11 ± 0,08 ^{efghijklmnop}	7,48
A38	43,77 ± 0,40 ^{ghijklmnopqrs}	9,76 ± 0,06 ^c	2,91 ± 0,13 ^{lmnopqrstuvw}	7,15
A39	44,52 ± 0,28 ^{ghijklmno}	8,31 ± 0,01 ^{ijklmnop}	3,30 ± 0,02 ^{efgh}	7,68
A40	43,18 ± 0,25 ^{ijklmnopqrstuv}	8,67 ± 0,02 ^{efghijkl}	3,15 ± 0,01 ^{efghijklmn}	7,76
A41	42,06 ± 0,16 ^{qrstuvwxy}	9,86 ± 0,21 ^c	3,12 ± 0,08 ^{efghijklmno}	6,78
A42	44,74 ± 0,18 ^{ghijklmno}	8,45 ± 0,07 ^{hijklmno}	2,97 ± 0,06 ^{ijklmnopqrstu}	6,94
A43	43,20 ± 0,07 ^{klmnopqrstuv}	9,28 ± 0,15 ^d	2,25 ± 0,01 ^{a'}	6,65
A44	41,52 ± 0,47 ^{tuvwxy}	6,09 ± 0,09 ^{e'f}	3,15 ± 0,02 ^{efghijklmn}	7,15
A45	42,61 ± 0,39 ^{opqrstuvw}	8,06 ± 0,12 ^{opqr}	3,12 ± 0,06 ^{efghijklmno}	7,31
A46	42,78 ± 0,29 ^{mnpqrstuvw}	9,16 ± 0,04 ^{de}	2,96 ± 0,05 ^{klmnopqrstu}	8,91
A47	49,52 ± 0,71 ^{ab}	8,06 ± 0,06 ^{opqr}	2,73 ± 0,13 ^{tuvwxy}	6,84
A48	46,09 ± 2,93 ^{def}	6,46 ± 0,03 ^{d'e'}	3,36 ± 0,03 ^{def}	7,91
A49	43,93 ± 0,25 ^{ghijklmnopqr}	6,93 ± 0,32 ^{a'b'c'}	3,12 ± 0,23 ^{efghijklmno}	6,81
A50	44,81 ± 0,26 ^{ghijklm}	8,75 ± 0,09 ^{efgh}	2,89 ± 0,05 ^{lmnopqrstuvw}	7,99
A51	45,74 ± 0,34 ^{defg}	7,89 ± 0,04 ^{pqrs}	3,06 ± 0,11 ^{ghijklmnopqr}	7,8
A52	41,19 ± 0,09 ^{wxy}	8,68 ± 0,09 ^{efghijk}	2,85 ± 0,07 ^{opqrstuvw}	8,07
A53	42,13 ± 0,31 ^{pqrstuvwxy}	7,68 ± 0,06 ^{rstuv}	3,02 ± 0,07 ^{hijklmnopqrst}	7,23
A54	44,58 ± 0,26 ^{ghijklmno}	8,28 ± 0,17 ^{ijklmnop}	3,03 ± 0,05 ^{hijklmnopqrs}	8,29
A55	40,67 ± 0,18 ^{wxy}	5,98 ± 0,06 ^{f'g'}	3,05 ± 0,05 ^{ghijklmnopqr}	7,98
A56	43,33 ± 0,61 ^{ijklmnopqrstu}	8,19 ± 0,09 ^{mnpq}	3,71 ± 0,06 ^{ab}	7,65
A57	45,00 ± 0,26 ^{efghijkl}	9,15 ± 0,05 ^{de}	3,02 ± 0,04 ^{hijklmnopqrst}	7,96
A58	42,25 ± 0,08 ^{pqrstuvw}	8,99 ± 0,09 ^{defg}	3,87 ± 0,01 ^a	6,97
A59	45,91 ± 0,11 ^{defg}	6,58 ± 0,04 ^{c'd'}	2,80 ± 0,10 ^{rstuvwxy}	8,04
A60	45,08 ± 0,26 ^{efghijk}	9,29 ± 0,32 ^d	3,07 ± 0,10 ^{efghijklmnopqr}	6,87
A61	41,75 ± 0,47 ^{stuvwxy}	8,26 ± 0,09 ^{ijklmnop}	2,82 ± 0,07 ^{pqrstuvwxy}	7,05
A62	44,59 ± 0,26 ^{ghijklmno}	8,31 ± 0,20 ^{hijklmnop}	3,15 ± 0,01 ^{efghijklmn}	7,89
A63	43,47 ± 0,09 ^{hijklmnopqrstu}	7,08 ± 0,01 ^{za'b'}	3,26 ± 0,09 ^{efghij}	8,34
A64	48,02 ± 0,25 ^{bc}	7,16 ± 0,11 ^{yzza'b'}	2,94 ± 0,07 ^{klmnopqrstuvw}	7,33
A65	40,16 ± 0,48 ^y	8,36 ± 0,02 ^{hijklmno}	2,68 ± 0,08 ^{wvxy}	7,04
A66	42,12 ± 3,06 ^{pqrstuvwxy}	7,86 ± 0,08 ^{pqrst}	2,93 ± 0,09 ^{lmnopqrstuvw}	7,31
Mini	36.28	5.70	2.25	6.23
Max	50.91	11.62	3.87	8.91
Mean	43.78	8.11	3.04	7.50
CV%	5.77	13.25	9.95	7.92

Les moyennes avec lettres distinctes dans la même colonne sont significativement différentes ($P < 0,05$). * Différence hautement significative ($P < 0,001$).

CHAPITRE 4

III Caractérisation moléculaire du caroubier

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer à travers l'outil moléculaire (RAPD) la diversité génétique existante entre les 11 potentiels cultivars (accessions) présélectionnés sur la base de leurs performances morphométriques (voir chapitre II). Les résultats des mesures de la similarité génétique permettront de prendre une décision relative à la réduction ou non du nombre de ces accessions, lesquelles feront objet d'une évaluation agronomique et commerciale en conditions contrôlées.

1. Matériels et méthodes

1.1 Extraction de l'ADN génomique

L'ADN a été extrait de jeunes feuilles de caroubier collectée au mois de Juin 2020 et congelées à - 20 °C. La quantité de tissu utilisée était de 100 mg, indiquée dans les instructions du kit d'extraction utilisé (NucleoSpin Plant II Mini avec PL1 - Macherey-Nagel). Les feuilles ont été broyées avec un mortier et un pilon en présence d'azote liquide et ce afin d'homogénéiser le tissu végétal pour l'obtention d'un rendement optimal avant l'étape de la lyse.

La lyse des cellules a été effectuée en y ajoutant au broyat 400 µL de tampon PL1, basé sur la méthode de lyse CTAB. La solution doit soigneusement être mélangée avant d'y ajouter 10 µL de solution de RNase A, puis la suspension est incubée pendant 10 minutes à 65 °C. Le lysat est filtré (anneau violet) en réalisant une centrifugation à 11000 g durant 2 minutes. Au filtrat sont ajoutés 450 µL de tampon PC pour optimiser la fixation de l'ADN sur la membrane de silice, le tout mélangés soigneusement en pipetant de haut en bas. Pour la fixation de l'ADN, charger au maximum 700 µL d'échantillon sur la colonne (membrane de silice - anneau vert) et centrifuger pendant 1 minute à 11000 g.

Trois lavages sont nécessaires pour l'élimination complète des protéines, des ARN, des métabolites et autres inhibiteurs de la PCR qui persistent sur la membrane de silice. Le premier lavage est réalisé avec 400 µL de tampon PW1, en centrifugeant à 11000 g pendant 1 minute. Le deuxième, en ajoutant 700 µL de tampon PW2 avec une centrifugation de 11000 g durant 1 minute. Le dernier est effectué avec 200 µL de tampon PW2 en centrifugeant pendant 2 minutes à 11000 g afin d'éliminer le tampon de lavage et sécher complètement la membrane de silice. Enfin, l'ADN génomique est élué avec le tampon d'élué PE (5 mM Tris/HCl, pH 8,5). Pour

se faire, pipetter 50 μL de tampon PE (65 °C) sur la membrane, puis incuber la colonne pendant 5 minutes à 65 °C. Centrifuger pendant 1 minute à 11000 g pour éluer l'ADN. Répéter cette étape avec 50 μL de tampon PE (65 °C) et éluer dans le même tube.

La concentration et qualité de l'ADN génomique ont été mesurées par spectrophotométrie (Thermo NanoDrop ND-1000 UV/VIS - Thermo Fisher Scientific, USA) à 260 nm (1 OD_{260} = 50 ng/ μL) pour l'ADN, 280 nm pour les protéines et 230 nm pour les peptides, acide humique, l'urée, l'EDTA, les polysaccharides...etc. D'une manière générale, la pureté d'une solution d'acide nucléique est considérée comme acceptable lorsque le ratio $A_{260} \text{ nm} / A_{280} \text{ nm}$ est compris entre 1,8 – 2,0 et entre 2,0 – 2,2 pour le ratio $A_{260} \text{ nm} / A_{230} \text{ nm}$.

1.2 Amplification PCR-RAPD

La PCR pour l'analyse RAPD a été réalisée dans des volumes de 25 μL contenant 25 ng/ μL d'ADN génomique, 10 μM d'amorces, 1,25 d'unités de la Taq polymérase (HOT FIREPol, Solis Biodyne, Estonie), 80 mM de dNTPs (Solis Biodyne) et 2,5 mM de MgCl_2 . Les réactions d'amplification de l'ADN ont été réalisées dans un thermocycleur (Bio-Rad iCycler, USA) en utilisant les paramètres de cycle suivants : 1 cycle de 94 °C pendant 4 min, 45 cycles de 92 °C pendant 1 min, 33 °C pendant 1 min, et 72 °C pendant 2 min. Une étape d'extension finale à 72 °C pendant 10 min a été réalisée pour assurer une extension complète. Au total, 10 amorces ont été choisies arbitrairement (Tableau 14) des ensembles suivants : OPA, OPB, OPC, OPD, OPI, OPJ (Macrogen, Corée de sud). Chaque réaction d'amplification a été réalisée en utilisant une seule amorce et répétée afin de vérifier la reproductibilité des résultats.

Les fragments amplifiés des RAPDs ont été séparés sur des gels d'agarose MetaPhor™ à 3,5 % (lonza, Suisse) colorés avec du GelRed (Biotium, USA) et un colorant de chargement 6x DNA Loading Dye Buffer Orange and Blue (Solis Biodyne). Les fragments ont ensuite été photographiés sur un système numérique de documentation des gels. Le marqueur de poids moléculaire 1 kb (Solis Biodyne) a été utilisé pour estimer la taille des fragments. Les bandes sur le gel ont été enregistrées comme présentes (1) et absentes (0).

Les analyses moléculaires ont été réalisées au niveau du laboratoire Gene Life Sciences, Sidi Bel Abbès – Algérie.

1.3 Analyse des données

L'analyse des données a été basée sur une matrice binaire de 1 et 0 où une lecture de 1 code pour la présence de bandes dans le gel et 0 code pour l'absence de bandes. Une autre matrice de l'indice de similarité de Jaccard (Tableau 15) a été calculée sur la base des données élaborées, les valeurs dans la matrice sont comprises entre 0 et 1 où 0 indique les génotypes les plus éloignés et 1 indique les génotypes les plus similaires selon leur profil moléculaire, le même indice a été utilisé pour construire un dendrogramme UPGMA (méthode de groupe de paires non pondérées avec moyenne arithmétique).

Le coefficient de corrélation cophénétique a été calculé pour évaluer la précision du modèle de regroupement. L'analyse des données a été soutenue par une ACoP (Analyse des Coordonnées Principales), qui est une analyse multivariée puissante permettant d'explorer la variabilité entre les génotypes, elle se concentre sur les distances et tente d'extraire les dimensions qui expliquent les distances maximales.

L'indice de Jaccard et le clustering ont été construits en utilisant le logiciel NTSYS-pc, version 2.1. (Rohlf, 2000), tandis que l'analyse multivariée a été réalisée en utilisant le logiciel PAST 4.03.

2. Résultats et discussion

Les dix amorces RAPD utilisées pour la caractérisation génétique des 11 cultivars présélectionnés (Bejaoui-A11, Guelmi-A27, Msili-A42, Skikdi-A21, Bumerdas-A08, Maricani-A47, Zayanid-A59, Tlemsani-A43, Abassi-A54, Relizani-A01 et Tarfi-A25) ont généré un total de 92 bandes (Tableau 14) avec un pourcentage de polymorphisme de 100 %, révélant une grande diversité génétique entre ces potentiels cultivars de caroubiers algériens. Le taux de polymorphisme enregistré chez les accessions de caroubiers portugais était de 40 % (Barracosa et al., 2008), et de 61,85 % chez les accessions syriennes (Mahfoud et al., 2018). Le nombre de bandes variait de 05 (OPJ-08) à 11 (OPA-16, OPA-17, OPB-05 et OPI-19) et la taille des produits amplifiés variait de 117 pb (OPA-16) à 5000 pb (OPA-17) (Figure 43). La taille des fragments obtenus chez les accessions marocaines était comprise entre 40 pb et 2000 pb (Konaté et al., 2007).

Le dendrogramme produit par le coefficient de Jaccard et la méthode de regroupement UPGMA appliquée à l'analyse RAPD a présenté neuf groupes de cultivars qui sont identifiés à un niveau de similarité de 0,65 (Figure 44). Le coefficient de corrélation cophénétique estimé

à 0,84 a montré que les clusters génétiques représentent avec précision les estimations de la similarité génétique. Chaque cluster est représenté par un seul cultivar, excepté les cultivars Zayanid (A59) et Bejaoui (A11), regroupés dans le cluster (A) et Maricani (A47) et Bumerdas (A08) qui sont regroupés dans un seul et même cluster (B) avec un niveau de similarité de 0,83, ce qui permet de confirmer via l'analyse moléculaire, en plus de l'analyse morphométrique, physico-chimique et phénotypique (voir les chapitres précédents), l'appartenance de l'accession A08 (Bumerdas) au cultivar Maricani. A noter que les cultivars Zayanid (A59) et Bejaoui (A11) sont regroupés dans les mêmes clusters relatifs d'une part aux caractères morphologiques (cluster III) et d'autres part aux traits physico-chimiques et phénotypiques (cluster IV). Ainsi, il est à constater que les résultats des analyses moléculaires via les RAPDs coïncident éminemment avec ceux exprimés par les analyses morphométriques, phénotypiques et physico-chimiques, confirmant de ce fait, la robustesse de ces marqueurs morphologiques dans l'estimation de la diversité phylogénétique, notamment chez le caroubier et renforce notre hypothèse énoncée précédemment pour laquelle on a estimé que les caractères morphométriques utilisés dans cette étude sont peu ou pas influencés par l'environnement. En comparant les distances entre les cultivars analysés, Relizani est celui qui est le plus distant génétiquement avec des niveaux de similitude en deçà de 0,08 et ce avec la majorité des cultivars (Tableau 15).

La répartition des 11 cultivars de caroubier par l'analyse des coordonnées principales (ACoP) basée sur l'ensemble des données RAPD est représentée par la Figure 45. Sur la variation totale (59,62 %), 46,65 % sont représentés par la coordonnée 1 et 12,97 % par la coordonnée 2. L'ACoP a montré que les cultivars Relizani, Msili et Tarfi (hermaphrodite) sont des génotypes significativement distincts, tandis que les autres cultivars peuvent être regroupés en 4 clusters, le premier est le plus évident est composé des cultivars Maricani et Bumerdas, le deuxième comprenant les cultivars Zayanid (localisé à Tlemcen) et Bejaoui, le troisième cluster regroupe deux cultivars, Skikdi et Guelmi, et le dernier cluster est composé des cultivars Tlemsani (localisé à Blida) et Abassi. Le cultivar Relizani est celui le plus éloigné génétiquement. Par ailleurs, l'analyse des coordonnées principales ainsi que le dendrogramme n'ont montré aucune influence des régions sur la distribution des cultivars étudiés. Dans l'ensemble, l'analyse ACoP a confirmé les résultats de la répartition des cultivars obtenus via l'analyse UPGMA.

Parmi les ensembles d'amorces RAPD utilisées, l'OPJ semble être le plus spécifique pour la moitié des cultivars de caroubiers analysés, ainsi, l'amorce OPJ-A08 a amplifié uniquement le cultivar Msili avec un marqueur bien défini d'une taille de 577 pb (Figure 46). L'amorce OPJ-04 a produit 7 bandes spécifiques pour 5 différents cultivars (Figure 46) : deux bandes (1414, 403 pb) pour le cultivar Guelmi, une bande (1455 pb) pour Tlemsani, une autre (498 pb) pour le cultivar Abassi, deux bandes spécifiques (1933, 1358 pb) pour le cultivar Relizani et une bande (1418 pb) pour le cultivar hermaphrodite Tarfi. Deux autres bandes spécifiques (204 et 958 pb) ont été produits pour les cultivars Relizani et Tarfi respectivement par les amorces OPA-17 et OPB-05.

En conclusion, l'analyse moléculaire par les RAPDs a dévoilé une importante diversité génétique entre les 11 potentiels cultivars de caroubiers et a permis à travers l'indice de similarité de Jaccard de réduire au nombre de neuf les cultivars qui feront l'objet d'une évaluation agronomique et commerciale en conditions contrôlées. Parmi ces 9 cultivars, huit sont des femelles (Relizani, Abassi, Tlemsani, Msili, Bejaoui, Guelmi, Skikdi, Maricani) et un hermaphrodite (Tarfi). Entre le cultivar Bejaoui et Zayanid, le choix s'est porté sur le premier car il présente de meilleures performances morphologiques et physico-chimiques. Dans cette étude, les bandes spécifiques produites par les amorces RAPD peuvent être utilisées pour l'identification de ces cultivars et des accessions de caroubier qui leur sont apparentées et ce, dans le but d'utiliser judicieusement la variabilité génétique existante pour la mise en place de programmes d'amélioration visant la création de variétés de caroubiers qui répondent aux attentes des agriculteurs et agro-industriels.

Tableau 14. Amorces oligonucléotidiques des RAPD utilisés et nombre de produits amplifiés à partir des réactions PCR des 11 cultivars présélectionnés parmi 66 accessions de caroubiers étudiées.

Amorce	Séquence d'amorce (5' — 3')	Nombre de produits amplifiés
OPA-01	5'-CAGGCCCTTC-3'	10
OPA-16	5'- AGCCAGCGAA-3'	11
OPA-17	5'- GACCGCTTGT-3'	11
OPB-05	5'- TGCGCCCTTC-3'	11
OPB-08	5'-GTCCACACGG-3'	09
OPC-01	5'-TTCGAGCCAG-3'	07
OPD-20	5'- ACCCGGTCAC-3'	10
OPI-19	5'- AATGCGGGAG-3'	11
OPJ-04	5'-CCGAACACGG-3'	07
OPJ-08	5'-CATACCGTGG-3'	05

Tableau 15. Matrice des indices de similitude de Jaccard entre les 11 cultivars de caroubiers calculés à partir des données moléculaires de type RAPD.

Cultivar	Bejaoui	Guelmi	Msili	Skikdi	Bumerdas	Maricani	Zayanid	Tlemsani	Abassi	Relizani	Tarfi
Bejaoui	1										
Guelmi	0,44	1									
Msili	0,06	0,09	1								
Skikdi	0,4	0,4	0,17	1							
Bumerdas	0,49	0,48	0,16	0,59	1						
Maricani	0,46	0,45	0,16	0,58	0,83	1					
Zayanid	0,67	0,45	0,16	0,48	0,62	0,55	1				
Tlemsani	0,32	0,43	0,16	0,41	0,45	0,42	0,39	1			
Abassi	0,28	0,34	0,15	0,43	0,38	0,35	0,31	0,49	1		
Relizani	0,00	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,04	0,07	0,15	1	
Tarfi	0,21	0,28	0,18	0,31	0,32	0,28	0,25	0,28	0,32	0,04	1

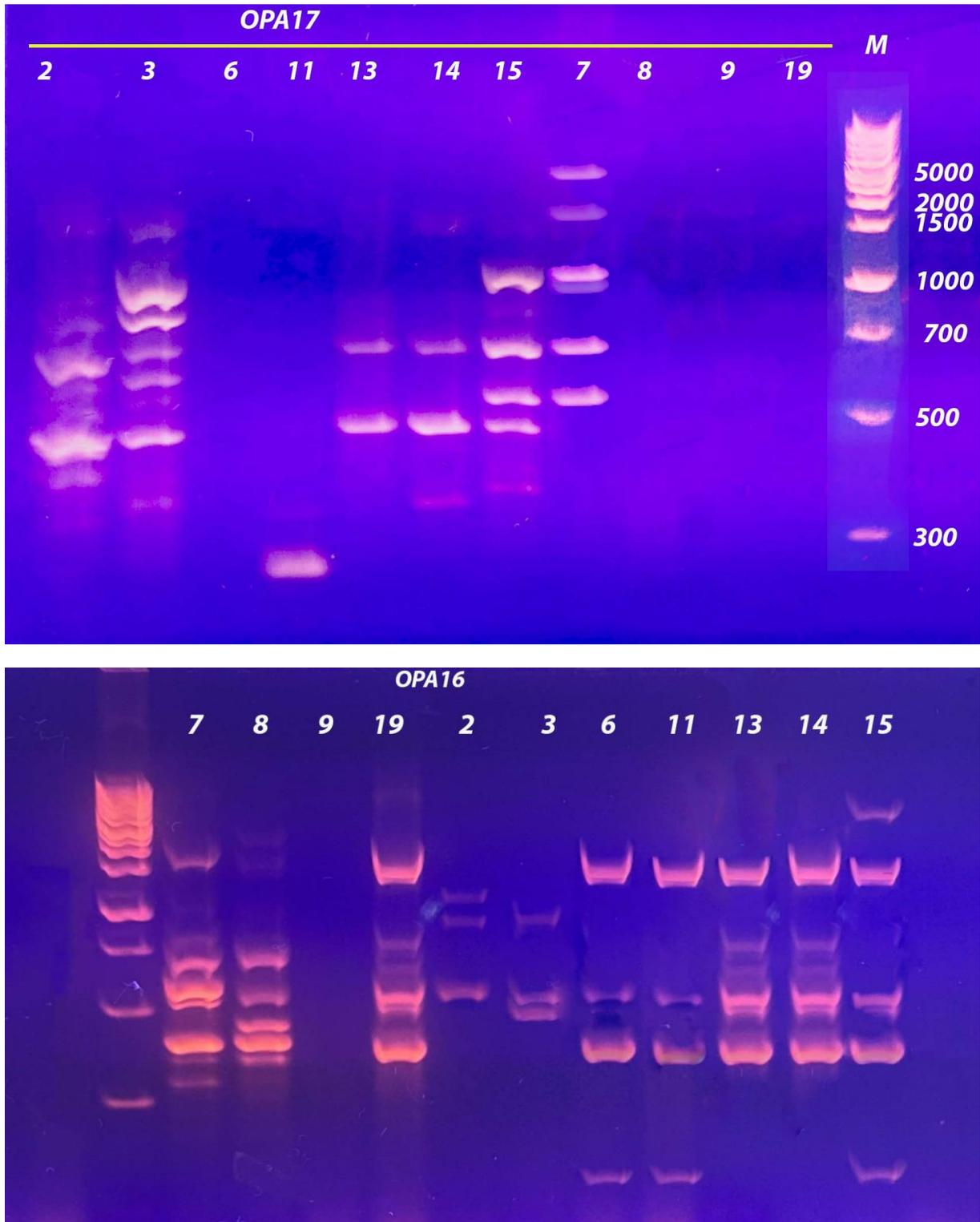


Figure 43. Exemple de produits d'amplification obtenus par les amorces OPA-17 et OPA-16. 2 : Bejaoui, 3 : Guelmi, 6 : Msili, 7 : Tlemsani, 8 : Abassi, 9 : Relizani, 11 : Skikdi, 13 : Bumerdas, 14 : Maricani, 15 : Zayanid, 19 : Tarfi.

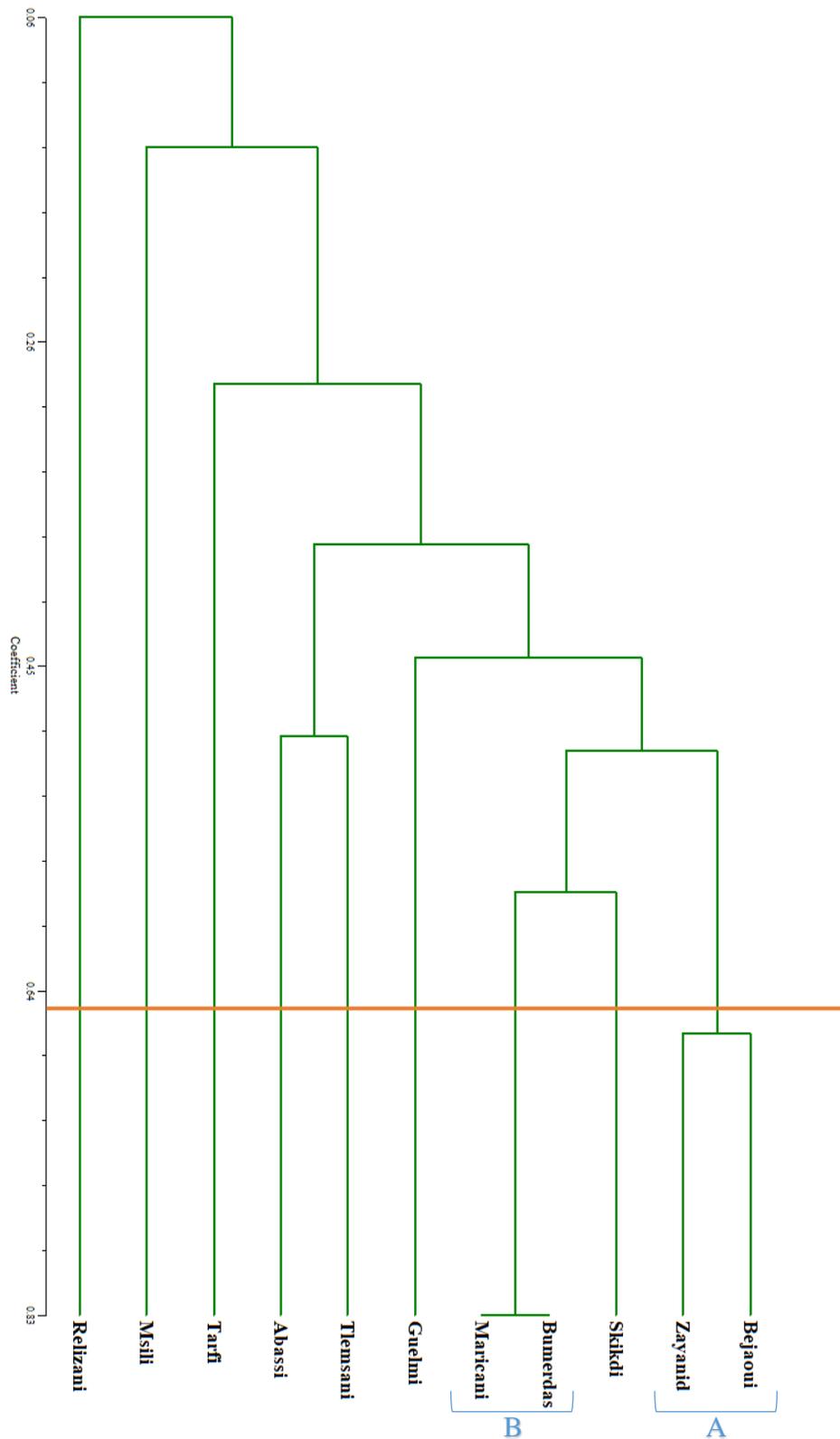


Figure 44. Dendrogramme produit par le coefficient de Jaccard et la méthode de regroupement UPGMA appliquée à 92 fragments polymorphes RAPD de 11 cultivars de caroubiers. Les cultivars ont été regroupés en 9 clusters, 7 avec pour chacun un seul cultivar et 2 clusters, regroupant d'une part les cultivars Zayanid et Bejaoui (A) et d'autre part les cultivars Maricani et Bumerdas (B).

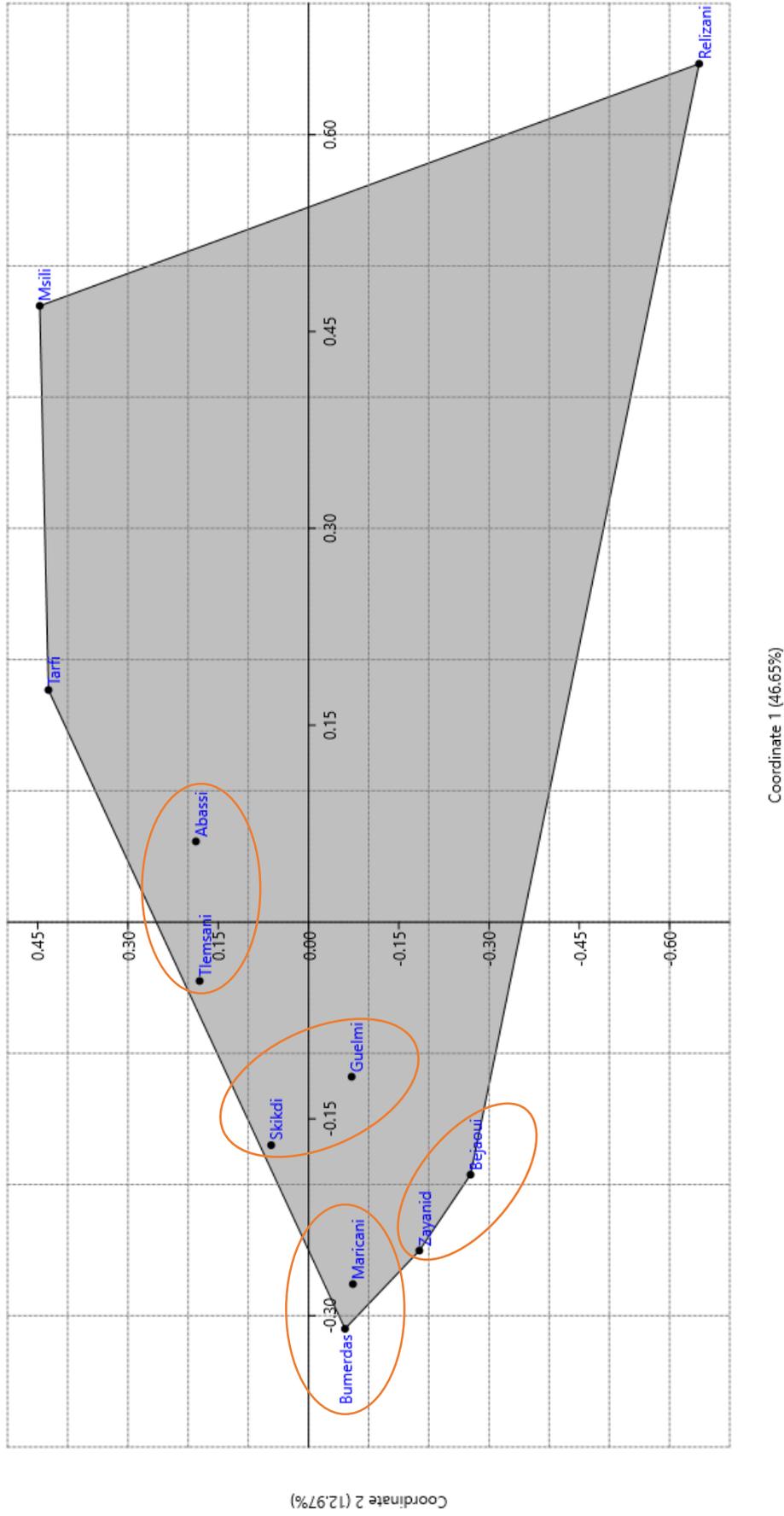


Figure 45. Analyse des Coordonnées Principales basée sur 92 fragments polymorphes RAPD de 11 cultivars de caroubiers.

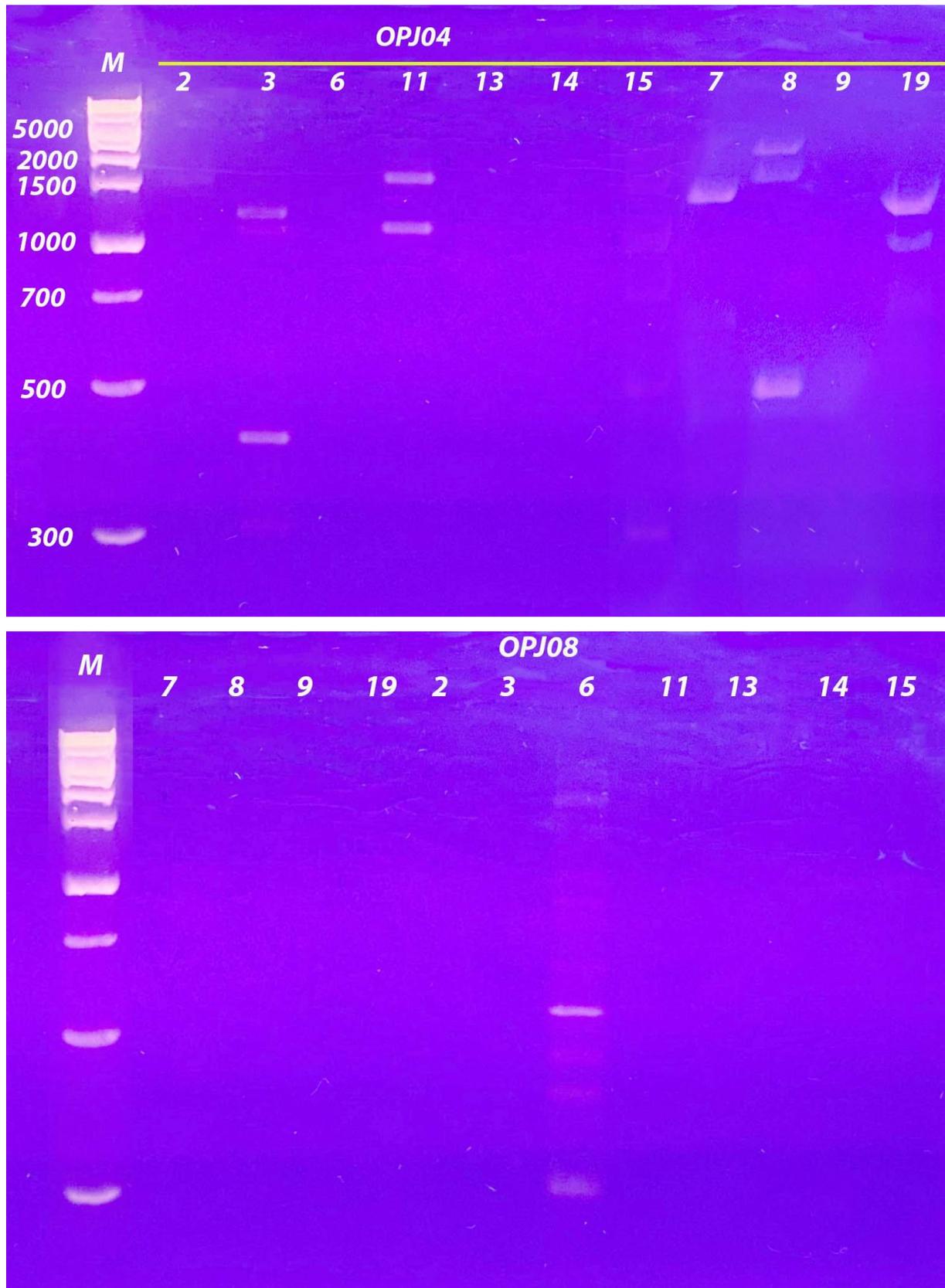


Figure 46. Spécificité des marqueurs de type RAPD produits par les amorces OPJ-04 et OPJ-08 pour six cultivars de caroubiers analysés.

CONCLUSION
ET
PERSPECTIVES

Conclusion et perspectives

Le caroubier est l'un des paysages de la méditerranée avec une adaptation extraordinaire aux conditions extrêmes, notamment à la sécheresse, à la salinité et aux sols pauvres et calcaires. A travers ses multiples et intéressants usages, la culture du caroubier peut jouer un rôle primordial dans la structure économique et sociale des régions rurales des pays méditerranéens, notamment en Algérie qui connaît depuis l'indépendance un problème sérieux d'exode rural.

La cératoniculture peut être un des moyens permettant la concrétisation de ces projets de développement. Cependant, cet objectif n'est atteignable que si en amont, des programmes de recherche sont menés dans le but de connaître la conjoncture de l'espèce en question, mais aussi dans le cadre de sa valorisation, gestion et conservation. La présente étude a justement permis d'une part, de mettre en lumière l'état actuel de la variabilité génétique chez le caroubier en Algérie et d'autre part, de valoriser cette diversité à travers l'identification et sélection des premiers cultivars algériens de caroubier. Ces derniers, pourront constituer, dans une perspective de gestion et conservation des ressources de l'espèce, le germoplasme de base pour les programmes d'amélioration et de sélection de variétés performantes, nécessaires à la création de vergers de caroubier compétitifs et viables.

En dépit de son déclin en Algérie pour les raisons que nous avons précédemment évoquées, le caroubier arrive à conserver une diversité génétique importante, évaluée grâce aux marqueurs génétiques utilisés dans le présent travail. En effet, parmi les 66 accessions de caroubier échantillonnées à travers le territoire national, 7 clusters ont été générés à partir des caractères morphométriques, 4 groupes via les caractères physico-chimiques et phénotypiques et 9 clusters produits à partir de marqueurs moléculaires de type RAPD. En tout, neuf cultivars potentiels de caroubier ont été identifiés et sélectionnés, 8 cultivars femelles et un hermaphrodite.

En outre, cette étude a pu démontrer que les marqueurs morphométriques, physico-chimiques et phénotypiques sont avec les marqueurs moléculaires, des outils incontournables non seulement pour la caractérisation et l'identification des cultivars, mais aussi pour l'évaluation de la diversité génétique chez une espèce donnée.

La comparaison entre les résultats des mesures morphométriques révélés dans ce travail et ceux effectués dans les différents pays du bassin méditerranéen a montré que les gousses les

plus similaires aux caroubes algériennes sont celles du caroubier espagnol. Concernant les résultats des paramètres physico-chimiques, nous avons constaté que les gousses qui se rapprochaient le plus de la caroube algérienne étaient les gousses du caroubier marocain et espagnol. La comparaison a révélé que la richesse en sucres totaux de la caroube algérienne est parmi la plus faible dans le bassin méditerranéen.

Par ailleurs, les résultats des analyses physico-chimiques et phénotypiques ont permis de distinguer clairement entre les caroubiers greffés et les caroubiers sauvages. Ces derniers, se caractérisent par une plus faible teneur en sucre total par rapport aux caroubiers greffés et présentent des gousses marron de forme torsadée, minces et étroites, tandis que les gousses des pieds greffés, sont de couleur brun rougeâtre, courbées, longues, larges et épaisses. Il ressort de cette différence que la sélection empirique a permis non seulement d'augmenter le rendement à partir des traits phénotypiques, mais aussi d'améliorer par conséquent le taux des sucres chez le caroubier.

Malgré quelques inconvénients que présentent les marqueurs RAPDs notamment celui lié à leur dominance, il n'en demeure pas moins qu'ils ont montré dans cette étude leur efficacité, autant dans la détermination de la variabilité génétique, que pour la révélation de marqueurs spécifiques aux différents cultivars de caroubier. Ces marqueurs peuvent être utilisés pour l'identification de ces cultivars et accessions qui leur sont apparentées et ce, dans la perspective de valoriser judicieusement les ressources génétiques existantes chez le caroubier.

En quelques années seulement, le caroubier en Algérie a gagné en popularité auprès des agriculteurs ainsi que des consommateurs et ce, grâce notamment à l'effort consenti par les acteurs de l'agro-industrie mené par la Sarl BOUBLENZA et les pouvoirs publics. De cet effort est né en 2020, le Conseil National Interprofessionnel de la Filière Caroube (CNIF-Caroube), qui regroupe industriels, collecteurs, agriculteurs et scientifiques, et dont l'objectif global est d'accompagner l'ensemble des acteurs de la filière dans la mise en œuvre de leurs actions et programmes visant le développement de la culture de la caroube en Algérie, la promotion de ses multiples usages et la consolidation de son importance économique, sociale et environnementale dans les zones rurales. Ce conseil s'est fixé aussi comme mission, d'accompagner et de veiller à la réussite, grâce notamment à l'effort de la recherche scientifique, du programme lancé par les pouvoirs publics relatif à la plantation de 10 millions de caroubiers à l'horizon 2030.

La présente étude s'inscrit dans le contexte de cet effort de recherche scientifique visant à promouvoir et valoriser le caroubier en Algérie à travers la création de vergers à greffons, dans lesquels seront installés les premiers cultivars de caroubiers sélectionnés via les résultats de ce travail. A partir des cultivars les plus performants sur le plan agronomique et commercial, sera collecté le matériel végétal nécessaire à la multiplication et distribution de ces variétés cultivées pour la création des premiers vergers conventionnels de caroubier algérien.

Ces vergers à greffons auront comme vocation de conserver ce germoplasme in-situ et de le gérer judicieusement par des programmes ayant comme tâches principales, la promotion de ces cultivars auprès des agriculteurs et leur mise à disposition des scientifiques désirant améliorer et apporter des solutions aux problématiques auxquelles est confrontée l'espèce. Pour ce faire, ces chercheurs scientifiques peuvent compter sur l'appui de la biotechnologie, dont l'utilité est devenue indispensable pour la mise en place de tous programmes modernes d'amélioration génétique.

Ainsi, il est possible par le biais de la culture in vitro de multiplier conformément et en un temps réduit un très grand nombre de clones sélectionnés. Aussi, le développement des marqueurs moléculaires sera d'une grande utilité, puisqu'il contribuera à ouvrir une nouvelle perspective pour la sélection chez le caroubier ; les priorités seront données aux marqueurs moléculaires liés au déterminisme du sexe, à la quantité et qualité de la gousse et des graines et à la précocité d'entrée en production. Il est également intéressant d'utiliser la technique de mutagenèse pour développer des variants génétiques présentant une meilleure qualité fruitière ou rendement agricole. Par ailleurs, l'utilisation de la technique de fusion des protoplastes chez le caroubier, peut contribuer à l'obtention d'hybrides somatiques regroupant les caractéristiques de qualité et de résistance aux stress abiotiques. Enfin et en dépit des controverses qu'elle suscite au sein de la communauté scientifique et dans la sphère politique, la transformation génétique est l'une des techniques les plus prometteuses pour l'obtention de cultivars de caroubier tolérants les facteurs limitant l'expansion de son aire de répartition.

Enfin, nous pensons que le développement du caroubier en Algérie, peut avec d'autres cultures, jouer un rôle majeur dans la renaissance et le développement de l'agriculture nationale et ce, dans la perspective d'orienter l'économie de rente actuelle vers une économie basée sur des ressources durables, créatrices d'emplois et qui assurent une autosuffisance alimentaire, gage de stabilité et prospérité pour le pays.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- 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. 1–7.
- ABIDAR, A., BOIANGIU, R.S., DUMITRU, G., TODIRASCU-CIORNEA, E., AMAKRAN, A., CIOANCA, O., HRITCU, L., AND NHIRI, M. (2020). The Aqueous Extract from *Ceratonia siliqua* Leaves Protects against 6-Hydroxydopamine in Zebrafish: Understanding the Underlying Mechanism. *Antioxidants*, 9(4), 304, doi: 10.3390/antiox9040304.
- AEA: Anuario de Estadística Agraria, 1987. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España.
- AFIF, M., MESSAOUD, Ch., BOULILA, A., CHOGRANI, H., BEJAOU, A., REJEB, M.N., AND BOUSSAID, M. (2008). Genetic structure of Tunisian natural carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) populations inferred from RAPD markers. *Annals of Forest Science*, 65, 710, doi: 10.1051/forest:2008057.
- AIT CHITT, M., BELMIR, H., AND LAZRAC, A. (2007). Production de plants sélectionnés et greffés de caroubier. *Transfert de technologie en agriculture*, 153, 1–4.
- ALBANELL, E., CAJA, G., AND PLAIXATS, J. (1991). Characteristics of Spanish carob pods and nutritive value of carob kibbles. *CIHEAM, Options Méditerranéennes*, 16, 135–136. <http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=91605058>.
- ALBANELL, E., CAJA, G., AND PLAIXATS, J. (1996). Characterization of carobs fruits (*Ceratonia siliqua* L.) cultivated in Spain for Agro-industrial use. *International Tree Crops Journal*, 9, 1–9, doi: 10.1080/01435698.1996.9752955.
- ALBANELL, E. (1990). *Caracterización morfológica, composición química y valor nutritivo de distintas variedades de garrofa (Ceratonia siliqua L.) cultivadas en España*. PhD thesis, Barcelona University, Spain, pp. 209.
- ALZOUBI, K.H., ALIBBINI, S., KHABOUR, O.F., EL-ELIMAT, T., AL-ZUBI, M., AND ALALI, F.Q. (2018). Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Prevents Short-Term Memory Deficit Induced by Chronic Stress in Rats. *Journal of Molecular Neuroscience*, 66, 314–321, doi: 10.1007/s12031-018-1161-8.
- AMAR, Z. (2000). Agricultural produce in the Land of Israel in the Middle Ages. Yad Izhak Ben-Zvi, Jerusalem, pp. 420 (in Hebrew).
- ARISTA, M., AND TALAVERA, S. (1990). Numeros cromosomicos para la flora Española. *Lagasalia*, 16(2), 323–328.

- AVALLONE, R., PLESSI, M., BARALDI, M., AND 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., TORUN, H., AYAZ, S., CORREIA, P.J., ALAIZ, M., SANZ, C., GRÚZ, J., AND STRNAD, M. (2007). Determination of chemical composition of Anatolian carob pod (*Ceratonia siliqua*): sugars, amino and organic acids, minerals and phenolic compounds. *Journal of Food Quality*, 30, 1040–1055, doi: 10.1111/j.1745-4557.2007.00176.x.
- AZAB, A. (2017). Carob (*Ceratonia siliqua*): Health, Medicine and Chemistry. *European Chemical Bulletin*, 6(10), 456–469, doi: 10.17628/ecb.2017.6.456-469.
- BABA AISSA, F. (2000). Encyclopédie des plantes utiles, Flore d'Algérie et du Maghreb, Substances végétales d'Afrique d'Orient et d'Occident. EDAS: 55.
- BANQUERI, J.A. (1802). Libro de agricultura del Doctor Abu Zacaria Iahia Aben Mohamed Ben Ahmed Ebn El Awam, Sevillano. Tomo primero. Madrid en la imprenta real, Madrid, España, pp. 698.
- BARRACOSA, P., ALMEIDA, M.T., AND CENIS, J. (1996). Characterization of cultivars of carob tree in Algarve (Portugal). In Proceedings of the III International Carob Symposium. Cabanas Tavira, Portugal (in press).
- BARRACOSA, P., OSÓRIO, J., AND 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, doi: 10.1016/j.scienta.2007.06.024.
- BARRACOSA, P., LIMA, M.B., AND CRAVADOR, A. (2008). Analysis of genetic diversity in Portuguese *Ceratonia siliqua* L. cultivars using RAPD and AFLP markers. *Scientia Horticulturae*, 118(3), 189–199, doi: 10.1016/j.scienta.2008.06.020.
- BARUA, U.M., CHALMERS, K.J., HACKETT, C.A., THOMAS, W.T.B., POWELL, W., AND WAUGH, R. (1993). Identification of RAPD markers linked to a *Rhynchosporium secalis* resistance locus in barley using near-isogenic lines and bulked segregant analysis. *Heredity*, 71, 177–184.
- BATLLE, I., ROVIRA, M., AND TOUS, J. (1996). *Carob germplasm characterization using isoenzymes*. Paper presented at the 3th International Carob Symposium, Cabanas-Tavira, Portugal.
- BATLLE, I., AND 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 Research. Gatersleben/International Plant Resources Institute. Rome, Italy, pp. 92.

- BATLLE, I. (1997). Current situation and possibilities of development of the carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in the Mediterranean region. Unpublished FAO Report. Rome, Italy.
- BAUMEL, A., MIRLEAU, P., VIRUEL, J., BOU DAGHER KHARRAT, M., LA MALFA, S., OUAHMANE, L., DIADEMA, K., MOAKHAR, M., SANGUIN, H., AND 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.
- BEN AYACHE, S., SAAFI, E.B., EMHEMMEDE, F., FLAMINI, G., ACHOUR, L., AND MULLER, Ch.D. (2020). Biological Activities of Aqueous Extracts from Carob Plant (*Ceratonia siliqua* L.) by Antioxidant, Analgesic and Proapoptotic Properties Evaluation. *Molecules*, 25, 3120, doi: 10.3390/molecules25143120.
- BEN OTHMEN, Kh., ELFALLEHB, W., GARCÍA BELTRÁN, J.M., ÁNGELES ESTEBAN, M., AND HADDADA, M. (2020). An in vitro study of the effect of carob (*Ceratonia siliqua* L.) leaf extracts on gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) leucocyte activities. Antioxidant, cytotoxic and bactericidal properties. *Fish and Shellfish Immunology*, 99, 35–43, doi: 10.1016/j.fsi.2020.02.005.
- BERNARDO, R. (2008). Molecular Markers and Selection for Complex Traits in Plants: Learning from the Last 20 Years. *Crop Science*, 48, 1649–1664, doi: 10.2135/cropsci2008.03.0131.
- BERTRAND, P.Y. (1991). Les noms des plantes au Maroc. Rabat: Editions Actes.
- BESSEDIK, M., GUINET, P., AND SUC, J.P. (1984). Données paléofloristiques en Méditerranée nord-occidentale depuis l'Aquitaniens. *Revue de Paléobiologie*, special vol, 25–31.
- BINER, B., GUBBUK, H., KARHAN, M., AKSU, M., AND PEKMEZCI, M. (2007). Sugar profiles of the pods of cultivated and wild types of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.) in Turkey. *Food Chemistry*, 100(4), 1453–1455, doi: 10.1016/j.foodchem.2005.11.037.
- BOLARIĆ, S., DRAGOJEVIĆ MÜLLER, I., VOKURKA, A., VITALI ČEPO, D., RUŠČIĆ, M., SREČEC, S., AND KREMER, D. (2021). Morphological and molecular characterization of Croatian carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) germplasm. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 45, 807–818, doi: 10.3906/tar-2107-24.
- BOUBLENZA, I., EL HAITOUM, A., GHEZLAOUI, S., MAHDAD, M., VASAI, F., AND CHEMAT, F. (2019). Algerian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations. Morphological and chemical variability of their fruits and seeds. *Scientia Horticulturae*, 256, 108537, doi: 10.1016/j.scienta.2019.05.064.
- BOUBLENZA, I. (2020). *Etude des populations spontanées et cultivées du caroubier (Ceratonia siliqua L.) en Algérie*. PhD thèse. Univ. Tlemcen, Algérie, pp. 115.

- BURES, P., PAVLICEK, T., HOROVA, L., AND NEVO, E. (2004). Microgeographic genome size differentiation of the carob tree, *Ceratonia siliqua*, at 'Evolution Canyon'. *Annals of Botany*, 93(5), 529–535, doi: 10.1093/aob/mch074.
- CAIRATI, E. (2013). Historia cultural del algarrobo, desde la cuenca del Mediterráneo hasta la Costa Norte de Perú. *Altre Modernita*, 10(11), 186–204.
- CAJA, G. (1985). La Garrofa: Composición, procesado y usos agroindustriales. Jornadas de la Garrofa. LLiria, Valencia, España.
- CARUSO, M., LA MALFA, S., PAVLÍČEK, T., FRUTOS TOMÁS, D., GENTILE, A., AND TRIBULATO, E. (2008a). Characterisation and assessment of genetic diversity in cultivated and wild carob (*Ceratonia siliqua* L.) genotypes using AFLP markers. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 83(2), 177–182, doi: 10.1080/14620316.2008.11512367.
- CARUSO, M., DISTEFANO, G., YE, X., LA MALFA, S., GENTILE, A., TRIBULATO, E., AND ROOSE, M.L. (2008b). Generation of expressed sequence tags from carob (*Ceratonia siliqua* L.) flowers for gene identification and marker development. *Tree Genetics & Genomes*, 4, 869–879, doi: 10.1007/s11295-008-0159-8.
- CARUSO, M., LA MALFA, S., LA ROSA, G., GENTILE, A., TRIBULATO, E., AND FRUTOS TOMÁS, D. (2009). Molecular characterization and evaluation of carob germplasm. *Acta Horticulturae*, 818, 95–102, doi: 10.17660/ActaHortic.2009.818.12.
- CATARINO, F.M. (1993). Le caroubier une plante exemplaire. *Naturopa conseil de l'Europe*. Centre Naturopa. N° 73, pp. 14–15.
- CATARINO, F.M. AND BENTO-PEREIRA, F. (1976). Ecological characteristics and CO₂ fixation in a xerophytic plant (*Ceratonia siliqua* L.). Proceedings 3rd MPP Meeting Izmir Ed. Vardar, Sheikh, Ozturk. Izmir, Turkey.
- CHAMI, M., HAJJ, A., KAHWAJI, J., YOUSSEF, H., GHAITH, S., FAKIH, L., SMAHA, M., NABBOUT, R., EL RIACHY, M., AS-SADI, F., AL ZEIN, M., RUIZ GOMEZ, F.J., PALACIOS-RODRIGUEZ, G., NAVARRO-CERILLO, R., TOUS, J., AND CHALAK, L. (2018). Assessment of Ancient Carob Germplasm of Lebanon by Morphological Traits. *Journal of the American Pomological Society*, 72(4), 260–278.
- COLLARD, B.C.Y., JAHUFER, M.Z.Z., BROUWER, J.B., AND PANG, E.C.K. (2005). An introduction to markers, quantitative trait loci (QTL) mapping and marker-assisted selection for crop improvement: The basic concepts. *Euphytica*, 142, 169–196, doi: 10.1007/s10681-005-1681-5.

- CORREIA, P.J., GAMA, F., PESTANA, M., AND MARTINS-LOUÇÃO, M.A. (2010). Tolerance of young (*Ceratonia siliqua* L.) carob rootstock to NaCl. *Agricultural Water Management*, 97(6), 910–916, doi: 10.1016/j.agwat.2010.01.022.
- CORSI, L., AVALLONE, R., COSENZA, F., FARINA, F., BARALDI, C., AND BARALDI, M. (2002). Antiproliferative effects of *Ceratonia siliqua* L. on mouse hepatocellular carcinoma cell line. *Fitoterapia*, 73, 674–684, doi: 10.1016/s0367-326x(02)00227-7.
- CRAIG, W.J., AND NGUYEN, T.T. (1984). Caffeine and theobromine level in cocoa and carob products. *Journal of Food Science*, 49, 302–305, doi: 10.1111/j.1365-2621.1984.tb13737.x.
- DAVIES, D.L., AND BOULDIN, D.W. (1979). A Cluster Separation Measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1(2), 224–227, doi: 10.1109/TPAMI.1979.4766909.
- DI GUARDO, M., SCOLLO, F., NINOT, A., ROVIRA, M., HERMOSO, J. F., DISTEFANO, G., LA MALFA, S. AND BATLLE, I. (2019). Genetic structure analysis and selection of a core collection for carob tree germplasm conservation and management. *Tree Genetics & Genomes*, 15, 41, doi: 10.1007/s11295-019-1345-6.
- DINESH, K.R., LIM, T.M., CHUA, K.L., CHAN, W.K., AND PHANG, V.P. (1993). RAPD analysis: an efficient method of DNA fingerprinting in fishes. *Zoological science*, 10(5), 849–854.
- DUBOIS, M., GILLES, K.A., HAMILTON, J.K., REBERS, P.A., AND SMITH, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356, doi: 10.1021/ac60111a017.
- DUNN, J.C. (1974). Well-Separated Clusters and Optimal Fuzzy Partitions. *Journal of Cybernetics*, 4(1), 95–104, doi: 10.1080/01969727408546059.
- EDWARDS, A., CIVITELLO, A., HAMMOND, H.A., AND CASKEY, C.T. (1991). DNA typing and genetic mapping with trimeric and tetrameric tandem repeats. *The American Journal of Human Genetics*, 49, 746–756.
- EL BAKKALI, A., ESSARIOUI, A., MEKKAOUI, A., HSSAINI, L., AND MAMOUNI, A. (2019). Characterization of Carob Trees Suggests High Morphological Variability in Populations of the Middle Atlas Region, Morocco: Towards Use of Carob Germplasm in Breeding Program. *International journal of pure and applied bioscience*, 7(1), 22–34, doi: 10.18782/2320-7051.6979.
- EL BATAL, H., HASIB, A., OUATMANE, A., DEHBI, F., JAOUAD, A., AND BOULI, A. (2011). Sugar composition and yield of syrup production from the pulp of Moroccan carob pods (*Ceratonia siliqua* L.). *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S955–S959, doi: 10.1016/j.arabjc.2011.10.012.

- EL HAJAJI, H., LACHKAR, N., ALAOU, K., CHERRAH, Y., FARAH, A., ENNABILI, A., EL BALI, B., AND LACHKAR, M. (2011). Antioxidant activity, phytochemical screening, and total phenolic content of extracts from three genders of carob tree barks growing in Morocco. *Arabian Journal of Chemistry*, 4, 321–324, doi: 10.1016/j.arabjc.2010.06.053.
- EL HAJAJI, H., LACHKAR, N., ALAOU, K., CHERRAH, Y., FARAH, A., ENNABILI, A., EL BALI, B., AND LACHKAR, M. (2010). Antioxidant Properties and Total Phenolic Content of Three Varieties of Carob Tree Leaves from Morocco. *Records of Natural Products*, 4(4), 193–204.
- EL KAHKAHI, R., ZOUHAIR, R., AIT CHITT, M., AND ERRAKHI, R. (2014). Morocco carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of Pods and Kernel. *International journal of pure and applied bioscience*, 2(4), 38–47.
- EL-HASKOURY, R., KRIAA, W., LYOUSSI, B., AND MAKNI, M. (2018). *Ceratonia siliqua* honeys from Morocco: Physicochemical properties, mineral contents, and antioxidant activities. *Journal of Food and Drug Analysis*, 26, 67–73, doi: 10.1016/j.jfda.2016.11.016.
- EL-HASKOURY, R., ZIZI, S., TOUZANI, S., AL-WAILI, N., AL-GHAMDI, A., AND LYOUSSI, B. (2015). Diuretic Activity of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Honey: Comparison with Furosemide. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 12(4), 128–133, doi: 10.4314/ajtcam.v12i4.19.
- EVREINOFF, V.A. (1955). Le pistachier. *Journal d'Agriculture Tropicale et de Botanique Appliquée*, 2, 389–414.
- FAOSTAT: The Statistics division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.faostat.fao.org.
- FERGUSON, I.K. (1980). The pollen morphology of *Ceratonia* (Leguminosae: Caesalpinioideae). *Kew Bulletin*, 35, 273–277, doi: 10.2307/4114571.
- FRAHM-LELIVELD, J.A. (1957). Observations cytologiques sur quelques Légumineuses tropicales et subtropicales. *Revue de cytologie et de biologie végétale*, 18, 273–287.
- GARCIA-OCHAO, F., AND CASAS, J.A. (1992). Viscosity of locust bean (*Ceratonia siliqua*) gum solutions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 59(1), 97–100, doi: 10.1002/jsfa.2740590114.
- GARCÍA SÁNCHEZ, E. (2013). Los sistemas de injerto en la agronomía andalusí. Manuscrits. *Revista d'Història Moderna*, 31, 41–63, doi: 10.5565/rev/manuscrits.33.
- GIL-ALBERT, F. (1998). Tratado de arboricultura frutal. Vol. II, La ecología del árbol frutal. 4a Edición, Ministerio De Agricultura, Pesca y Alimentación, Ediciones Mundi-Prensa, pp. 205.

- GOLDBLATT, P. (1981). Cytology and phylogeny of the *Leguminosea*. In: POLHILL, R.M., AND RAVEN, P.H. (Eds). *Advances in Legume Systematic*. Vol. 2. Royal Botanic Gardens, Kew, England, pp. 237–464.
- GROVER, A., AND SHARMA, P.C. (2016). Development and use of molecular markers: past and present. *Critical Reviews in Biotechnology*, 36(2), 290–302, doi: 10.3109/07388551.2014.959891.
- GUGLIUZZO, A., MAZZEO, G., MANSOUR, R., AND GARZIA, G.T. (2019). Carob pests in the Mediterranean region: bio-ecology, natural enemies and management options. *Phytoparasitica*, 47, 605–628, doi: 10.1007/s12600-019-00766-7.
- HADDARAH, A., ISMAIL, A., BASSAL, A., HAMIEH, T., IOANNOU, I., AND GHOUL, M. (2013). Morphological and Chemical Variability of Lebanese Carob Varieties. *European Scientific Journal*, 9(18), 353–369.
- HAMMER, Ø., HARPER, D.A.T., AND RYAN, P.D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1–9.
- HASELBERG, C. (1988). A contribution to the classification and characterisation of female and male varieties of *Ceratonia siliqua* L. Proceedings of the II International Carob Symposium. Valencia, Spain, pp. 137–151.
- HASELBERG, C. (1996). Factors influencing flower and fruit development in carob (*Ceratonia siliqua* L.). In III International Carob Symposium. Cabanas-Tavira, Portugal (in press).
- HERNÁNDEZ BERMEJO, J.E., AND GARCÍA SÁNCHEZ, E. (2000). Botánica económica y etnobotánica en al-Andalus (Península Ibérica: siglos X-XV): un patrimonio desconocido de la humanidad. *Arbor CLXVI*, 654, 311–331.
- HILLCOAT, D., LEWIS, G., AND VERDCOURT, B. (1980). A new species of *Ceratonia* (Leguminocea- Caesalpinioideae) from Arabia and the Somali Republic. *Kew Bulletin*, 35, 261–271, doi: 10.2307/4114570.
- HIRSCH, A.M., LUM, M.R., AND DOWNIE, J.A. (2001). What makes the rhizobial-legume symbiosis so special? *Plant Physiology*, 127(4), 1484–1492.
- HOOGENDOORN, B., NORTON, N., KIROV, G., WILLIAMS, N., HAMSHERE, M., SPURLOCK, G., AUSTIN, J., STEPHENS, M., BUCKLAND, P., OWEN, M., AND O'DONOVAN, M. (2000). Cheap, accurate and rapid allele frequency estimation of single nucleotide polymorphisms by primer extension and DHPLC in DNA pools. *Human Genetics*, 107, 488–493, doi: 10.1007/s004390000397.
- HORWITZ, W., AND LATIMER, G.W. (2005). Official methods of analysis of AOAC International. Gaithersburg, Md.: AOAC International, 18th edition.

- HUNTER, R.L., AND MERKERT, C.L. (1957). Histochemical demonstration of enzymes separated by zone electrophoresis in starch gels. *Science*, 125(3261), 1294–1295, doi: 10.1126/science.125.3261.1294-a.
- IDREES, M., AND IRSHAD, M. (2014). Molecular Markers in Plants for Analysis of Genetic Diversity: A Review. *European academic research*, 2(1), 1513–1540.
- IIPUMBU, L. (2008). *Compositional analysis of locally cultivated carob (Ceratonia siliqua) cultivars and development of nutritional food products for a range of marker sectors*. PhD thesis, Stellenbosch University, South Africa, pp. 107.
- IRWIN, H.S., AND BARNEBY, R.C. (1981). Cassieae. In: POLHILL, R.M., AND RAVEN, P.H. (Eds). *Advances in Legume Systematic*. Vol. 1. Royal Botanic Gardens, Kew, England, pp. 97–106.
- JONES, D.K. (1953). Carob culture in Cyprus. FAO 53/2/1225. FOA. Rome.
- JONES, Ch., AND KORTENKAMP, A. (2000). RAPD library fingerprinting of bacterial and human DNA: Applications in mutation detection. *Teratogenesis, Carcinogenesis, and Mutagenesis*, 20(2), 49–63, doi: 10.1002/(sici)1520-6866(2000)20:2<49::aid-tcm1>3.0.co;2-d.
- KAYA, D., AND DALKILIÇ, Z. (2021). Determination of a sex-related RAPD marker in carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Genetika*, 53(2), 575–582, doi: 10.2298/GENSR2102575K.
- KHLIFA, M., BAHLOUL, A., AND KITANE, S. (2013). Determination of Chemical Composition of Carob Pod (*Ceratonia siliqua* L) and its Morphological Study. *Journal of Materials and Environmental Science*, 4(3), 348–353.
- KOCHERANE, R., KROUCHI, F., AND DERRIDJ, A. (2019). Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology. *AgroBiologia*, 9(2), 1581–1600.
- KOLLER, B., LEHMANN, A., MCDERMOTT, J. M., AND GESSLER, C. (1993). Identification of apple cultivars using RAPD markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 85, 901–904, doi: 10.1007/BF00225036.
- 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, Rabat, Maroc, pp. 196.
- KONATE, I., FILALI-MALTOUF, A., AND BERRAHO, El-B. (2007). Diversity analysis of Moroccan carob ("*Ceratonia siliqua*" L.) accessions using phenotypic traits and RAPD markers. *Acta Botanica Malacitana*, 32, 79–90, hdl.handle.net/10630/3708.
- KONATÉ, I., EL-BEKKAY, B., AND FILALI-MALTOUF, A. (2009). Inter-simple sequence repeat markers variation among natural accessions of Moroccan carob tree (*Ceratonia siliqua*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 11(2), 168–172.

- KONIECZNY, A., AND AUSUBEL, F.M. (1993). A procedure for mapping *Arabidopsis* mutations using co-dominant ecotype-specific PCR-based markers. *The Plant Journal*, 4(2), 403–410.
- KORKMAZ, N., AKIN, M., KOC, A., EYDURAN, S.P., ILHAN, G., SAGBAS, H.I., AND ERCISLI, S. (2020). Morphological and biochemical diversity among wild-grown carob trees (*Ceratonia siliqua* L.). *Folia Horticulturae*, 32(1), 1–10, doi: 10.2478/fhort-2020-0007.
- KUMAR, P., GUPTA, V.K., MISRA, A.K., MODI, D.R., AND PANDEY, B.K. (2009). Potential of Molecular Markers in Plant Biotechnology. *Plant Omics Journal*, 2(4), 141–162.
- KYRATZIS, A.C., ANTONIOU, C., PAPAYIANNIS, L.C., GRAZIANI, G., ROUPHAEL, Y., AND KYRIACOU, M.C. (2021). Pod Morphology, Primary and Secondary Metabolite Profiles in Non-grafted and Grafted Carob Germplasm Are Configured by Agro-Environmental Zone, Genotype, and Growing Season. *Frontiers in Plant Science*, 11, 612376, doi: 10.3389/fpls.2020.612376.
- LA MALFA, S., TRIBULATO, E., GENTILE, A., VENTURA, M., GIOACCHINI, P. AND TAGLIAVINI, M. (2010). ¹⁵N natural abundance technique does not reveal the presence of nitrogen from biological fixation in field grown carob (*Ceratonia siliqua* L.) trees. *Acta Horticulturae*, 868, 191–196, doi: 10.17660/ActaHortic.2010.868.22.
- LA MALFA, S., CURRÒ, S., DOUGLAS, A.B., BRUGALETTA, M., CARUSO, M., AND GENTILE, A. (2014). Genetic diversity revealed by EST-SSR markers in carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Biochemical Systematics and Ecology*, 55, 205–211, doi: 10.1016/j.bse.2014.03.022.
- LAUCOU, V., HAUROGNÉ, K., ELLIS, N., AND RAMEAU, C. (1998). Genetic mapping in pea. 1. RAPD-based genetic linkage map of *Pisum sativum*. *Theoretical and Applied Genetics*, 97, 905–915, doi: 10.1007/s001220050971.
- LEITCH, I. J., AND HESLOP-HARRISON, J. S. (1992). Physical mapping of the 18S–5.8S–26S rRNA genes in barley by in situ hybridization. *Genome*, 35(6), 1013–1018 doi: 10.1139/g92-155.
- LITT, M., AND LUTY, J.A. (1989). A hypervariable microsatellite revealed by in vitro amplification of a dinucleotide repeat within the cardiac muscle actin gene. *The American Journal of Human Genetics*, 44, 397–401.
- LOUCA, A., AND PAPAS, A. (1973). The effect of different proportions of carob pod meal in the diet on the performance of calves and goats. *Animal Science*, 17, 139–146, doi: 10.1017/S0003356100016871.
- LOZZI, A., ABDELWAHD, R., MENTAG, R., AND 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.
- LUCAS, H. (1849). Exploration scientifique de l'Algérie. Sciences physiques. Zoologie. I-IV, Histoire naturelle des animaux articulés. Ordre du Gouvernement et avec le concours d'une commission académique, Paris, France, pp. 527.
- MAHDAD, M.Y. (2013). *Situation et perspectives d'amélioration du caroubier (Ceratoniasiliqua L.) dans le Nord-ouest de l'Algérie*. Magister thesis, Tlemcen University, Algeria, pp. 83.
- MAHDAD, M.Y., AND GAOUAR, S.B.S. (2016). *Le Caroubier (Ceratoniasiliqua L.) dans le Nord-ouest de l'Algérie: Situation et perspectives d'amélioration*. Germany: Editions Universitaires Européennes. ISBN-13: 978-3639542035.
- MAHFOUD, H., AMEEN, T., KAZNGI, F., AND NASSER, S. (2018). Morphological and Genetic Variability of Natural Syrian Carob (*Ceratoniasiliqua L.*). *SSRG International Journal of Agriculture & Environmental Science*, 5(2), 70–76, doi: 10.14445/23942568/IJAES-V5I2P110.
- MAKREM, A., NAJEH, B., LAARBI, K., AND BOUSSAÏD, M. (2006). Genetic Diversity in Tunisian *Ceratoniasiliqua L.* (Caesalpinioideae) Natural Populations. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 53, 1501, doi: 10.1007/s10722-005-7761-5.
- MAKRIS, D.P., AND KEFALAS, P. (2004). Carob pods (*Ceratoniasiliqua L.*) as a source of polyphenolic antioxidant. *Food Technology and Biotechnology*, 42(2), 105–108, udc 634.46:547.565.2.
- MARAKIS, S., KALAITZAKIS, J., AND MITRAKOS, K. (1988). Criteria for recognizing carob tree varieties. in Proceedings of the II International Carob Symposium (FITO, P AND MULET, A. eds.). Valencia, Spain, pp. 558–566.
- MARTIN, G.B., BROMMONSCHENKEL, S.H., CHUNWONGSE, J., FRARY, A., GANAL, M.W., SPIVEY, R., WU, T., EARLE, E.D., AND TANKSLEY, S.D. (1993). Map-Based Cloning of a Protein Kinase Gene Conferring Disease Resistance in Tomato. *Science*, 262(5138), 1432–1436, doi: 10.1126/science.7902614.
- MARTINS-LOUÇÃO, M.A., AND RODRÍGUEZ-BARRUECO, C. (1982). Studies in nitrogenase activity of carob (*Ceratoniasiliqua L.*) callus cultures associated with Rhizobium, in Proceedings V International Congress Plant Tissue Culture, Tokyo, Japan, pp. 671–672.
- MARTINS-LOUÇÃO, M.A., CORREIA, P., AND PEREIRA, F. (1996). The role of plant/soil microorganisms interaction in carob development. In Proccegens of the III International Carob Symposium. Cabanas. Tavira, Portugal (in press).

- MASON, A.S., HIGGINS, E.E., SNOWDON, R.J., BATLEY, J., STEIN, A., WERNER, Ch., AND PARKIN, I.A.P. (2017). A user guide to the Brassica 60K Illumina Infinium™ SNP genotyping array. *Theoretical and Applied Genetics*, 130, 621–633, doi: 10.1007/s00122-016-2849-1.
- MELGAREJO, P., AND SALAZAR, D.M. (2003). Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas. In Mundi-Prensa, 3th Vol (pp. 19–162). Spain. ISBN: 84-8476-111-8.
- MEYER, F.G. (1980). Carbonized food plants of Pompeii, Herculaneum and the villa at Torre Annunziata. *Economic Botany*, 34, 401–437, doi: 10.1007/BF02858317.
- MEYER, R.S., DUVAL, A.E., AND JENSEN, H.R. (2012). Patterns and processes in crop domestication: an historical review and quantitative analysis of 203 global food crops. *New Phytologist*, 196, 29–48, doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04253.x.
- MEZIANI, S., OOMAH, B.D., ZAIDI, F., SIMON-LEVERT, A., BERTRAND, C., AND ZAIDI-YAHIAOUI, R. (2015). Antibacterial activity of carob (*Ceratonia siliqua* L.) extracts against phytopathogenic bacteria *Pectobacterium atrosepticum*. *Microbial Pathogenesis*, 78, 95–102, doi: 10.1016/j.micpath.2014.12.001.
- MIJARRA, J. M. P., BARRÓN, E., MANZANEQUE, F. G., AND MORLA, C. (2009). Floristic changes in the Iberian Peninsula and Balearic Islands (southwest Europe) during the Cenozoic. *Journal of Biogeography*, 36, 2025–2043, doi:10.1111/j.1365-2699.2009.02142.x.
- MIN, B.R., AND HART, S.P. (2003). Tannins for suppression of intestinal parasites. *Journal of Animal Science*, 81, 102–109.
- MIR, M.A., MANSOOR, Sh., SUGAPRIYA, M., ALYEMENI, M.N., WIJAYA, L., AND PARVAIZ, Ah. (2021). Deciphering genetic diversity analysis of saffron (*Crocus sativus* L.) using RAPD and ISSR markers. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(2), 1308-1317, doi: 10.1016/j.sjbs.2020.11.063.
- MISSBAH, M.E.I., AUJJAR, N., BELABED, A., DESSAUX, Y., AND FILALI-MALTOUF, A. (1996). Characterization of rhizobia isolated from carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Journal of applied bacteriology*, 80, 165–173, doi: 10.1111/j.1365-2672.1996.tb03205.x.
- MITRAKOS, K. (1981). Temperature germination responses in three mediterranean evergreen sclerophylls. In: MARGARIS, N.S., AND MOONEY, H.A. (Eds). *Components of Productivity of Mediterranean-climate Regions - Basic and Applied Aspects*. Dr.W. Junk Publishers, The Hague/Boston/London, pp. 277–279.
- MORTON, J. (1987). Carob. In: Morton Julia F. *Fruits of warm climates*. Miami-Floride, Etats-Unis, pp. 65–69.

- MUSOLINO, A., BELLA, M.A., BORTESI, B., MICHIARA, M., NALDI, N., ZANELLI, P., CAPELLETTI, M., PEZZUOLO, D., CAMISA, R., SAVI, M., NERI, T.M., AND ARDIZZONI, A. (2007). BRCA mutations, molecular markers, and clinical variables in early-onset breast cancer: A population-based study. *The Breast*, 16(3), 280–292, doi: 10.1016/j.breast.2006.12.003.
- NAGHMOUCHI, S., KHOUJA, M.L., REJEB, M.N., AND 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.
- NAGHMOUCHI, S., KHOUJA, M.L., ROMERO, A., TOUS, J., AND BOUSSAID, M. (2009). Tunisian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *Scientia Horticulturae*, 121, 125–130, doi: 10.1016/j.scienta.2009.02.026.
- NAS. (1979). Tropical Legumes: Resources for the Future. National Academy of Sciences. Washington DC, USA, pp. 109–116.
- 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.
- ORPHANOS, P.I. (1980). Practical aspects of carob cultivation in Cyprus. *Portugaliae Acta Biologica*, 1(4), 221–228.
- ORPHANOS, P.I., AND PAPACONSTANTINO, J. (1969). The carob varieties of Cyprus. Tech. Bull.5. Cyprus Agricultural Research Institute. Ministry of Agriculture and Natural Resources, Nicosia, Cyprus.
- ORTIZ, P.L., ARISTA, M., AND TALAVERA, S. (1996). Producción de néctar y frecuencia de polinizadores en *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpiniaceae). *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 54, 540–546.
- PALAMAREV, E. (1989). Paleobotanical evidences of the Tertiary history and origin of the Mediterranean sclerophyll dendroflora. *Plant Systematics and Evolution*, 162, 93–107, doi: 10.1007/BF00936912.
- PARAN, I., AND MICHELMORE, R.W. (1993). Development of reliable PCR-based markers linked to downy mildew resistance genes in lettuce. *Theoretical and Applied Genetics*, 85, 985–993, doi: 10.1007/BF00215038.
- PATWARDHAN, A., RAY, S., AND ROY, A. (2014). Molecular Markers in Phylogenetic Studies- A Review. *Phylogenetics & Evolutionary Biology*, 2(131), doi: 10.4172/2329-9002.1000131.
- POWELL, W., MACHRAY, G.C., AND PROVAN, J. (1996). Polymorphism revealed by simple sequence repeats. *Trends in plant science*, 1(7), 215–222.

- RAFALSKI, J.A. (2002). Novel genetic mapping tools in plants: SNPs and LD-based approaches. *Plant Science*, 162(3), 329–333, doi: 10.1016/S0168-9452(01)00587-8.
- RAMÓN-LACA, L., AND 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.
- REDDY, M.P., SARLA, N., AND SIDDIQ, E.A. (2002). Inter simple sequence repeat (ISSR) polymorphism and its application in plant breeding. *Euphytica*, 128, 9–17, doi: 10.1023/A:1020691618797.
- REJEB, M.N., LAFFRAY, D., AND LOUGUET, P. (1991). Physiologie du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) en Tunisie. Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides, Groupe d'Etude de l'Arbre, Paris, France, pp. 417–426.
- 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, France, pp. 79–85.
- RETANA, J., RAMONEDA, J., AND GARCÍA DEL PINO, F. (1990). Importancia de los insectos en la polinización del algarrobo. *Boletín de Sanidad Vegetal Plagas*, 16(1), 143–150.
- RETANA, J., RAMONEDA, J., GARCÍA DEL PINO, F., AND BOSCH, J. (1994). Flowering phenology of carob, *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinaceae). *Journal of Horticultural Science*, 69(1), 97–103, doi: 10.1080/14620316.1994.11515254.
- RIVIERE, C.H., AND LECO, H. (1900). *Manuel pratique de l'agriculteur algérien*. Augustin CHALLAMEL (Ed.). Paris, France, pp. 349–353.
- ROHLF, F.J. (2000). NTSYS-pc, Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System. Version 2.1. New York, Exeter, Setauket.
- ROUMIEUX, C. (2012). *Modélisation de La dynamique saisonnière des éclosions d'Aedes (Ochlerotatus), Caspius (Pallas, 1771) (Culicidae) en contexte de changement climatique*. PhD thesis, Aix-Marseille University, France, pp. 168.
- ROZIER, F. (1787). *Démonstration élémentaires de botanique*. Tome III. Editions Chez Bruyset Frères, Lyon, France, pp. 720.
- RSEM: LA REAL SOCIEDAD ECONÓMICA MATRITENSE. (1818). *Agricultura General De Gabriel Alonso De Herrera*. Tomo II. Madrid en la imprenta real. Madrid, España, pp. 466.
- RTIBI, K., SELMI, S., GRAMI, D., AMRI, M., ETO, B., EL-BENNA, J., SEBAI, H., AND MARZOUKI, L. (2017). Chemical constituents and pharmacological actions of carob pods and leaves (*Ceratonia siliqua* L.) on the gastrointestinal tract: A review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 93, 522–528, doi: 10.1016/j.biopha.2017.06.088.

- RUAS, M-P., MANE, P., PUIG, C., HALLAVANT, Ch., PRADAT, B., OUERFELLI, M., ROS, J., BIDON, D.A., AND DURAND, A. (2015). Regard pluriel sur les plantes de l'héritage arabo-islamique en France médiévale, in RICHARTE, C., GAYRAUD, R-P., AND POISSON, J-M. *Héritages arabo-islamiques dans l'Europe méditerranéenne*. Edition La Découverte-INRAP, Paris, France, pp. 347–376.
- RUSSO, G., AND D'ANDREA, L. (2002). Evaluation and Preservation of Genetic Resources of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Southern Italy for Pharmaceutical Use. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants* 9(4), 367–372, doi: 10.1300/j044v09n04_15.
- SAHLE, M., COLEON, J., AND HAAS, C. (1992). Carob pod (*Ceratonia siliqua*) meal in geese diets. *British Poultry Science*, 33, 531–541.
- SAÏDI, R., EL BOUZDOUDI, B., EL KBIACH, M.B., MAOUNI, A., BADO, A., AND LAMARTI, A. (2016). Micropropagation of Carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) by cotyledonary buds. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(12), 4850–4859.
- SAXENA, R.K., CUI, X., THAKUR, V., WALTER, B., CLOSE, T.J., AND VARSHNEY, R.K. (2011). Single feature polymorphisms (SFPs) for drought tolerance in pigeonpea (*Cajanus* spp.). *Functional & Integrative Genomics*, 11(4), 651–657, doi: 10.1007/s10142-011-0227-2.
- SBAY, H., AND 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, Maroc, pp. 1–9.
- SCHLÖTTERER, Ch. (2004). The evolution of molecular markers— just a matter of fashion? *Nature reviews / Genetics*, 5, 63–69.
- SEDRA, M.H., LASHERMES, Ph., TROUSLOT, P., COMBES, M-Ch., AND HAMON, S. (1998). Identification and genetic diversity analysis of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) varieties from Morocco using RAPD markers. *Euphytica*, 103, 75–82.
- SERAIRI-BEJI, R., MEKKI-ZOUITEN, L., TEKAYA-MANOUBI, L., LOUESLATI, M.H., GUEMIRA, F., AND BEN MANSOUR, A.B. (2000). Can carob powder be used with oral rehydration solution for the treatment of acute diarrhea. *Médecine Tropicale*, 60, 125–128.
- SIDINA, M.M., EL HANSALI, M., WAHID, N., OUATMANE, A., BOULLI, A., AND HADDIOUI, A. (2009). Fruit and seed diversity of domesticated carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. *Scientia Horticulturae*, 123, 110–116, doi: 10.1016/j.scienta.2009.07.009.
- SIDINA, M.M., EL HANSALI, M., BOULLI, A., AND HADDIOUI, A. (2011). Characterization and assessment of genetic differentiation in Moroccan carob (*Ceratonia siliqua* L.) using isozymes markers. *International Journal of Integrative Biology*, 11(2), 64–68.

- SION, S., SAVOIA, M.A., GADALETA, S., PIARULLI, L., MASCIO, I., FANELLI, V., MONTEMURRO, C., AND MIAZZI, M.M. (2021). How to Choose a Good Marker to Analyze the Olive Germplasm (*Olea europaea* L.) and Derived Products. *Genes*, 12(10), 1474, doi: 10.3390/genes12101474.
- SUC, J. P. (1984). Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe. *Nature*, 307, 429–432, doi: 10.1038/307429a0.
- SUC, J.P., POPESCU, S.M., FAUQUETTE, S., BESSEDIK, M., JIMÉNEZ-MORENO, G., BACHIRI TAOUFIQ, N., ZHENG, Z., AND MÉDAIL, F. (2018). Reconstruction of Mediterranean flora, vegetation and climate for the last 23 million years based on an extensive pollen dataset. *Ecologia mediterranea*, 44(2), 53–85.
- TALHOUK, S.N., VAN BREUGEL, P., ZURAYK, R., AL-KHATIB, A., ESTEPHAN, J., GHALAYINI, A., DEBIAN, N., AND LYCHAA, D. (2005). Status and prospects for the conservation of remnant semi-natural carob *Ceratonia siliqua* L. populations in Lebanon. *Forest Ecology and Management*, 206(1-3), 49–59, doi: 10.1016/j.foreco.2004.10.053.
- TETIK, N., TURHAN, I., OZIYCI, H.R., GUBBUK, H., KARHAN, M., AND ERCISLI, S. (2011). Physical and chemical characterization of *Ceratonia siliqua* L. germplasm in Turkey. *Scientia Horticulturae*, 129, 583–589, doi: 10.1016/j.scienta.2011.04.029.
- THOMSON, P. (1971). The carob in California. California Rare Fruit Growers Yearbook III, 61–102.
- THOUIN, PARMENTIER, TESSIER, HUZARD, SILVESTRE, BOSC, CHASSIRON, CHAPTAL, LA CROIX, DE PERTHUIS, YVART, DECANDOLLE, AND DU TOUR. (1778). *Nouveau cours complet d'agriculture: Théorique et pratique*. Tome XII. Membres de la section de l'agriculture de l'institut de France. Edition chez Deterville, Paris, France, pp. 622.
- TOUS, J., ROMERO, A., AND BATLLE, I. (2013). The Carob Tree: Botany, Horticulture, and Genetic Resources. In Jules Janick (Eds.), *Horticultural Reviews*, Volume 41 (pp. 385–456), doi: 10.1002/9781118707418.ch08.
- TOUS, J., ROMERO, A., HERMOSO, J.F., NINOT, A., PLANA, J., AND BATLLE, I. (2009). Agronomic and Commercial Performance of Four Spanish Carob Cultivars. *HortTechnology*, 19(2), 465–470, doi: 10.21273/HORTSCI.19.2.465.
- TOUS, J. (1984). Cultivo del Algarrobo. Hoja Divulgativa N2: 10. Ministerio de Agricultura. Madrid, Spain, pp. 16.
- TOUS, J., OLARTE, C., TRUCO, M.J., AND ARÚS, P. (1992). Isozyme Polymorphisms in Carob Cultivars. *HortScience*, 27(3), 257–258, doi: 10.21273/HORTSCI.27.3.257.

- TOUS, J., BATLLE, I., AND ROMERO, A. (1995). Prospección de variedades de algarrobo en Andalucía. *Información Técnica Económica Agraria (ITEA)*, 91V (3), 164–174.
- TOUS, J., ROMERO, A., PLANA, J., AND BATLLE, I. (1996). Current situation of carob plant material. III Intl. Carob Symp. Cabanas-Tavira, Portugal.
- TUCKER S.C. (1992a). The developmental basis for sexual expression in *Ceratonia siliqua* (Leguminosae: Ceasalpinoideae: Cassieae). *American Journal of Botany*, 79, 367–327, doi: 10.1002/j.1537-2197.1992.tb14555.x.
- TUCKER S.C. (1992b). The role of floral development in studies of legume evolution. *Canadian Journal of Botany*, 70, 692–700, doi: 10.1139/b92-089.
- TURHAN, I. (2014). Relationship Between Sugar Profile and D-Pinitol Content of Pods of Wild and Cultivated Types of Carob Bean (*Ceratonia siliqua* L.). *International Journal of Food Properties*, 17, 363–370, doi: 10.1080/10942912.2011.631255.
- VALERO-MUÑOZ, M., BALLESTEROS, S., RUIZ-ROSO, B., PÉREZ-OLLEROS, L., MARTÍN-FERNÁNDEZ, B., LAHERA, V., AND DE LAS HERAS, N. (2017). Supplementation with an insoluble fiber obtained from carob pod (*Ceratonia siliqua* L.) rich in polyphenols prevents dyslipidemia in rabbits through SIRT1/PGC-1 α pathway. *European Journal of Nutrition*, 58, 357–366, doi: 10.1007/s00394-017-1599-4.
- VIRUEL, J., HAGUENAUER, A., JUIN, M., MIRLEAU, F., BOUTEILLER, D., BOUDAGHER-KHARRAT, M., OUAHMANE, L., LA MALFA, S., MEDAIL, F., SANGUIN, H., NIETO-FELINER, G., AND BAUMEL, A. (2018). Advances in genotyping microsatellite markers through sequencing and consequences of scoring methods for *Ceratonia siliqua* (Leguminosae). *Applications in Plant Sciences*, 6(12), e1201, doi: 10.1002/aps3.1201.
- VIRUEL, J., LE GALLIOT, N., PIRONON, S., NIETO-FELINER, G., SUC, J.P., LAKHAL-MIRLEAU, F., JUIN, M., SELVA1, M., BOU DAGHER KHARRAT, M., OUAHMANE, L., LA MALFA, S., DIADEMA, K., SANGUIN, H., MÉDAIL, F., AND BAUMEL, A. (2020). A strong east–west Mediterranean divergence supports a new phylogeographic history of the carob tree (*Ceratonia siliqua*, Leguminosae) and multiple domestications from native populations. *Journal of Biogeography*, 47, 460–471, doi: 10.1111/jbi.13726.
- VOS, P., HOGERS, R., BLEEKER, M., REIJANS, M., VAN DE LEE, Th., HORNES, M., FRIJTERS, A., POT, J., PELEMAN, J., KUIPER, M., AND ZABEAU, M. (1995). AFLP: a new technique for DNA fingerprinting. *Nucleic Acids Research*, 23(21), 4407–4414.
- WILLIAMS, J.G., KUBELIK, A.R., LIVAK, K.J., RAFALSKI, J.A., AND TINGEY, S.V. (1990). DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers. *Nucleic Acids Research*, 18(22), 6531–6535, doi: 10.1093/nar/18.22.6531.

- ZEMOURI, Z., DJABEUR, A., FRIMEHDI, N., KHELIL, O., AND KAID-HARCHE, M. (2020). The seed diversity of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) and the relationship between seeds color and coat dormancy. *Scientia Horticulturae*, 274, 109679, doi: 10.1016/j.scienta.2020.109679.
- ZHANG, J., ZHENG, H. G., AARTI, A., PANTUWAN, G., NGUYEN, T. T., TRIPATHY, J. N., SARIAL, A. K., ROBIN, S., BABU, R. C., NGUYEN, B.D., SARKARUNG, S., BLUM, A., AND NGUYEN, H. T. (2001). Locating genomic regions associated with components of drought resistance in rice: comparative mapping within and across species. *Theoretical and Applied Genetics*, 103, 19–29, doi: 10.1007/s001220000534.
- ZHENG, X., WOLFF, D., BAUDRACCO-ARNAS, S., AND PITRAT, M. (1999). Development and utility of cleaved amplified polymorphic sequences (CAPS) and restriction fragment length polymorphisms (RFLPs) linked to the Fom-2 *fusarium* wilt resistance gene in melon (*Cucumis melo* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 99, 453–463, doi: 10.1007/s001220051257.
- ZIETKIEWICZ, E., RAFALSKI, A., AND LABUDA, D. (1994). Genome Fingerprinting by Simple Sequence Repeat (SSR)-Anchored Polymerase Chain Reaction Amplification. *Genomics*, 20(2), 176–183, doi: 10.1006/geno.1994.1151.
- ZOHARY, D. (2002). Domestication of the carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Israel Journal of Plant Sciences*, 50, 141–145, doi: 10.1560/BW6B-4M9P-U2UA-C6NN.
- ZOUARI, N., AND 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.
- ZOUHAIR, O. (1996). Le caroubier: situation actuelle et perspectives d’avenir. Document interne, Eaux et forêts, Maroc, pp. 22.

Résumé

L'objectif de cette étude est d'identifier et sélectionner les premiers cultivars de caroubier en Algérie à travers une prospection sur terrain et une évaluation de la diversité génétique et des performances par des outils morphométriques, physico-chimiques, et moléculaires de plusieurs accessions de caroubiers échantillonnées de par le territoire national.

La prospection menée à travers l'Algérie a révélé que parmi les 33 sites visités, seuls deux sites pouvaient être considérés comme des vergers de caroubiers. Par ailleurs, seuls deux cultivars ont été localisés, connus sous les noms de 'Tlemsani' et 'Maricani'. Parmi les soixante-six accessions de caroubiers échantillonnées et évaluées par les caractéristiques des gousses et des graines, et analysées via la classification hiérarchique ascendante (CAH), l'analyse discriminante linéaire (ADL), et le profil de la carte thermique, 11 cultivars de caroubiers potentiels ont été identifiés et sélectionnés, 10 femelles et un hermaphrodite.

Les résultats des analyses physico-chimiques ont montré que la teneur en sucres totaux de la caroube algérienne est parmi la plus faible dans le bassin méditerranéen avec une moyenne de 43,78 %. En outre, les résultats de l'analyse de variance et l'analyse des correspondances multiples (ACM) ont révélés que les caroubiers sauvages se caractérisent par une plus faible teneur en sucre total par rapport aux caroubiers greffés.

L'analyse moléculaire par 10 RAPDs a dévoilé une importante diversité génétique entre les 11 cultivars de caroubiers identifiés et sélectionnés via les caractères morphométriques et a permis à travers l'indice de similarité de Jaccard de réduire au nombre de neuf les cultivars qui feront l'objet d'une évaluation agronomique et commerciale en conditions contrôlées. Parmi ces 9 cultivars, huit sont des femelles et un, hermaphrodite. De plus, il est à noter que les résultats des analyses moléculaires concordent significativement avec ceux exprimés par les analyses morphométriques, phénotypiques et physico-chimiques, confirmant de ce fait, la robustesse de ces marqueurs morphologiques dans l'estimation de la diversité génétique.

Enfin, à l'aide de l'outil moléculaire, des marqueurs RAPDs spécifiques ont été révélés pour les différents cultivars de caroubier. Ces marqueurs peuvent être utilisés pour l'identification de ces cultivars et accessions qui leur sont apparentées et ce, dans la perspective d'utiliser judicieusement la variabilité génétique existante pour la mise en place de programmes d'amélioration visant la création de variétés de caroubiers qui répondent aux attentes des agriculteurs et agro-industriels.

Mots clés : Caractérisation, identification, sélection, caroubier, cultivars, marqueurs morphométriques, paramètres physico-chimiques, RAPD, diversité génétique.

Abstract

The objective of this study is to identify and select the first carob cultivars in Algeria through a field survey and an evaluation of the genetic diversity and performance by morphometric, physico-chemical and molecular tools of several accessions of carob trees sampled throughout the national territory.

The survey carried out across Algeria revealed that of the 33 sites visited, only two sites could be considered as carob orchards. Furthermore, only two cultivars were located, known as 'Tlemsani' and 'Maricani'. Among the sixty-six carob accessions sampled and evaluated by pod and seed characteristics, and analysed via hierarchical ascending classification (HAC), linear discriminant analysis (LDA), and heat map profiling, 11 potential carob cultivars were identified and selected, 10 females and one hermaphrodite.

The results of the physico-chemical analyses showed that the total sugar content of Algerian carob is among the lowest in the Mediterranean basin with an average of 43.78%. In addition, the results of the analysis of variance and multiple correspondence analysis (MCA) revealed that wild carob trees are characterised by a lower total sugar content than grafted carob trees.

Molecular analysis by 10 RAPDs revealed significant genetic diversity among the 11 carob cultivars identified and selected via morphometric traits and allowed, through Jaccard's similarity index, to reduce to nine the cultivars that will be subject to agronomic and commercial evaluation under controlled conditions. Of these nine cultivars, eight are female and one is hermaphrodite. Furthermore, it should be noted that the results of the molecular analyses are significantly in line with those expressed by the morphometric, phenotypic and physico-chemical analyses, thus confirming the robustness of these morphological markers in the estimation of genetic diversity.

Finally, using the molecular tool, specific RAPD markers were revealed for the different carob cultivars. These markers can be used to identify these cultivars and related accessions with a view to making judicious use of the existing genetic variability for the establishment of breeding programmes aimed at creating carob varieties that meet the expectations of farmers and agro-industrialists.

Key words: Characterisation, identification, selection, carob tree, cultivars, morphometric markers, physico-chemical parameters, RAPD, genetic diversity.

المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد واختيار أول أصناف الخروب في الجزائر من خلال الاستطلاع الميداني وتقييم التنوع الوراثي والجودة باستخدام المقاييس المورفومترية، الفيزيوكيميائية والجزيئية لعدة مدخلات لأشجار الخروب التي تم أخذ عينات منها في جميع أنحاء التراب الوطني.

كشفت الاستطلاع الميداني في أنحاء الجزائر أنه من بين المواقع الـ 33 التي تمت زيارتها، لا يمكن اعتبار سوى موقعين كبساتين حقيقية للخروب. وبالإضافة إلى ذلك، لم يتم تحديد سوى صنفين من الخروب، هما "تلمساني" و"ماريكاني". من أصل ستة وستين مدخلات خروب تم أخذ عينات منها وتقييمها من خلال خصائص القرون والبذور، وتم تحليلها من خلال التصنيف الهرمي التصاعدي (CAH)، والتحليل التمييزي الخطي (ADL)، وملف خريطة الحرارة، تم تحديد واختيار 11 صنفاً محتملاً من الخروب، 10 أنثى وخنثى واحد.

أظهرت نتائج التحليلات الجزيئية والكيميائية أن محتوى السكريات الكلية للخروب الجزائري هي من بين الأدنى مقارنة مع الخروب المتواجدة في بلدان البحر الأبيض المتوسط بمتوسط 43.78%. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت نتائج تحليل التباين والمراسلات المتعددة (ACM) أن أشجار الخروب البري تتميز بانخفاض محتوى السكر الكلي مقارنة بأشجار الخروب المطعمة.

أظهر التحليل الجزيئي بواسطة 10 RAPDs تنوعاً وراثياً كبيراً بين 11 نوعاً من أصناف الخروب التي تم تحديدها واختيارها عن طريق الخصوصيات المورفومترية، وجعل من الممكن من خلال مؤشر تشابه Jaccard تقليص عدد هذه الأصناف إلى تسعة، من هذه الأصناف التسعة، ثمانية من الإناث وواحد خنثى. إضافة، تجدر الإشارة إلى أن نتائج التحليلات الجزيئية تتفق بشكل كبير مع تلك التي تم التعبير عنها من خلال التحليلات الشكلية والظاهرية والفيزيوكيميائية، مما يؤكد متانة هذه العلامات المورفولوجية في تقدير التنوع الجيني. أخيراً، باستخدام الاداة الجزيئية RAPDs، تم الكشف عن علامات محددة لأصناف الخروب المختلفة. يمكن استخدام هذه العلامات لتحديد هذه الأصناف والمدخلات المتعلقة بها، بهدف الاستخدام الحكيم للتنوع الجيني الحالي لتنفيذ برامج التحسين التي تهدف إلى إنشاء أصناف من أشجار الخروب التي تلبي توقعات المزارعين وقطاع الصناعات الزراعية.

الكلمات المفتاحية: التوصيف، التحديد، الانتقاء، الخروب، الأصناف، العلامات المورفومترية، البارامترات الفيزيوكيميائية، RAPD، التنوع الجيني.



Original Research Paper

Functional Diversity Based on Morphometric Analysis and Identification of the Algerian Carob Tree (*Ceratonia siliqua* L.) Cultivars

Yassine Moustafa MAHDAD^{1,2,4*}, Rida Mohammed MEDIOUNI¹, Juan VIRUEL³,
Nassim SELKA¹, Semir Bechir Suheil GAOUAR¹

¹ *Laboratory of Applied genetic in agriculture, ecology and public health, Biology Department, Faculty SNV/STU, University of Tlemcen, Algeria, ,*

² *Laboratory of Sustainable Management of Natural Resources in Arid and Semi-arid Areas, SNV Department, Naâma University Center, Naâma, Algeria.*

³ *Royal Botanic Gardens, Kew, Richmond, Surrey, TW9 3DS, United Kingdom.*

⁴ *Laboratory of physiopathology and Biochemical of Nutrition (PpBioNut), Biology Department, Faculty SNV/STU, University of Tlemcen, Algeria.*

*Corresponding author, University of Tlemcen, Algeria, e-mail: mahdad@cuniv-naama.dz. ORCID: 0000-0002-5993-1825.

Article history: Received: February 13th 2022; Revised: February 25th 2022; Accepted: March 06th 2022

Abstract

Sixty-six carob accessions from 19 sites throughout Algeria were analysed by leaf, pod and seed characteristics to assess their genetic diversity and identify the Algerian carob cultivars that could be used as germplasm for breeding programs. We compared Algerian accessions with carobs from different Mediterranean countries, and the results showed a high level of morphological similarity between Algerian and Spanish carob pods. Analysis of variance (ANOVA) revealed highly significant differences ($p < 0.001$) between accessions for all the quantitative traits. Correlation analysis between variables indicated that seed yield could be improved by selecting light, thin and narrow carob pods. Multiple correspondence analysis explained a total variance of 30.22 % and illustrated three distinct leaf classes. Principal component analysis (PCA) proposed two main groups of variables, one based on seed performance and the other targeting pod potential. Hierarchical classification (HC) with seven clusters revealed considerable genetic diversity among the Algerian carob accessions studied, and indicated that the type of bioclimate did not influence their distribution, suggesting that morphometric traits are probably controlled more by genes than by bioclimate. Linear discriminant analysis (LDA), clustering and heatmap plotting identified 11 potential cultivars, 10 female and one hermaphroditic.

Key words: carob germplasm; characterisation; genetic diversity; identification; morphological analysis; statistical tools.

المخلص

تم تحليل ستة وستين مدخلاً من الخروب من 19 موقعاً في جميع أنحاء الجزائر من خلال خصائص الأوراق والقرون والبذور لتقييم تنوعها الجيني وتحديد أصناف الخروب الجزائرية التي يمكن استخدامها كأصول وراثية لبرامج التحسين. قارنا المدخلات الجزائرية بالخروب من بلدان البحر الجزائرية والإسبانية. كشف تحليل التباين الأبيض المتوسط المختلفة، وأظهرت النتائج مستوى عالٍ من التشابه المورفولوجي بين قرون الخروب عن فروق ذات دلالة إحصائية بين المدخلات لجميع الصفات الكمية. أشار تحليل الارتباط بين المتغيرات إلى أنه يمكن تحسين محصول البذور عن طريق اختيار قرون الخروب الخفيفة والرفيعة والضيقة. أوضح تحليل المراسلات المتعددة تبايناً إجمالاً بنسبة 30.22 %. وأوضح ثلاث فئات أوراق متميزة. اقترح تحليل المكون الرئيسي مجموعتين رئيسيتين من المتغيرات، واحدة تعتمد على أداء البذور والأخرى على القرون. أظهر التصنيف الهرمي المكون من سبع مجموعات تنوعاً جينياً كبيراً بين مدخلات الخروب الجزائرية التي تمت دراستها، وأشار إلى أن نوع المناخ الحيوي لم يؤثر على توزيعها، مما يشير إلى أن السمات المورفومترية ربما تتحكم فيها الجينات أكثر من المناخ الحيوي. حدد التحليل التمييزي الخطي والتجميع والتخطيط الحراري 11 صنفاً محتملاً من الخروب، 10 إناث وواحد خنثى.

الكلمات المفتاحية: الخروب، التوصيف، التنوع الجيني، التحديد، التحليلات المورفولوجية، الاختبارات الإحصائية

Introduction

The carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) is a sclerophyllous, xerophilic, thermophilic, heliophilic and calcicolous species (Mahdad and Gaouar, 2016) belonging to the family Fabaceae. Genetic and fossil data support a pre-Mediterranean origin of the carob tree with the split between *C. oreothauma* and *C. siliqua* estimated at 6.4 Ma (Bessedik et al., 1984; Viruel et al., 2020), and its ancestors were likely distributed around the Tethys Sea during Paleogene times (Palamarev, 1989). However, its centre of diversification is well known and is indisputably the Mediterranean basin (Batlle and Tous, 1997; Melgarejo and Salazar, 2003; Viruel et al., 2020). This rustic agroforestry species plays a pivotal socio-economic and ecological role, particularly in dry regions and areas where desertification processes are occurring at significant magnitudes, especially in Algeria. It is usually found in regions with a Mediterranean climate (Baumel et al., 2018), but also in regions with a continental climate such as the Algerian steppe, where wild carob trees have been observed at an altitude of 1168 m in areas with temperatures regularly reaching -10°C (Mahdad and Gaouar, 2016).

All parts of the carob trees (i.e., roots, wood, bark, leaves, flowers and fruits) have economic value and considerable health benefits and can be used in several sectors. Its lateral roots, which are branched with numerous root hairs and extend over a length of 30 to 40 m (Tous, 1984), allow the tree to grow in rocky terrain with shallow soil and in arid conditions, which would be restrictive for other crops (Albanell, 1990). The wood of the carob tree, known as *carouge* (Rivière and Leco, 1900), is hard with a fine grain and is used in the manufacture of utensils and production of fuel (Batlle and Tous, 1997). The bark of the tree is used in tanneries, particularly in finishing and enamelling hides (Batlle, 1997) and is very rich in antioxidant substances (El Hajaji et al., 2011). Carob leaves have anticancer, antioxidant, bactericidal and anti-neurodegenerative properties (Corsia et al., 2002; El Hajaji et al., 2010; Meziani et al., 2015; Ben Othman et al., 2020; Abidar et al., 2020). El-Haskoury et al. (2015) discovered that carob honey has diuretic, natriuretic and kaliuretic activity without the side effects of hypokalaemia; the honey is also rich in bioactive molecules with antioxidant and anti-radical properties (El-Haskoury et al., 2018). Given its enormous economic interest, locust bean gum remains the most important product among those derived from the seed. It constitutes one third of the total weight of the seed (Jones, 1953). This mucilaginous gum, rich in galactomannan known under the code E-410, is used in the food industry as a thickener, stabiliser, binder and gelling agent or as a dispersing agent (Batlle and Tous, 1997). It is also used in printing, photography, textiles, pharmaceuticals, cosmetics, chemicals, petroleum, explosives and mixed feed (Tous et al., 2013). Furthermore, Ben Ayache et al. (2020) observed that the seeds demonstrate the most potent anticarcinogenic properties on all human cell carcinomas tested. Carob pods have traditionally been used as feed for ruminants (Louca and Papas, 1973) and non-ruminants (Sahle et al., 1992), but also for human consumption (Azab, 2017). Its pulp is used as a substitute for cocoa in the production of chocolate because it is less calorific and does not contain caffeine or theobromine (Craig and Nguyen, 1984). The pods have antioxidant, analgesic, antiparasitic and anti-diarrheal properties (Makris and Kefalas, 2004; Ben Ayache et al., 2020; Min and Hart, 2003; Serairi-Béji et al., 2000). In general, they are very beneficial for the treatment of gastro-intestinal disorders (Rtibi et al., 2017). Furthermore, it has been shown that the fruit of the carob tree can prevent dyslipidaemia and short-term memory deficit (Valero-Muñoz et al., 2017; Alzoubi et al., 2018).

Many studies have been carried out in the past two decades aiming at describing the diversity in *C. siliqua*, using morphometric (Russo and D'Andrea, 2002; Barracosa et al., 2007; Sidina et al., 2009), enzymatic (Batlle et al., 1996; Makrem et al., 2006), chemical (Ayaz et al., 2007; Khelifa et al., 2013; Tetik et al., 2011), cytological (Bureš et al., 2004) and molecular markers (Caruso et al., 2008; Konate et al., 2009; La Malfa et al., 2014; Viruel et al., 2018). In Algeria, there have been very few studies on the diversity of the carob tree. There have been studies on seed diversity for western populations

(Zemouri et al., 2020), on wild carob tree populations (Kocherane et al., 2019), and on morphological and chemical diversity of randomly sampled populations (Boublenza et al., 2019).

There is currently substantial interest in cultivation of the carob tree in Algeria because there is increasing demand for it in the agri-food industry, almost doubling the price of carob on the market (1260€ per ton) and making it more profitable than the olive tree (380€ per ton), which was not previously the case when carob trees were replaced with olive groves (Mahdad and Gaouar, 2016). The interest in this crop, particularly among farmers, requires support essentially in the selection of cultivars to be planted in different regions with different climatic conditions. For example, the Spanish cultivar ‘Duraio’ was selected for planting new orchards in NE Spain (Tous et al., 2009). Unfortunately, unlike in many Mediterranean countries (Tous et al., 2013), there is no information about Algerian carob cultivars, with the majority of them dating from the colonial period for which there is no archive material. This study is the first in Algeria to attempt, by means of a field prospection and the use of morphometric and statistical tools, to determine potential cultivars of the carob tree in order to improve and sustainably develop carob growing.

Materials and methods

Field prospection

The field prospection was carried out on 33 sites in 26 departments (Figure 1) aiming at establishing a primary inventory based on the available information regarding the situation of carob cultivars in Algeria. Most people surveyed were carob collectors with more than 25 years’ experience in carob harvests.

Plant material

In this study, sixty-six accessions were sampled from 19 sites throughout Algeria (Figure 1). The sampled trees (Table 1) covered a wide geographical area (15 regions) from four bioclimatic regions (arid, semi-arid, humid and semi-humid; Roumieux (2012)). For each accession, five leaves were randomly sampled in June 2020 and were characterised using two qualitative (colour and shape) and four quantitative (rachis length, number of leaflets/leaves, leaflet area and leaflet length/width) traits. Thirty pods and three seeds per pod for each tree (harvested from August to September 2020) were randomly collected and twelve morphometric traits were measured (pod length, pod width, pod thickness, pod weight, pulp weight, percentage of pulp, seed length, seed width, seed thickness, seed weight per pod, number of seeds and percentage of seeds). The selection of continuous characters for morphological characterisation was undertaken using a basic list of descriptors for carob tree cultivars (Tous et al., 2013).

Statistical analysis

Morphological data for quantitative traits were analysed by one-way analysis of variance (ANOVA) test using GenStat Discovery Edition 3 software, with Duncan’s pairwise comparison between means at a level of significance $\alpha = 0.05$.

In order to examine variations between different sets of quantitative and qualitative parameters, a range of multivariate tools was used, including principal component analysis (PCA), a technique that uses covariances and correlations to identify relationships between quantitative variables, and multiple correspondence analysis (MCA) to analyse the relationship between the qualitative variables of leaves. All quantitative leaf variables were transformed for the MCA analysis into qualitative variables represented by three modalities according to classes created from the following quartiles: <25%, [25% - 75%], >75%.

Hierarchical classification (HC) was performed according to the “ward.D2” agglomerative hierarchical clustering method, which is based on the Euclidean distance. Two indices “Dunn” and “DB” (Dunn, 1974; Davies and Bouldin, 1979) were used via the “NbClust” package in R to determine the best number of clusters. Additionally, a heatmap was created as a way of visualising the performance of each accession and hierarchical clustering to identify variables that appear to be characteristic of each cluster.

Analyses were performed with the RStudio program (v. 1.3.1093), using the packages “FactoMineR” for multidimensional exploratory data analysis and “Factoextra” for elegant visualisation of the results of analyses. The functions used for each multivariable analysis were “princomp” for PCA, “hclust” for clustering, “MCA” for multiple correspondence analysis and “heatmap” for heatmap plotting.

The coefficient correlation between the morphological parameters of pods and seeds was analysed using PAST 4.03 software (Hammer et al., 2001) and Bonferroni’s correction as a multiple-comparison correction. Finally, linear discriminant analysis (LDA) as implemented in PAST 4.03 software was used to separate and classify accessions according to their morphological characteristics and regions, and the Jackknife method was used for bias correction.

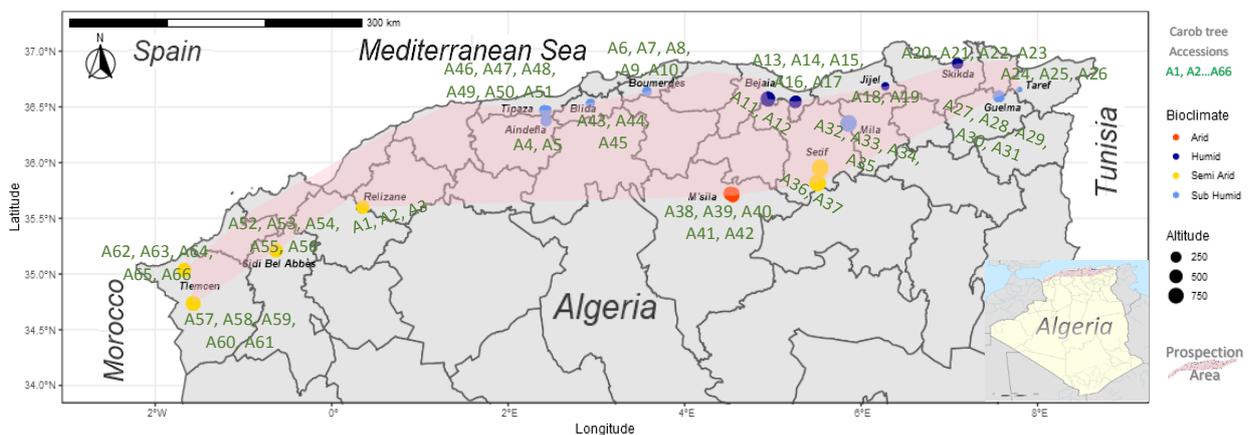


Figure 1. Distribution map of sixty-six carob tree accessions sampled in 19 localities with different bioclimatic stages of northern Algeria.

Results

Field prospecting

The prospecting conducted throughout Algeria revealed that among the 33 sites visited, 21 were areas of reforestation, 03 were avenue of trees and 07 sites used carob as ornamental species. Only two sites (Blida and Tipaza) could be considered carob orchards (i.e., having more than 100 trees). In 33 sites, just two recognized cultivars were identified: ‘Tlemsani’ (accession A43) referring to the region of Tlemcen, and ‘Maricani’ (accessions A47 and A49), which means “American” (Figure 2).

In all the sites visited, the carob trees resulting from propagation by grafting are referred as “Hor” or “Hora” (feminine name) which means “pure”, while trees dispersed by seed propagation are named according to their region. Local names used are “Akajout”, “Akachkach”, “Adjout”, “Berhoucha”, “Belhoucha” and “Hartani”, all these names mean “wild”. Furthermore, two hermaphrodite accessions (A25 and A26) were sampled, and were named as ‘Tarfi’ in reference to the region El Taref.

Additionally, this prospecting revealed that *C. siliqua* species is in common association with Olive tree (*Olea europaea*), mastic tree (*Pistacia lentiscus*), and occasionally associated with wild olive tree (*Olea*

oleaster) and Mount Atlas mastic tree (*Pistacia atlantica*), and rarely with oleander (*Nerium oleander*) in the thalwegs of Algerian steppe.

Table 1. Geographic location and bioclimate of the studied carob tree accessions.

Accession	Region	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Bioclimate
A01	Relizane	35°36'09"N	0°21'14"E	397	Semi Arid
A02	Relizane	35°36'09"N	0°21'14"E	397	Semi Arid
A03	Relizane	35°36'08"N	0°21'14"E	399	Semi Arid
A04	Aindefla	36°22'35"N	2°25'51"E	262	Sub Humid
A05	Aindefla	36°22'38"N	2°25'50"E	269	Sub Humid
A06	Boumerdes	36°38'02"N	3°34'47"E	92	Sub Humid
A07	Boumerdes	36°38'16"N	3°34'25"E	130	Sub Humid
A08	Boumerdes	36°38'18"N	3°34'23"E	152	Sub Humid
A09	Boumerdes	36°38'17"N	3°34'21"E	143	Sub Humid
A10	Boumerdes	36°38'04"N	3°34'51"E	70	Sub Humid
A11	Bejaia	36°34'19"N	4°56'35"E	603	Humid
A12	Bejaia	36°34'19"N	4°56'37"E	607	Humid
A13	Bejaia	36°32'54"N	5°15'39"E	289	Humid
A14	Bejaia	36°32'55"N	5°15'39"E	298	Humid
A15	Bejaia	36°32'33"N	5°15'07"E	303	Humid
A16	Bejaia	36°32'32"N	5°15'08"E	285	Humid
A17	Bejaia	36°32'41"N	5°15'24"E	307	Humid
A18	Jijel	36°41'04"N	6°16'28"E	74	Humid
A19	Jijel	36°41'05"N	6°16'31"E	84	Humid
A20	Skikda	36°53'24"N	7°05'32"E	236	Humid
A21	Skikda	36°53'24"N	7°05'33"E	241	Humid
A22	Skikda	36°53'23"N	7°05'29"E	231	Humid
A23	Skikda	36°53'22"N	7°05'33"E	233	Humid
A24	El Taref	36°39'22"N	7°47'44"E	31	Sub Humid
A25*	El Taref	36°39'22"N	7°47'45"E	31	Sub Humid
A26*	El Taref	36°39'22"N	7°47'44"E	31	Sub Humid
A27	Guelma	36°35'39"N	7°33'42"E	284	Sub Humid
A28	Guelma	36°35'39"N	7°33'43"E	278	Sub Humid
A29	Guelma	36°35'40"N	7°33'41"E	286	Sub Humid
A30	Guelma	36°35'40"N	7°33'40"E	291	Sub Humid
A31	Guelma	36°35'40"N	7°33'40"E	291	Sub Humid
A32	Mila	36°21'16"N	5°51'38"E	753	Sub Humid
A33	Mila	36°21'16"N	5°51'38"E	753	Sub Humid
A34	Mila	36°21'14"N	5°51'38"E	763	Sub Humid
A35	Mila	36°21'00"N	5°51'18"E	827	Sub Humid
A36	Setif	35°49'13"N	5°30'26"E	955	Semi Arid
A37	Setif	35°57'08"N	5°32'15"E	940	Semi Arid
A38	M'sila	35°43'21"N	4°31'07"E	490	Arid
A39	M'sila	35°43'21"N	4°31'07"E	490	Arid
A40	M'sila	35°43'22"N	4°31'07"E	490	Arid
A41	M'sila	35°42'16"N	4°32'46"E	477	Arid
A42	M'sila	35°43'16"N	4°32'46"E	488	Arid
A43	Blida	36°31'53"N	2°55'46"E	114	Sub Humid
A44	Blida	36°31'53"N	2°55'48"E	113	Sub Humid
A45	Blida	36°32'15"N	2°56'14"E	97	Sub Humid
A46	Tipaza	36°28'05"N	2°26'10"E	186	Sub Humid
A47	Tipaza	36°28'03"N	2°26'08"E	188	Sub Humid
A48	Tipaza	36°28'01"N	2°26'05"E	192	Sub Humid
A49	Tipaza	36°28'03"N	2°24'40"E	218	Sub Humid
A50	Tipaza	36°28'04"N	2°24'43"E	216	Sub Humid
A51	Tipaza	36°28'04"N	2°24'41"E	217	Sub Humid
A52	Sidi Bel Abbès	35°12'50"N	0°37'47"W	472	Semi Arid
A53	Sidi Bel Abbès	35°12'50"N	0°37'44"W	471	Semi Arid
A54	Sidi Bel Abbès	35°12'50"N	0°37'44"W	471	Semi Arid

A55	Sidi Bel Abbès	35°12'43"N	0°37'47"W	473	Semi Arid
A56	Sidi Bel Abbès	35°12'38"N	0°37'48"W	470	Semi Arid
A57	Tlemcen	34°44'13"N	1°34'07"W	617	Semi Arid
A58	Tlemcen	34°44'12"N	1°34'10"W	619	Semi Arid
A59	Tlemcen	34°44'05"N	1°34'08"W	567	Semi Arid
A60	Tlemcen	34°44'05"N	1°34'08"W	567	Semi Arid
A61	Tlemcen	34°44'05"N	1°34'08"W	567	Semi Arid
A62	Tlemcen	35°02'10"N	1°40'17"W	503	Semi Arid
A63	Tlemcen	35°02'11"N	1°40'18"W	497	Semi Arid
A64	Tlemcen	35°02'09"N	1°40'18"W	513	Semi Arid
A65	Tlemcen	35°02'07"N	1°40'17"W	524	Semi Arid
A66	Tlemcen	35°02'09"N	1°40'17"W	510	Semi Arid

* Hermaphroditic cultivar.



Figure 2. Pods and seeds variability of some Algerian carobs accessions.

Morphometric analysis

ANOVA analysis showed highly significant differences ($P < 0.001$) between accessions for all quantitative traits (Table 2). Leaf dimension traits (rachis length, leaflet area and length/width ratio) of all carob accessions (Table S1) ranged from 9.04 (A24) to 22.16 cm (A14), 11.49 cm² (A34) to 33.93 cm² (A14), and 1.23 (A61) to 1.73 (A62) respectively. The rachis and leaflets showed on average 13.70 cm length and 19.68 cm² area, and the length/width ratio was 1.50 on average. The number of leaflets per leaf were 8.32 on average and varied from 6.0 (A58) to 11.2 (A26 ‘Tarfi’).

The pod dimensions (Table S2) (length and width) ranged from 11.20 cm (A34) to 19.36 cm (A60) and from 1.54 cm (A44) to 3.07 cm (A01), respectively. Both traits presented means of 15.05 cm and 2.13 cm

respectively. Pod thickness was thin, of 0.63 cm on average, and ranged from 0.29 cm (A61) to 0.97 cm (A47 ‘Maricani’). Seed dimensions (Table S3) (length, width and thickness) varied from 0.81 cm (A24) to 1.10 cm (A45), 0.59 cm (A08) to 0.81 cm (A01) and 0.23 cm (A25 ‘Tarfi’) to 0.50 cm (A18 and A49 ‘Maricani’) respectively. These seed characteristics were 0.93 cm, 0.71 cm and 0.41 cm on average, respectively.

The weight of the pods varied between 5.8 g (A18) and 27.4 g (A11), with a mean value of 15.17 g. The number of seeds varied from 6.43 (A34) to 13.97 (A19), and a mean value of 10.97. The hermaphroditic accessions A25 and A26 recorded the highest weight (25.03 g) and pulp percentage (93.80 %) respectively. Finally, seed yield ranged from 6.20 % (A26 ‘Tarfi’) to 28.63 % (A18).

Table 2. Extreme values, mean and statistical significance of 16 morphological traits of 66 Algerian carob accessions.

Morphological traits	Min ± SE	Max ± SE	Mean ± SE	CV%	<i>p-value</i> ***
Rachis length (cm)	9.04 ± 1.27	22.16 ± 1.30	13.70 ± 0.37	21.85	< 0.001
Number of leaflets	6.0 ± 0.00	11.2 ± 0.49	8.32 ± 0.14	13.74	< 0.001
Leaflet area (cm ²)	11.49 ± 0.47	33.93 ± 2.67	19.68 ± 0.59	24.41	< 0.001
Length / Width of leaflet	1.23 ± 0.04	1.73 ± 0.08	1.50 ± 0.02	8.41	< 0.001
Pod length (cm)	11.20 ± 0.30	19.36 ± 0.35	15.05 ± 0.25	13.41	< 0.001
Pod width (cm)	1.54 ± 0.04	3.07 ± 0.03	2.13 ± 0.04	15.85	< 0.001
Pod thickness (cm)	0.29 ± 0.02	0.97 ± 0.02	0.63 ± 0.02	27.56	< 0.001
Pod weight (g)	5.8 ± 0.21	27.4 ± 0.55	15.17 ± 0.67	35.65	< 0.001
Pulp weight (g)	4.17 ± 0.19	25.03 ± 1.17	13.16 ± 0.65	39.87	< 0.001
% of pulp	71.37 ± 1.59	93.80 ± 0.24	85.18 ± 0.65	6.16	< 0.001
Number of seeds	6.43 ± 0.42	13.97 ± 0.45	10.97 ± 0.17	12.49	< 0.001
Seed yield (%)	6.20 ± 0.24	28.63 ± 1.59	14.82 ± 0.65	35.44	< 0.001
Seed length (cm)	0.81 ± 0.01	1.10 ± 0.01	0.93 ± 0.01	7.78	< 0.001
Seed width (cm)	0.59 ± 0.01	0.81 ± 0.00	0.71 ± 0.01	6.32	< 0.001
Seed thickness (cm)	0.23 ± 0.01	0.50 ± 0.00	0.41 ± 0.01	11.35	< 0.001
Seed Weight / pod (g)	1.03 ± 0.08	2.71 ± 0.07	2.00 ± 0.04	17.20	< 0.001

Min: Minimum; Max: Maximum; SE: standard error; CV%: coefficient of variation; *** A highly significant *p-value* for all variables studied.

Correlation analysis

The correlation between the 12 analysed morphological traits (pods and seeds) is summarised in Figure 3. The results revealed a correlation between all the characters, except the trait of seed width and number

of seeds, percentage of pulp, yield (% of seeds) and seed thickness. Pulp weight had a strongly positive correlation with pod length, pod width and pod thickness, with respective correlation coefficients of $r = 0.63, 0.75, 0.64$, but a weakly positive correlation with seed number ($r = 0.27$), seed length ($r = 0.38$), seed width ($r = 0.28$) and seed weight ($r = 0.31$). Furthermore, pulp weight was negatively correlated with yield ($r = -0.63$) and seed thickness ($r = -0.31$). Yield (% of seeds) was negatively correlated with the majority of traits, pod length, pod width, pod thickness, pod weight and seed length with respective correlation coefficients of $r = -0.16, -0.51, -0.44, -0.55$ and -0.14 , while it was positively correlated with seed number ($r = 0.28$), seed thickness ($r = 0.27$) and seed weight ($r = 0.40$).

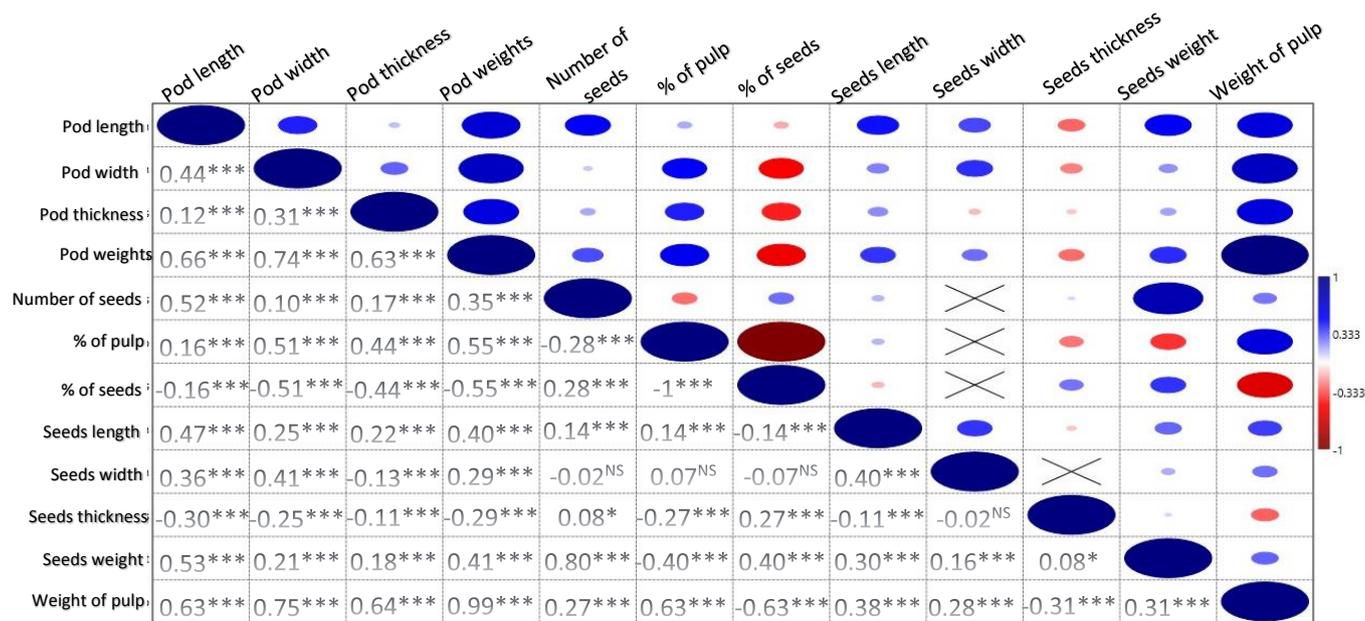


Figure 3. Coefficient correlation between morphological pods and seeds parameters of 66 Algerian carobs accessions (Significant level: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. ns: statistically non-significant).

Multivariate analysis

The multiple correspondence analysis (MCA) for variables regarding leaves is illustrated in Figure 4. The two dimensions of MCA explained 30.22 % of the total of variance over 18 modalities. The MCA provide an opportunity to group the leaves of carob trees into three distinct classes: i) leaves with a short rachis, low number of leaflets, small leaflets, lobed, narrow and green leaves; ii) leaves with a medium rachis, medium number of leaflets, medium leaflets, oval, short and light green leaves, and iii) leaves with a long rachis, large number of leaflets, large leaflets, elliptic, long and dark green leaves.

Principal component analysis of the 12 pod and seed morphological characters is shown in Figure 5. The two first principal components explained 67.5 % of the total variance, the first axis explained 49.6 %, and 17.9 % in the second. The best-represented variables in the first component were pod weight ($\text{Cos}^2 = 0.96$), pulp weight ($\text{Cos}^2 = 0.95$), yield ($\text{Cos}^2 = 0.73$), percentage of pulp ($\text{Cos}^2 = 0.73$), pod width ($\text{Cos}^2 = 0.7$) and pod length ($\text{Cos}^2 = 0.52$). In the second component, seed weight, seed number and seed length were the most significant variables, with a quality of representation of $\text{Cos}^2 = 0.56, 0.37$ and 0.24 , respectively. The PCA shows a negative correlation between most of pod traits and seed yield, and a null correlation between the latter trait and the other characters of the seed. The latter result seems to be in contradiction with those of correlation analysis between variables, however this ambiguity can be explained by the loss of information recorded by the PCA, which is 32.5 %.

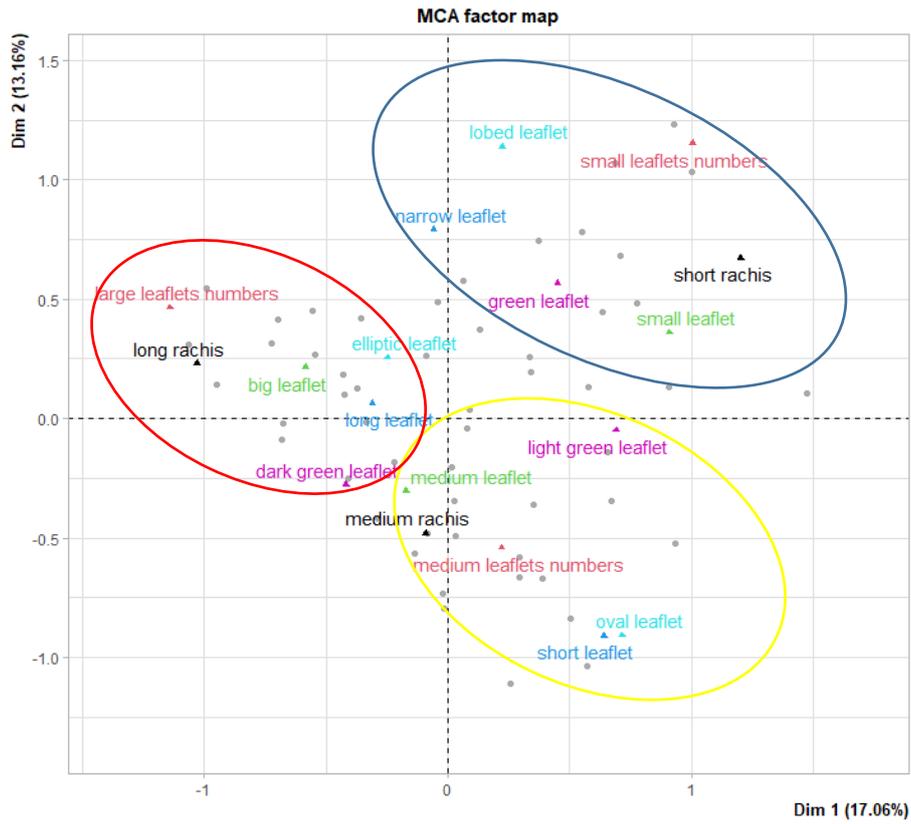


Figure 4. Multiple correspondence analysis of six variables of leaves belonging 66 Algerian carobs accessions. The MCA groups the leaves of carob tree into three distinct classes.

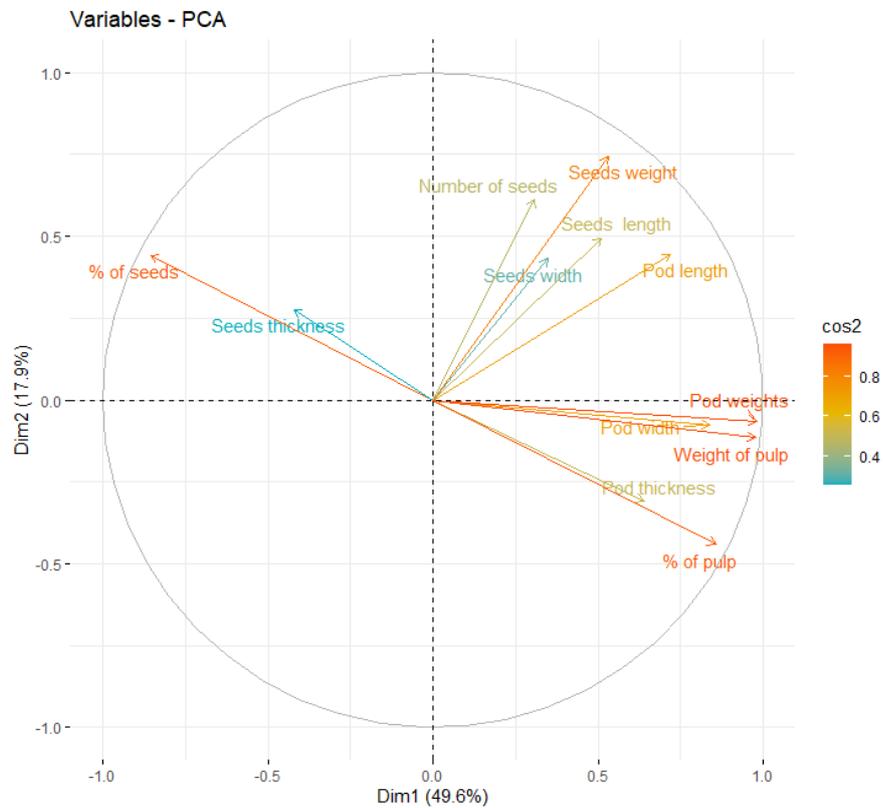


Figure 5. Principal component analysis of 12 morphological traits (pods and seeds) of 66 Algerian carobs accessions.

Hierarchical classification of the different accessions according to their morphometric measurements is presented in Figure 6. The best number of clusters determined by both “Dunn” and “DB” indices was seven. The group that stood out was the one with hermaphrodite accessions (A25 and A26 ‘Tarfi’). Cluster VII combined three accessions: A32 and A34 located in the east of the country in a sub-humid bioclimatic stage, and A61 located in the far west in a semi-arid bioclimatic stage. The sixth group included four accessions, two from the west (A57 and A58) with a semi-arid bioclimate, one in the centre of the country (A44) with a sub-humid bioclimate, and the last located in the east (A18) with a humid bioclimate. Cluster IV combined the cultivar Maricani (A47 and A49) with accessions from the region of Boumerdes (A06, A08 and A09), while the cultivar Tlemsani (A43) was very close to the accession (A04) in the third cluster. In the first cluster, all the accessions (A02, A03 and A01) from the region of Relizane and most accessions (A27, A28 and A31) from the region of Guelma were grouped together. Finally, cluster V combined the greatest number of accessions, which were located throughout the country and in all types of bioclimatic stages.

The heatmap (Figure 7) shows that Cluster I was characterised by accessions with a high percentage of pulp and a low yield of seed. Cluster II, which grouped together the two hermaphrodite accessions, was characterised by a low percentage of seeds and thin seeds, and also by high pulp weight. Cluster III was characterised by a high weight of pulp and seed, and high number of seed, while a thick pod and narrow seeds distinguished Cluster IV. Cluster V, which grouped together most accessions, was characterised by a medium to high seed yield and a medium to low percentage of pulp. Cluster VI was distinguished by several traits such as a high percentage of seeds, low percentage of pulp and short pods with a small weight. Finally, Cluster VII contained accessions with a small number of short seeds and low pod and seed weight.

Linear discriminant analysis (LDA) for the classification of accessions per region is shown in Figure 8. LDA identified two linear discriminants that explained 57.37 % of the total variance and clearly showed three separate accession groups belonging to three different regions: El Taref, Relizane and Guelma. LDA indicated that 69.7 % of accessions were correctly classified according to their origin, but only 39.39 % with the correction of Jackknife method, which represents 26 accessions out of a total of 66 accessions studied. These 26 accessions were originally from 11 regions: Relizane (A01, A02 and A03), Boumerdes (A06, A08 and A09), Bejaia (A16 and A17), Skikda (A21 and A22), El Taref (A25 and A26, ‘Tarfi’), Guelma (A27, A28, A29 and A31), Mila (A32 and A35), M’sila (A40 and A42), Tipaza (A47 and A49, ‘Maricani’), Sidi Bel Abbès (A54) and Tlemcen (A59, A63 and A65).

Discussion

Our study demonstrates the enormous morphological variability of carob accessions across Algeria, with traits that overlap with carob trees to other countries of the Mediterranean basin (Table 3 and 4). Especially for the pod parameters; such as Cypriot pods with a mean length of 15.24 cm (Kyrtzidis et al., 2021), Spanish pods with a mean width of 2.11 cm (Albanell et al., 1996), and Moroccan pods with a mean thickness at 0.64 cm (El Kahkahi et al., 2014). Similar results were found for seed dimensions very close to Spanish seed cultivars, presenting extreme values passed from 0.75 to 1.10 cm and 0.59 to 0.80 cm, respectively (Albanell et al., 1996). However, the Algerian carob germplasm presents the most range variation of seed thickness compared to the Mediterranean populations, with a coefficient of variation (11.35 %). This probably indicates that, for this trait, genetic diversity within Algerian cultivars is high. Its mean was 0.41 cm, coinciding with those observed among Tunisian populations and Syrian accessions (Naghmouchi et al., 2009; Mahfoud et al., 2018).

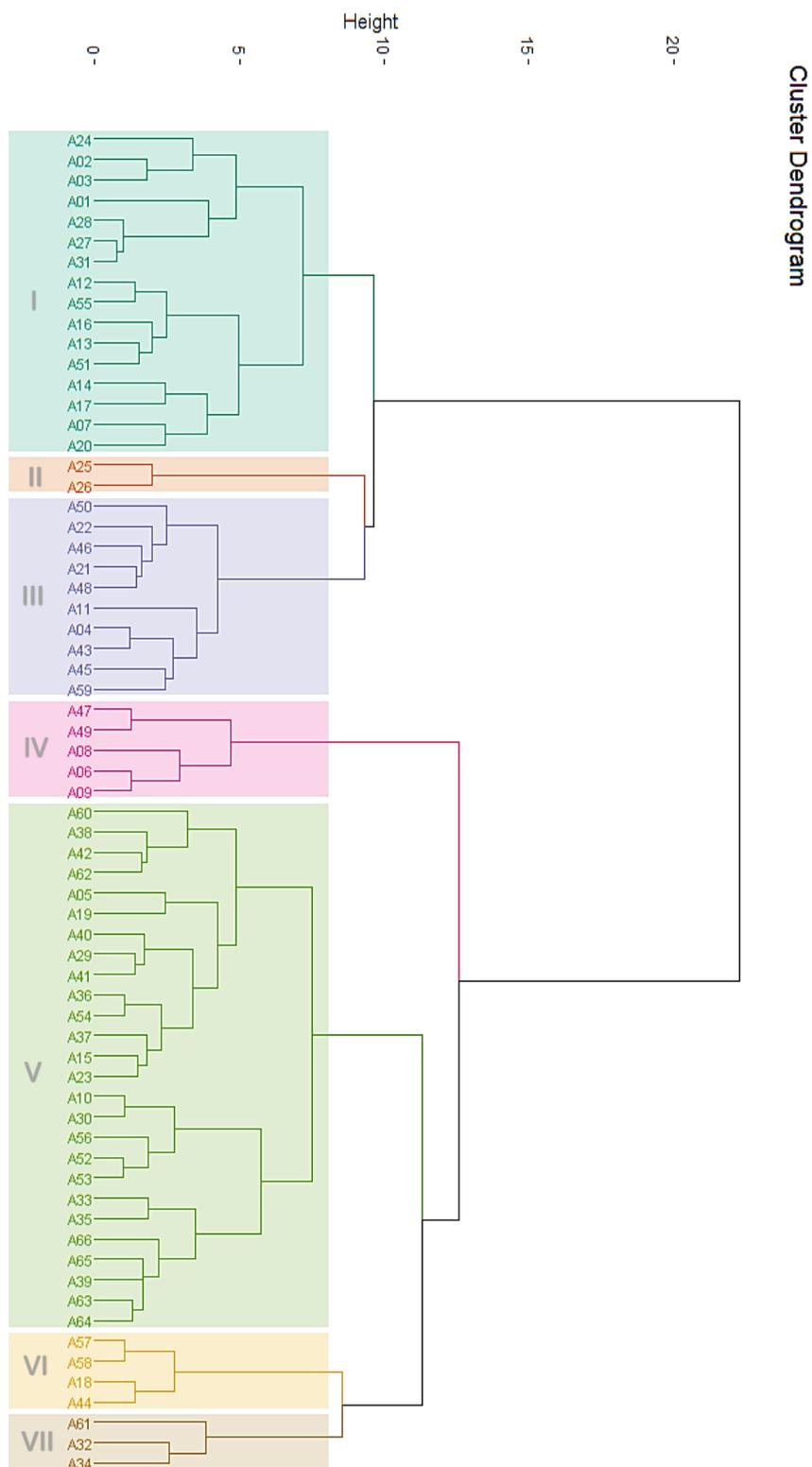


Figure 6. Hierarchical classification of 66 Algerian carobs accessions based on their 12 morphological characters of pods and seeds.

The weight of the Algerian pods overlaps with those observed by Albanell et al. (1996), who obtained a range from 5.09 g to 29.84 g, with an average weight of 14.88 g in Spanish pods. The number of Algerian seeds was close to the average recorded among Lebanese accessions (10.93) (Chami et al.,

2018). Finally, the seed yield from these Algerian accessions, with a mean of 14.88 %, could be considered satisfactory compared with the seed yield recorded from other carobs in the Mediterranean basin. In conclusion, it appears from this comparison that the most similar carob pods in the Mediterranean basin to those in Algeria are Spanish carob pods.

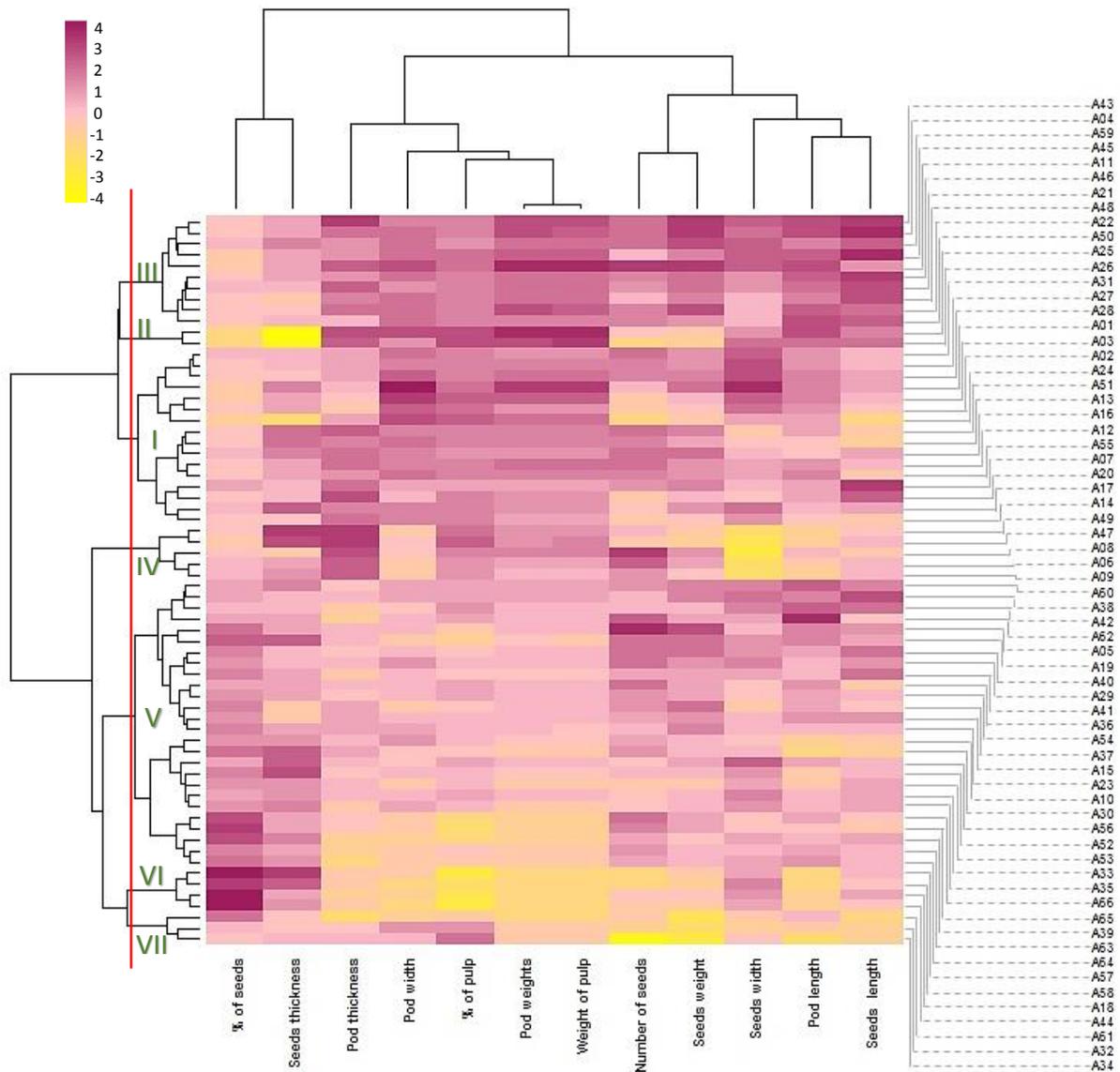


Figure 7. Heatmap of morphological performance of 66 Algerian carobs accessions.

The number of leaflets per leaf (mean = 8.32) was significantly higher than those recorded by Chami et al. (2018) for Lebanon accessions (mean = 7.88), by El Bakkali et al. (2019) for Moroccan populations (mean = 7.2) and by Korkmaz et al. (2020) for Turkish wild trees (mean = 6.43).

According to Albanell et al. (1996), to improve the yield of seed and gum it is possible to select a light, thin, narrow carob pod with a high number of thick, short seeds. The characteristics of pod length and seed width were not important since these were not correlated with seed yield. These conclusions were confirmed by our results of the analysis of morphometric parameters and their correlations. For a high

pulp weight, a heavy, long, wide, thick pod should be selected with a high number of long, wide, thin seeds.

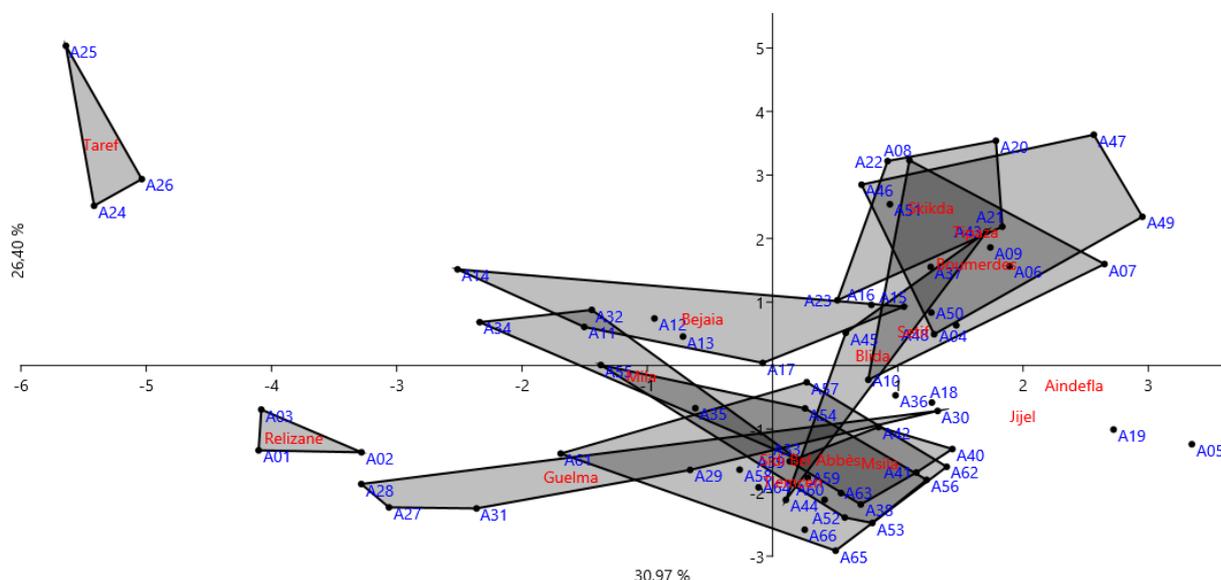


Figure 8. Linear discriminant Analysis of 66 Algerian carobs accessions.

Principal component analysis showed two groups of variables, one represents pod characters, while the other represents seed traits. According to the same multivariate analysis, a high pulp weight leads to lower seed yield, which is similar to the results of Boublenza et al. (2019).

Hierarchical clustering analysis revealed significant genetic diversity among the Algerian carob accessions studied. It also showed that the distribution of these accessions was not influenced by type of bioclimate. This suggests that morphometric traits are probably controlled more by genes than by bioclimate; indeed, the results of a study conducted by Kyratzis et al. (2021) suggest the same hypothesis.

It appears from the results of linear discriminant analysis and hierarchical classification and the performance of morphological traits of each accession for each cluster (Heatmap analysis) that among the sixty-six accessions studied, eleven are potential cultivars. Two cultivars are already known and confirmed by this study – ‘Tlemsani’ (A43) and ‘Maricani’ (A47; A49) – and nine other cultivars were identified in the present study: the hermaphroditic cultivar Tarfi (A25; A26) which could be used for pollination in the field and the female cultivars which were given the following names: ‘Relizani’ (A01; A02; A03), ‘Bumerdas’ (A08), ‘Bejaoui’ (A11), ‘Skikdi’ (A21; A22), ‘Guelmi’ (A27; A28; A31), ‘Msili’ (A42), ‘Abassi’ (A54) and ‘Zayanid’ (A59). These cultivars could be used as germplasms for reforestation programmes and for the establishment of high-yielding Algerian carob orchards.

Table 3. Comparison of morphological characteristics of carob pods from Mediterranean countries.

Morphological traits of pod		Algerian ⁽¹⁾ accessions (N=66)	Spanish ⁽²⁾ cultivars (N=182)	Italian ⁽³⁾ cultivars (N=54)	Portuguese ⁽⁴⁾ cultivars (N=15)	Turkish ⁽⁵⁾ genotypes (N=32)	Moroccan ⁽⁶⁾ accessions (N=47)	Syrian ⁽⁷⁾ accessions (N=24)	Lebanese ⁽⁸⁾ accessions (N=59)	Cypriot ⁽⁹⁾ accessions (N=124)
Length (cm)	Mini	11.20	7.71	13.30	12.95	14.25	10.11	12.87	10.83	7.34*
Short (<14) **	Max	19.36	27.28	21.10	20.36	19.08	16.63	22.32	23.42	20.20*
Medium (14-18)	Mean	15.05	15.83	17.10	17.07*	16.91	13.85	17.46*	16.19	15.24*
Long (>18)	CV%	13.41	n.m	7.70	12.33*	7.00	10.81*	13.08*	21.26	15.41*
Width (cm)	Mini	1.54	1.44	1.50	1.62	1.98	1.21	1.98	1.43	1.62*
Small (<1.85) **	Max	3.07	2.68	2.67	2.34	2.35	1.81	3.12	2.70	2.71*
Medium (1.85-2.25)	Mean	2.13	2.11	2.30	2.05*	2.18	1.57	2.47*	2.21	2.32*
Big (>2.25)	CV%	15.85	n.m	5.80	8.36*	5.00	11.23*	11.36*	14.64	8.53*
Thickness (cm)	Mini	0.29	0.54	0.50	0.72	0.52	0.45	0.58	0.46	0.59*
Thin (<0.75) **	Max	0.97	1.32	1.33	1.10	1.12	0.87	1.26	1.22	1.28*
Medium (0.75-0.95)	Mean	0.63	0.85	0.96	0.98*	0.88	0.64	0.89*	0.83	1.00*
Thick (>0.95)	CV%	27.56	n.m	9.20	13.05*	14.00	13.45*	20.91*	19.13	13.49*
Weight (g)	Mini	5.8	5.09	n.m	11.46	14.34*	n.m	8.99	5.90	5.29*
Small (<12) **	Max	27.4	29.84	n.m	26.39	29.58*	n.m	26.33	37.65	30.46*
Medium (12-17)	Mean	15.17	14.88	n.m	18.67*	21.52*	n.m	16.42*	20.34	17.35*
High (>17)	CV%	35.65	n.m	n.m	19.13*	3.80*	n.m	29.76*	39.33	29.13*
Pulp weight (g)	Mini	4.17	3.74	n.m	n.m	12.37*	3.41	n.m	4.49	n.m
	Max	25.03	27.43	n.m	n.m	27.24*	7.42	n.m	34.67	n.m
	Mean	13.16	13.00	n.m	n.m	19.70*	5.96*	n.m	18.00	n.m
	CV%	39.87	n.m	n.m	n.m	4.00*	17.04*	n.m	42.94	n.m
N° of seeds	Mini	6.43	2.88	n.m	10.15	7.67*	8.43	8.26	7.86	n.m
Few (<8.5) **	Max	13.97	14.76	n.m	13.69	12.3*	15.53	16.11	14.30	n.m
Medium (8.5-10.5)	Mean	10.97	10.00	n.m	12.17*	10.45*	12.26	11.81*	10.93	n.m
Many (>10.5)	CV%	12.49	n.m	n.m	9.56*	2.40*	11.73*	17.94*	13.45	n.m

** Ranks of morphological characters of the carob tree (Tous et al., 2013). * Values calculated from authors data. n.m: not mentioned.

References: ⁽¹⁾ Present work; ⁽²⁾ Albanell et al., 1996; ⁽³⁾ Russo and D'Andrea, 2002; ⁽⁴⁾ Barracosa et al., 2007; ⁽⁵⁾ Tetik et al., 2011; ⁽⁶⁾ El Kahkahi et al., 2014; ⁽⁷⁾ Mahfoud et al., 2018; ⁽⁸⁾ Chami et al., 2018; ⁽⁹⁾ Kyratzis et al., 2021.

Table 4. Comparison of morphological characteristics of carob seeds from Mediterranean countries.

Morphological traits of seed		Algerian ⁽¹⁾ accessions (N=66)	Spanish ⁽²⁾ cultivars (N=182)	Italian ⁽³⁾ cultivars (N=54)	Portuguese ⁽⁴⁾ cultivars (N=15)	Tunisian ⁽⁵⁾ populations (N=19)	Turkish ⁽⁶⁾ genotypes (N=32)	Moroccan ⁽⁷⁾ accessions (N=47)	Syrian ⁽⁸⁾ accessions (N=24)	Lebanese ⁽⁹⁾ accessions (N=59)
Seed yield (%)	Mini	6.20	3.55	n.m	10.85	8.89	5.17	17.4	n.m	6.7
Low (<10) **	Max	28.63	29.41	n.m	18.14	24.50	14.01	27.83	n.m	36.6
Medium (10-15)	Mean	14.82	12.11	n.m	13.11*	17.20	8.79	23.02*	n.m	13.13
High (>15)	CV%	35.44	n.m	n.m	15.93*	30.06	27.00	10.51*	n.m	44.63
Length (cm)	Mini	0.81	0.75	0.73	0.87	0.80	n.m	0.75	0.81	0.77
Short (<0.85) **	Max	1.10	1.10	1.12	1.02	0.97	n.m	0.92	1.14	1.15
Medium (0.85-0.95)	Mean	0.93	0.96	0.93	0.96*	0.91	n.m	0.82*	0.99*	0.97
Long (>0.95)	CV%	7.78	n.m	4.40	4.40*	5.52	n.m	5.00*	8.62*	8.96
Width (cm)	Mini	0.59	0.59	0.62	0.64	0.65	n.m	0.57	0.62	0.60
Narrow (<0.675) **	Max	0.81	0.80	0.78	0.77	0.74	n.m	0.72	0.83	0.86
Medium (0.67-0.72)	Mean	0.71	0.70	0.68	0.71*	0.69	n.m	0.63*	0.72*	0.74
Wide (>0.72)	CV%	6.32	n.m	4.40	4.92*	4.18	n.m	6.32*	6.60*	9.43
Thickness (cm)	Mini	0.23	0.31	0.32	0.38	0.35	n.m	0.32	0.37	0.37
Thin (<0.38) **	Max	0.50	0.47	0.47	0.52	0.47	n.m	0.45	0.46	0.53
Medium (0.38-0.45)	Mean	0.41	0.38	0.39	0.42*	0.41	n.m	0.40*	0.41*	0.43
Thick (>0.45)	CV%	11.35	n.m	7.20	8.13*	9.81	n.m	7.07*	7.06*	8.67
Weight / pod (g)	Mini	1.03	0.35	n.m	1.84	n.m	1.15*	1.09	n.m	1.36
	Max	2.71	3.13	n.m	2.99	n.m	2.34*	2.62	n.m	3.05
	Mean	2.00	1.88	n.m	2.36*	n.m	1.82*	1.76	n.m	2.24
	CV%	17.20	n.m	n.m	11.79*	n.m	n.m	18.97*	n.m	20.09

** Ranks of morphological characters of the carob tree (Tous et al., 2013). * Values calculated from authors data. n.m: not mentioned.

References: ⁽¹⁾ Present work; ⁽²⁾ Albanell et al., 1996; ⁽³⁾ Russo and D'Andrea, 2002; ⁽⁴⁾ Barracosa et al., 2007; ⁽⁵⁾ Naghmouchi et al., 2009; ⁽⁶⁾ Tetik et al., 2011; ⁽⁷⁾ El Kahkahi et al., 2014; ⁽⁸⁾ Mahfoud et al., 2018; ⁽⁹⁾ Chami et al., 2018.

Conclusion

This study compiled the first inventory of Algerian carob cultivars based on field prospection and a selection of morphometric tools and statistical analysis. The findings are intriguing and could serve as a springboard for reforestation efforts and the establishment of efficient and viable carob orchards. However, it is necessary to use dominant and codominant molecular markers (AFLP, SSR, and SNP) to determine the genetic similarities between the Algerian carob accessions. This step is fundamental to selecting the best germplasms according to their agronomic and commercial value.

Acknowledgments

We thank the company BOUBLENZA, which is the leader in Algeria in processing and exporting carob, for its invaluable help, particularly for contacts with groups of carob collectors, whom we also thank for sharing invaluable information and for their availability throughout the sampling.

Funding

The authors declare that no funding was procured for carrying out the research described in this article.

Author contributions

Y.M.M. designed the study, carried out the field and laboratory work, performed the statistical analysis, wrote and edited the manuscript. R.M.M. participated in the statistical analysis and contributed to the writing of the manuscript. J.V. revised and contributed to the writing of the manuscript. N.S. carried out the field and laboratory work. S.B.S.G. supervised the study and revised the manuscript.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

- Abidar A. Boianjiu RS. Dumitru G. Todirascu-Ciornea E. Amakran A. Cioanca O. Hritcu L. Nhiri M 2020.** The Aqueous Extract from *Ceratonia siliqua* Leaves Protects against 6-Hydroxydopamine in Zebrafish: Understanding the Underlying Mechanism. *Antioxidants*, 9(4): 304. DOI:10.3390/antiox9040304.
- Albanell E. Caja G. Plaixats J 1996.** Characterization of carobs fruits (*Ceratonia siliqua* L.) cultivated in Spain for Agro-industrial use. *International Tree Crops Journal*, 9: 1-9. DOI:10.1080/01435698.1996.9752955.
- Albanell E. 1990.** Caracterización morfológica, composición química y valor nutritivo de distintas variedades de garrofa (*Ceratonia siliqua* L.) cultivadas en España. PhD thesis, Barcelona University, Spain.
- Alzoubi KH. Alibbini S. Khabour OF. El-Elimat T. Al-zubi M. Alali FQ 2018.** Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Prevents Short-Term Memory Deficit Induced by Chronic Stress in Rats. *Journal of Molecular Neuroscience*, 66: 314-321. DOI:10.1007/s12031-018-1161-8.
- Ayaz FA. Torun H. Ayaz S. Correia PJ. Alaiz M. Sanz C. Grúz J. Strnad M 2007.** Determination of chemical composition of Anatolian carob pod (*Ceratonia siliqua*): sugars, amino and organic acids, minerals and phenolic compounds. *Journal of Food Quality*, 30: 1040-1055. DOI:10.1111/j.1745-4557.2007.00176.x.
- Azab A 2017.** Carob (*Ceratonia siliqua*): Health, Medicine and Chemistry. *European Chemical Bulletin*, 6(10): 456-469. DOI:10.17628/ecb.2017.6.456-469.

- 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. DOI:10.1016/j.scienta.2007.06.024.
- Battle I Rovira M and Tous J 1996.** Carob germplasm characterization using isoenzymes. In *Proceedings of the 3th International Carob Symposium*. Cabanas-Tavira, Portugal (in press).
- Battle I and 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 Research. Gatersleben/International Plant Resources Institute. Rome.
- 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.
- 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.
- Ben Ayache S. Saafi EB. Emhemmed F. Flamini G. Achour L. Muller ChD 2020.** Biological Activities of Aqueous Extracts from Carob Plant (*Ceratonia siliqua* L.) by Antioxidant, Analgesic and Proapoptotic Properties Evaluation. *Molecules*, 25: 3120. DOI:10.3390/molecules25143120.
- Ben Othmen Kh. Elfallehb W. García Beltrán JM. Ángeles Estebanc M. Haddada M 2020.** An in vitro study of the effect of carob (*Ceratonia siliqua* L.) leaf extracts on gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) leucocyte activities. Antioxidant, cytotoxic and bactericidal properties. *Fish and Shellfish Immunology*, 99: 35-43. DOI:10.1016/j.fsi.2020.02.005.
- Bessedik M. Guinet P. Suc JP 1984.** Données paléofloristiques en Méditerranée nord-occidentale depuis l'Aquitainien. *Revue de Paléobiologie, special vol*, 25-31.
- 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. DOI:10.1016/j.scienta.2019.05.064.
- Bureš P. Pavlíček T. Horová L. Nevo E 2004.** Microgeographic genome size differentiation of the carob tree, *Ceratonia siliqua*, at 'Evolution Canyon'. *Annals of Botany*, 93: 529-535. DOI:10.1093/aob/mch074.
- Caruso M. La Malfa S. Pavlíček T. Frutos Tomás D. Gentile A. Tribulato E 2008.** Characterisation and assessment of genetic diversity in cultivated and wild carob (*Ceratonia siliqua* L.) genotypes using AFLP markers. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 83(2): 177-182. DOI:10.1080/14620316.2008.11512367.
- Chami M. Hajj A. Kahwaji J. Youssef H. Ghaith S. Fakih L. Smaha M. Nabbout R. El Riachy M. As-Sadi F. Al Zein M. Ruiz Gomez FJ. Palacios-Rodriguez G. Navarro-Cerillo R. Tous J. Chalak L 2018.** Assessment of Ancient Carob Germplasm of Lebanon by Morphological Traits. *Journal of the American Pomological Society*, 72(4): 260-278.
- Corsi 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: 674-684. DOI:10.1016/s0367-326x(02)00227-7.
- Craig WJ. Nguyen TT 1984.** Caffeine and theobromine level in cocoa and carob products. *Journal of Food Science*, 49: 302-305. DOI:10.1111/j.1365-2621.1984.tb13737.x.
- Davies DL. Bouldin DW 1979.** A Cluster Separation Measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1(2): 224-227. DOI:10.1109/TPAMI.1979.4766909.
- Dunn JC 1974.** Well-Separated Clusters and Optimal Fuzzy Partitions. *Journal of Cybernetics*, 4(1): 95-104. DOI:10.1080/01969727408546059.
- El Bakkali A. Essarioui A. Mekkaoui A. Hssaini L. Mamouni A 2019.** Characterization of Carob Trees Suggests High Morphological Variability in Populations of the Middle Atlas Region, Morocco:

- Towards Use of Carob Germplasm in Breeding Program. International journal of pure and applied bioscience, 7(1): 22-34. DOI:10.18782/2320-7051.6979.
- EL Hajaji H. Lachkar N. Alaoui K. Cherrah Y. Farah A. Ennabili A. El Bali B. Lachkar M 2011.** Antioxidant activity, phytochemical screening, and total phenolic content of extracts from three genders of carob tree barks growing in Morocco. Arabian Journal of Chemistry, 4: 321-324. DOI:10.1016/j.arabjc.2010.06.053.
- El Hajaji H. Lachkar N. Alaoui K. Cherrah Y. Farah A. Ennabili A. El Bali B. Lachkar M 2010.** Antioxidant Properties and Total Phenolic Content of Three Varieties of Carob Tree Leaves from Morocco. Records of Natural Products, 4(4): 193-204.
- El Kakhahi R. Zouhair R. Ait Chitt M. Errakhi R 2014.** Morocco carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of Pods and Kernel. International journal of pure and applied bioscience, 2 (4): 38-47.
- El-Haskoury R. Kriaa W. Lyoussi B. Makni M 2018.** *Ceratonia siliqua* honeys from Morocco: Physicochemical properties, mineral contents, and antioxidant activities. Journal of Food and Drug Analysis, 26: 67-73. DOI:10.1016/j.jfda.2016.11.016.
- El-Haskoury R. Zizi S. Touzani S. Al-Waili N. Al-Ghamdi A. Lyoussi B 2015.** Diuretic activity of carob (*Ceratonia siliqua* L.) honey: comparison with furosemide. African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines, 12 (4): 128-133. DOI:10.4314/ajtcam.v12i4.19.
- Hammer Ø. Harper DAT. Ryan PD 2001.** PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica, 4(1): 1-9.
- Jones DK 1953.** Carob culture in Cyprus. FAO 53/2/1225. FOA. Rome.
- Khelifa M. Bahloul A. Kitane S 2013.** Determination of Chemical Composition of Carob Pod (*Ceratonia siliqua* L) and its Morphological Study. Journal of Materials and Environmental Science, 4 (3): 348-353.
- Kocherane R. Krouchi F. Derridj A 2019.** Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology. AgroBiologia, 9(2): 1581-1600.
- Konate I. El-Bekkay B. Filali-Maltouf A 2009.** Inter-simple sequence repeat markers variation among natural accessions of Moroccan carob tree (*Ceratonia siliqua*). International Journal of Agriculture and Biology, 11(2): 168-172.
- Korkmaz N. Akin M. Koc A. Eydurhan S.P. Ilhan G. Sagbas HI. Ercisli S 2020.** Morphological and biochemical diversity among wild-grown carob trees (*Ceratonia siliqua* L.). Folia Horticulturae, 32(1): 69-78. DOI:10.2478/fhort-2020-0007.
- Kyratzis AC. Antoniou C. Papayiannis LC. Graziani G. Roupheal Y. Kyriacou MC 2021.** Pod Morphology, Primary and Secondary Metabolite Profiles in Non-grafted and Grafted Carob Germplasm Are Configured by Agro-Environmental Zone, Genotype, and Growing Season. Frontiers in Plant Science, 11: 612376. DOI:10.3389/fpls.2020.612376.
- La Malfa S. Currò S. Douglas AB. Brugaletta M. Caruso M. Gentile A 2014.** Genetic diversity revealed by EST-SSR markers in carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). Biochemical Systematics and Ecology, 55: 205-211. DOI:10.1016/j.bse.2014.03.022.
- Louca A. Papas A 1973.** The effect of different proportions of carob pod meal in the diet on the performance of calves and goats. Animal Science, 17: 139-146. DOI :10.1017/S0003356100016871.
- Mahdad MY. Gaouar SBS. 2016.** Le Caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) dans le Nord-ouest de l'Algérie: Situation et perspectives d'amélioration. Editions Universitaires Européennes. ISBN-13: 978-3639542035.
- Mahfoud H. Ameen T. Kazngi F. Nasser S 2018.** Morphological and Genetic Variability of Natural Syrian Carob (*Ceratonia siliqua* L.). SSRG International Journal of Agriculture & Environmental Science, 5(2): 70-76. DOI:10.14445/23942568/IJAES-V5I2P110.

- Makrem A. Najeh B. Laarbi K. Boussaïd M 2006.** Genetic Diversity in Tunisian *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinioideae) Natural Populations. Genetic Resources and Crop Evolution, 53: 1501. DOI:10.1007/s10722-005-7761-5.
- Makris DP. Kefalas P 2004.** Carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) as a source of polyphenolic antioxidant. Food Technology and Biotechnology, 42 (2): 105-108. UDC 634.46:547.565.2.
- Melgarejo P. Salazar DM. 2003.** Algarrobo. In Mundi-Prensa, Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas. Vol.II, Spain, pp. 19-162. ISBN: 84-8476-111-8.
- Meziani S. Oomah BD. Zaidi F. Simon-Levert A. Bertrand C. Zaidi-Yahiaoui R 2015.** Antibacterial activity of carob (*Ceratonia siliqua* L.) extracts against phytopathogenic bacteria *Pectobacterium atrosepticum*. Microbial Pathogenesis, 78: 95-102. DOI:10.1016/j.micpath.2014.12.001.
- Min BR. Hart SP 2003.** Tannins for suppression of intestinal parasites. Journal of Animal Science, 81: 102-109.
- Naghmouchi S. Khouja ML. Romero A. Tous J. Boussaid M 2009.** Tunisian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. Scientia Horticulturae, 121: 125-130. DOI:10.1016/j.scienta.2009.02.026.
- Palamarev E 1989.** Paleobotanical evidences of the Tertiary history and origin of the Mediterranean sclerophyll dendroflora. Plant Systematics and Evolution, 162: 93-107. DOI:10.1007/BF00936912.
- Rivière CH. Leco H 1900.** Manuel pratique de l'agriculteur algérien. (Ed), Augustin CHALLAMEL, Paris, France.
- Roumieux C. 2012.** Modélisation de La dynamique saisonnière des éclosions d'Aedes (*Ochlerotatus*), Caspius (Pallas, 1771) (Culicidae) en contexte de changement climatique. PhD thesis, Aix-Marseille University, France.
- Rtibi K. Selmi S. Grami D. Amri M. Eto B. El-benna J. Sebai H. Marzouki L 2017.** Chemical constituents and pharmacological actions of carob pods and leaves (*Ceratonia siliqua* L.) on the gastrointestinal tract: A review. Biomedicine & Pharmacotherapy, 93: 522-528. DOI:10.1016/j.biopha.2017.06.088.
- Russo G. D'Andrea L 2002.** Evaluation and Preservation of Genetic Resources of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Southern Italy for Pharmaceutical Use. Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants, 9(4): 367-372. DOI:10.1300/j044v09n04_15.
- Sahle M. Coleon J. Haas C 1992.** Carob pod (*Ceratonia siliqua*) meal in geese diets. British Poultry Science, 33: 531-541.
- Serairi-Beji R. Mekki-Zouiten L. Tekaya-Manoubi L. Loueslati MH. Guemira F. Ben Mansour AB 2000.** Can carob powder be used with oral rehydration solution for the treatment of acute diarrhea. Médecine Tropicale, 60: 125-128.
- Sidina MM. El Hansali M. Wahid N. Ouattmane A. Boulli A. Haddioui A 2009.** Fruit and seed diversity of domesticated carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. Scientia Horticulturae, 123: 110-116. DOI:10.1016/j.scienta.2009.07.009.
- Tetik N. Turhan I. Oziyci HR. Gubbuk H. Karhan M. Ercisli S 2011.** Physical and chemical characterization of *Ceratonia siliqua* L. germplasm in Turkey. Scientia Horticulturae, 129: 583-589. DOI:10.1016/j.scienta.2011.04.029.
- Tous J. Romero A. Batlle I 2013.** The Carob Tree: Botany, Horticulture, and Genetic Resources. Horticultural Reviews, Vol 41, 1st Edition. Edited by Jules Janick, pp. 385-456. DOI:10.1002/9781118707418.ch08.
- Tous J. Romero A. Hermoso JF. Ninot A. Plana J. Batlle I 2009.** Agronomic and Commercial Performance of Four Spanish Carob Cultivars. HortTechnology, 19(2): 465-470. DOI:10.21273/HORTSCI.19.2.465.
- Tous J 1984.** Cultivo del Algarrobo. Hoja Divulgativa N2: 10. Ministerio de Agricultura. Madrid, Spain.

- Valero-Muñoz M. Ballesteros S. Ruiz-Roso B. Pérez-Olleros L. Martín-Fernández B. Lahera V. de las Heras N 2017.** Supplementation with an insoluble fiber obtained from carob pod (*Ceratonia siliqua* L.) rich in polyphenols prevents dyslipidemia in rabbits through SIRT1/PGC-1 α pathway. *European Journal of Nutrition*, 58 : 357-366. DOI:10.1007/s00394-017-1599-4.
- Viruel J. Haguenaer A. Juin M. Mirleau F. Bouteiller D. Boudagher-Kharrat M. Ouahmane L. La Malfa S. Médail F. Sanguin H. Nieto Feliner G. Baumel A 2018.** Advances in genotyping microsatellite markers through sequencing and consequences of scoring methods for *Ceratonia siliqua* (Leguminosae). *Applications in Plant Sciences*, 6(12) : e1201. DOI:10.1002/aps3.1201.
- Viruel J. Le Galliot N. Pironon S. Nieto-Feliner G. Suc JP. Lakhel-Mirleau F. Juin M. Selva1 M. Bou Dagher Kharrat M. Ouahmane L. La Malfa S. Diadema K. Sanguin H. Médail F. Baumel A 2020.** A strong east–west Mediterranean divergence supports a new phylogeographic history of the carob tree (*Ceratonia siliqua*, Leguminosae) and multiple domestications from native populations. *Journal of Biogeography*, 47: 460-471. DOI:10.1111/jbi.13726.
- Zemouri Z. Djabeur A. Frimehdi N. Khelil O. Kaid-Harche M 2020.** The seed diversity of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) and the relationship between seeds color and coat dormancy. *Scientia Horticulturae*, 274, 109679. DOI:10.1016/j.scienta.2020.109679.

Supplementary table 1. Leaf characteristics of 66 Algerian carob trees accessions.

Acc	Rachis length (cm)*	Number of leaflets*	Leaflet area (cm ²)*	Length / Width of leaflet*	Leaflet shape	Leaflet colour
A01	17.26 ±0.82 ^{cdef}	10.0 ±0.00 ^{abc}	27.00 ±1.96 ^{bcdef}	1.73 ±0.02 ^a	elliptic	dark green
A02	14.80 ±0.82 ^{efghijklmnopq}	8.8 ±0.49 ^{bcdefgh}	30.36 ±2.86 ^{ab}	1.66 ±0.04 ^{abcde}	elliptic	dark green
A03	11.90 ±0.76 ^{klmnopqrstuv}	8.6 ±0.40 ^{bcdefghi}	19.93 ±1.11 ^{hijklmnopq}	1.70 ±0.02 ^{abc}	elliptic	dark green
A04	15.22 ±2.37 ^{defghijklmno}	8.4 ±0.75 ^{cdefghij}	23.41 ±3.14 ^{defghijkl}	1.43 ±0.03 ^{lmnopqrstuvwxy}	elliptic	dark green
A05	15.12 ±0.49 ^{defghijklmnop}	7.8 ±0.66 ^{efghijkl}	20.51 ±3.34 ^{efghijklmnopq}	1.41 ±0.04 ^{opqrstuvwxy}	elliptic	dark green
A06	12.46 ±1.21 ^{hijklmnopqrstuv}	8.2 ±0.66 ^{defghij}	20.82 ±2.00 ^{efghijklmnop}	1.34 ±0.05 ^{wxyza'b}	elliptic	dark green
A07	14.44 ±0.96 ^{efghijklmnopqr}	7.0 ±0.63 ^{ijklm}	25.36 ±1.09 ^{bcdefgh}	1.38 ±0.05 ^{rstuvwxyza'}	elliptic	green
A08	13.44 ±0.88 ^{efghijklmnopqrstu}	6.8 ±0.49 ^{ijklm}	25.26 ±2.96 ^{bcdefghi}	1.46 ±0.03 ^{hijklmnopqrstuvw}	elliptic	light green
A09	14.52 ±1.78 ^{efghijklmnopqr}	7.2 ±0.49 ^{hijklm}	23.84 ±2.11 ^{cdefghij}	1.46 ±0.03 ^{hijklmnopqrstuvw}	elliptic	green
A10	14.92 ±1.23 ^{defghijklmnop}	7.8 ±0.49 ^{efghij}	30.19 ±2.03 ^{abc}	1.63 ±0.04 ^{abcdef}	elliptic	green
A11	15.60 ±1.45 ^{defghijklm}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	20.60 ±2.23 ^{efghijklmnopq}	1.61 ±0.04 ^{bcdefghij}	elliptic	light green
A12	11.48 ±1.37 ^{mnopqrstuv}	8.8 ±0.49 ^{bcdefgh}	12.94 ±0.63 ^{rstu}	1.42 ±0.04 ^{mnopqrstuvwxy}	elliptic	dark green
A13	12.20 ±1.74 ^{ijklmnopqrstuv}	7.8 ±0.49 ^{efghij}	17.80 ±1.93 ^{ijklmnopqrstu}	1.48 ±0.07 ^{efghijklmnopqrstu}	elliptic	light green
A14	22.16 ±1.30 ^a	9.6 ±0.24 ^{abcde}	33.93 ±2.67 ^a	1.67 ±0.07 ^{abcd}	elliptic	dark green
A15	14.78 ±0.97 ^{efghijklmnopq}	7.8 ±0.49 ^{efghij}	22.02 ±0.16 ^{defghijklmno}	1.28 ±0.02 ^{za'b}	oval	green
A16	10.36 ±0.52 ^{rstuv}	6.4 ±0.51 ^{klm}	20.31 ±0.74 ^{efghijklmnopq}	1.55 ±0.03 ^{cdefghijklmnop}	elliptic	green
A17	16.65 ±1.51 ^{cdefgh}	9.8 ±0.66 ^{abcd}	23.23 ±1.16 ^{defghijkl}	1.57 ±0.03 ^{bcdefghijklm}	elliptic	dark green
A18	12.74 ±0.62 ^{ghijklmnopqrstuv}	9.6 ±0.24 ^{abcde}	17.54 ±1.55 ^{ijklmnopqrstu}	1.51 ±0.02 ^{efghijklmnopqrs}	elliptic	dark green
A19	13.52 ±1.88 ^{efghijklmnopqrstu}	9.0 ±1.00 ^{bcdefg}	24.68 ±2.53 ^{bcdefghi}	1.35 ±0.02 ^{tuvwxyza'b}	oval	green
A20	14.40 ±2.26 ^{efghijklmnopqr}	7.2 ±0.49 ^{hijklm}	27.89 ±2.98 ^{bcd}	1.45 ±0.04 ^{klmnopqrstuvw}	elliptic	dark green
A21	17.48 ±0.94 ^{bcde}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	27.00 ±3.28 ^{bcde}	1.56 ±0.03 ^{cdefghijklmno}	elliptic	dark green
A22	13.50 ±0.82 ^{efghijklmnopqrstu}	8.0 ±0.32 ^{efghij}	17.87 ±1.39 ^{ijklmnopqrstu}	1.34 ±0.03 ^{uvwxyza'b}	oval	green
A23	15.68 ±0.72 ^{defghijklm}	8.6 ±0.24 ^{bcdefghi}	23.48 ±2.12 ^{defghij}	1.47 ±0.06 ^{ghijklmnopqrstuvw}	elliptic	dark green
A24	9.04 ±1.27 ^v	6.4 ±0.75 ^{klm}	12.75 ±0.79 ^{stu}	1.35 ±0.03 ^{tuvwxyza'b}	oval	light green
A25	21.08 ±1.23 ^{ab}	10.0 ±0.89 ^{abc}	21.36 ±2.28 ^{defghijklmno}	1.43 ±0.06 ^{mnopqrstuvwxy}	elliptic	dark green
A26	19.98 ±1.09 ^{abc}	11.2 ±0.49 ^a	20.83 ±2.71 ^{efghijklmnop}	1.44 ±0.03 ^{klmnopqrstuvwxy}	elliptic	dark green
A27	14.02 ±1.62 ^{efghijklmnopqrs}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	19.29 ±2.05 ^{hijklmnopqr}	1.62 ±0.07 ^{abcdefg}	elliptic	dark green
A28	13.30 ±1.38 ^{efghijklmnopqrstu}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	20.29 ±2.09 ^{efghijklmnopq}	1.59 ±0.02 ^{bcdefghijkl}	elliptic	dark green
A29	11.74 ±1.28 ^{lmnopqrstuv}	8.0 ±0.55 ^{efghij}	17.38 ±1.31 ^{ijklmnopqrstu}	1.58 ±0.04 ^{bcdefghijklm}	elliptic	dark green
A30	16.56 ±1.76 ^{cdefghi}	8.0 ±0.84 ^{efghij}	13.83 ±1.73 ^{rstu}	1.36 ±0.04 ^{stuvwxyza'b}	oval	dark green
A31	12.00 ±0.62 ^{ijklmnopqrstuv}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	15.76 ±1.20 ^{nopqrstu}	1.61 ±0.07 ^{abcdefghij}	elliptic	dark green
A32	10.42 ±1.63 ^{rstuv}	8.8 ±0.49 ^{bcdefgh}	17.10 ±1.93 ^{ijklmnopqrstu}	1.60 ±0.07 ^{bcdefghijkl}	elliptic	dark green
A33	10.62 ±0.48 ^{qrstuv}	8.0 ±0.00 ^{efghij}	13.74 ±1.01 ^{rstu}	1.59 ±0.04 ^{bcdefghijkl}	elliptic	green
A34	9.36 ±0.83 ^{uv}	7.0 ±0.63 ^{ijklm}	11.49 ±0.47 ^u	1.61 ±0.04 ^{bcdefghij}	elliptic	light green
A35	9.36 ±0.72 ^{uv}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	13.91 ±1.48 ^{rstu}	1.72 ±0.03 ^{ab}	elliptic	light green
A36	20.06 ±2.04 ^{abc}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	22.56 ±1.62 ^{defghijklmn}	1.50 ±0.03 ^{efghijklmnopqrst}	elliptic	dark green
A37	9.48 ±0.81 ^{tuv}	7.6 ±0.24 ^{ghijklm}	15.83 ±0.89 ^{nopqrstu}	1.32 ±0.07 ^{wxyza'b}	oval	dark green
A38	13.22 ±0.75 ^{efghijklmnopqrstu}	8.2 ±0.66 ^{defghij}	13.96 ±1.19 ^{pqrstu}	1.62 ±0.07 ^{bcdefgh}	elliptic	dark green
A39	16.16 ±0.74 ^{cdefghijkl}	10.2 ±0.20 ^{ab}	17.38 ±2.56 ^{ijklmnopqrstu}	1.49 ±0.04 ^{efghijklmnopqrstu}	elliptic	green
A40	13.58 ±2.81 ^{efghijklmnopqrstu}	7.6 ±0.68 ^{ghijklm}	25.12 ±4.48 ^{bcdefghi}	1.35 ±0.06 ^{tuvwxyza'b}	elliptic	dark green
A41	13.18 ±0.31 ^{efghijklmnopqrstu}	10.0 ±0.00 ^{abc}	14.07 ±0.51 ^{pqrstu}	1.44 ±0.04 ^{klmnopqrstuvwxy}	elliptic	dark green
A42	13.92 ±1.10 ^{efghijklmnopqrs}	8.2 ±0.66 ^{defghij}	17.72 ±1.66 ^{ijklmnopqrstu}	1.45 ±0.02 ^{klmnopqrstuvw}	oval	dark green
A43	15.34 ±1.49 ^{defghijklmn}	10.2 ±0.20 ^{ab}	22.85 ±2.04 ^{defghijklm}	1.72 ±0.08 ^{ab}	elliptic	dark green
A44	10.08 ±0.48 ^{tuv}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	15.36 ±0.78 ^{opqrstu}	1.41 ±0.02 ^{opqrstuvwxy}	elliptic	green
A45	11.94 ±1.36 ^{klmnopqrstuv}	8.6 ±0.60 ^{bcdefghi}	16.10 ±1.11 ^{mnopqrstu}	1.49 ±0.04 ^{efghijklmnopqrstu}	elliptic	dark green
A46	12.34 ±1.28 ^{ijklmnopqrstuv}	8.6 ±0.60 ^{bcdefghi}	15.77 ±1.93 ^{nopqrstu}	1.45 ±0.02 ^{klmnopqrstuvw}	oval	dark green
A47	11.56 ±1.33 ^{mnopqrstuv}	8.2 ±0.37 ^{defghij}	18.49 ±2.05 ^{ijklmnopqrstu}	1.25 ±0.02 ^{ab'}	oval	light green
A48	12.06 ±0.70 ^{ijklmnopqrstu}	8.6 ±0.40 ^{bcdefghi}	15.85 ±1.61 ^{nopqrstu}	1.46 ±0.05 ^{ijklmnopqrstuvw}	elliptic	dark green
A49	12.10 ±0.24 ^{ijklmnopqrstu}	7.2 ±0.49 ^{hijklm}	26.95 ±1.52 ^{bcdefg}	1.43 ±0.03 ^{mnopqrstuvwxy}	oval	green
A50	16.86 ±0.85 ^{cdefg}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	20.82 ±0.99 ^{efghijklmnop}	1.40 ±0.02 ^{pqrstuvwxy}	oval	light green
A51	15.58 ±0.65 ^{defghijklm}	10.0 ±0.63 ^{abc}	18.71 ±1.18 ^{ijklmnopqrstu}	1.52 ±0.03 ^{defghijklmnopqr}	elliptic	dark green
A52	9.10 ±0.51 ^v	6.2 ±0.20 ^{lm}	17.50 ±2.52 ^{ijklmnopqrstu}	1.55 ±0.06 ^{defghijklmnopq}	oval	dark green
A53	11.38 ±0.56 ^{mnopqrstuv}	7.6 ±0.24 ^{ghijklm}	19.83 ±0.93 ^{hijklmnopq}	1.29 ±0.03 ^{zyza'b}	elliptic	dark green
A54	11.24 ±1.09 ^{mnopqrstuv}	7.2 ±0.49 ^{hijklm}	18.60 ±1.52 ^{hijklmnopqrstu}	1.66 ±0.04 ^{abcde}	elliptic	dark green
A55	16.28 ±0.58 ^{cdefghij}	10.0 ±0.32 ^{abc}	15.33 ±0.54 ^{opqrstu}	1.72 ±0.04 ^{ab}	oval	green
A56	18.96 ±0.66 ^{abcd}	9.4 ±0.40 ^{bodef}	25.02 ±1.99 ^{bcdefghi}	1.39 ±0.04 ^{qrstuvwxyza'}	elliptic	green
A57	10.62 ±0.36 ^{pqrstuv}	8.0 ±0.00 ^{efghij}	11.91 ±1.17 ^{tu}	1.62 ±0.04 ^{bcdefghi}	elliptic	green
A58	9.04 ±0.42 ^v	6.0 ±0.00 ^m	15.21 ±1.15 ^{opqrstu}	1.61 ±0.02 ^{bcdefghi}	elliptic	green
A59	13.88 ±0.85 ^{efghijklmnopqrs}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	16.72 ±1.88 ^{klmnopqrstu}	1.54 ±0.03 ^{defghijklmnopq}	elliptic	green
A60	17.00 ±1.25 ^{cdefg}	8.4 ±0.24 ^{cdefghij}	20.27 ±0.99 ^{ghijklmnopq}	1.43 ±0.04 ^{mnopqrstuvwxy}	lobed	dark green
A61	14.16 ±0.48 ^{efghijklmnopqrs}	8.0 ±0.32 ^{efghij}	17.41 ±0.88 ^{ijklmnopqrstu}	1.23 ±0.04 ^{b'}	oval	dark green
A62	13.70 ±1.41 ^{efghijklmnopqrstu}	9.6 ±0.40 ^{abcde}	16.60 ±1.14 ^{lmnopqrstu}	1.73 ±0.08 ^a	elliptic	green
A63	10.96 ±1.07 ^{opqrstu}	8.2 ±0.49 ^{defghij}	19.70 ±2.76 ^{hijklmnopqr}	1.54 ±0.04 ^{defghijklmnopq}	oval	light green
A64	11.00 ±0.71 ^{opqrstu}	7.6 ±0.40 ^{ghijklm}	15.44 ±0.90 ^{opqrstu}	1.57 ±0.04 ^{bcdefghijklm}	elliptic	green
A65	11.16 ±1.40 ^{mnopqrstuv}	6.4 ±0.51 ^{klm}	17.44 ±1.42 ^{ijklmnopqrstu}	1.46 ±0.05 ^{ijklmnopqrstuvw}	lobed	green
A66	15.92 ±1.62 ^{defghijkl}	9.0 ±0.45 ^{bcdefg}	20.61 ±3.42 ^{efghijklmnopq}	1.60 ±0.01 ^{bcdefghij}	oval	light green
Mini	9.04	6.0	11.49	1.23		
Max	22.16	11.2	33.93	1.73		
Mean	13.70	8.32	19.68	1.50		
CV%	21.85	13.74	24.41	8.41		

Acc: Accession. Means with different letters in the same column differ significantly ($p < 0.05$). * Significantly different at $P < 0.001$.

Supplementary table 2. Pod characteristics of 66 Algerian carob trees accessions.

Acc	Length (cm)*	Width (cm)*	Thickness (cm)*	Weight of pods (g)*	Weight of pulp (g)*	% of pulp*
A01	16.41 ±0.22 ^{efghij}	3.07 ±0.03 ^a	0.56 ±0.02 ^{stuvw}	25.10 ±0.61 ^b	22.76 ±0.59 ^b	90.59 ±0.39 ^{bcde}
A02	15.39 ±0.27 ^{klmn}	2.61 ±0.05 ^{cd}	0.47 ±0.02 ^{c'd'e'f}	16.43 ±0.67 ^{lmnop}	14.72 ±0.59 ^{ijkl}	89.74 ±0.67 ^{bcdefg}
A03	16.51 ±0.35 ^{ghij}	2.83 ±0.06 ^b	0.51 ±0.02 ^{wxyza'b'c'}	21.55 ±1.06 ^{de}	19.70 ±0.98 ^{cd}	91.46 ±0.63 ^{abc}
A04	18.04 ±0.26 ^{bcd}	2.47 ±0.02 ^{ef}	0.77 ±0.02 ^{hij}	23.13 ±0.62 ^{cd}	20.49 ±0.54 ^c	88.67 ±0.39 ^{bcdefghij}
A05	16.63 ±0.28 ^{efghi}	1.74 ±0.02 ^{yzza'}	0.57 ±0.01 ^{stuvw}	10.87 ±0.37 ^{yzb'c'}	8.51 ±0.34 ^{yz}	78.00 ±1.15 ^{yzza'}
A06	12.85 ±0.18 ^{tuv}	1.74 ±0.03 ^{yzza'}	0.87 ±0.02 ^{cdef}	15.03 ±0.44 ^{qrst}	13.09 ±0.40 ^{mnpq}	87.00 ±0.63 ^{ghijklmnop}
A07	14.87 ±0.27 ^{mnpq}	2.08 ±0.02 ^{nop}	0.78 ±0.01 ^{ghij}	14.73 ±0.43 ^{qrst}	12.47 ±0.34 ^{mnpqr}	84.85 ±0.95 ^{nopqrstuv}
A08	14.44 ±0.21 ^{nopqr}	1.92 ±0.03 ^{tuv}	0.89 ±0.02 ^{cd}	19.30 ±0.58 ^{efghi}	17.17 ±0.53 ^{efgh}	88.92 ±0.67 ^{bcdefghi}
A09	12.14 ±0.18 ^{vwxy}	1.75 ±0.02 ^{yzza'}	0.87 ±0.02 ^{cdef}	13.80 ±0.46 ^{rstv}	12.04 ±0.36 ^{mnpqrs}	87.28 ±0.94 ^{efghijklmno}
A10	13.59 ±0.25 ^{rst}	1.76 ±0.02 ^{xyza'}	0.50 ±0.02 ^{xyza'b'c'}	7.83 ±0.25 ^{e'}	5.87 ±0.26 ^{b'c'd'}	74.19 ±1.55 ^{b'c'}
A11	18.42 ±0.21 ^{bc}	2.67 ±0.03 ^c	0.84 ±0.02 ^{ef}	27.40 ±0.55 ^a	24.73 ±0.51 ^a	90.22 ±0.30 ^{bcdef}
A12	15.50 ±0.18 ^{ijklm}	2.37 ±0.03 ^{efghij}	0.82 ±0.02 ^{efg}	19.77 ±0.40 ^{efgh}	17.63 ±0.37 ^{fg}	89.20 ±0.60 ^{bcdefghi}
A13	13.46 ±0.31 ^{stu}	2.45 ±0.06 ^{ef}	0.73 ±0.02 ^{jk}	17.93 ±0.80 ^{ijkl}	15.96 ±0.71 ^{hijk}	89.11 ±0.77 ^{bcdefghi}
A14	13.43 ±0.26 ^{stu}	2.34 ±0.04 ^{ghij}	0.79 ±0.03 ^{ghi}	15.40 ±0.71 ^{nopqr}	13.60 ±0.65 ^{lmn}	88.06 ±0.98 ^{efghijklm}
A15	14.26 ±0.22 ^{opqrs}	2.08 ±0.02 ^{nop}	0.60 ±0.02 ^{pqrstu}	12.43 ±0.48 ^{xy}	10.23 ±0.38 ^{vwxy}	82.52 ±0.75 ^{stuvwxy}
A16	13.91 ±0.22 ^{qrs}	2.37 ±0.03 ^{efgh}	0.80 ±0.01 ^{ghi}	17.27 ±0.38 ^{ijklm}	14.90 ±0.34 ^{ijkl}	86.28 ±0.39 ^{ijklmnopq}
A17	14.14 ±0.23 ^{pqrst}	2.39 ±0.03 ^{fg}	0.75 ±0.01 ^{ijk}	16.77 ±0.49 ^{klmno}	14.69 ±0.42 ^{ijkl}	87.78 ±0.79 ^{efghijklm}
A18	11.34 ±0.19 ^{yz}	1.74 ±0.04 ^{yzza'}	0.44 ±0.01 ^{d'e'f'g'h'}	5.80 ±1.04 ^{f'}	4.17 ±0.19 ^{e'}	71.37 ±1.59 ^{d'}
A19	16.56 ±0.25 ^{ghi}	1.95 ±0.03 ^{rstuv}	0.55 ±0.01 ^{vwxyzza'}	13.20 ±0.31 ^{tuwx}	10.61 ±0.27 ^{stuvw}	80.39 ±0.68 ^{yzza'}
A20	15.19 ±0.41 ^{lmno}	2.02 ±0.05 ^{opqrst}	0.92 ±0.02 ^{abc}	17.03 ±0.88 ^{ijklmno}	15.20 ±0.83 ^{ijkl}	89.14 ±0.83 ^{bcdefghi}
A21	16.86 ±0.37 ^{efghi}	2.19 ±0.04 ^{kl}	0.86 ±0.02 ^{def}	20.00 ±0.88 ^{efg}	17.67 ±0.87 ^{efg}	87.84 ±0.85 ^{efghijklm}
A22	17.88 ±0.38 ^{bcde}	2.42 ±0.03 ^{fg}	0.80 ±0.03 ^{efh}	23.07 ±1.04 ^{cd}	20.47 ±0.94 ^e	88.79 ±0.58 ^{bcdefghi}
A23	15.39 ±0.31 ^{klmn}	1.98 ±0.02 ^{qrst}	0.63 ±0.02 ^{nopqr}	13.60 ±0.54 ^{stvw}	11.46 ±0.51 ^{qrstu}	83.98 ±1.05 ^{pqrstuvw}
A24	14.94 ±0.26 ^{mnpq}	2.64 ±0.03 ^c	0.64 ±0.01 ^{mnpopqr}	20.10 ±0.53 ^{ef}	18.46 ±0.52 ^{def}	91.69 ±0.18 ^{ab}
A25	18.34 ±0.36 ^{bc}	2.70 ±0.06 ^c	0.91 ±0.02 ^{bcd}	26.67 ±1.20 ^a	25.03 ±1.17 ^a	93.66 ±0.54 ^a
A26	16.99 ±0.37 ^{efgh}	2.27 ±0.04 ^{hijk}	0.84 ±0.02 ^{efg}	24.03 ±0.86 ^{bc}	22.56 ±0.82 ^b	93.80 ±0.24 ^a
A27	15.49 ±0.21 ^{ijklm}	2.39 ±0.02 ^{fg}	0.63 ±0.01 ^{nopqr}	18.20 ±0.44 ^{hijkl}	16.09 ±0.39 ^{hij}	88.43 ±0.39 ^{efghijkl}
A28	16.03 ±0.24 ^{ijkl}	2.55 ±0.02 ^{de}	0.63 ±0.02 ^{opqr}	19.87 ±0.55 ^{efgh}	17.69 ±0.49 ^{efg}	89.13 ±0.47 ^{bcdefghi}
A29	14.14 ±0.28 ^{pqrst}	2.19 ±0.02 ^{kl}	0.59 ±0.01 ^{qrstuv}	12.70 ±0.32 ^{tuwxy}	10.56 ±0.27 ^{stuvw}	83.13 ±0.49 ^{stuvwxy}
A30	14.91 ±0.23 ^{mnpq}	1.73 ±0.02 ^{yzza'}	0.49 ±0.01 ^{c'd'e'}	8.63 ±0.23 ^{d'e'}	6.63 ±0.21 ^{a'b'}	76.85 ±1.31 ^{za'}
A31	15.94 ±0.29 ^{ijkl}	2.41 ±0.02 ^{fg}	0.60 ±0.01 ^{pqrstuv}	17.37 ±0.46 ^{ijklm}	15.21 ±0.39 ^{ijk}	87.72 ±0.43 ^{efghijklm}
A32	12.89 ±0.31 ^{tuv}	2.18 ±0.03 ^{klmn}	0.49 ±0.01 ^{ya'b'c'}	9.70 ±0.39 ^{c'd'}	8.40 ±0.34 ^{yz}	86.63 ±0.72 ^{ghijklmnopq}
A33	11.64 ±0.30 ^{xyz}	1.86 ±0.03 ^{vwxy}	0.61 ±0.01 ^{pqrst}	9.67 ±0.40 ^{c'd'}	7.76 ±0.31 ^{yzza'}	80.75 ±1.02 ^{yz}
A34	11.20 ±0.30 ^z	2.00 ±0.04 ^{pqrst}	0.57 ±0.02 ^{stuvw}	9.60 ±0.37 ^{c'd'}	8.57 ±0.31 ^{yz}	89.45 ±0.48 ^{bcdefgh}
A35	12.56 ±0.26 ^{vwxy}	2.18 ±0.03 ^{klm}	0.55 ±0.01 ^{tuwvxy}	11.23 ±0.33 ^{xyzb'c'}	9.35 ±0.24 ^{vwxy}	83.82 ±1.29 ^{pqrstuvw}
A36	15.12 ±0.35 ^{lmno}	1.98 ±0.05 ^{pqrst}	0.50 ±0.02 ^{yzza'b'c'}	12.93 ±0.55 ^{tuwxy}	10.89 ±0.47 ^{stuv}	84.20 ±0.60 ^{pqrstuvw}
A37	14.67 ±0.25 ^{mnpq}	1.80 ±0.02 ^{wxyz}	0.62 ±0.01 ^{pqrst}	13.23 ±0.41 ^{tuwxy}	10.84 ±0.34 ^{stuv}	82.03 ±0.95 ^{stuvwxy}
A38	17.94 ±0.43 ^{bcd}	1.93 ±0.02 ^{stuv}	0.43 ±0.01 ^{e'f'g'h'}	13.90 ±0.55 ^{qrst}	11.98 ±0.45 ^{opqrst}	86.50 ±0.69 ^{hijklmnopq}
A39	12.71 ±0.31 ^{tuv}	1.80 ±0.03 ^{wxyz}	0.57 ±0.01 ^{stuvw}	10.03 ±0.46 ^{a'c'd'}	8.40 ±0.33 ^{yz}	83.24 ±1.09 ^{stuvwxy}
A40	14.51 ±0.22 ^{nopqr}	1.95 ±0.02 ^{rstuv}	0.48 ±0.01 ^{c'd'e'f}	11.17 ±0.35 ^{yzb'c'}	9.13 ±0.27 ^{wxy}	82.07 ±0.98 ^{stuvwxy}
A41	15.29 ±0.29 ^{lmn}	2.03 ±0.02 ^{opqrs}	0.50 ±0.02 ^{xyza'b'c'}	12.70 ±0.53 ^{tuwxy}	10.37 ±0.46 ^{vwxy}	81.38 ±0.69 ^{wxyz}
A42	16.30 ±0.27 ^{hijk}	2.11 ±0.02 ^{lmno}	0.59 ±0.02 ^{pqrstuv}	15.07 ±0.42 ^{nopqrs}	12.86 ±0.42 ^{mnpq}	85.08 ±0.66 ^{mnpqrstuv}
A43	18.38 ±0.40 ^{bc}	2.37 ±0.03 ^{efghi}	0.95 ±0.02 ^{ab}	24.67 ±0.66 ^{bc}	21.96 ±0.63 ^b	88.88 ±0.31 ^{bcdefghi}
A44	11.75 ±0.23 ^{wxyz}	1.54 ±0.04 ^{b'}	0.45 ±0.01 ^{c'd'e'f'g'}	6.17 ±0.20 ^{e'f'}	4.60 ±0.20 ^{a'd'e'}	74.35 ±1.60 ^{b'c'}
A45	17.50 ±0.37 ^{cdef}	2.45 ±0.03 ^{ef}	0.71 ±0.02 ^k	21.48 ±0.87 ^{de}	19.28 ±0.77 ^{dde}	89.88 ±0.74 ^{bcdefg}
A46	16.32 ±0.29 ^{hijk}	2.44 ±0.03 ^{efgh}	0.76 ±0.02 ^{ij}	20.30 ±0.44 ^{ef}	18.06 ±0.42 ^{def}	88.86 ±0.43 ^{bcdefghi}
A47	12.21 ±0.19 ^{vwxy}	1.88 ±0.02 ^{uvw}	0.97 ±0.02 ^a	17.27 ±0.48 ^{ijklmno}	15.77 ±0.45 ^{hijk}	91.31 ±0.46 ^{abcd}
A48	17.52 ±0.34 ^{cdef}	2.44 ±0.02 ^{fg}	0.69 ±0.02 ^{kl}	20.33 ±0.62 ^{ef}	18.03 ±0.52 ^{def}	88.81 ±0.48 ^{bcdefghi}
A49	12.04 ±0.15 ^{vwxyz}	1.76 ±0.02 ^{xyza'}	0.97 ±0.02 ^a	16.10 ±0.36 ^{mnpopq}	14.41 ±0.30 ^{klm}	89.64 ±0.60 ^{bcdefgh}
A50	18.65 ±0.31 ^{ab}	2.47 ±0.02 ^{ef}	0.55 ±0.02 ^{tuwvxyz}	17.93 ±0.55 ^{ijkl}	15.82 ±0.49 ^{hijk}	88.26 ±0.56 ^{efghijkl}
A51	14.83 ±0.22 ^{mnpq}	2.37 ±0.03 ^{fg}	0.88 ±0.02 ^{ode}	18.67 ±0.49 ^{efghij}	16.43 ±0.44 ^{ghi}	88.11 ±0.72 ^{efghijklm}
A52	15.58 ±0.30 ^{ijklm}	1.77 ±0.03 ^{xyz}	0.34 ±0.02 ^{jk'}	9.03 ±0.38 ^{d'e'}	7.17 ±0.30 ^{za'ab'}	79.68 ±1.17 ^{yzza'}
A53	15.25 ±0.22 ^{lmn}	1.74 ±0.03 ^{yzza'}	0.39 ±0.02 ^{h'i'}	10.00 ±0.32 ^{c'd'}	8.17 ±0.29 ^{yz}	81.55 ±1.23 ^{wxyz}
A54	15.94 ±0.24 ^{ijkl}	1.99 ±0.05 ^{pqrst}	0.55 ±0.03 ^{tuwvxy}	13.50 ±0.48 ^{stvwxy}	11.49 ±0.49 ^{pqrst}	84.62 ±0.93 ^{opqrstuv}
A55	16.01 ±0.21 ^{ijkl}	2.44 ±0.04 ^{fg}	0.66 ±0.01 ^{klm}	18.33 ±0.50 ^{hijkl}	16.23 ±0.49 ^{hij}	88.42 ±0.68 ^{bcdefghijk}
A56	14.63 ±0.27 ^{mnpq}	1.71 ±0.04 ^{za'}	0.38 ±0.02 ^{ij'}	7.73 ±0.47 ^{e'}	5.98 ±0.43 ^{b'c'}	75.91 ±1.69 ^{a'b'}
A57	12.55 ±0.22 ^{vwxy}	1.57 ±0.02 ^{b'}	0.47 ±0.01 ^{c'd'e'f}	6.03 ±0.16 ^{f'}	4.34 ±0.17 ^{d'e'}	71.47 ±1.57 ^{d'}
A58	12.10 ±0.22 ^{vwxyz}	1.66 ±0.02 ^{a'}	0.39 ±0.01 ^{h'i'}	6.63 ±0.32 ^{e'f'}	4.84 ±0.29 ^{c'd'e'}	72.30 ±1.66 ^{c'd'}
A59	16.10 ±0.26 ^{hijkl}	2.43 ±0.03 ^{fg}	0.65 ±0.02 ^{lmnopq}	20.32 ±0.60 ^{ef}	17.79 ±0.54 ^{efg}	87.53 ±0.52 ^{efghijklmno}
A60	19.36 ±0.35 ^a	2.06 ±0.03 ^{opqr}	0.40 ±0.02 ^{g'h'i'}	13.61 ±0.44 ^{pqrst}	11.61 ±0.45 ^{pqrst}	85.10 ±0.92 ^{lmnopqrstu}
A61	14.27 ±0.13 ^{opqrs}	1.71 ±0.02 ^{za'}	0.29 ±0.02 ^{k'}	5.97 ±0.15 ^{f'}	4.80 ±0.16 ^{c'd'e'}	80.50 ±1.74 ^{xyz}
A62	17.35 ±0.38 ^{defg}	2.12 ±0.04 ^{lmno}	0.48 ±0.02 ^{c'd'e'f}	15.75 ±0.81 ^{mnpopqr}	13.50 ±0.76 ^{lmno}	85.35 ±0.95 ^{klmnopqrst}
A63	14.47 ±0.69 ^{nopqr}	2.08 ±0.04 ^{mnpopq}	0.42 ±0.01 ^{f'g'h'i'}	10.19 ±0.73 ^{za'c'd'}	8.34 ±0.57 ^{yz}	82.96 ±1.07 ^{stuvwxy}
A64	14.05 ±0.34 ^{pqrst}	1.97 ±0.03 ^{qrstu}	0.54 ±0.01 ^{vwxyzza'b'}	12.64 ±0.55 ^{uxy}	10.80 ±0.47 ^{stuv}	85.60 ±0.80 ^{ijklmnopqr}
A65	12.63 ±0.34 ^{uvw}	1.96 ±0.03 ^{rstuv}	0.49 ±0.01 ^{b'c'd'}	10.83 ±0.43 ^{za'c'}	8.92 ±0.35 ^{xy}	82.66 ±1.09 ^{stuvwxy}
A66	14.89 ±0.62 ^{mnpopq}	1.85 ±0.05 ^{vwxyz}	0.58 ±0.03 ^{rstuvw}	13.60 ±1.21 ^{stvwxy}	11.60 ±1.02 ^{opqrst}	85.43 ±0.70 ^{ijklmnopqrs}

Acc: Accession. Means with different letters in the same column differ significantly ($p < 0.05$). * Significantly different at $P < 0.001$.

Supplementary table 3. Seed characteristics of 66 Algerian carob trees accessions.

Acc	Length (cm)*	Width (cm)*	Thickness (cm)*	Weight of seeds*	Number of seeds*	% of seeds*
A01	0.92 ±0.01 ^{lmnopq}	0.81 ±0.00 ^a	0.44 ±0.00 ^{efg}	2.34 ±0.09 ^{abcdeh}	10.40 ±0.23 ^{rstuvw}	9.41 ±0.39 ^{xyza'}
A02	0.87 ±0.01 ^{xyza'b'c'd'}	0.74 ±0.00 ^{dhhijkl}	0.41 ±0.00 ^{klmnopq}	1.71 ±0.13 ^{qrstuvwxy}	9.60 ±0.35 ^{vwxzya'b'c'd'}	10.26 ±0.67 ^{vwxzya'}
A03	0.90 ±0.01 ^{qrstuvw}	0.77 ±0.01 ^{bcd}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrst}	1.85 ±0.15 ^{ijklmnopqrstuvw}	9.55 ±0.48 ^{wxyza'b'c'd'}	8.54 ±0.63 ^{zya'b'}
A04	1.09 ±0.01 ^{ab}	0.75 ±0.01 ^{cdefghij}	0.41 ±0.00 ^{ijklmn}	2.64 ±0.12 ^{abc}	12.20 ±0.29 ^{cdefg}	11.33 ±0.39 ^{rstuvwxyza'}
A05	0.94 ±0.01 ^{klmn}	0.72 ±0.00 ^{mnopqr}	0.47 ±0.00 ^b	2.36 ±0.11 ^{abcdeh}	12.20 ±0.35 ^{cdefg}	22.00 ±1.15 ^{de}
A06	0.89 ±0.01 ^{stuvwxy}	0.61 ±0.01 ^{l'm}	0.41 ±0.01 ^{klmnopqrstuv}	1.95 ±0.11 ^{ghijklmnopqrstuv}	12.83 ±0.35 ^{abcd}	13.00 ±0.63 ^{lmnopqrstuv}
A07	1.07 ±0.01 ^b	0.70 ±0.00 ^{uvwxyza'}	0.39 ±0.00 ^{wxyz}	2.27 ±0.16 ^{bcdefghijk}	11.17 ±0.39 ^{ghijklmnopqrstu}	15.15 ±0.95 ^{ijklmn}
A08	0.86 ±0.01 ^{c'd'e'}	0.59 ±0.01 ^{n'}	0.36 ±0.01 ^{b'c'd'e'}	2.13 ±0.14 ^{efghijklmnopq}	13.50 ±0.46 ^{ab}	11.08 ±0.67 ^{rstuvwxyza'}
A09	0.90 ±0.00 ^{stuvw}	0.62 ±0.00 ^{ij'k'}	0.42 ±0.00 ^{ijkl}	1.76 ±0.14 ^{pqrstuvw}	11.43 ±0.39 ^{defghijklmnopqrs}	12.72 ±0.94 ^{mnopqrstuvw}
A10	0.86 ±0.01 ^{c'd'e'f}	0.68 ±0.01 ^{b'c'd'e'f}	0.41 ±0.00 ^{ijklmnop}	1.97 ±0.11 ^{ghijklmnopqrstuv}	11.83 ±0.40 ^{defghijklmno}	25.81 ±1.55 ^{bc}
A11	0.95 ±0.01 ^{kl}	0.77 ±0.01 ^{bcde}	0.41 ±0.00 ^{ijklmnopq}	2.67 ±0.08 ^{ab}	13.43 ±0.26 ^{abc}	9.78 ±0.30 ^{wxyza'}
A12	0.92 ±0.01 ^{mnopqrs}	0.71 ±0.01 ^{opqrstuvw}	0.40 ±0.00 ^{mnopqrstuvw}	2.14 ±0.12 ^{efghijklmnopq}	12.40 ±0.32 ^{bcde}	10.80 ±0.60 ^{rstuvwxyza'}
A13	0.84 ±0.01 ^{e'f'g'}	0.67 ±0.01 ^{e'f'g'}	0.46 ±0.01 ^{cd}	1.97 ±0.17 ^{ghijklmnopqrstuv}	11.79 ±0.66 ^{defghijklmnop}	10.89 ±0.77 ^{rstuvwxyza'}
A14	0.87 ±0.01 ^{ya'b'c'd'}	0.72 ±0.01 ^{mnopqr}	0.38 ±0.01 ^{yz'a'}	1.80 ±0.14 ^{lmnopqrstuvw}	9.50 ±0.41 ^{xyza'b'c'd'}	11.94 ±0.98 ^{opqrstuvwxy}
A15	0.91 ±0.01 ^{opqrst}	0.69 ±0.01 ^{zya'b'c'd'e'}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrs}	2.20 ±0.14 ^{defghijklmno}	10.43 ±0.42 ^{qrstuvw}	17.48 ±0.75 ^{ghij}
A16	0.93 ±0.01 ^{lmnop}	0.69 ±0.01 ^{wxyza'b'c'd'}	0.43 ±0.00 ^{fgh}	2.36 ±0.08 ^{abcdeh}	12.40 ±0.28 ^{bcde}	13.72 ±0.39 ^{klmnopqrst}
A17	0.94 ±0.01 ^{klmno}	0.75 ±0.00 ^{d'f'g'h'j'k'}	0.47 ±0.00 ^{bc}	2.08 ±0.15 ^{ghijklmnopqr}	10.00 ±0.44 ^{tuvwxyzb'c'd'}	12.22 ±0.79 ^{opqrstuvwxy}
A18	0.91 ±0.01 ^{pqrst}	0.71 ±0.01 ^{opqrstuv}	0.50 ±0.00 ^a	1.63 ±0.09 ^{stuvwxy}	8.47 ±0.27 ^{b'd'}	28.63 ±1.59 ^a
A19	0.96 ±0.00 ^{ij}	0.69 ±0.00 ^{za'b'c'd'e'}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqr}	2.59 ±0.10 ^{abcd}	13.97 ±0.45 ^a	19.61 ±0.68 ^{efg}
A20	1.02 ±0.01 ^{ef}	0.67 ±0.01 ^{c'd'e'f'g'}	0.39 ±0.00 ^{wxyza'}	1.83 ±0.16 ^{klmnopqrstuvw}	9.77 ±0.56 ^{uvwxyza'b'c'd'}	10.86 ±0.83 ^{rstuvwxyza'}
A21	1.05 ±0.01 ^c	0.71 ±0.01 ^{opqrst}	0.40 ±0.00 ^{qrstuvwxy}	2.33 ±0.14 ^{abcdeh}	11.43 ±0.44 ^{defghijklmnopqrs}	12.16 ±0.85 ^{nopqrstuvwxy}
A22	0.99 ±0.01 ^{egh}	0.70 ±0.01 ^{uvwxyza'}	0.37 ±0.01 ^{za'b'c'}	2.59 ±0.17 ^{abcd}	11.70 ±0.42 ^{defghijklmno}	11.21 ±0.58 ^{rstuvwxyza'}
A23	0.95 ±0.01 ^{ijkl}	0.69 ±0.00 ^{wxyza'b'c'}	0.36 ±0.00 ^{d'e'}	2.14 ±0.11 ^{efghijklmnopq}	10.77 ±0.43 ^{lmnopqrstuvw}	16.02 ±1.05 ^{hijkl}
A24	0.81 ±0.01 ^{h'}	0.70 ±0.01 ^{tuvwxyz}	0.31 ±0.00 ^f	1.64 ±0.02 ^{stuvwxy}	8.80 ±0.22 ^{zya'b'c'd'}	8.31 ±0.18 ^{a'b'}
A25	0.97 ±0.01 ^{ij}	0.73 ±0.01 ^{lmnopq}	0.23 ±0.01 ^{h'}	1.63 ±0.13 ^{stuvwxy}	9.83 ±0.43 ^{tuvwxyzb'c'd'}	6.34 ±0.54 ^{b'}
A26	0.99 ±0.01 ^{gh}	0.74 ±0.01 ^{d'hijkl}	0.25 ±0.01 ^{g'}	1.48 ±0.07 ^{wxyz}	8.77 ±0.31 ^{z'b'c'd'}	6.20 ±0.24 ^{b'}
A27	0.90 ±0.01 ^{qrstuv}	0.78 ±0.00 ^b	0.39 ±0.00 ^{t'vwxyz}	2.11 ±0.09 ^{efghijklmnopqr}	11.67 ±0.27 ^{defghijklmnopq}	11.57 ±0.39 ^{rstuvwxyzy}
A28	0.92 ±0.01 ^{mnopqr}	0.78 ±0.00 ^b	0.38 ±0.00 ^{yz'a'}	2.17 ±0.12 ^{defghijklmnop}	11.87 ±0.30 ^{defghijklmn}	10.87 ±0.47 ^{rstuvwxyza'}
A29	0.96 ±0.01 ^{ijk}	0.74 ±0.00 ^{ijklmn}	0.39 ±0.00 ^{wxyza'}	2.14 ±0.09 ^{efghijklmnopq}	12.07 ±0.33 ^{defghijk}	16.87 ±0.49 ^{ghij}
A30	0.88 ±0.01 ^{wxyza'b'c'd'}	0.68 ±0.00 ^{b'c'd'e'f'}	0.41 ±0.00 ^{ijklmnop}	2.00 ±0.12 ^{ghijklmnopqrst}	12.07 ±0.27 ^{defghijkl}	23.15 ±1.31 ^{cd}
A31	0.91 ±0.00 ^{pqrst}	0.76 ±0.00 ^{bcdefgh}	0.39 ±0.00 ^{rstuvwxy}	2.15 ±0.10 ^{efghijklmnop}	12.33 ±0.32 ^{bcdef}	12.28 ±0.43 ^{nopqrstuvwxy}
A32	0.84 ±0.01 ^{f'g'}	0.64 ±0.01 ^{i'}	0.38 ±0.00 ^{yz'a'}	1.30 ±0.09 ^{yz'a'}	9.00 ±0.34 ^{zya'b'c'd'}	13.37 ±0.72 ^{klmnopqrstuv}
A33	0.82 ±0.01 ^{g'h'}	0.69 ±0.01 ^{zya'b'c'd'}	0.47 ±0.00 ^{bc}	1.90 ±0.14 ^{ijklmnopqrstuvw}	11.33 ±0.45 ^{efghijklmnopqrst}	19.25 ±1.02 ^{efg}
A34	0.82 ±0.01 ^{g'h'}	0.67 ±0.01 ^{c'd'e'f'g'}	0.40 ±0.00 ^{mnopqrstuvw}	1.03 ±0.08 ^{a'}	6.43 ±0.42 ^{e'}	10.55 ±0.48 ^{uvwxyza'}
A35	0.86 ±0.00 ^{d'e'f'}	0.68 ±0.00 ^{za'b'c'd'e'f'}	0.42 ±0.00 ^{h'j'k'}	1.88 ±0.17 ^{klmnopqrstuvw}	10.93 ±0.37 ^{ghijklmnopqrstuv}	16.18 ±1.29 ^{hijk}
A36	0.90 ±0.01 ^{rstuvw}	0.67 ±0.01 ^{f'g'}	0.41 ±0.00 ^{ijklmnop}	2.05 ±0.14 ^{efghijklmnopqrs}	11.27 ±0.45 ^{efghijklmnopqrstuv}	15.80 ±0.60 ^{hijkl}
A37	0.88 ±0.01 ^{uvwxyza'b'c'}	0.66 ±0.01 ^{h'}	0.36 ±0.01 ^{d'e'}	2.39 ±0.15 ^{abcdeh}	11.27 ±0.29 ^{efghijklmnopqrstuv}	17.97 ±0.95 ^{ghij}
A38	1.01 ±0.00 ^{efg}	0.74 ±0.00 ^{f'ij'k'l'm}	0.39 ±0.00 ^{stuvwxyz}	1.92 ±0.14 ^{hijklmnopqrstuvw}	10.60 ±0.43 ^{nopqrstuvw}	13.50 ±0.69 ^{klmnopqrstuv}
A39	0.93 ±0.01 ^{klmno}	0.71 ±0.01 ^{opqrstuv}	0.43 ±0.00 ^{ghij}	1.63 ±0.11 ^{stuvwxy}	9.73 ±0.36 ^{tuvwxyzb'c'd'}	16.76 ±1.09 ^{ghij}
A40	1.01 ±0.00 ^{efg}	0.71 ±0.00 ^{rstuvwxy}	0.40 ±0.00 ^{lmnopqrstuv}	2.03 ±0.14 ^{ghijklmnopqrs}	10.90 ±0.33 ^{hijklmnopqrstuv}	17.93 ±0.98 ^{ghij}
A41	1.01 ±0.01 ^{efg}	0.72 ±0.00 ^{mnopqr}	0.39 ±0.00 ^{twxyz}	2.33 ±0.10 ^{abcdeh}	12.20 ±0.32 ^{cdefgh}	18.62 ±0.69 ^{fgh}
A42	1.04 ±0.01 ^{cd}	0.76 ±0.00 ^{cdefghij}	0.40 ±0.00 ^{mnopqrstuvw}	2.21 ±0.09 ^{defghijklmno}	10.67 ±0.25 ^{lmnopqrstuvw}	14.92 ±0.66 ^{ijklmno}
A43	1.09 ±0.01 ^{ab}	0.76 ±0.01 ^{bcdefgh}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrs}	2.71 ±0.07 ^a	12.13 ±0.36 ^{bcdefgh}	11.12 ±0.31 ^{rstuvwxyza'}
A44	0.87 ±0.01 ^{xyza'b'c'd'}	0.74 ±0.01 ^{ijklmn}	0.47 ±0.01 ^b	1.57 ±0.10 ^{tuvwxy}	8.77 ±0.31 ^{b'c'd'}	25.65 ±1.60 ^{bc}
A45	1.10 ±0.01 ^a	0.76 ±0.01 ^{bcdefgh}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrstu}	2.20 ±0.17 ^{defghijklmnop}	10.26 ±0.43 ^{stuvwxy}	10.12 ±0.74 ^{vwxzya'}
A46	1.04 ±0.01 ^c	0.70 ±0.01 ^{uvwxyza'b'}	0.37 ±0.01 ^{a'b'c'd'e'}	2.25 ±0.09 ^{cdefghijklm}	10.57 ±0.30 ^{pqrstuv}	11.14 ±0.43 ^{rstuvwxyza'}
A47	0.91 ±0.01 ^{pqrst}	0.60 ±0.01 ^{m'n'}	0.48 ±0.01 ^b	1.50 ±0.09 ^{uvwxyz}	9.73 ±0.43 ^{wxyza'b'c'd'}	8.69 ±0.46 ^{za'b'}
A48	1.07 ±0.01 ^b	0.72 ±0.00 ^{mnopqrs}	0.40 ±0.00 ^{mnopqrstuvw}	2.31 ±0.13 ^{abcdeh}	12.00 ±0.40 ^{defghijklm}	11.19 ±0.48 ^{rstuvwxyza'}
A49	0.89 ±0.01 ^{tuvwxyz}	0.62 ±0.00 ^{j'k'l'}	0.50 ±0.00 ^a	1.69 ±0.11 ^{stuvwxy}	10.63 ±0.45 ^{mnopqrstuvw}	10.36 ±0.60 ^{uvwxyza'}
A50	1.02 ±0.01 ^{ef}	0.69 ±0.01 ^{zya'b'c'd'}	0.40 ±0.00 ^{qrstuvwxy}	2.12 ±0.13 ^{efghijklmnopqr}	11.70 ±0.46 ^{defghijklmnop}	11.74 ±0.56 ^{pqrstuvwxyzy}
A51	0.85 ±0.01 ^{d'e'f'}	0.66 ±0.01 ^{i'}	0.45 ±0.01 ^{de}	2.23 ±0.13 ^{cdefghijklmn}	12.43 ±0.41 ^{bcde}	11.89 ±0.72 ^{opqrstuvwxy}
A52	0.91 ±0.01 ^{pqrstuv}	0.71 ±0.01 ^{opqrstuvw}	0.42 ±0.00 ^{ijkl}	1.86 ±0.14 ^{klmnopqrstuvw}	10.77 ±0.47 ^{hklmnopqrstuv}	20.32 ±1.17 ^{ef}
A53	0.91 ±0.01 ^{opqrst}	0.69 ±0.01 ^{zya'b'c'd'}	0.41 ±0.00 ^{ijklm}	1.83 ±0.13 ^{klmnopqrstuvw}	11.57 ±0.34 ^{defghijklmnopqr}	18.45 ±1.23 ^{fgh}
A54	0.87 ±0.01 ^{b'c'd'}	0.68 ±0.01 ^{a'b'c'd'e'f'}	0.41 ±0.01 ^{lmnopqrstuv}	2.01 ±0.11 ^{ghijklmnopqrs}	12.27 ±0.32 ^{bcdefg}	15.38 ±0.93 ^{ijklm}
A55	0.86 ±0.01 ^{b'c'd'e'}	0.71 ±0.01 ^{pqrstuvwxy}	0.41 ±0.00 ^{ijklmno}	2.10 ±0.12 ^{efghijklmnopqr}	11.93 ±0.27 ^{defghijklm}	11.58 ±0.68 ^{qrstuvwxyzy}
A56	0.92 ±0.01 ^{lmnopq}	0.70 ±0.01 ^{stuvwxy}	0.44 ±0.00 ^{ef}	1.75 ±0.12 ^{pqrstuvwx}	10.70 ±0.39 ^{lmnopqrstuvw}	24.09 ±1.69 ^{cd}
A57	0.88 ±0.00 ^{uvwxyza'b'c'}	0.71 ±0.00 ^{rstuvwxy}	0.42 ±0.00 ^{ijkl}	1.69 ±0.08 ^{stuvwxy}	9.67 ±0.25 ^{vwxzya'b'c'd'}	28.53 ±1.57 ^a
A58	0.92 ±0.01 ^{mnopqr}	0.72 ±0.01 ^{nopqrst}	0.40 ±0.00 ^{lmnopqrstuv}	1.79 ±0.11 ^{lopqrstuvwx}	10.10 ±0.24 ^{pqrstuvwxy}	27.70 ±1.66 ^{ab}
A59	1.02 ±0.01 ^{de}	0.77 ±0.01 ^{bc}	0.44 ±0.01 ^{ef}	2.53 ±0.13 ^{abcde}	12.16 ±0.34 ^{bcdefghij}	12.47 ±0.52 ^{mnopqrstuvwxy}
A60	0.89 ±0.00 ^{stuvwxyza'}	0.71 ±0.00 ^{qrstuvwxy}	0.41 ±0.00 ^{klmnopqrs}	2.00 ±0.12 ^{ghijklmnopqrst}	12.74 ±0.38 ^{abcde}	14.90 ±0.92 ^{ijklmnop}
A61	0.82 ±0.00 ^{g'h'}	0.67 ±0.01 ^{g'h'}	0.37 ±0.00 ^{za'b'c'd'}	1.17 ±0.11 ^{za'}	9.37 ±0.37 ^{zya'b'c'd'}	19.49 ±1.74 ^{efg}
A62	0.98 ±0.01 ^{hi}	0.73 ±0.01 ^{klmnop}	0.44 ±0.01 ^{efg}	2.25 ±0.14 ^{bcdefghijkl}	11.38 ±0.41 ^{defghijklmnopqrs}	14.65 ±0.95 ^{ijklmnopq}
A63	0.94 ±0.01 ^{klm}	0.72 ±0.01 ^{mnopqrs}	0.44 ±0.00 ^{ef}	1.85 ±0.18 ^{klmnopqrstuvw}	10.04 ±0.73 ^{tuvwxyzb'c'}	17.04 ±1.07 ^{ghij}
A64	0.94 ±0.01 ^{klmno}	0.73 ±0.00 ^{klmno}	0.43 ±0.00 ^{fghi}	1.85 ±0.14 ^{klmnopqrstuvw}	10.07 ±0.37 ^{uvwxyzb'}	14.40 ±0.80 ^{ijklmnopqrs}
A65	0.91 ±0.01 ^{pqrst}	0.72 ±0.01 ^{mnopqr}	0.48 ±0.00 ^{ijkl}	1.91 ±0.15 ^{hijklmnopqrstuv}	10.63 ±0.39 ^{lmnopqrstuvw}	17.34 ±1.09 ^{ghij}
A66	0.91 ±0.01 ^{opqrstu}	0.76 ±0.01 ^{bcdef}	0.47 ±0.01 ^{bc}	2.00 ±0.21 ^{efghijklmnopqrstu}	10.00 ±0.69 ^{tuvwxyzb'c'd'}	14.57 ±0.70 ^{ijklmnopqr}

Acc: Accession. Means with different letters in the same column differ significantly ($p < 0.05$). * Significantly different at $P < 0.001$.