



DEMOCRATIC AND POPULAR ALGERIAN
REPUBLIC
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND
SCIENTIFIC RESEARCH



ZIANE ACHOUR UNIVERSITY OF DJELFA
FACULTY OF SCIENCE OF NATURE AND LIFE
DEPARTMENT OF AGRONOMIC AND VETERINARY SCIENCES

THESIS
FOR THE OBTAINING OF THE THIRD CYCLE DOCTORATE
(D-LMD) DEGREE IN AGRONOMIC SCIENCES

OPTION: FOREST ECOLOGY

By
KOCHERANE Rima

Theme

Morpho-ecological and phytochemical characterization of
carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria

Before the jury composed of:

Pr BELHADJ Safia
Pr DERRIDJ Arezki
Pr KROUCHI Fazia
Pr GUIT Brahim
Dr AIT SAID Samir
Dr HACHI Mohamed

Professor (UZAD)
Professor (UMMTO)
Professor (UMMTO)
Professor (UZAD)
MCA (UMMTO)
MCA ((UZAD)

President
Thesis director
Thesis co-director
Examiner
Examiner
Examiner

University year : 2020/2021



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة زيان عاشور-الجلفة
UNIVERSITE ZIANE ACHOUR – DJELFA
كلية علوم الطبيعة والحياة
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
قسم العلوم الفلاحية والبيطرية
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES ET VETERINAIRES

THESE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT DE TROISEME
CYCLE (D-LMD) EN SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : ECOLOGIE FORESTIERE

Par
KOCHERANE Rima

Thème

**Caractérisation morpho-écologique et phytochimique du
caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) en Algérie**

Devant le jury composé de :

Pr BELHADJ Safia
Pr DERRIDJ Arezki
Pr KROUCHI Fazia
Pr GUIT Brahim
Dr AIT SAID Samir
Dr HACHI Mohamed

Professeur (UZAD)
Professeur (UMMTO)
Professeur (UMMTO)
Professeur (UZAD)
MCA (UMMTO)
MCA ((UZAD)

Présidente
Rapporteur
Co- rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

Année universitaire : 2020-2021

Résumé :

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) est un arbre forestier à large répartition en Algérie du nord et dans le pourtour méditerranéen. Il est répertorié parmi les espèces sous-utilisées et dont la valorisation et la culture sont à encourager. Toutefois, une bonne valorisation nécessite la connaissance de la ressource génétique de l'espèce.

Sept (07) provenances algériennes du caroubier s'étendant depuis Tlemcen, à l'Ouest, jusqu'à Annaba, à l'Est, et couvrant différents bioclimats (semi-aride, subhumide et humide) et différentes altitudes (32 à 1050 m), ont été étudiées pour la morphologie des feuilles, des gousses et des graines et la teneur en quelques paramètres physico-chimiques des pulpes, des graines et des feuilles.

Un échantillonnage aléatoire sur 20 arbres par provenance à raison 20 de gousses et de 20 feuilles matures par arbre a été fait. Soit un total de 140 arbres, 2800 gousses, 2800 graines et 2800 feuilles mesurées pour les caractères quantitatifs (taille de la feuille, nombre de folioles par feuille, taille des gousses et graines, poids total, nombre de graines par gousse, rendement en graines) et qualitatifs (couleur, forme et aspect de la surface des gousses et des graines ; couleur de la feuille et présence/absence de la foliole terminale).

L'étude physico-biochimique des trois parties végétales (feuille/ pulpe/graine) a porté sur le taux de matière sèche, la teneur en cendres, en matière grasse et en sucres totaux.

Les résultats ont montré une variabilité significative de la morphologie des gousses, des graines et des feuilles du caroubier selon les provenances géographiques.

L'étude morphologique des feuilles a permis de fournir des données sur ses caractères pour la première fois chez le caroubier algérien.

L'étude biochimique a montré notamment la supériorité de certaines provenances pour le taux de sucres des pulpes.

Le classement des provenances indique toutefois que la variabilité mise en évidence ne reflète pas les conditions (i.e. bioclimat, altitude et continentalité) du site d'origine.

L'étude morphologique indique l'existence de provenances bien classées et d'autres mal classées aussi bien pour les dimensions des gousses que des feuilles, tandis que l'étude biochimique, en particulier la teneur en sucres totaux des pulpes, ne conforte pas ce classement.

Mots clés : *Ceratonia siliqua* L., Algérie, morphologie, phytochimie, provenance, variabilité.

Abstract:

The carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) is a forest tree with a wide distribution in northern Algeria and around the Mediterranean. It is listed among the under-utilized species whose development and cultivation are to be encouraged. However, good valuation of the species requires knowledge of its genetic resources.

Seven (07) Algerian provenances of the carob tree extending from Tlemcen, in the west, to Annaba, in the east, and covering different bioclimates (semi-arid, sub-humid and humid) and different altitudes (32 to 1050 m), were studied for leaf, pod and seed morphology and the content of some physicochemical parameters of pulps, seeds and leaves.

Random sampling on 20 trees per provenance at a rate of 20 pods and 20 mature leaves per tree was carried out. That is a total of 140 trees, 2800 pods, 2800 seeds and 2800 leaves measured for quantitative characteristics (leaf size, number of leaflets per leaf, size of pods and seeds, total pod weight, number of seeds per pod, seed yield) and qualitative traits (pod and seed color, shape and surface; leaf color and presence / absence of the terminal leaflet).

The physicochemical study of the three plant parts (leaf / pulp / seed) focused on the dry matter content, the ash, fat and total sugars content.

Results showed a significant variability in the pod, seed and leaf morphology among the carob tree provenances.

Leaf morphological study provided data on such trait characteristics for the first time on the Algerian carob tree.

The biochemical study showed in particular the superiority of certain provenances for the pulp sugar content.

Provenance clustering indicates, however, that the variability evidenced does not reflect the conditions (i.e. bioclimate, altitude and continentality) at the site of origin.

The morphological study indicates the existence of provenances at the top position and others at the bottom position for pod and leaf dimensions, while the biochemical study, in particular the pulp total sugar content, does not confirm this ranking.

Keywords : *Ceratonia siliqua* L., Algeria ; morphology ; phytochemistry ; provenance ; variation.

ملخص :

شجرة الخروب (*Ceratonia siliqua* L.) هي شجرة غابية واسعة الانتشار في شمال الجزائر وفي منطقة البحر الأبيض المتوسط. وهذا النوع مدرج ضمن الأنواع التي لم تُستغل استغلالاً كافياً والتي ينبغي تشجيع تقييمها وزراعتها. إلا أن التقييم الجيد يتطلب معرفة الموارد الوراثية للأنواع.

في سبعة (07) مناطق جزائرية للخروب تمتد من تلمسان غرباً، إلى عنابة شرقاً وتشمل ظروف مناخية متنوعة من رطوبة إلى شبه جافة وعلى ارتفاعات مختلفة (32 إلى 1050 م). من أجل دراسة مورفولوجيا الأوراق، والقرون، والبذور، ومحتوى بعض الخصائص الفيزيوكيميائية لللب، والبذور، والأوراق.

أخذنا عينات عشوائية من 20 شجرة لكل منطقة مع 20 قرناً و20 ورقة بالغة لكل شجرة. وما يقاس مجموعه 140 شجرة، و2800 قرن، و2800 بذرة و2800 ورقة، لدراسة الخصائص الكمية (حجم الورقة، وعدد الوريقات لكل ورقة، وحجم القرون والبذور، والوزن الكلي، وعدد البذور لكل قرن، والمردود). والخصائص النوعية (لون وشكل ومظهر سطح القرن والبذور؛ لون الورقة وعدم وجود الوريقة الطرفية).

وفحصنا من خلال الدراسة الفيزيوكيميائية للأجزاء النباتية الثلاثة (ورقة/لب/بذرة) محتوى المادة الجافة والرماد والدهون والسكر الكلي. وأظهرت النتائج تبايناً كبيراً في مورفولوجيا القرون والبذور وأوراق الخروب بين المناطق الجغرافية. وقد أتاحت الدراسة المورفولوجية للأوراق تقديم بيانات عن هذه الصفات لشجرة الخروب لأول مرة في الجزائر. وأظهرت الدراسة الفيزيوكيميائية بشكل خاص تفوق مناطق معينة على محتوى السكر في اللب.

ومع ذلك، فإن تصنيف المناطق يشير إلى أن التباين الذي تم تسليط الضوء عليه لا يعكس الظروف المناخية أو الارتفاع لموقع المنطقة. وتشير الدراسة المورفولوجية إلى وجود مناطق مصنفة بشكل جيد ومناطق أخرى غير مصنفة لكل من أبعاد القرون والأوراق، في حين أن الدراسة الفيزيوكيميائية، ولا سيما المحتوى الكلي للسكر في اللب، لا تدعم هذا التصنيف.

الكلمات المفتاحية: شجرة الخروب – الجزائر – مورفولوجيا – فيتو كيمياء – منطقة – تغيرات.

Remerciements

« *La connaissance est la seule chose qui s'accroît lorsqu'on la partage* ».

Mes remerciements sont d'abord destinés à "Dieu", le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la patience de faire ce travail et de continuer pour voir le fruit de ma longue période de recherche.

Tout d'abord, je tiens à remercier ceux grâce à qui notre formation de troisième cycle a pu exister ;

Je remercie particulièrement Prof. BELHADJ Safia, directrice d'option de notre doctorat qui n'a jamais hésité à m'aider, à me conseiller, ainsi, pour avoir honoré de sa présence ce jury en acceptant de le présider.

J'exprime ma gratitude et reconnaissance au Prof. DERRIDJ Arezki qui a accepté de m'encadrer, d'avoir dirigé pendant plus de 07 ans la réalisation de ma thèse, et de n'avoir jamais décliné les démarches entreprises pour l'avancement de mes recherches.

J'adresse mes vifs remerciements à ma co-directrice de thèse Prof. KROUCHI Fazia qui a bien voulu diriger ce travail avec beaucoup de compétence et d'efficacité. pour ses orientations, sa présence, sa disponibilité, son aide et ses conseils qui m'en ont été très précieux et à me faire part de son savoir faire tant sur le plan technique que linguistique. Je lui dois une immense reconnaissance et un très grand respect.

Je voudrais également adresser ma profonde reconnaissance aux membres de jury pour avoir accepté de consacrer leurs temps pour examiner ce modeste travail à savoir : Dr GUERZOU Ahlem, Pr. BELHADJ Safia et Dr GUIT Ibrahim ; de l'université de Djelfa ainsi qu'au examinateur externe : Dr AIT SAID Samir d'avoir accepté de lire et ou de se déplacer afin d'enrichir, et d'améliorer via leurs commentaires la qualité du présent manuscrit.

J'exprime mes plus vifs remerciements, et ma reconnaissance au personnel du SAIDAL de Médéa et particulièrement à la directrice Dr ABADA.S et aux membres du laboratoire du contrôle de qualité.

Je remercie vivement le personnel : du Parc National De Chréa (secteur Hammam Melouane), du Parc National De TAZA, du Parc National De Tlemcen, les Forestiers de la conservation des forêts de Tipaza, Relizane, kenchla, Batna, Mostaganem.

Un merci particulier à M^r BAAZIZ Hocine d'avoir contribué et aidé gentiment à la réalisation de ce travail notamment par son aide dans la collecte des caroubes à la région de Sétif.

Je remercie mes amis et collègues qui m'ont encouragé, aidé et initié dans les statistiques, en particulier Mme LOUZABI Sihem et Dr. HAFSI Zakaria, ainsi que toutes mes collègues doctorantes qui m'encourageaient à chaque fois : BACHIR Kamilia, HOUMA Imene, Je remercie

Ma reconnaissance et mes remerciements vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je voudrais en toute modestie dédier ce travail à :

Mes très chers parents qui ont toujours été à mes cotés, qui n'ont jamais cessé de m'encourager et m'aider dans mes études, Leur fierté à mon égard 'aujourd'hui est pour moi la meilleure des récompenses. Papa, maman je vous dis merci, et que Dieu vous protège pour nous.

À Mon cher mari Hocine qui m'a tant soutenu

À ma petite princesse Amira

A mes très chers frères.

A mes très chères sœurs et leurs époux.

A mes chers neveux et mes chères nièces

A mon cher oncle Belkacem qui m'a toujours soutenue et encouragée à aller de l'avant et de ne jamais baisser les bras.

A tous mes cousins et cousines

A mes amies Sabah, Kamy , Amel et Soumia de m'avoir accompagnées durant mon cursus et leurs soutien au moment les plus difficiles .

En fin, à tous ceux que j'aime, ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin.

Liste des illustrations par chapitre

Liste des illustrations par chapitre

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Liste des tableaux :	Page
Tableau. 1 : Classification classique et phylogénétique de <i>Ceratonia siliqua</i> L.	6
Tableau. 2 : Production mondiale de la caroube (FAOSTAT 2019)	28
Tableau. 3 : Surface cultivée, production et rendement de la caroube en Algérie, année 2009 (données fournies par la DSA)	29
Tableau. 4 : Composition chimique de la pulpe (en M.S de la pulpe)	39
Liste des figures :	
Fig. 1 : Allure de l'arbre du caroubier (photo prise à Tlemcen, 2014)	11
Fig. 2 : Racines du caroubier (Mahdad, 2011)	11
Fig. 3 : Différentes formes de tronc du caroubier (photo prise à Jijel (A ; B), Tlemcen (c) et Blida (D ; E))	12
Fig. 4 : Branches du caroubier (photo prise à Blida)	11
Fig. 5 : Feuilles du caroubier (photo prise à Blida, 2014)	12
Fig. 6 : Inflorescence mâle, femelle et hermaphrodite du caroubier	12
Fig. 7 : Gousses vertes et gousses mûres du caroubier	13
Fig. 8 : Graines du caroubier	13
Fig. 9 : Coupe transversale d'une graine de caroube (D'après Dakia et al., 2008)	13
Fig. 10 : Fructification du caroubier sur des rameaux principaux, sur le tronc.	14
Fig. 11 : Centre d'origine et distribution du caroubier dans le monde (Batlle et Tous, 1997)	16
Fig. 12 : Les principaux ravageurs du caroubier (Batlle et Tous, 1997)	22

Chapitre II : Aperçu sur la zone d'étude et méthodologie globale

Liste des tableaux :	Page
Tableau. 1 : Caractéristiques des sites retenues dans l'étude.	Annexe1
Tableau. 2 : Précipitations moyennes annuelles en (mm) corrigées pour les périodes retenues.	Annexe1
Tableau. 3 : Précipitations moyennes, mensuelles et annuelles en (mm) corrigées pour la période (2004-2014)	74
Tableau. 4 : Régime saisonnier des précipitations au niveau des sites étudiés pour la période (2004-2014)	75
Tableau. 5 : Les températures moyennes mensuelles et annuelles en (°C) corrigées pour la période (2004-2014)	Annexe1
Tableau. 6 : Moyenne des Minima (m) et Moyenne des Maxima (M) durant la période (2004-2014)	78
Tableau. 7 : Les paramètres climatiques caractérisant le bioclimat des stations d'étude pour les périodes retenues.	Annexe1
Tableau. 8 : Valeurs de l'indice de sécheresse estivale d'Emberger-Giacobbe pour les sites pluviométriques de la zone d'étude pour la période 2004-2014.	80
Tableau. 9 : valeurs de l'indice de De Martonne et bioclimats correspondants.	80
Tableau. 10 : Valeurs de l'indice d'aridité des stations étudiées pour la période 2004-2014.	81
Tableau. 11 : Etages bioclimatiques selon Emberger (1952)	84
Liste des figures	
Fig. 1 : Localisation des sites d'échantillonnage du caroubier en Algérie	67
Fig. 2 : Variation mensuelle des précipitations en mm (2004-2014)	74
Fig. 3 : Les régimes saisonniers (précipitation en mm) durant la période (2004-2014)	76
Fig. 4 : Diagrammes ombrothermiques des sites d'étude pour la période (2004-2014)	83

Fig. 5 : Position des sites d'étude pour les deux périodes (1913-1938) et (1980-2014) sur le climagramme pluviothermique d'Emberger. **86**

Chapitre III : Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

Liste des tableaux	Page
Table 1. Geographic and climatic data of studied sites.	97
Table 2: Distribution of trees for pod and seed qualitative traits.	99
Table 3: Statistical parameters on quantitative traits of pods and seeds.	103
Table 4: Distribution of trees within-provenance per class of mean values of pod and seed traits.	104
Table 5: Results of two way nested Anova on quantitative traits of pods and seeds.	105
Table 6: Correlation matrix between quantitative traits of pods and seeds.	109
Liste des figures	Page
Fig. 1 : Map of Algeria showing locations of the carob sites analyzed	97
Fig. 2 : Boxplot of pod and seed traits per population.	107
Fig. 3 : Distribution of trees within-provenance for mean values of pod and seed traits.	108

Chapitre IV : Caractérisation foliaire du caroubier chez sept provenances algériennes

Liste des tableaux	Page
Tableau. 1 : Paramètres statistiques sur les caractères quantitatifs des feuilles de <i>C.siliqua</i>	124
Tableau. 2 : Analyse de la variance "ANOVA" de l'effet du site et de l'arbre dans site sur les caractères des feuilles de <i>C.siliqua</i> .	125
Tableau. 3 : Corrélations entre les caractéristiques morphologiques des provenances du caroubier.	127
Tableau. 4 : Vecteurs propres et pourcentage de variation expliquée par les trois premiers axes à partir de 6 caractères analysés chez 2800 feuilles du caroubier	127
Tableau. 5 : Fréquences des caractères qualitatifs des feuilles de <i>C. siliqua</i> selon les provenances.	129
Tableau. 6 : Comparaison des données recueillies dans la littérature pour la feuille de <i>Ceratonia siliqua</i> .	Annexe1
Liste des figures	Page
Fig. 1 : Schéma descriptif d'une feuille paripennée de caroubier (Gharnit et <i>al.</i> , 2005).	120
Fig. 2 : Feuilles du caroubier.	121
Fig. 3 : Boxplot de quelques traits morphologiques de la feuille par provenance.	126
Fig. 4 : Cercle de corrélation des variables quantitatives des feuilles dans le plan 1-2.	128
Fig. 5 : Projection des variables morphologiques de la feuille et des provenances dans le plan 1-2 de l'analyse en composantes principales.	128

Chapitre V : Analyse de quelques paramètres physico-chimiques

Liste des tableaux	Page
Tableau. 1 : Teneur en quelques paramètres physico-chimiques selon les parties végétales et les provenances de <i>C. siliqua</i> .	139

Tableau. 2 : Analyse de la variance de l'effet provenance et de la partie végétale sur les teneurs en quelques paramètres physico-chimiques de *C. siliqua*. **143**

Liste des figures

Fig. 1 : Protocole de dosage de la matière grasse (ISO 659, 2009).	137
Fig. 2 : Protocole de dosage des sucres totaux (Dubois et <i>al.</i> , 1956)	138
Fig. 3 : Courbe d'étalonnage pour le dosage des sucres totaux.	Annexe1
Fig. 4 : Taux en matière sèche (%) : (a) selon les parties végétales et les provenances, (b) selon les parties végétales toute provenance confondue.	140
Fig. 5 : Taux en cendres (%) : (a) selon les parties végétales et les provenances, (b) selon les parties végétales toute provenance confondue.	140
Fig. 6 : Taux de matière grasse (%) : (a) selon les parties végétales et les provenances, (b) selon les parties végétales toute provenance confondue.	141
Fig. 7 : Taux de sucres totaux (%) : (a) selon les parties végétales et les provenances, (b) selon les parties végétales toute provenance confondue.	142

Liste des abréviations

Liste des abréviations

APG : Angiosperm Phylogeny Group.

A.S.P.E.Wi.T : Association pour la Sauvegarde et la Promotion de l'Environnement de la Wilaya de Tlemcen

°C : Degré Celsius

C : Concentration

CCl₄ : tétrachlorure de carbone.

DGF : Direction générale des forêts

DO : Densité optique

DSA : Direction des Services Agricole de la wilaya de Tlemcen

FAO: Food and agricultural organization

g : Gramme

H₂SO₄ : Acide sulfurique

h : heure

HCl : Acide chlorhydrique

HDL: High density lipoprotein

Kg : Kilogramme

L: Litre

LDL: Low density lipoprotein

mg : Milligramme

MPO : Myeloperoxidase

MS : Matière sèche

nm : Nanomètre

OMS : Organisation mondiale de la santé

Qx /ha : quitaux par hectare

µl : Microlitre

Table des matières

Table des matières

Introduction	01
Chapitre I : Synthèse Bibliographique	
Partie 1 : Aperçu sur le caroubier (<i>Ceratonia siliqua</i> L.)	
1.1. La famille des Fabacées	04
1.2. Le genre <i>Ceratonia</i>	05
1.3. L'espèce : <i>Ceratonia siliqua</i> L.	05
1.3.1. Taxonomie et position systématique	05
1.3.2. Description botanique	07
1.3.3. La biologie de reproduction	13
1.3.4. Origine et répartition biogéographique	15
1.3.4.1. Origine du caroubier	15
1.3.4.2. Répartition biogéographique	15
a. Dans le monde	15
b. Dans la région méditerranéenne	16
c. En Algérie	18
1.4. Ecologie du caroubier	19
1.4.1. Exigences édaphoclimatiques	19
a. Le climat	20
b. Le sol	20
c. L'apport en eau	21
1.4.2. Multiplication et capacité germinative des graines	21
1.5. Les ravageurs et les maladies du caroubier	22
1.6. L'importance de l'espèce et son utilisation	23
1.6.1. L'utilisation comme fourrage	24
1.6.2. L'utilisation des feuilles	24
1.6.3. L'utilisation des gousses	25
1.6.4. L'utilisation des graines	27
1.6.5. Les autres utilisations de l'arbre	27
1.6.6. L'importance écologique	28
1.6.7. L'importance économique	28
1.7. La production du caroubier	29
1.8. Les ressources et la diversité génétique	31
Partie 2 : Composition chimique et métabolites secondaires du caroubier	
2.1. La composition de la pulpe	34
2.1.1. Les sucres	35
2.1.2. Les polyphénols	36
2.1.3. Les fibres	38
2.1.4. Les acides aminés	38
2.1.5. Les cendres	39
2.1.6. Les minéraux	39
2.1.7. L'humidité	40
2.1.8. Les cyclitols	40
2.2. La composition chimique de la graine	43
2.2.1. La cuticule	43
2.2.2. L'endosperme	44
2.2.3. Le germe	45
Références bibliographiques	46

Chapitre II : Aperçu sur la zone d'étude et méthodologie globale	
II.1. Localisation de la zone d'étude	68
II.2. Choix de sites d'étude	68
II.3. Description des sites	69
II.4. Etude climatiques des sites d'échantillonnage	73
II.4.1. Introduction	73
II.4.2. Méthodologie	74
II.4.3. Les précipitations	74
II.4.3.1. Pluviométrie moyenne mensuelle et annuelle	75
II.4.3.2. Régime saisonniers des précipitations	76
II.4.4. Les températures	78
II.4.4.1. Températures moyennes mensuelles et annuelles	78
II.4.4.2. Températures moyennes des maxima du mois le plus chaud « M »	79
II.4.4.3. Températures moyennes des minima du mois le plus froid « m »	79
II.4.4.4. Amplitude thermique (M-m) ou indice de continentalité	80
II.4.5. Synthèse climatique	81
II.4.5.1. Indice de sécheresse estivale d'Emberger- Giacobbe et méditerranéité	81
II.4.5.2. Indice d'aridité de De Martonne	81
II.4.5.3. La période sèche	82
II.4.5.4. Le quotient pluviométrique d'Emberger	85
II.4.6. Conclusion	86
Références bibliographiques	88
Aperçu méthodologique global	
1- Récolte de matériel végétal	91
2- Aspects abordés	91
2.1. Etude de la variabilité intra et inter-population de la morphologie des gousses et des graines	91
2.2. Etude de la variabilité inter-population de la morphologie de la feuille	91
2.3. Etude de la variabilité inter-provenance de quelques paramètres physico-chimiques de différentes parties végétales	92
3- Analyse statistiques des résultats	92
Chapitre III : Genetic resources of carob tree (<i>Ceratonia siliqua</i> L.) in Algeria : insight from pod and seed morphology	
Résumé	93
III.1.Introduction	94
III.2.Material and methods	95
III.2.1. Study sites	95
III.2.2. Plant material	96
III.2.3. Measured traits	96
A. Qualitative traits	96
B. Quantitative traits	96
III.2.4. Statistical analysis	98
III.3. Results	98
III.3.1. Qualitative traits	98
III.3.2. Quantitative traits	100
III.3.2.1. Within and between provenance variations for quantitative traits	100
III.3.2.2. Correlation between quantitative traits	109
III.3.2.3. Correspondence between quantitative and qualitative traits	109
III.4. Discussion and conclusion	110
Acknowledgements	113

References	113
Chapitre IV : Caractérisation foliaire du caroubier issu de sept sites en Algérie	
IV.1.Introduction	119
IV.2. Matériel et méthodes	120
IV.2.1. Matériel végétal et préparation des échantillons aux analyses	120
IV.2.2. Analyse morphologique des feuilles	120
a. Traits quantitatifs	121
b. Traits qualitatifs	121
IV. 2.3. Analyses statistiques	121
IV.3. Résultats des traits quantitatifs	122
IV.3.1. Niveau de variation des caractères foliaires	122
IV.3.2. Corrélations entre les caractères foliaires	126
a-Corrélations linéaires de Pearson	126
b- Projections des variables dans les plan factoriel 1x2 de l'analyse en composantes principales	127
IV.4.Résultats des traits qualitatifs	129
IV.5. Discussion	130
IV.6. conclusion	131
Références	131
Chapitre V : Analyse de quelques paramètres physico-chimiques	
V.1. Introduction	133
V.2. Matériel et méthodes	134
V.2.1. Préparation du matériel végétal	134
V.2.2. Méthodes d'analyse des paramètres physico-chimiques	134
V.2.2.1. Détermination de l'humidité et de la matière sèche	134
V.2.2.2. Dosage des cendres	135
V.2.2.3. Dosage de la matière grasse	135
V.2.2.4. Dosage des sucres totaux	136
V.2.3. Analyse statistique	136
V.3. Résultats	137
V.3.1. Taux de matière sèche	137
V.3.2. Teneur en cendres	138
V.3.3. Teneur en matières grasses	139
V.3.4. Teneur en sucres totaux	140
V. 4. Discussion	142
V.4.1.Teneur en matière sèche	142
V.4-2-Teneur en cendres	143
V.4.3.Teneur en matière grasse	144
V.4.4.Teneur en sucres totaux	145
V. 5. Conclusion	146
Références bibliographiques	147
Conclusion générale et perspectives	151
Bibliographie	153
Listes des annexes	

Introduction

Introduction

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) de la famille des *Fabacées*, est une essence typiquement méditerranéenne largement répartie en Algérie sous forme de peuplements spontanés dans les zones côtières et semi-arides (Benmahioul *et al.*, 2011) et cultivé depuis longtemps pour ses produits dérivés mais aussi pour sa résistance au déficit hydrique (Biner *et al.*, 2007).

Le caroubier est une espèce agro-sylvo-pastorale dont les diverses utilisations permettent d'apporter des revenus complémentaires aux communautés rurales des zones de montagnes qui souffrent généralement d'une certaine précarité avec toutes ses implications sur l'état de conservation des ressources forestières (Naggar *et Lahssini*, 2015). Il pourrait constituer des plantations de choix dans les programmes de reboisement pour garantir un développement durable des zones rurales et pour contribuer à la protection des sols et à la lutte contre la désertification.

Le caroubier a, en plus, un grand intérêt socio-économique puisque ses gousses, plus riches en sucres que la canne à sucre et la betterave sucrière, et qui sont utilisées en industrie alimentaire et pharmacologique (Batlle *et Tous*, 1997 ; Gharnit *et al.*, 2001). La caroube est un réservoir essentiel de composés nutritionnels et pharmaceutiques. Plus spécifiquement, les graines de caroube sont généralement utilisées pour la production de gomme de caroube.

Toutes les parties de cet arbre sont utiles et exploitées pour leur grande richesse et leur valeur ajoutée dans plusieurs domaines. Les feuilles sont un fourrage populaire et ont des propriétés diététiques et médicinales. En outre, l'écorce et les feuilles ont été utilisées dans la médecine traditionnelle comme laxatif, diurétique, anti-diarrhéique et pour le traitement de la gastro-entérite (Ben Hsouna *et al.*, 2011 ; El Bouzdoudi *et al.*, 2017). Ces extraits foliaires recèlent de multiples propriétés médicinales : cytotoxiques et antimicrobiennes (Kivçak *et Mert*, 2002 ; Meziani *et al.*, 2015 ; Meziou-Chebouti *et al.*, 2015), antioxydantes (Custodio *et al.*, 2011 ; Rtibi *et al.*, 2016b) et antifongiques (Fadel *et al.*, 2011) ; inhibitrices de la prolifération des cellules tumorales (Corsia *et al.*, 2002 ; Custodio *et al.*, 2011) et hépatoprotectrices (Ibrahim *et al.*, 2013). De même, la caroube semble constituer un bon complément énergétique pour les brebis Ouled Djellal en Algérie et peut, de ce fait, se substituer à l'orge en grains (Mebirouk-Boudechiche *et al.*, 2014).

La pulpe est riche en sucres (Ayaz *et al.*, 2007) qui sont extraits pour produire des sirops et de la mélasse. Elle est aussi utilisée sous forme de poudre pour remplacer le cacao dans la composition des biscuits, crème glacée, etc. (Bengoechea *et al.*, 2008). La pulpe contient également une excellente source de fibres bioactives utilisées dans l'industrie pharmaceutique, car elles ont de nombreux effets positifs sur la glycémie, le taux de cholestérol et le cancer (Goulas *et al.*, 2016).

De plus, la pulpe de caroube est reconnue comme une bonne source de molécules bioactives, tels que les composés phénoliques (l'acide gallique, l'acide syringique, l'acide 4-hydrobenzoïque et l'acide gentisique), dont certains présentent des activités antioxydantes (Makris et Kefalas, 2004 ; Bernardo-Gil *et al.*, 2011 ; Sebai *et al.*, 2013) et des propriétés thérapeutiques telles que néphroprotectrices (Ahmed, 2010) et antiprolifératives (Corsi *et al.*, 2002), ainsi que les cendres (Yousif et Alghzawi *et al.*, 2000). C'est aussi une source très appréciée de macro-éléments tels que le calcium, le potassium, le magnésium et le phosphore, en plus des oligo-éléments comme le fer, le zinc et le manganèse (Youssef *et al.*, 2013 ; Khelifa *et al.*, 2013).

La gomme est extraite de l'endosperme de la graine après élimination de la cuticule et du germe (Kök *et al.*, 1999 ; Haddarah *et al.*, 2013). L'endosperme contient entre 80 et 85 % de galactomannanes (Maier *et al.*, 1993) qui est un additif alimentaire (E410) utilisé comme épaississant, stabilisant ou aromatisant dans l'industrie alimentaire et comme ingrédient actif ou molécule porteuse dans les produits pharmaceutiques, cosmétiques, textiles, peintures, etc. (Goulas *et al.*, 2016).

La production mondiale de caroube a connu un déclin ces dix dernières années et se situait en 2016 aux alentours de 160.000 t/an (Gillet, 2018). Toutefois, les nombreuses utilisations pourraient susciter un regain d'intérêt pour cette espèce. Et une meilleure valorisation et gestion a besoin de s'appuyer sur des travaux de caractérisation de cette bio-ressource. En effet, il est nécessaire d'intensifier les recherches et de développer les filières de production et d'industrialisation des différents produits de cet arbre. Sa valorisation sur tous les plans : médicinal, agroalimentaire et industriel, jouera sans doute un rôle majeur dans l'amélioration de son exploitation, ainsi que dans la réévaluation des procédés de son implantation (Benmahioul *et al.*, 2011).

Plusieurs recherches ont été menées jusqu'à présent sur la caractérisation morphologique du caroubier dans le bassin méditerranéen surtout par les marocains (Gharnit *et al.*, 2005 ; El Kahkahi *et al.*, 2015 et Seghir *et al.*, 2016), par les turques (Bostan et KaskoArıcı, 2015 ; Korkmaz *et al.*, 2020), les grecques (Christodoulakis et Mitrakos, 1987) et les espagnols

(Batlle et Tous, 1997). Sur le caroubier algérien, récemment, plusieurs études ont abordé la caractérisation chimique des différentes parties de l'arbre et l'évaluation de leurs activités biologiques à l'échelle d'une seule provenance : Bejaia (Benchikh et Louailèche, 2014 ; Mahtout et al., 2018 ; Mekhoukhe et al., 2018); Boumerdes (Maziou-Chebouti et al., 2015) ; Mascara (Ouis et Hariri, 2017), Tlemcen (Ghanemi, 2017), de trois provenances (Tlemcen, Blida et Jijel) selon Gaouar (2011) voire à l'échelle de dix provenances (Tlemcen, Ain-Temouchent, Sidi-Bel-Abbes, Mostaganem, Relizane, Chlef, Blida, Tipaza, Boumerdes, Bejaia) selon Boublenza et al. (2019). Toutefois, à notre connaissance, il n'y a pas d'étude morphologique portant en même temps sur les feuilles, les gousses et les graines des populations algériennes du caroubier. Et c'est pour apporter une contribution dans ce sens que nous avons abordé cette présente étude. Par ailleurs, notre contribution s'appuie sur un effort d'échantillonnage plus conséquent (20 arbres par provenance, 20 gousses et feuilles par arbre et 7provenances) que ceux des précédentes études sur le caroubier algérien.

Cette thèse consacrée à la caractérisation morphologique et phytochimique des feuilles, des gousses et des graines du caroubier originaires de 7 provenances du caroubier spontané en Algérie comporte les volets suivants :

- ✓ l'étude de la variabilité intra et inter-provenance de la morphologie des gousses et des graines ;
- ✓ l'étude de la variabilité inter- provenance de la morphologie de la feuille
- ✓ l'étude de la variabilité inter-provenance de quelques paramètres physico-chimiques de la pulpe, des graines et des feuilles.

Dans cette thèse, nous abordons, en premier lieu, une synthèse bibliographique sur le caroubier y compris un rappel sur la composition chimique et les métabolites secondaires de l'espèce. Nous donnons ensuite une description et une étude climatique des sites d'étude ; nous présentons ensuite la méthodologie globale puis nous abordons les trois chapitres expérimentaux (morphologie de la gousse et de la graine ; morphologie foliaire ; physico-chimie de la pulpe, de la graine et de la feuille), nous formulons enfin une conclusion avec quelques perspectives complémentaires à ce présent travail.

Chapitre I :
Synthèse bibliographique

Partie 1 : Aperçu sur le caroubier

1.1. La famille des *Fabacées*

Les *Fabacées* ou légumineuses constituent, une des plus grandes familles des plantes à fleurs, avec plus de 19 400 espèces et 730 genres, distribués à travers le monde dans de nombreux écosystèmes écologiques (Wojciechowski et al., 2004 ; Lewis et al., 2005), sont la troisième famille angiosperme par le nombre, après les composées (*Astéracées*) et les orchidées (Schneider et Huyghe, 2015). Elle doit son unité à son fruit, appelé gousse, d'où l'autre dénomination sous laquelle elle est le plus connue : les légumineuses.

Les légumineuses sont caractérisées par :

- Des fleurs papilionacées (en forme de papillon) pour la plupart des espèces cultivées,
- Une gousse contenant des graines (la gousse étant le fruit issu de l'ovaire de la fleur),
- La capacité d'utiliser l'azote atmosphérique (N₂) pour produire ses propres composants protéiques, observée pour la majorité des membres de cette famille. Leur métabolisme dépendant de l'azote est considéré comme une adaptation aux variations climatiques et les perturbations imprévisibles de l'habitat (Wojciechowski et al., 2004 ; Lewis et al., 2005).

Hors sa particularité biologique des racines, les espèces de la famille des *Fabaceae* présente une évolution foliaire. Les feuilles, primitivement alternes, composées-imparipennées et stipulées, peuvent évoluer vers une feuille simple, ou vers une feuille composée –pennée ; en particulier, la foliole terminale se transforme souvent en vrille et les stipules peuvent devenir plus importantes que les feuilles, voire les remplacer.

Les fleurs sont groupées en grappes plus ou moins allongées et les fruits des *Fabaceae* présentent une large variabilité quant à la forme du fruit qu'elles produisent, communément appelé "gousses", il est charnu, plus ou moins allongé, le fruit dérive d'un seul carpelle. Les *Fabaceae* ont souvent une seule loge, uniloculaire (Schneider et Huyghe, 2015).

La famille s'accommode d'une très large gamme d'habitats. Les espèces la composant ont une distribution quasi cosmopolite et se trouvent dans les zones tropicales, subtropicales ou tempérées. Les formes arborescentes prédominent dans les pays chauds ; les formes herbacées dans les régions tempérées (Heywood, 1996).

1.2. Le Genre : *Ceratonia*

Le genre *Ceratonia* appartient à la famille des *Leguminosae* (*Fabaceae*) de l'ordre des *Rosales* (*Fabales*). Ce genre renferme en plus de *Ceratonia siliqua*, deux autres espèces : *Ceratonia oreothauma* qui est natif d'Arabie (Oman) et *Ceratonia somalensis* originaire du nord de la Somalie (Batlle et Tous, 1997 ; Benmahioul et al., 2011).

1.3. L'espèce : *Ceratonia siliqua* L.

Le nom scientifique du caroubier, *Ceratonia siliqua* L, proposé par Linné est dérivé du nom latin *Ceratonia* où trouve ses racines dans le nom grec "Keras" signifiant « petite corne » en référence à ses caroubes, gousses en formes de cornes à maturité (Albanell, 1990). Le nom d'espèce *siliqua* désigne également mais en latin une silique ou gousse (Batlle et Tous, 1997). Sa popularité lui a valu différentes appellations telles que : carouge, figuier d'Egypte, fève de Pythagore et Pain de Saint Jean-Baptiste, selon la croyance que Saint Jean-Baptiste s'alimenta du fruit de cet arbre durant son séjour dans le désert, lequel a donné origine à la dénomination « pain de Saint Jean-Baptiste » (Albanell, 1990 ; Berrogué, 2007).

Le mot caroubier en français, il est connu en Angleterre sous les noms : Algaroba, carob, carob tree. Selon Bock (2012), il est connu en Italie (carrubo), en Espagne (Algarrobo, Garrofer, Garrover), aux Pays-Bas (Johannesbroodboom), en Allemagne (Bockshornbaum, Johannisbrotbaum, Karobenbaum). Le nom commun serait d'origine hébraïque "Karuv" dérivés tels al kharroube en arabe, *tislighwa* en tamazight et ahkhabon en berbère (Rejeb, 1995 ; Batlle et Tous, 1997 ; Abi azar, 2007).

1.3.1. Taxonomie et position Systématique

Selon la systématique de Cronquist (1981) et APG III (2009). La classification classique et phylogénétique de *Ceratonia siliqua* L. est présentée dans le tableau 1 suivant.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau.1 : Classification classique et phylogénétique de *Ceratonia siliqua* L.

Classification pré- phylogénétique (Cronquist, 1981)		Classification phylogénétique (APGIII, 2009)	
Règne	<i>Plantae</i>	Règne	<i>Plantae</i>
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>	Clade	<i>Tracheobionta</i>
Embranchement	<i>Spermaphytes</i>	Clade	<i>Magnoliophyta</i>
Sous-embranchement	<i>Magnoliophyta</i>	Clade	<i>Rosidés</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>	Clade	<i>Rosidés I</i>
Sous-classe	<i>Rosidae</i>	Ordre	<i>Fabales</i>
Ordre	<i>Fabales</i>	Famille	<i>Fabaceae</i>
Famille	<i>Caesalpinaceae</i>	Sous-famille	<i>Caesalpinioideae</i>
Sous-famille	<i>Caesalpinioideae</i>	genre	<i>Ceratonia</i>
Genre	<i>Ceratonia</i>	espèce	<i>Ceratonia siliqua</i> L.
Espèce	<i>Ceratonia siliqua</i> L.		

Cependant, cette position taxonomique demeure controversée. En effet, Tucker (1992 a) suggère que *C. siliqua* peut avoir un lien avec la sous-famille des *Mimosoideae*. Toutefois, certains auteurs tels qu' Irwin et Barneby (1981) et Tucker (1992 a et b) ont pu prouver que le genre *Ceratonia* est isolé morphologiquement des autres genres de la tribu des *Cassieae* et de ce fait, il doit être exclu de cette tribu. Par ailleurs, des études cytologénétiques ont révélé que le genre *Ceratonia* qui possède un nombre total de chromosomes $2n = 24$ est éloigné des autres membres des *Cassieae* dont le nombre de chromosomes est $2n = 28$ (Goldblatt, 1981 ; Arista et Talavera, 1990 ; Bureš et al., 2004). De plus, certains auteurs ont désigné *Ceratonia* comme étant l'un des genres les plus archaïques des légumineuses (Tucker, 1992a) et qui serait complètement isolé des autres genres de sa famille (Zohary, 1973). C'est l'unique parmi les Césalpinées vivant à l'état sub-spontané au sud de l'Europe (Gharnit, 2003).

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., qui est morphologiquement très 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). Vu que les grains de pollen de *C. siliqua* sont plus évolués (tetracolporé) que les grains tricolporés, il a été suggéré que *C. oreothauma* est l'ancêtre sauvage de l'espèce cultivée *C. siliqua* (Hillcoat et al., 1980).

1.3.2. Description botanique

- L'arbre :

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) est un arbre ou arbuste sclérophylle à croissance lente (Fig.1), pouvant atteindre dans les conditions propices une hauteur de 7-10 m et même 15 à 20 m en Orient et une circonférence à la base du tronc de 2 à 3 m (Batlle et Tous, 1997 ; Ait chitt et al., 2007). Il possède une cime très étalée et arrondie. C'est un arbre xérophile avec une longévité importante dépassant les 200 ans (Rejeb et al., 1991 ; Benmahioul et al., 2011).

- L'écorce :

Cette espèce ligneuse a une écorce lisse et grise lorsque l'arbre est jeune, brune et rugueuse à l'âge adulte. L'écorce est rugueuse à la base de couleur grise à rougeâtre (Melgarejo et Salazar, 2003), tandis que l'écorce est lisse sur la partie supérieure du tronc et à la base des branches.

- Le bois :

Son bois est blanc-jaunâtre lorsqu'il est jeune et devient rose veiné puis rouge foncé et dur en vieillissant. Il est très apprécié en ébénisterie, marqueterie, armurerie, charonnage et aussi pour la fabrication du charbon (Boudy, 1950 ; Benmahioul et al., 2011).

- Les racines :

Cet arbre développe un système racinaire pivotant, qui peut atteindre 18 m de profondeur (Fig.2). Ce qui permet de classer cette espèce parmi celles qui présentent un système racinaire très étendu et spécialement distribué en surface (Aafi, 1996 ; Melgarejo et Salazar, 2003).

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. Cependant, 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 du caroubier (Marrakech et Taounate) cultivées dans des conditions axéniques. L'examen du système racinaire des plantes, effectué à 2, 4 et 6 mois après l'inoculation, n'a montré aucune formation de nodosité.

L'absence ou la présence des rhizobiums chez le caroubier peut être considérée comme une des caractéristiques agronomiques des plus importantes en vue d'une mise en place d'un programme d'amélioration génétique de l'espèce.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- **Le tronc :**

Le tronc du caroubier est épais, très crevassé, robuste avec de clairs canaux de circulation de la sève, associés aux racines les plus épaisses, ce qui leur donne un aspect tortueux comme l'olivier, particulièrement marqué chez certaines variétés (Melgarejo et Salazar, 2003). Le tronc chez les arbres épais et vieux est tortueux et sinusoïdal (Fig.3), le diamètre moyen est de 50 cm en fonction de l'âge de l'arbre (Albanell, 1990).

- **Les 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 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 (Fig. 4).
- 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.

- **Les feuilles :**

Ses feuilles sont persistantes, de 10 à 20 cm de longueur, se caractérisent par un pétiole sillonné sur la face interne et un rachis portant généralement de 4 à 10 folioles, opposés de 3 à 7cm. Elles sont coriaces, entières, ovales à elliptiques, paripennées, légèrement échancrées au sommet (Fig.5) avec une couleur verte luisante à la face supérieure et vert pâle à la face inférieure (Diamantoglou et Mitrakos, 1981 ; Rejeb, 1995 ; Ait Chitt et al., 2007 ; Bock, 2012). 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 perd ses feuilles tous les deux ans, au mois de juillet, lesquelles sont renouvelées au printemps de la même année, en Avril et Mai (Aafi, 1996 ; Ait chitt et al., 2007).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Les organes reproducteurs :

Le caroubier est une espèce dioïque, parfois hermaphrodite et rarement monoïque (Linskens et Scholten, 1980 ; Batlle et Tous, 1997). Les pieds mâles sont stériles et improductifs (Rejeb, 1995). Les fleurs mâles, femelles et hermaphrodites poussent sur des pieds différents. Initialement, les fleurs sont bisexuelles ; il y a suppression d'un sexe durant le développement et le fonctionnement des cellules pour aboutir à des fleurs mâles ou femelles (Tucker, 1990a). La dioécie n'est pas fréquente chez les Légumineuses. En termes d'évolution, l'unisexualité est généralement considérée comme un caractère dérivé de l'état ancestral bisexuel.

- Les fleurs :

Les fleurs groupées en grappes latérales sont de couleur pourpre et parfois rougeâtre (Batlle et Tous, 1997 ; Konate, 2007) qui apparaît sur les vieux bois et parfois sur le tronc (Bock, 2012). 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 (Von Haselberg, 1998). Il existe au sein des caroubiers à inflorescences mâles des variétés à fleurs jaunes (Fig.6) et d'autres à fleurs rouges (Fig.6). 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).

La morphologie florale chez cette espèce est très complexe : on peut distinguer des inflorescences mâles avec des étamines courtes ou longues, des inflorescences femelles avec des étamines rudimentaires et, occasionnellement, des inflorescences hermaphrodites sont caractérisées par un pistil et étamines fonctionnelles au sein d'une même fleur (Albanell, 1990 ; Aafi, 1996 ; Benmahioul et al., 2011).

- Le pollen :

Les grains de pollen sont ellipsoïdes avec aux pôles 28 à 29 μm de diamètre et à l'équateur 25 à 28 μm (Ferguson, 1980 ; Linskens et Scholten, 1980) et peuvent germer facilement (Sfakiotakis, 1978).

- Le fruit :

Le fruit du caroubier, appelé caroube ou carouge est classifié habituellement comme un fruit sec et cela malgré son aspect pulpeux (Albanell, 1990). La caroube est une gousse pendante qui se développe très lentement, nécessitant 9 à 10 mois pour atteindre la maturité (Batlle et Tous, 1997), correspondant à trois stades de développement :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- le premier stade est caractérisé par une lente croissance en automne et en hiver ;
- le second correspond à un développement actif et une croissance rapide des gousses au printemps ;
- au dernier stade, la gousse mûrit et se durcit en juin-juillet.

Ce sont des gousses indéhiscentes, de grande taille avec une longueur de 10 à 30 cm et une largeur de 1.5 à 3.5 cm et une épaisseur de 1 à 2.5 cm. Chaque gousse pèse 15 à 40 g (Ait chitt et al., 2007). La gousse est séparée à l'intérieur par des cloisons pulpeuses transversales et renferme de 4 à 16 graines brunes soit 10 à 20 % du poids de la gousse en fonction du cultivar, du climat, de l'efficacité de la pollinisation, de la conduite technique et l'entretien des arbres. (Rejeb, 1995 ; Melgarejo et Salazar, 2003 ; Ait Chitt et al., 2007 ; Bock, 2012).

La couleur de la caroube est d'abord verte, puis elle devient brune foncée, rouge ou noire à maturité (Fig. 7) selon les variétés, les gousses sont toujours très brillant, sinueux sur les bords, aplati, droit ou arqué à surface ridée, tannée lorsqu'elle est mûre et présente un tissu pulpeux sucré et rafraîchissant (Batlle et Tous, 1997 ; Konate, 2007). 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).

La caroube est une gousse avec une forte accumulation de sucres et de tanins ; ces deux composés lui confèrent au début de son cycle un aspect charnu différentiable d'une variété à l'autre, ce qui présente un intérêt au moment de l'étude pomologique du fruit immature (état vert) (Melgarejo et Salazar, 2003).

La gousse est composée de trois parties de l'extérieur vers intérieur l'epicarpe ou peau, de nature fibreuse et colorée ; le mésocarpe ou pulpe, de nature charnue, riche en sucres. Il représente environ 70 à 95 % du fruit entier ; l'endocarpe, de nature fibreuse ; il recouvre l'intérieur du fruit en le divisant en segments ou loges carpellaires où se situent les graines (dites, garrofines en Espagnol) (Batlle et Tous, 1997).

- La graine :

Les graines du caroubier sont petites et aplaties, d'une forme presque ovale, avec un pôle basal tronqué et écrasé en zone apicale (Fig.8). Son tégument est normalement lisse, dur, de couleur brune rougeâtre et brillant (Albanell, 1990). Elles présentent des dimensions de 8 à 10 mm de long sur 6 à 8 mm de largeur avec 3 à 5 mm d'épaisseur (Batlle et Tous, 1997 ;

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Gharnit *et al.*, 2006 ; Mahdad et Guaour, 2016). Ces graines, toutes d'un poids sensiblement identique devenant très dures à maturité, ont été utilisées par les anciens comme unité de mesure pour peser les pierres précieuses, d'où le mot « carat » (1 carat = 205,3 mg) (Rejeb, 1995 ; Turnbull *et al.*, 2006). Il apparaît 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).



Fig. 1 : Allure de l'arbre du caroubier (*photo prise au site de Tlemcen, 2014*)



Fig. 2 : Racines du caroubier
(Mahdad, 2011)



Fig. 4 : Branches du caroubier
(*photo prise à Hammam Melouane, Blida, 2014*)



Fig. 3 : Différentes formes de tronc du caroubier (*photo prise à Jijel (A ; B), Tlemcen (C) et Blida (D ; E) en 2014*)



Fig. 5 : Feuilles du caroubier (*photo prise à Blida ,2014*)



Fig. 6 : Inflorescence mâle, femelle et hermaphrodite du caroubier (*photo prise à Hammam Melouane Blida ,2014*)



Fig. 7 : Gousses vertes et gousses mûres du caroubier
(Photo prise à Hammam Melouane Blida ,2013)



Fig. 8 : Graines du caroubier

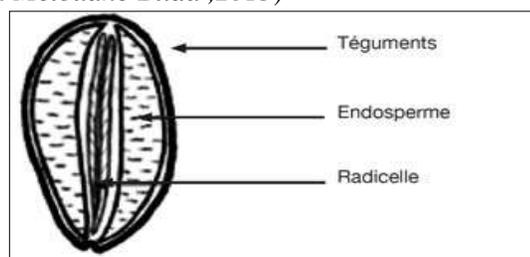


Fig. 9 : Coupe transversale d'une graine de caroube (D'après [Dakia et al., 2008](#))

1.3.3. La biologie de la reproduction

Le caroubier est considéré comme le seul arbre méditerranéen qui fleurisse en été : d'août à octobre ([Aafi, 1996](#)) ou en automne : de septembre à novembre ([Fournier, 1977](#)). Cependant, le temps et la durée de la période de floraison dépendent des conditions climatiques ([Batlle et Tous, 1997](#)) car dans certaines régions chaudes, la floraison peut avoir lieu même au mois de juin. [Hillcoat et al. \(1980\)](#) ont mentionné que *Ceratonia oreothauma* fleurit en mars et avril dans son lieu d'origine. De ce fait, l'hybridation entre les deux espèces n'est possible qu'artificiellement.

La fleur femelle apparaît à partir de juillet et est adaptée à une pollinisation aussi bien anémophile qu'entomophile ([Passos de Carvalho, 1988](#) ; [Retana et al., 1990, 1994](#) ; [Rejeb et al., 1991](#) ; [Ortiz et al., 1996](#)). 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. Toutefois, les pieds mâles reçoivent un plus grand nombre de visiteurs (insectes) ([Ortiz et al., 1996](#)). Les sujets hermaphrodites pourraient être envisagés en tant que pollinisateurs et producteurs.

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 Von 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 fructification se produit essentiellement sur des rameaux secondaires, occasionnellement sur des rameaux principaux et rarement sur le tronc (Fig.10). La fructification, chez le caroubier, se situe entre juillet et décembre de l'année qui suit la floraison, selon les régions et les cultivars (Aafi, 1996).



Fig. 10 : Fructification du caroubier sur des rameaux principaux, sur le tronc
(photo prise à Tlemcen ,2014).

1.3.4. Origine et répartition biogéographique

1.3.4.1. Origine du caroubier :

Le centre d'origine du caroubier demeure aberrant, puisqu'il existe plusieurs hypothèses émanant d'un désaccord entre différents auteurs. Schweinfurth (1894) avait insinué qu'il est originaire des pays montagneux du Sud d'Arabie (Yémen). La découverte de la nouvelle espèce de caroubier *Ceratonia oreothauma* Hillc., Lewis and Verde., considérée comme une espèce plus ancienne que *Ceratonia siliqua* et survivant dans les montagnes de l'Arabie (Oman) et de la Somalie (Hillcoat *et al.*, 1980) semble appuyer la précédente hypothèse. Par contre, Vavilov (1951) et De Candolle (1983) ont rapporté qu'il serait natif de la région Est méditerranéenne (Turquie et Syrie). Tandis-que des études archéobotaniques menées à partir

de restes carbonisés de bois et de fruits ont démontré que le caroubier était présent dans la méditerranée orientale au néolithique (4000 ans av. J.-C.) période initiale de la domestication des espèces ligneuses (Estrada et al., 2006). Par ailleurs, Zohary (1973) considère le caroubier comme une relique procédant de la flore Indo-Malaisienne dont sont aussi issus les groupes *Olea*, *Laurus*, *Myrtus*, et *Chamaerops*. Cette dernière hypothèse selon laquelle le caroubier aurait une origine tropicale, trouve ses arguments à partir de caractéristiques physiologiques importantes propres à l'espèce 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). Aussi, la longévité des feuilles qui est quasiment le double que chez la majorité des espèces méditerranéennes, les plus communes, tend à confirmer l'origine tropicale de la plante (Catarino, 1993).

1.3.4.2. Répartition biogéographique :

a. Dans le monde :

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) est un arbre typiquement méditerranéen, originaire du Moyen Orient, il est distribué dans toute la région du pourtour méditerranéen, dont l'aire de répartition s'étend sur l'Asie mineure, l'Afrique du Nord, l'Europe méridionale et la péninsule Ibérique (Fig.11). En effet, on le rencontre actuellement en allant de l'Espagne et du Portugal jusqu'en Turquie, en Syrie, en Yougoslavie, en passant par le Maroc, l'Algérie, la Tunisie, la Lybie, l'Egypte, la Grèce, le Liban, Chypre, l'Italie et la France (Boudy 1950 ; Rejeb 1995 ; Sbay et Abourouh, 2006 ; Abi Azar, 2007).

Le caroubier a été également, introduit avec succès dans plusieurs autres pays ayant un climat méditerranéen. C'est le cas en Australie, en Afrique du Sud, aux Etats Unis (Arizona, Californie du Sud), aux Philippines et en Iran (Evreinoff, 1947 ; dans Batlle et Tous, 1997). Généralement, la distribution des espèces arborescentes, telle que *Ceratonia siliqua* est limitée par des stress liés aux froids (Mitrakos, 1981). En effet, l'espèce *Ceratonia oreothauma* qui semble être plus sensible au froid a une répartition restreinte et limitée seulement à Omane et à la Somalie (Hillcoat et al., 1980). Dans les zones basses méditerranéennes (0-500 m, rarement 900 m d'altitude), le caroubier constitue une essence dominante et caractéristique du maquis des arbres sclérophylles (Zohary et Orsham, 1959).

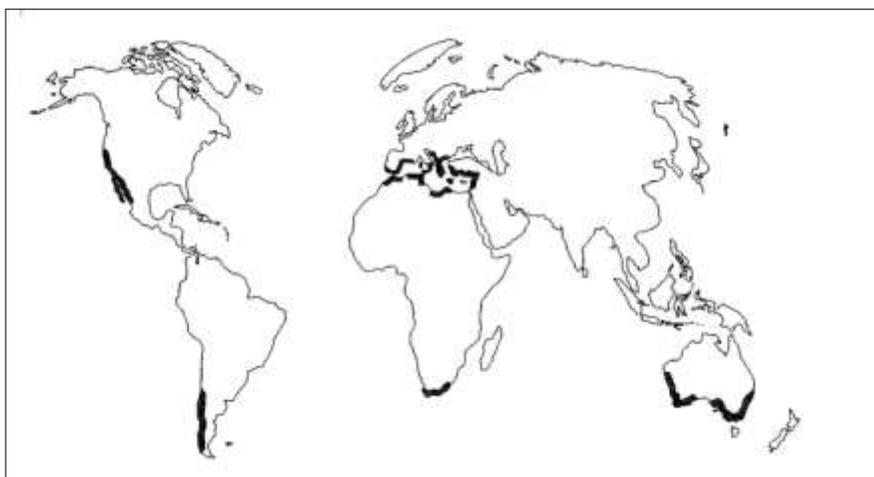


Fig. 11 : Centre d'origine et distribution du caroubier dans le monde (Batlle et Tous, 1997)

b. Dans la région méditerranéenne :

Melgarejo et Salazar (2003) considèrent que la Méditerranée est le centre de diversité du caroubier et que même si cette zone n'est pas le centre d'origine, le plus important aux yeux d'un améliorateur reste bel et bien que c'est dans le bassin méditerranéen qu'existe une plus grande diversité de l'espèce et pour autant c'est l'aire dans laquelle il est fort possible de trouver de nouveaux matériels génétiques avec une plus grande probabilité de réussite. Actuellement on trouve le caroubier dans plusieurs pays, de l'Europe et de l'Afrique du Nord à l'état sauvage en association avec, l'oléastre, le thuya, le pin, le chêne vert (Aafi, 1996 ; Batlle et Tous, 1997).

Au Maroc, le caroubier est localisé dans les plaines et les moyennes montagnes du Rif, du Moyen Atlas, du Haut Atlas et de l'Anti-Atlas et dans des bioclimats de type humide, subhumide, semi-aride et aride côtier à variantes chaude et tempérée. Il est souvent en association avec l'olivier, le lentisque, le thuya ou l'arganier. La principale population spontanée de caroubier est localisée dans les régions situées entre 600 et 1000 m d'altitude, en association avec d'autres espèces forestières et abritées des vents et du froid (Ait Chitt et al., 2007 ; Konate, 2007). Les peuplements de caroubier s'intègrent dans l'ordre des *Pistacio-Rhamnenalia* (Achhal et al., 1980), qui dans l'ensemble du pays jusqu'à 1150 m d'altitude à l'exception des zones très arides (Emberger et Maire, 1941 ; Metro et Sauvage, 1955 ; Quezel et Santa, 1962/63 ; Guinochet et Vilmorin, 1984). Sa densité à l'hectare varie de 5 à 25 pieds (Sbay, 2008).

En Tunisie, le Caroubier croît dans les conditions naturelles à l'état sauvage, en association avec l'olivier et le lentisque. Il est bien défini dans les étages humide, subhumide, et semi aride supérieur, à variante chaude à tempérée (Rejeb, 1989). Dans les conditions naturelles, on le rencontre à l'état sauvage en association avec l'olivier et le lentisque et en mélange, avec le callitris, mais le défrichement de ces associations, à la faveur des cultures vivrières et des arbres fruitiers, rend cette végétation de plus en plus rare en Tunisie (Rejeb, 1995).

c. En Algérie :

Le caroubier est fréquemment cultivé dans l'Atlas Saharien et il est commun dans le tell (Quezel et Santa, 1962). On le trouve à l'état naturel en association avec l'amandier, *Olea europea* et *Pistacia atlantica* dans les étages semi-aride chaud, subhumide et humide, avec une altitude allant de 100 m à 1300 m dans les vallons frais qui le protègent de la gelée ; avec une température de 5 °C jusqu'à 20 °C et une pluviométrie de 200 mm à 600 mm/an (Batlle et Tous, 1997 ; Benmahioul et al., 2011). Ses lieux de prédilection sont les collines bien ensoleillées des régions littorales ou sublittorales : Sahel algérois, Dahra, la Kabylie, vallée de la Sommam (1074 ha) et de l'Oued-Isser, collines d'Oran et des coteaux Mostaganem à étage semi-aride chaud, plaines d'Annaba, Mitidja et les vallées intérieures (1054 ha). Il descend jusqu'à Bou-Saâda, mais n'y porte pas de fruit, et dans la zone de Traras au Nord de Tlemcen (276 ha) (Lavallée, 1962 ; Zitouni, 2010). Selon l'étude de Gaouar (2011), l'aire de répartition du caroubier à Tlemcen est dans les régions suivantes : Sidi M'djahed, Sebra, Henaya, Tlemcen, Aïn Tellout, Sidi Abdli, Remchi, Ben Sekran, Aïn Youcef et de Beni Saf jusqu'à Marsat Ben M'hidi.

1.4. Ecologie du caroubier

Le caroubier appartient à l'écosystème "maquis du littoral méditerranéen" sur sols calcaires ; c'est une espèce thermophile, xérophile et héliophile. Il croît bien dans les régions tempérées et subtropicales et tolère les zones côtières chaudes et humides, mais il est très sensible au froid d'hiver, de sorte qu'il peut vivre seulement à proximité des côtes avec des altitudes de moins de 500 m, bien que dans certaines zones sa culture occupe des terrains plus élevés mais toujours avec des expositions adéquates (Melgarejo et Salazar, 2003).

Le caroubier est une espèce qui résiste très bien à la sécheresse (Zouhair, 1996 ; Sbay et Abourouh, 2006), il n'est devancé que par le pistachier cultivé (Evreinoff, 1955). Les études de Rejeb (1989) confirment que le caroubier se comporte comme une véritable espèce résistante à la sécheresse en s'adaptant morphologiquement et physiologiquement au manque d'eau.

De par ses aptitudes d'adaptation aux stress du sol et du climat, le caroubier pourrait contribuer au développement des zones défavorisées (Gharnit et al., 2006) actuellement appelées « zones d'ombres ». De plus, il est caractérisé par sa grande tolérance à la salinité avec une tolérance de 2 g/l de NaCl devançant ainsi entre autres 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. Ceci démontre que le caroubier peut jouer un rôle très important dans les zones salines, qui arrivent de jour en jour à gagner des terrains considérables, notamment dans le Nord-ouest de l'Algérie et particulièrement dans la région de Relizane. Le caroubier 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).

1.4.1. Exigences édaphoclimatiques

Le caroubier est une espèce typique de la flore méditerranéenne, bien définie dans l'étage humide, subhumide et semi aride (Hmamouchi, 1999). L'aire de répartition du caroubier s'étend dans les secteurs des plateaux et en moyennes montagnes jusqu'à 1700 m d'altitude (Baum, 1989 ; Zouhair, 1996 ; Sbay et Abrouch, 2006).

a. Le climat : Les zones propices à la culture du caroubier doivent être caractérisées par un climat méditerranéen subtropical, avec des hivers doux, des printemps suaves à chauds et des étés chauds à très chauds et secs (Batlle et Tous, 1997). Les arbres adultes ne nécessitent pas de froid hivernal, car 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) ; il est considéré comme une des espèces

Chapitre I : Synthèse bibliographique

méditerranéennes les plus vulnérables aux dommages causés par les basses températures (Albanell, 1990).

Le caroubier est une espèce très sensible aux gelées, 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. 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).

b. Le sol : le caroubier est un arbre peu exigeant quant au type de sol. 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).

c. L'apport en 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).

1.4.2. Multiplication et capacité germinative des graines

Le caroubier peut se reproduire par deux voies : la multiplication sexuée et la propagation végétative. La technique la plus utilisée pour la propagation du caroubier est le semis. Le substrat utilisé doit être léger et drainant. Ait Chitt et al. (2007) préconisent un mélange composé de sable (1/3) et de terre végétale (2/3). Quoique les graines de *Ceratonia siliqua* peuvent se maintenir intactes plusieurs années, il est conseillé d'utiliser celles issues de la récolte de l'année et de semer très tôt, généralement au printemps (Goor et Barney, 1968 ; Hong et al., 1996). Malheureusement ce mode de multiplication présente certains inconvénients, à savoir :

- la non conformité génétique : le semis donne généralement des plants hétérogènes et ne permet pas de reproduire avec certitude tous les caractères du pied-mère ;
- la complexité de l'espèce caractérisée essentiellement par sa dioïcie, sa haute hétérozygotie et sa croissance généralement moyenne rend impossible la détermination de son sexe à l'âge juvénile ;
- l'entrée en production est tardive : l'arbre commence à produire des gousses à partir de l'âge de 6 à 7 ans.

Bien que le bouturage est moins utilisé parce qu'il demande beaucoup plus de soins et une température édaphique élevée ; il a été pratiqué surtout par les Italiens (Rejeb, 1995).

Le caroubier a été décrit par Lee et al. (1977) et Hartmann et Kester (1983), comme une espèce capricieuse, très difficile à enraciner et à bouturer.

Le greffage consiste à greffer les pieds mâles par les femelles. Cette méthode permet aux arbres mâles de donner des fruits à partir de la troisième année, de produire des races garantissant la fructification et la préservation de la conformité des caractères sélectionnés chez la plante mère (Gharnit, 2003 ; Ait Chitt et al., 2007).

Les premières tentatives de multiplication *in vitro* du caroubier ont été réalisées par Martins-Louçao et Rodriguez-Barrueco (1981), qui n'ont observé qu'une formation de cal. Les premiers succès ont été obtenus par Sebastian et McComb (1986) et par Alorda et al. (1987).

Actuellement, la régénération du caroubier par culture *in vitro* est possible et de nombreux résultats encourageants ont été obtenus, portant principalement sur la micropropagation par bourgeonnement axillaire (Vinterhalter et Vinterhalter, 1992 ; Vinterhalter et al., 1992 ; Belaizi et al., 1994 ; Gharnit et Ennabili, 2009).

1.5. Les ravageurs et les maladies du caroubier

Bien que le caroubier soit une espèce résistante aux maladies, il peut cependant dans certaines conditions faire l'objet d'attaques par le sphaerella du caroubier (*Sphaerella cuprea*) qui macule de noir, parfois abondamment les folioles. De même, le tronc peut être attaqué par la petite cochenille blanche (*Aspidiotus hederæ* Vallot) (Fig.14). Cette dernière constitue généralement pour le caroubier une menace plus apparente que réelle car souvent, une coccinelle (*Chilocorus bipustulatus* L.), se charge de réduire l'invasion avant qu'elle n'ait atteint de trop grandes proportions.

En Espagne, l'insecte polyphage le plus redoutable est *Zeuzera pyrina* L. (Fig.12), en effet, sa larve attaque le bois du tronc et des branches et cause ainsi des dégâts importants. Un coléoptère, *Cerambyx velutinus*, peut également creuser des trous dans le tronc (Batlle et Tous, 1997). Les gousses peuvent être infestées par un petit polyphage : la pyrale du caroubier (*Myelois ceratoniae* Z.). Elle pond des oeufs sur les fleurs ou les gousses récemment formées, les larves pénètrent par la suite, dans les gousses et les détruisent. Stockées dans des conditions humides elles peuvent être également attaquées par la mite du caroubier (*Ectomyelois ceratoniae*), et par les larves d'un moucheron, *Asphondylia gennadii*.

La déformation de jeunes gousses peut être provoquée par le champignon *Oidium ceratoniae*. Ce dernier peut également causer des dégâts sur les feuilles (rouille surtout en atmosphère humide). Les rongeurs, surtout les rats, peuvent dans certaines conditions, grimper aux arbres et ronger l'écorce jusqu'à ce que les branches meurent (Sbay, 2008).

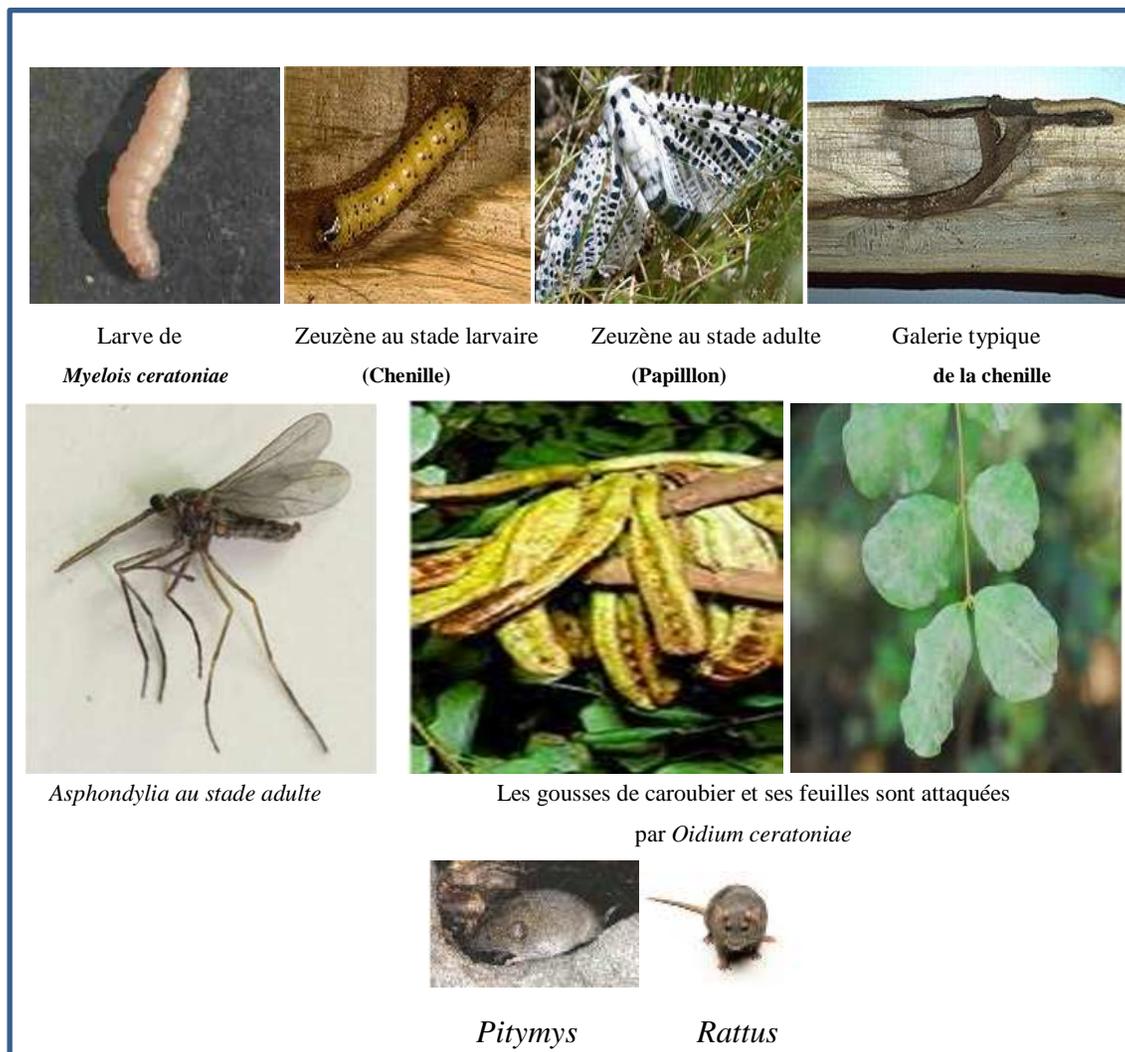


Fig. 12 : Les principaux ravageurs du caroubier (Batlle et Tous, 1997)

1.6. L'importance de l'espèce et son utilisation

Le caroubier se présente comme une essence à la fois forestière et arboricole. Il est d'une grande importance socio-économique et écologique puisque toutes ses parties (feuilles, fleurs, fruits, bois, écorces et racines) sont utiles et ont des valeurs dans plusieurs domaines (Aafi, 1996).

1.6.1. L'utilisation comme fourrage

Ceratonia siliqua est une espèce pastorale, il est à l'état de taillis émondé, ébranché ou à l'état de buisson, les pieds mâles sont souvent taillés pour le fourrage, ainsi, les feuilles sont utiles

pour l'alimentation des animaux (Rejeb *al.*, 1991 ; Gharnit, 2003). Les caroubes constituent un excellent aliment énergétique pour le bétail, la valeur fourragère de ses feuilles et de ses gousses est respectivement de 0,29 et de 1,15 unités fourragères par kilogramme de matière sèche (Putod, 1982), elle est comparable à celle de l'orge (1 UF/kg de matière sèche). Les gousses séchées, entières ou découpées, sont mélangées à du concentré et données aux chevaux, aux bovins, ovins, aux porcs et aux volailles (Rejeb, 1995). Lors de la préparation de la gomme de caroube, à partir de la graine, est généré un sous-produit très riche en protéines : le germe. Celui-ci, selon les régions, peut présenter de 35 % à plus de 50 % de taux de protéines. Il est très utilisé dans le domaine de l'alimentation du bétail au niveau mondial, et très particulièrement dans le domaine avicole, dans le cas du Maroc (Ait Chitt *et al.*, 2007 ; Haddarah *et al.*, 2013).

Selon les travaux de Lizardo *et al.* (2002), il semblerait que la farine de caroube soit un produit parfaitement adapté à l'alimentation des porcelets. Son incorporation dans les régimes s'avère très utile dans le soutien de la consommation, de la croissance et de la santé en post-sevrage.

1.6.2. L'utilisation des feuilles

Plusieurs études ont montré que l'utilisation des feuilles associées avec le polyéthylène glycol (PEG) améliore la digestibilité et la qualité nutritive des tanins contenus dans les feuilles (Priolo *et al.*, 2000), ces derniers ont été utilisés en Turquie, dans la médecine « traditionnelle » pour traiter la diarrhée et dans l'alimentation diététique et dans le traitement de l'obésité (Baytop, 1984 ; Berrougui, 2007). Les feuilles ont été également désignées comme étant porteurs d'activités cytotoxiques, antimicrobiennes, antioxydantes et antifongiques (Kivçak *et Mert*, 2002 ; Custodio *et al.*, 2011 ; Fadel *et al.*, 2011 ; Meziani *et al.*, 2015 ; Meziou-Chebouti *et al.*, 2015).

Corsia *et al.* (2002) ; Custodio *et al.* (2011) ont démontré la capacité extraordinaire des extraits de feuilles et de gousses à l'inhibition de la prolifération des cellules tumorales. L'extrait des feuilles du caroubier ont une activité hépatoprotectrice (Ibrahim *et al.*, 2013). Ben Hsouna *et al.* (2011) ont découvert que l'extrait de la feuille de caroubier présente quelques améliorations contre les dommages oxydatifs induits par le tétrachlorure de carbone (CCl₄) chez les tissus des rats. Les feuilles de *Ceratonia siliqua* exercent un fort effet

antioxydant et ils pourraient avoir un effet anti-inflammatoire en inhibant l'activité et l'expression des neutrophiles MPO, limitant ainsi leurs effets toxiques (Rtibi *et al.*, 2016 b; Rtibi *et al.*, 2017).

1.6.3. L'utilisation des gousses

En Egypte, les sirops à base de fruits de caroube constituent une boisson populaire (Batlle *et Tous*, 1997), les Arabes fabriquent avec la pulpe une boisson alcoolisée et les Kabyles fabriquent à partir du fruit un plat appelé tomina (Bonnier, 1990). Au Liban, les gousses de caroube sont principalement utilisées pour extraire la mélasse ou «débés » ce qu'on appelle la mélasse de caroube et la fabrication d'un produit laitier artisanal connu sous le nom de «Mekika ». Il est spécifique de la région (Haddarah *et al.*, 2013).

Les gousses du caroubier, ont été, jadis, utilisés en Egypte dans la médecine traditionnelle, mélangées à de la bouillie d'avoine, à du miel et à de la cire, soignaient la diarrhée. Les caroubes figuraient également dans des préparations vermifuges et soignaient troubles visuels et infections oculaires (Iserin, 1997).

Selon certains auteurs, les fibres solubles de la pulpe peuvent avoir un effet préventif ou curatif sur la santé humaine et animale, grâce à la réduction du risque de thrombose par le biais de la diminution de la pression sanguine et le niveau de cholestérol dans le sérum. (Williams *et al.*, 1995 ; Beagge *et al.*, 1996 ; Konate, 2007). En thérapeutique, cette essence est connue pour son effet hypocholestérolémiant, antiprolifératif, antidiarrhéique, et autres troubles digestifs, laxatif et nourrissant (Bourrougui, 2007). Par ailleurs, elle joue un rôle effectif dans la suppression des parasites intestinaux (Min *et Hart*, 2003) et dans le traitement de la diarrhée (Serairi-Béji *et al.*, 2000).

- La pulpe

La farine, obtenue en séchant, torréfiant et mouvant les gousses après les avoir débarrassées de leurs graines, peut servir comme matière première pour l'industrie agroalimentaire. Des recherches ont montré que la caroube peut constituer un bon candidat pour être utilisée comme un aliment fonctionnel ou comme un ingrédient alimentaire (Tsatsaragkou *et al.*, 2014 ; Biernacka *et al.*, 2017 ; Arribas *et al.*, 2019 ; Salih *et Jilal*, 2020) du fait qu'elle peut constituer une bonne source de polyphénols antioxydants (Owen *et al.*, 2003). Une fois torréfiée, la pulpe de caroube développe des caractéristiques sensorielles (goût et couleur) similaires à ceux de

la poudre de cacao (Durazzo *et al.*, 2014), mais et contrairement au cacao, la caroube ne contient pas le thiobromine (stimulants), la caféine et l'acide oxalique (composé toxique lorsqu'il est consommé en grandes quantités) (Biner *et al.*, 2007). La farine de caroube est appréciée pour son effet épaississant à faible concentration et son effet de retardement de la viscosité lors de la préparation au moment de la cuisson. Elle est extrêmement employée dans la fabrication des glaces, dont elle améliore la texture, la tenue dans le temps à la température, la tenue à l'acidité tout en réduisant les effets de cristallisation de l'eau (Ait Chitt *et al.*, 2007). Les composés bioactifs présents dans cette pulpe se sont révélés bénéfiques pour le contrôle de nombreux problèmes de santé tels que le diabète, les maladies cardiaques et le cancer du côlon en raison de leurs activités antidiabétiques, antioxydantes et anti-inflammatoires (Nassar-Abbas *et al.*, 2016 ; Rtibi *et al.*, 2016).

De nombreuses études cliniques ont souligné l'efficacité de la poudre de caroube dans le traitement des diarrhées aiguës infantiles (Serairi *et al.*, 2000), ce qui a été confirmé par l'étude clinique menée par Loeb *et al.* (1989). La pulpe est recommandée contre la tuberculose pulmonaire et les affections des bronches. En décoction, elle est, toutefois, antidiarrhéique et légèrement purifiante. Elle est utilisée pour le traitement de certaines maladies comme la gastrite, l'entérite, les angines, les rhumes, le cancer... (Crosia *et al.*, 2002 ; Gharnit, 2003 ; Ait Chitt *et al.*, 2007). En plus de son pouvoir nématocide démontré par les travaux d'El Allagui *et al.* (2007) qui est dû à sa teneur en composés phénoliques, la caroube possède aussi une activité antimicrobienne et antioxydante selon Ben Hsouna *et al.* (1986).

Par ailleurs, la pulpe a été le premier produit d'horticulture utilisé en fermentation, dans plusieurs pays méditerranéens (Merwin, 1981), pour la production industrielle de bioéthanol (Makris et Kefalas, 2004). Les extraits de gousses de caroube sont également utilisés pour la production d'éthanol par *Saccharomyces cerevisiae* (Turhan *et al.*, 2010b ; Yatmaz *et al.*, 2012 ; Germeç *et al.*, 2015), pour l'acide citrique (Makris et Kefalas, 2004), pour la production de β -mannanase (Yatmaz *et al.*, 2016 ; Germec *et al.*, 2017) et pour l'amélioration de la production d'acide lactique par *Lactobacillus casei* (Turhan *et al.*, 2010a).

1.6.4. L'utilisation des graines

Tous les constituants de la graine du caroubier (tégument, endosperme et cotylédon), jouent un rôle industriel et médical important, mais la gomme de caroube, obtenue en broyant

l'endosperme des graines (Goncalves et Romano, 2005) reste la plus importante. Cette gomme est utilisée à cause de polyphénol antioxydant contenu naturellement dans l'enveloppe tégumentaire (Makris et Kafalas, 2004), comme épaississant connu sous le code normalisé E410, agent stabilisateur, gélifiant, fixateur dans différents domaines de l'agroalimentaire (fromage, mayonnaise, salades...etc), la cosmétique (crèmes, dentifrices..etc), l'industrie pharmaceutique (médicaments, sirops..etc) (Batista et al., 1996 ; Biner et al., 2007 ; Dakia et al., 2007 ; Sandolo et al., 2007 ; Mattaus et Ozcan, 2011 ; Prajapati Vipul et al., 2013).

De part ses multiples usages, son application dans les domaines techniques est très large, elle est utilisée en imprimerie, la photographie, les textiles, les matières plastiques, l'encre, le cirage et les matières adhésives (Batlle et Tous, 1997)

Elle est principalement utilisée dans les aliments pour les enfants (Lizardo et al., 2002). Elle est également utilisée dans l'alimentation diététique humaine (Dakia et al., 2007) ou comme ingrédient potentiel dans les aliments dérivés des céréales pour les personnes coeliaques (Feillet et Roulland, 1998). Elle est aussi utilisée dans la fabrication d'un condiment aromatique du Sénégal appelé nététu (Ndir et al., 2000 ; Kaderi et al., 2014). En plus de toutes ces vertus, l'étude de Parrado et al. (2008) a démontré que la gomme de caroube, lorsqu'elle est utilisée comme biofertilisant après avoir été transformée en un extrait enzymatique hydrosoluble, exerce une action phyto-hormonale bénéfique et significative sur la croissance de la plante, le nombre de fleurs et le nombre de fruits par plant.

1.6.5. Les autres utilisations de l'arbre

L'écorce et les racines sont utilisées en tannerie grâce à leur teneur en tanins particulièrement dans l'achèvement et l'émaillage des peaux. El Hajaji et al. (2010) ont pu confirmer la présence dans l'écorce du caroubier de grandes quantités de composés polyphénoliques caractérisés par leurs activités antioxydantes qui sont très importantes pour la santé. Alors que le bois du caroubier appelé carouge (Rivière et Leco, 1900) est dur à grains fins ; il est utilisé pour la fabrication d'ustensiles et la production de combustible ainsi il est estimé dans la charbonnerie et la menuiserie et surtout comme bois de chauffe (Rejeb, 1995 ; Batlle et Tous, 1997 ; Hariri et al., 2009). En effet, le caroubier est une plante mellifère car ses fleurs sont très butinées par les abeilles, et sont utilisées par les apiculteurs pour la production du miel de caroube ou miel d'automne (Rejeb et al., 1991 ; Gharnit, 2003).

1.6.6. L'importance écologique

Le caroubier (*Ceratonia siliqua*) est une espèce agro-sylvo-pastorale ayant un énorme intérêt écologique, en raison de sa rusticité et de son adaptation aux contraintes de l'environnement. Le caroubier est de plus en plus recommandé pour le reboisement des zones arides et dégradées, comme étant une ressource précieuse de reforestation pour gérer l'érosion sur les terres marginales non adaptées à d'autres espèces agricoles (sols pauvres et salins et résistant à la sécheresse) ou la désertification (Batlle et Tous, 1997 ; Biner et al., 2007 ; Barracosa et al., 2007 ; Sbay, 2008). Ainsi, il peut être utilisé dans le reboisement pour lutter contre la propagation des incendies, comme arbre d'ornement et d'ombrage en bordure des routes et dans les jardins (tout au long des allées de la Californie, de l'Australie) (Batlle et Tous, 1997) et comme brise-vent compte tenu de sa couronne sphérique, et de son feuillage persistant, dense et brillant (Winer, 1980 ; Sidina et al., 2009 ; Yousif et Alghzawi, 2000). Il est retenu par la DGF pour son plan national de reboisement et lui accorde une place de choix pour certaines parties du barrage vert II et pour les zones d'ombres (DGF, 2021)

1.6.7. L'importance économique

Le caroubier pourrait constituer des plantations de choix dans les programmes réguliers de reboisement pour assurer un développement durable des zones rurales et à l'économie de montagne et peut contribuer à l'amélioration des ressources pastorales du pays (Rejeb, 1995 ; Batlle et Tous, 1997). En fait, la culture du caroubier et l'industrialisation de ses produits ont connu un développement remarquable en raison des multiples utilisations de ses graines et surtout la gomme de caroube est d'une grande importance dans l'industrie alimentaire (Correia et Martins-Loucao, 1995, 2005 ; Gonçalves et al., 2005). Ainsi, la caroube est une source de bon marché d'hydrates de carbone actuellement explorées comme matériaux pour la production de bioéthanol, avec plusieurs avantages par rapport à d'autres cultures agricoles riches en sucre (Vourdoubas et al., 2002 ; Sanchez et al., 2010 ; Turhan et al., 2010). Cet arbre constitue une vraie source de profit pour les arboriculteurs puisque le prix de vente de la caroube est très encourageant et la main d'œuvre (pour la cueillette) est moins coûteuse en comparaison avec les pays concurrents (Espagne, Portugal, Italie...) (Gharnit et al., 2006 ; Fadel et al., 2011). En Algérie, le caroubier constitue une véritable plus-value pour l'économie nationale, s'il est valorisé, sachant que les importations de l'Algérie de cacao sont passées de

Chapitre I : Synthèse bibliographique

5.000 tonnes en 2015 à 17.000 tonnes en 2019, alors qu'il était possible d'exploiter la poudre de caroube, reconnue mondialement par ses caractéristiques nutritionnelles, comme matière première dans la production du chocolat. L'exploitation de la poudre de caroube produite localement se veut une alternative à la poudre de cacao à même d'économiser des millions/an en devises, outre la création de postes d'emploi et le renflouement du Trésor public en devises, après le lancement de l'exportation de l'excédent de caroube (Algérie Presse Service, 2020).

1.7. La production du caroubier

Dans le monde : selon les données du FAOSTAT (2019), la production mondiale annuelle de la caroube est estimée à 136 539 tonnes, elle est essentiellement méditerranéenne ;(Afrique du nord et le sud de l'Europe). La plus grande production enregistrée, 41 909 tonnes, est celle du Portugal, contre une production de l'Algérie estimée à 4 042 tonnes, Maroc 21 983 tonnes, qui demeure le deuxième pays producteur mondial de caroube (Tableau 2).

Les productions de gousses et de graines dans les différents pays ne sont pas en parallèles, car il existe des différences dans les rendements en graines entre les cultivars et les variétés de type sauvage (Batlle et Tous, 1997).

Tableau. 2 : Production mondiale de la caroube (FAOSTAT 2019)

Pays	Production en tonnes (2017)
Portugal	41 909
Italie	28 910
Maroc	21 983
Turquie	15 016
Grèce	12 528
Chypre	5 378
Algérie	4 042
Espagne	2 600
Liban	2 226
Tunisie	847
Croatie	452
Israël	448
Ukraine	200
Monde	136 539

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Durant le siècle dernier, la production mondiale de caroube a connu une chute dramatique, elle est passée de 650.000 t en 1945 (Orphanos et Papaconstantinou, 1969) à 310.000 t en 1997 et 136 539 t en 2017 (Biner et al., 2007 ; FAOSTAT, 2019). La grande perte a été enregistrée en Espagne où la production a chuté de 400.000 t en 1930 à 150.000 t en 1990 jusqu'à 2600 t en 2017 (MAPA, 1994 ; FAOSTAT, 2019). Selon Batlle et Tous (1997), la régression accusée dans la production du caroubier a été principalement liée à la baisse des prix et aux programmes du développement des zones côtières au dépend des plantations de caroubier.

En Algérie : la superficie cultivée totale du caroubier en Algérie a fortement baissé, passant de 11000 ha en 1961 à 1000 ha en 2011 (FAOSTAT, 2012). En 2009, cette superficie était de 927 ha (tableau 3) dont 645 ha, soit 69,58 % de la superficie totale se trouvent dans la wilaya de Bejaia. Les agriculteurs locaux font manuellement la récolte des gousses à la fin de l'été, d'août à octobre. La production nationale de la caroube est estimée à 33841 Qx et se concentre principalement dans la wilaya de Bejaia avec une production de 18.417 Qx, ce qui représente 54,42 % de la production nationale (tableau 3), suivie par la wilaya de Blida (23,79 %) et Tipaza (16,55 %). La superficie cultivée du caroubier dans le Nord-ouest de l'Algérie (comprenant la wilaya de Tlemcen et Mascara) ne représente que 6 ha, soit 0,65 % de la superficie nationale, tandis que la production de la caroube est de seulement 0,39 %.

Tableau. 3 : Surface cultivée, production et rendement de la caroube en Algérie, année 2009 (données fournies par la DSA)

Wilaya*	Surface cultivée (ha)	Production (qx)	Rendement (qx/ha)
Bejaia	645	18417	28,6
Tipaza	105	5600	53,3
Blida	100	8050	80,5
Boumerdes	32	1080	40,0
Bouira	22	144	6,9
Mila	10	80	8,0
Tlemcen	5	100	20,0
B.B. Arreridj	4	20	5,0
Aïn-Defla	2	300	150
Mascara	1	30	30,0
Tizi-Ouzou	1	20	20,0
Total	927	33841	36,5

* les wilayas ont été classées par ordre décroissant selon la surface cultivée (ha).

1.8. Les ressources et la diversité génétique

L'étude de la variabilité du caroubier a été envisagée par des marqueurs morphologiques et agronomiques de la gousse, la graine, la feuille, la fleur, etc., puis par des marqueurs biochimiques (Batlle *et al.*, 1996 ; Barracosa *et al.*, 1996 ; Afif *et al.*, 2006 ; Gadoum *et al.*, 2019) et moléculaires : RAPD (Talhouk *et al.*, 2005 ; Konaté *et al.*, 2007 ; Afif *et al.*, 2008 ; Barracosa *et al.*, 2008) ; ADN nucléaire (Bures *et al.*, 2004 ; El Ferchichi Ouarda *et al.*, 2008) ; AFLP (Barracosa *et al.*, 2008 ; Caruso *et al.*, 2008) ; ISSR (Konaté *et al.*, 2009) ; EST-SSR (La Malfa *et al.*, 2014) ; nSSR (Di Guardo *et al.*, 2019).

Les caractères morphologiques des gousses et des graines constituent un marqueur quantitatif largement utilisé avec vigueur, productivité, résistance aux maladies, sexe de l'arbre et précocité comme caractères différenciant les cultivars de caroubier (Albanell *et al.*, 1996 ; Yousif *et al.*, 2000 ; Barracosa *et al.*, 2007 ; Naghmouchi *et al.*, 2009). Toutefois, Ces traits morphologiques peuvent être influencés par des facteurs environnementaux et comprennent d'une part des mesures biométriques portant sur la plante (taille et forme des gousses, des feuilles, longueur d'inflorescence, nombre de fleurs, etc.) et d'autre part des données qualitatives comme la couleur des gousses, la forme et la surface des gousses, le taux de graines (Batlle et Tous, 1997 ; Gharnit *et al.*, 2004 ; Korkmaz *et al.*, 2020). Actuellement, les cultivateurs se focalisent de plus en plus sur le critère rendement de graines, qui sont mieux valorisées et plus rentables (production de la galactomannane) que le produit de la pulpe.

En utilisant 12 caractères phénotypiques de fruits et de graines, Barracosa *et al.* (2007) ont signalé une grande diversité de 15 cultivars de caroube au Portugal. Pour les cultivars espagnols, Albanell *et al.* (1996) ; Melgarejo et Salazar, (2003) et Tous *et al.* (2009) ont montré une grande diversité dans les paramètres morphologiques des gousses et des graines dont l'Espagne, premier producteur mondial de caroubes et aussi le pays où il y a une plus grande diversité variétale de l'espèce.

De plus, une variabilité phénotypique importante présente chez 54 cultivars de *Ceratonia siliqua* L., récoltés dans le sud de l'Italie (Russo et Polignano, 1996 ; Russo et D'Andrea, 2002) ; de même, les résultats de la caractérisation phénotypique des gousses, des graines et des feuilles pour les caroubiers sauvages ou cultivés turcs indiquent un bon potentiel de variabilité génétique (Tetik *et al.*, 2011 ; Bostan et Kasko Arici, 2015 et Korkmaz *et al.*,

Chapitre I : Synthèse bibliographique

2020). Breugel et Stephan (1999) ; Haddarah *et al.* (2013) et Chami *et al.* (2018) ont identifié le potentiel de diversité de germoplasme du caroubier libanais en utilisant des traits morphologiques.

Les paramètres morphologiques des gousses et des graines montrent une grande diversité dans la population de caroubiers tunisiens ; le type et l'origine géographique des arbres utilisés comme source de variation (Naghmouchi *et al.*, 2009). Cependant, Au Maroc des approches morpho-chimiques et moléculaires ont été utilisés pour caractériser les caroubes cultivés ou spontanés (gousses, graines, feuilles et fleurs) de différentes régions du Maroc et ont permis de révéler une grande variabilité génétique entre ces populations étudiées (Gharnit *et al.*, 2006 ; Konaté *et al.*, 2007 ; Sbay *et al.*, 2008 ; Sidina *et al.*, 2009 ; Khelifa *et al.*, 2013 ; El Kahkahi *et al.*, 2014 ; El Kahkahi *et al.*, 2015 ; Seghir *et al.*, 2016). Sidina *et al.* (2009) ont souligné que les écorégions du nord du Maroc (Berkane, El Houceima Nador et Chefchaouen) semblent l'être similaires aux cultivars du côté nord du bassin méditerranéen (Albanell *et al.*, 1991 ; Barracosa *et al.*, 2007). Ainsi, le rendement des graines est relativement plus élevé dans ces populations du nord du Maroc. La similitude des caractéristiques de la caroube dans les deux côtés de la Méditerranée (Nord du Maroc et Sud de l'Europe), suggère qu'il existe un échange de matériel entre les deux régions.

Récemment, les caractères morphologiques des gousses et des graines ont été utilisés pour caractériser les populations de caroube recueillies dans deux îles de la Croatie (Srećec *et al.*, 2016).

En Algérie, la plupart des caroubiers sont sauvages et poussent au nord et nord-ouest du pays, les principales variétés connues de caroubier sont *Bouje* et *Altea* (variétés de Bejaia) (Mahdad et Gaouar, 2016). Selon Mahdad et Gaouar (2016) dans une perspective d'amélioration visant à valoriser le caroubier dans la région Nord-ouest de l'Algérie à travers la mise en place d'un programme d'amélioration génétique de l'espèce pour la tolérance au froid et le bon rendement en graines. Cependant, Boublenza *et al.* (2017) en torréfiant la pulpe de caroube mûre récoltée dans la région de Tlemcen, à l'ouest de l'Algérie dans différentes conditions (temps / température de torréfaction), le produit obtenu peut avoir des spécifications différentes telles que couleur modulée, l'arôme et le goût. Ainsi, étudier les effets de ces

Chapitre I : Synthèse bibliographique

derniers et les paramètres physicochimiques permettent de contrôler le processus d'obtention du meilleur produit.

Les variétés algériennes sont presque inconnues et aucune n'a été étudiée jusqu'à présent. Récemment, [Boublenza et al. \(2019\)](#) ont étudié les variations morphologiques de la caroube et sa composition chimique de dix régions différentes situées dans le nord de l'Algérie. L'étude a permis de classer les différentes variétés de caroubiers dont le premier groupe est pour les espèces de Tlemcen, Relizane et Sidi bel Abbes, la seconde comprend ceux de Tipaza et Ain Temouchent, et la troisième ceux de Boumerdes et Blida. Les variétés de Mostaganem, Chlef et Bejaia ne sont pas regroupées. Cette variabilité morphologique est influencée par l'environnement et les localisations géographiques ; ces deux paramètres ont un effet sur la qualité du caroubier cultivé. Les deux variétés de Mostaganem et Bejaia produisent un rendement élevé de graines qui sont utilisées pour produire de la gomme de caroube et de la farine de germe de caroube qui est riche en protéines. D'autre part, les gousses de Chlef et de Tlemcen ont une pulpe charnue et sont plus riches en sucres ; elles peuvent être valorisées et utilisées pour la production de poudre de caroube.

Selon l'étude d'[Afif et al. \(2006\)](#) basée sur des marqueurs biochimiques (des isozymes), chez 17 populations tunisiennes réparties dans quatre zones bioclimatiques, a révélé une grande diversité génétique et un niveau substantiel d'endogamie chez ces populations. Cependant, des études basées sur l'analyse enzymatique (isozymes) ont révélé des niveaux de polymorphisme très faibles entre les cultivars de différentes origines ([Tous et al., 1996](#)) et ceux du même origine ([Barracosa et al., 1996](#)). Vu le faible niveau du polymorphisme révélé par les marqueurs biochimiques et sa variabilité en fonction des conditions environnementales, il est souvent nécessaire d'utiliser les marqueurs moléculaires pour compléter l'évaluation et l'étiquetage des ressources génétiques

Partie 2 : Composition chimique et métabolites secondaires du caroubier

Sur le plan phytochimique, les recherches scientifiques ont démontré que la pulpe et les graines sont les deux principaux constituants de la gousse du caroubier et représentent respectivement 90 % et 10 % de son poids total (Sbay et Abourouh, 2006 ; Konaté, 2007). La caroube est un mélange complexe de métabolites primaires et secondaires, la présence de sucres et de fibres étant caractéristique de ces fruits, suivis d'une grande diversité de polyphénols. De nombreux minéraux et acides aminés sont également présents dans les caroubes (Goulas et al., 2016). Selon plusieurs auteurs, la composition chimique des différents constituants dépend, en général du cultivar, le sexe, de l'origine ou de la zone de culture et parfois de la période de récolte mais aussi aux conditions édapho-climatiques. (Orphanos et Papaconstantinou, 1969 ; Vardar et al., 1972 ; Calixto et Cañellas, 1982 ; Albanell et al., 1991 ; Sbay et Abourouh, 2006 ; Youssef et al., 2013).

2.1. La composition de la pulpe

La pulpe de caroube, constitue une bonne source de fibres alimentaires, de sucres et d'une gamme de composés bioactifs tels que les polyphénols. Elle est très riche en sucres (30-60 %), en particulier, le saccharose (65 à 75 % des sucres totaux), le fructose et le glucose (15 et 25 % des sucres totaux, respectivement), elle contient également des quantités appréciables de fibres jusqu'à 40 % (Khelifa et al., 2013), mais pauvre en protéines (2-6 %) et en lipides (0,4-0,8 %) dont les acides saturés et insaturés sont en proportions égales (Marakis, 1996; Santos et al., 2005 ; Silanikove et al., 2001 in press ; Yousif et Alghzawi, 2000 ; Berrougui, 2007).

La composition chimique de la pulpe varie en fonction des cultivars, de l'origine géographique, du temps de la récolte et des facteurs environnementaux (Owen et al., 2003 ; Ayaz et al., 2007 ; Biner et al., 2007 ; El Batal et al., 2011). Ainsi, Thomson (1971) a trouvé dans 40 cultivars un taux de sucres de 37 à 62 %, des protéines brutes de 2,2 à 6,6 %, des fibres brutes de 4,2 à 9,6 % et une teneur en cendre de 1.5 à 2.4 %. Alors que d'autres auteurs ont rapporté un contenu riche en polyphénols (16-20 % essentiellement des tanins) et en fibres alimentaires (jusqu'à 39,8 %) (Albanell et al., 1991 ; Yousif et Alghzawi, 2000 ; Santos et al., 2005; Biner et al., 2007; Youssef et al., 2009). Avallone et al. (1997) et Bengoechea et al.

(2008) ont rapporté des taux élevés en glucides (>50 %) avec une faible quantité de protéines (1-2 %) et des teneurs négligeables en matières grasses (0,5-0,7), et environ 18 % de cellulose et d'hémicellulose, et une teneur appréciable en minéraux.

2.1.1. Les sucres

Les gousses de caroube sont caractérisées par une teneur élevée en sucres (environ 500 g/kg) plus élevée que celle présente dans la betterave ou dans la canne à sucres (environ 200 g/kg) (Petit et Pinilla, 1995). Il est bien connu que le saccharose est le sucre le plus abondant dans la gousse de caroube (Calixto *et al.*, 1982 ; Gubbuk *et al.*, 2010), suivi par le glucose et le fructose, les teneurs des autres sucres (xylose, maltose) sont plus faibles et la cellulose et l'hémicellulose représentent un taux de 18 % (Tableau 4). Cependant, ces proportions varient selon les auteurs (Karkacier et Artik, 1995 ; Biner *et al.*, 2007 ; El Batal *et al.*, 2011 ; Haddarah *et al.*, 2013). Ces différences au sein de la littérature sont attribuées à de nombreux facteurs tels l'origine géographique, les conditions climatiques, la diversité entre les variétés, la récolte et le stockage, et les facteurs technologiques tels que l'extraction et les méthodes d'analyse (Owen *et al.*, 2003 ; Papagiannopoulos *et al.*, 2004 ; Ayaz *et al.*, 2007). En général, les caroubes cultivées ont une teneur en sucres plus élevée que les caroubes sauvages (Turhan *et al.*, 2013). La gousse du caroubier présente une valeur énergétique importante (17,5 KJ/g de M.S) (Avallone *et al.*, 1997 ; Biner *et al.*, 2007) et d'autres composés comme les vitamines.

2.1.2. Les polyphénols

Les polyphénols constituent l'un des groupes de substances les plus répandus chez les plantes après les terpénoïdes. Plusieurs milliers de polyphénols sont connus, englobant une grande variété de molécules constituées d'un ou de plusieurs cycles aromatiques avec des degrés variables d'hydroxylation, de méthylation et de glycosylation (Manganaris *et al.*, 2014). Les principales catégories de composés phénoliques présents dans la caroube sont les acides phénoliques, les gallotannins et les flavonoïdes (Goulas *et al.*, 2016). La caroube est une bonne source de polyphénols principalement les tannins (16-20 %) (Owen *et al.*, 2003 ; Biner *et al.*, 2007 ; Haddarah *et al.*, 2013). Cependant, les résultats sont très différents au sein de la littérature, non seulement en fonction des facteurs technologiques tels que les méthodes d'extraction et d'analyse, mais aussi de la génétique, de l'origine géographique, des conditions climatiques, de la récolte et du stockage (Papagiannopoulos *et al.*, 2004 ; Markis et Kefalas, 2004 ; Cavdarova *et al.*, 2014). Les polyphénols de caroube ont suscité un intérêt

scientifique ; ainsi, de nombreuses méthodes d'extraction ont été proposées pour récupérer les polyphénols de la caroube (Cavdarova *et al.*, 2014 ; Roseiro *et al.*, 2013 ; Almanasrah *et al.*, 2015). En outre, un brevet pour l'extraction et la purification de composés phénoliques a été enregistré par Baraldi *et al.* (2004).

a. Les phénols

Les phénols, subdivisés en acides benzoïque et cinnamique, sont la classe de polyphénols la plus abondante dans les gousses de caroubier. En effet, l'acide gallique et ses dérivés tels que le méthylgallate constituent la majorité des acides phénoliques (Papagiannopoulos *et al.*, 2004 ; Owen *et al.*, 2003). La caroube est l'une des sources les plus riches d'acide gallique puisque sa teneur a été estimée entre 23,7 mg/100g et 164,7 mg/100 g (Papagiannopoulos *et al.*, 2004 ; Owen *et al.*, 2003 ; Ayaz *et al.*, 2007). Selon la base de données Phenol-Explorer, seuls les châtaigniers et les clous de girofle avaient une teneur en acide gallique plus élevée que les caroubes. L'acide syringique, l'acide 4-hydrobenzoïque et l'acide gentisique sont également des acides benzoïques que l'on trouve dans la caroube (Goulas *et al.*, 2016).

La concentration d'acides cinnamiques dans les caroubes est relativement faible ; des extraits de caroubes contiennent de l'acide cinnamique, de l'acide coumarique, de l'acide férulique et de l'acide chlorogénique (Papagiannopoulos *et al.*, 2004 ; Ortega *et al.*, 2009 ; Roseiro *et al.*, 2013 ; Custodio *et al.*, 2011).

b. Les flavonoïdes

Les flavonoïdes représentent le groupe phénolique le plus diversifié, avec deux cycles aromatiques (A et B) associés par des liaisons C-C par un hétérocycle oxygéné de 3 C. Sur la base de l'état d'oxydation du cycle central, les flavonoïdes sont ensuite divisés en anthocyanes, flavonols, flavones, flavanones et isoflavonoïdes. Les caroubes sont particulièrement riches en flavonols tels que la quercétine, la myricétine, le kaempférol et leurs dérivés glucosidiques. Les rhamnosides de quercétine et de myricétine sont habituellement les flavonoïdes les plus abondants dans la caroube. La présence de flavones (apigénine, lutéoline et chrysoïdium), de flavanones (naringénine) ou d'isoflavones (génistéine) est faible (Papagiannopoulos *et al.*, 2004 ; Owen *et al.*, 2003 ; Ortega *et al.*, 2009).

c. Les Tanins

Les tanins constituent le groupe le plus caractéristique de polyphénols dans les caroubes et contribuent à leur astringence. Dans le jus de caroube, la concentration en tanins est dix fois plus élevée que dans le jus de raisin et elle diminue avec l'avancement de la maturation des fruits (Rababah *et al.*, 2011). Les tanins sont classés en formes hydrolysables et condensés (ou non hydrolysables). En général, les tanins hydrolysables sont considérés comme esters multiples d'acide gallique ou ellagique avec glucose et produits de leurs réactions oxydatives et sont connus sous le nom de tanins galloylés et ellagitannins, respectivement (Manganaris *et al.*, 2014).

D'autre part, les tanins condensés sont des proanthocyanidines oligomères et polymériques non hydrolysables (Khanbabaee et Van Ree, 2001). Avallone *et al.* (1997) ont signalé la présence de tanins hydrolysables et condensés dans différentes parties de la caroube. En particulier, les gousses de caroube contiennent une valeur moyenne de 2,75 mg de tanins condensés /g et 0,95 mg de tanins hydrolysables /g. D'un point de vue chimique, les tanins de caroube sont principalement des tanins condensés (proanthocyanidines), composé de groupes flavan-3-ol et de leurs esters galloylés, acide gallique, (+)-catéchine, (-)-gallate épicatechine, (-) -gallate d'épigallocatechine, delphinidine, pelargonidine et cyanidine (Papagiannopoulos *et al.*, 2004 ; Owen *et al.*, 2003).

2.1.3. Les fibres

Les fibres alimentaires sont un groupe hétérogène de substances, généralement divisées en fibres solubles et insolubles. La fibre de caroube est produite par extraction à l'eau de la pulpe de caroube pour éliminer la majorité des glucides solubles ; la teneur totale en fibres alimentaires variait habituellement de 30 à 40 % de la pulpe de caroube (Haber, 2002). Une méthode de fabrication de la fibre naturelle de caroube a été également brevetée (Marco *et al.*, 1997). La fraction de fibres alimentaires insolubles se compose de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de polyphénols insolubles et sa teneur minimale dépasse 70 % de fibres de caroube. La forte proportion de polyphénols présents dans la fibre de caroube la différencie des autres sources de fibres alimentaires. En général, la fibre de caroube est considérée comme une fibre principalement insoluble et pratiquement non fermentescibles (Nasar-Abbas *et al.*, 2016). D'autre part, la quantité de fibres alimentaires solubles est significativement plus faible

(max 10 g 100 g⁻¹ fibres de caroube) et contient des glucides simples. Enfin, la fibre de caroube a un grand effet sur la rhéologie de la pâte lorsqu'elle est utilisée comme ingrédient dans les produits de boulangerie (Tsatsaragkou *et al.*, 2014 ; Goulas *et al.*, 2016). Par conséquent, la différence dans la quantité de fibres rapportés dans la poudre de caroube est très probablement dûe aux différentes méthodes appliquées pour calculer les différentes fractions de fibres (Iipumbu *et al.*, 2008). Chez l'homme, la consommation de fibres de caroube a démontré un pouvoir antioxydant élevé (Kumazawa *et al.*, 2002) et un abaissement du taux de cholestérol et des triglycérides sérique (Zunft *et al.*, 2003).

2.1.4. Les acides aminés

A partir d'extrait de gousses, cinq acides aminés, en l'occurrence, l'alanine, la glycine, la leucine, la proline et la valine ont été isolés par Vardar *et al.* (1972) et deux autres composés, la tyrosine et la phénylamine, ont été rapportés par Charalambous et Paconstantinou (1966). La teneur en acides aminés des caroubes se compose d'un mélange de 17 résidus (acide aspartique, acide glutamique, sérine, glycine, histidine, arginine, thréonine, alanine, tyrosine, valine, proline, méthionine, isoleucine, leucine, cystéine, phénylalanine et lysine) (Ayaz *et al.*, 2009 ; Sigge *et al.*, 2011). L'acide aspartique, l'asparagine, l'alanine, l'acide glutamique, la leucine et la valine représentent ensemble environ 57 % de la teneur totale en acides aminés des gousses (Ayaz *et al.*, 2007). En général, les caroubes peuvent être considérées comme une bonne source d'acides aminés selon les normes de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) pour les protéines. Plus précisément, il contient les sept acides aminés essentiels (thréonine, méthionine, valine, isoleucine, leucine, phénylalanine et lysine) à des concentrations conformes aux normes de l'OMS. La farine de caroube broyée contient à peu près 4,45 % de protéines (Ayaz *et al.*, 2009).

2.1.5. Les cendres

Selon plusieurs auteurs (Calixto *et al.*, 1982 ; Albanell *et al.*, 1991 ; Avallone *et al.*, 1997 ; Batlle et Tous, 1997 ; Yousif et Alghzawi *et al.*, 2000 ; Iipumbu *et al.*, 2008 ; Yousef *et al.*, 2009), la teneur en cendres présentes dans la poudre de caroube variait entre 2 % et 6 % selon le type de caroube (Albanell *et al.*, 1991 ; Avallone *et al.*, 1997 ; Iipumbu *et al.*, 2008).

2.1.6. Les minéraux

Les caroubes sont un excellent réservoir de potassium et de calcium. La teneur en potassium varie entre 970 mg 100 g⁻¹ poids sec et 1120 mg 100 g⁻¹ poids sec, alors que la concentration en calcium atteint 300 mg 100 g⁻¹ poids sec (Ayaz *et al.*, 2007 ; Ayaz *et al.*, 2009 ; Sigge *et al.*, 2011 ; Oziyci *et al.*, 2014). Compte tenu du fait que le lait de vache contient en moyenne 1200 mg de calcium par litre (une portion de caroube contient une concentration presque équivalente de calcium avec une tasse de lait) (Singh *et al.*, 2007). Des macrominéraux tels que le phosphore et le magnésium ont également été trouvés dans les caroubes à des concentrations plus faibles. Les gousses de caroube contiennent également de nombreux microminéraux, dont le fer, le cuivre, le zinc, le manganèse, le nickel, le baryum, le cobalt, etc. Parmi les microminéraux, le fer a la concentration la plus élevée. Enfin, ses graines contiennent généralement des macrominéraux et des microminéraux plus élevés que les gousses (Ayaz *et al.*, 2007 ; Ayaz *et al.*, 2009 ; Sigge *et al.*, 2011 ; Oziyci *et al.*, 2014). De plus une étude minéralogique récente faite par El Bouzdoudi *et al.* (2017) sur des caroubes cultivés au Maroc ont identifié cinq macroéléments et trente microéléments dans la gousse entière, la pulpe et la graine et ses divers constituants. La teneur en minéraux de la gousse est très variable. La richesse de la pulpe et des graines de caroube en éléments minéraux reflète l'importance attribuée à cet aliment depuis longtemps pour les nutriments animale et humaine.

2.1.7. L'humidité

La poudre de caroube contient une humidité qui varie selon les auteurs de 6 % à 15,6 % (Calixto *et al.*, 1982 ; Avallone *et al.*, 1997 ; Yousif et Alghazwi, 2000 ; Iipumbu *et al.*, 2008 ; Youssef *et al.*, 2009). Battle et Tous (1997) et Iipumbu *et al.* (2008) ont expliqué que cette variabilité est due aux conditions environnementales (pluie et humidité), aux cultivars de caroubier, à la durée de maturation, au moment de la récolte et à la durée de stockage (Albanell *et al.*, 1991 ; Avallone *et al.*, 1997 ; Iipumbu *et al.*, 2008).

2.1.8. Les cyclitols

Comme toutes les légumineuses, un ensemble de cyclitols avec ses multiples bénéfices pour la santé a été confirmé dans la caroube (Livesey, 2003). Le principal cyclitol est le D-pinitol (3-O-méthyl-D-chiro-inositol) et son contenu était très diversifié (1,0 à 8,5 g 100 g⁻¹ d.m.) dans la caroube. La concentration de D-pinitol est influencée par des facteurs génétiques et

Chapitre I : Synthèse bibliographique

environnementaux, surtout la teneur moyenne en D-pinitol des caroubes sauvages est plus élevée que celle des caroubes cultivés (Turhan, 2013).

Le D-pinitol revêt une grande importance, car il peut être utilisé comme marqueur de la falsification de la caroube par le cacao (Baumgartner et al., 1986). En outre, la caroube peut être considérée comme un excellent réservoir de D-pinitol et son procédé d'isolement a été breveté (Camero et Merino, 2004). Récemment, l'extraction assistée par ultrasons et l'extraction par fluide supercritique ont été proposés pour l'isolement de D-pinitol dans la caroube (Haber, 2002 ; Custodio et al., 2015). Enfin, le myo-inositol, D-(+)-chiro-inositol, ononitol (4-O-méthyl-myo-inositol), sequoyitol (5-O-méthyl-myo-inositol) et le bornésitol (1-O-méthyl-myo-inositol) n'a été détecté qu'à des concentrations infimes (Baumgartner et al., 1986).

Tableau 4. Composition chimique de la pulpe (en M.S de la pulpe)

Constituants	Poudre de caroube	Références
Hydrates de carbone	31,5-82,4 %	Shawakfeh et Ereifej, 2005 ; El batal et al., 2011 ; Youssef et al., 2013 ; El Kahkahi et al., 2015 ; Nasar-Abbas et al., 2015 ; Ouis et Hariri, 2017 ; Mahtout et al., 2018 ; Boublenza et al., 2019
Saccharose (%)	32-75 %	Albanell et al., 1991 ; Petit et Pinnila, 1995 ; Avallone et al., 1997 ; Batlle et Tous, 1997 ; Yousif et Alghzawi et al., 2000 ; Biner et al., 2007 ; Iipumbu et al., 2008 ; Gubbuk et al., 2010 ; Nasar-Abbas et al., 2015 ; Rtibi et al., 2017 ; Mahtout et al., 2018

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Glucose (%)	1,5-17,4 %	Avallone et <i>al.</i> , 1997 ; Batlle et Tous, 1997 ; Biner et <i>al.</i> , 2007 ; Iipumbu et <i>al.</i> , 2008 ; Gubbuk et <i>al.</i> , 2010 ; Nasar-Abbas et <i>al.</i> , 2015 ; Rtibi et <i>al.</i> , 2017 ; Mahtout et <i>al.</i> , 2018
Fructose (%)	1,8 - 17,9 %	Avallone et <i>al.</i> , 1997 ; Batlle et Tous, 1997 ; Biner et <i>al.</i> , 2007 ; Iipumbu et <i>al.</i> , 2008 ; Gubbuk et <i>al.</i> , 2010 ; Rtibi et <i>al.</i> , 2017 ; Mahtout et <i>al.</i> , 2018
Polyphénols totaux(%)	5,36-26,45%	Wursh et <i>al.</i> , 1984 ; Avallone et <i>al.</i> , 1997 ; Batlle et Tous, 1997 ; Ayaz et <i>al.</i> , 2007 ; Iipumbu et <i>al.</i> , 2008 ; Sahin et <i>al.</i> , 2009 ; Youssef et <i>al.</i> , 2009 ; Gubbuk et <i>al.</i> , 2010 ; Khelifa et <i>al.</i> , 2013 ; El Kahkahi et <i>al.</i> , 2015 ; Rtibi et <i>al.</i> , 2016 ; Rtibi et <i>al.</i> , 2017
Fibre (%)	4,8- 50 %	Shawakfeh et Ereifej, 2005 ; Ozcan et <i>al.</i> , 2007 ; Haddarah et <i>al.</i> , 2013 ; Youssef et <i>al.</i> , 2013 ; El Kahkahi et <i>al.</i> , 2015 ; Nasar-Abbas et <i>al.</i> , 2015 ; Rtibi et <i>al.</i> , 2016 ; Rtibi et <i>al.</i> , 2017 ; Boublenza et <i>al.</i> , 2019 ; Korkmaz et <i>al.</i> , 2020
Humidité (%)	4,35– 17,42 %	Calixto et Canellas, 1982 ; Avallone et <i>al.</i> , 1997 ; Iipumbu et <i>al.</i> , 2008 ; Yousif et Alghazwi, 2000 ; Youssef et <i>al.</i> , 2009 ; Fadel et <i>al.</i> , 2011 ;

Chapitre I : Synthèse bibliographique

		Khelifa <i>et al.</i> , 2013 ; Youssef <i>et al.</i> , 2013 ; El Kahkahi <i>et al.</i> , 2015 ; Ouis et Hariri, 2017 ; Mahtout <i>et al.</i> , 2018 ; Boublenza <i>et al.</i> , 2019
Cendre (%)	2- 6 %	Albanell <i>et al.</i> , 1991 ; Avallone <i>et al.</i> , 1997 ; Batlle et Tous, 1997 ; Bravo <i>et al.</i> , 1994 ; Calixto <i>et al.</i> , 1982 ; lipumbu <i>et al.</i> , 2008 ; Yousif et Alghzawi <i>et al.</i> , 2000 ; Yousef <i>et al.</i> , 2009
Proteine (%)	2- 7,6 %	Calixto et Canellas, 1982 ; Albanell <i>et al.</i> , 1991 ; Bravo <i>et al.</i> , 1994 ; Avallone <i>et al.</i> , 1997 ; Yousif et Alghzawi, 2000 ; Shawakfeh et Ereifej, 2005 ; Ayaz <i>et al.</i> , 2007 ; Ozcan <i>et al.</i> , 2007 ; lipumbu <i>et al.</i> , 2008 ; Youssef <i>et al.</i> , 2009 ; Fadel <i>et al.</i> , 2011 ; Haddarah <i>et al.</i> , 2013 ; Youssef <i>et al.</i> , 2013 ; Nasar-Abbas <i>et al.</i> , 2015 ; Ouis et Hariri, 2017 ; Rtibi <i>et al.</i> , 2017 ; Mahtout <i>et al.</i> , 2018 ; Korkmaz <i>et al.</i> , 2020

2.2. La composition chimique de la graine

Les graines de caroube sont constituées de trois différentes parties mais fortement liées. Il s'agit, de l'extérieur vers l'intérieur, deux enveloppes distinguées, l'une externe appelée *testa*, colorée et dure et l'autre interne nommée *tegmen* qui est plus blanche et molle (cuticule

marron, 30-33 %), un endosperme ou albumen, il se situe sous l'épisperme et constitue le tissu de réserve pour la germination de l'embryon (blanc et translucide, 42-46 %) un embryon ou un germe (23-25 %) (Neukom, 1988 ; Melgarejo et Salazar, 2003 ; Gharnit *et al.*, 2006). Elle contient essentiellement des antioxydants et de polysaccharides (galactose et mannose dans une proportion de 1 pour 4), l'enveloppe tégumentaire est considérée comme étant une source naturelle pour la production de polyphénols antioxydants (Batista *et al.*, 1996 ; Makris et Kefalas, 2004).

2.2.1. La cuticule

La cuticule ou l'enveloppe contient principalement de la cellulose, de la lignine et des tanins, des antioxydants (Batista *et al.*, 1996 ; Melgarejo et Salazar, 2003). Ces antioxydants naturels ne sont que les polyphénols naturellement présents dans l'enveloppe de la graine, qui sont valorisables dans l'industrie alimentaire (Makris et Kefalas, 2004).

2.2.2. L'endosperme

La partie la plus intéressante de la graine de caroube est l'endosperme qui est constitué de 2 téguments enrobant un germe. Sa composition chimique est pauvre en minéraux en fibres et en protéines. Par contre elle contient une quantité appréciable de lipides (Bouzouita *et al.*, 2007). Economiquement, c'est la partie la plus intéressante de la graine grâce à sa teneur élevée en galactomannane ou gomme de caroube. Cette partie de la graine est obtenue par décorticage afin de séparer les enveloppes et le germe des graines. Une fois broyés, les téguments donnent la gomme de caroube non purifiée (Kök *et al.*, 1998).

Cette gomme est une poudre blanche à blanc crème obtenue à partir de l'endosperme de la graine de caroube. Elle est composée d'un polysaccharide de haute masse moléculaire composé de galactomannane et sa concentration peut atteindre jusqu'à 85 % de la graine de caroube. La composition typique de la gomme (LBG) de haute pureté est de 10 à 13 % d'humidité, 5 % de protéine, 1 % de cendres, 1 % des fibres de et le reste est de 80 à 85 % de galactomannane (Maier *et al.* 1993). La gomme de caroube, extraite soit par traitement de la graine de caroube par l'eau bouillante (LBGw) ou par l'acide (LBGa), possède une grande portion d'eau et de protéines, et peu de lipides. Elle possède également des teneurs variables en sucres (Dakia *et al.*, 2007). Dakia *et al.* (2007) ont aussi exploré les teneurs de la gomme de caroube en sucres. Il s'est révélé que les teneurs en mannose et en galactose sont élevées

par la technique d'extraction LBGa (respectivement 64,9 % et 17,9 %) que par la technique d'extraction LBGw (respectivement 51,9 % et 14,6 %). Contrairement à ces valeurs, [Rizzo et al. \(2004\)](#) ont démontré que la gomme de caroube extraite par LBGw a des teneurs plus faibles en galactose et en mannose, respectivement ~40% et ~10 %. Récemment, quelques études ont également évoqué ce sous-produit de l'industrie comme une bonne source de polyphénols ([Bernardo-Gil, 2011](#) ; [Bouaziz et al., 2013](#)).

La taille et la structure moléculaires des galactomannanes revêtent une grande importance, car elles affectent grandement les propriétés fonctionnelles de la gomme de caroube ([Rizzo et al., 2004](#)). Les propriétés fonctionnelles de la gomme telles que la solubilité, la rhéologie, la viscosité, le taux d'hydratation, la formation de gel synergique et l'adsorption de l'eau ont été étudiées ([Barak et Mudgil, 2014](#) ; [Gillet et al., 2014](#)). Enfin, de nombreux travaux décrivent la nouvelle utilisation de la gomme (LBG) dans les produits alimentaires tels que les gelées, les aliments pour bébés, etc ([Aoki et al., 2001](#) ; [Bergmann et al., 2012](#)). La gomme (LBG) est également exploitée pour le développement de nouvelles barrières visant à améliorer les caractéristiques organoleptiques des produits alimentaires ([Yan et al., 2016](#)).

2.2.3. Le germe

La farine de germe (embryon) est riche en protéines (52 %) et en carbohydrates (27 %), avec 8 % de lipides (neutre), 7 % d'eau et 6 % de cendres. La caroubine, la protéine insoluble dans l'eau isolée à partir d'embryons de caroube, est un mélange composé d'un grand nombre de protéines polymérisées de taille différente ([Wang et al., 2001](#) ; [Bengoechea et al., 2008](#)). Certains auteurs ([Wang et al., 2001](#) ; [Smith et al., 2010](#)) indiquent que ce système de protéine possède les mêmes propriétés rhéologiques que le gluten, mais la caroubine a une structure plus ordonnée, avec des changements mineurs dans la structure secondaire lorsqu'elle est hydratée. Aussi, l'analyse de la composition chimique de la farine du germe du caroubier a montré une haute quantité d'acides aminés comme l'acide glutamique, l'acide aspartique et l'arginine ([Bengoechea, 2008](#)). Le germe comprend une concentration plus élevée de tanins (16,2 mg condensés tanins/g et tanins hydrolysables à 2,98 mg/g), alors que leur concentration dans les graines de caroube existe dans traces. Selon [El Bouzdoudi et al. \(2017\)](#) les graines présentent une teneur élevée en potassium (6,2 g/kg de MS, 4,3 g/kg de MF et 0,305

Chapitre I : Synthèse bibliographique

mg/graine) et une très faible teneur en sodium (0,17 mg/kg de MS, 0,13 mg/kg de MS et 0,01 mg/graine).

La composition chimique de la caroube et ses différentes parties a fait l'objet d'études approfondies pour différents pays de la région méditerranéenne. Il avait été observé que cette composition ne dépend pas seulement de facteurs technologiques tels que l'extraction et la méthode d'analyse, mais aussi sur le génotype de la plante, l'origine géographique, les conditions climatiques ; la récolte et les procédures de stockage (Owen *al.*, 2003 ; Biner *et al.*, 2007 ; El Kahkahi *et al.*, 2015).

Références bibliographiques

A

- Aafi, A., 1996.** Note technique sur le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.). Centre National de la Recherche Forestière, Rabat (Maroc), pp. 10.
- Abi Azar, R., 2007.** Complexation des protéines laitières par les extraits de gousses vertes de caroubier. Propriétés technologiques des coagulums obtenus. Thèse de Doctorat. Agroparistech. 195 p.
- Achhal, A., Akabli, O., Barbro, M., Benabide, A., M'Hirit, O., Peyre, C., Quezel, P., et Rivaz-Martinez, S., 1980.** A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. *Ecologia Mediterranea*, n°5 : 211-249.
- Afif, M., Ben Fadhel, N., Khoudja, M.L. & Boussaid, M., 2006.** Genetic diversity in Tunisian *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinioideae) natural populations. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 53 : 1501-1511.
- Afif, M., Messaoud, C., Boulila, A., Chograni, H., Bejaoui, A., Rejeb, M. N., & Boussaid, M., 2008.** Genetic structure of Tunisian natural carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) populations inferred from RAPD markers. *Ann. For. Sci.* 65, 710.
- Ait Chitt, A., Belmir, H., Lazrak, A., 2007.** Production des plants sélectionnés et greffés du caroubier. Transfert de technologie en Agriculture. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA MAPM/DERD 153, 1-4.
- Albanell, E., 1990.** Caracterización morfológica, composición química y valor nutritivo de distintas variedades de garrofa (*Ceratonia siliqua* L.) cultivadas en España. Tesis doctoral. Barcelona. España, pp. 209.
- Albanell, E., Caja, G., Plaixats, J., 1991.** Characteristics of Spanish carob pods and nutritive value of carob kibbles. In : Tisserand J.-L. (Ed.), Alibés X. (Ed.). Fourrages et sousproduits méditerranéens. Zaragoza : CIHEAM. p. 135-136 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n°16 : 135-136
- Albanell, E., Caja, G., Plaixats, J., 1996.** Characterization of carob fruits (*Ceratonia siliqua* L.), cultivated in Spain for agroindustrial use. *International Tree Crops Journal* 9: 1- 9.
- Almanasrah, M., Roseiro, L.B., Bogel-Lukasik, R., Carvalheiro, F., Brazinha, C., Crespo, J., Kallioinen, M., Mänttari, M., Duarte, L.C., 2015.** Selective recovery of phenolic compounds and carbohydrates from carob kibbles using water-based extraction. *Ind. Crop. Prod.* 70, 443-450.
- Alorda, M., estades, J., Galmes, J. et Medrano, H., 1987.** Promotion of rooting in carob cuttings. *Gartenbauwissenschaft*. 52 (1):31-34.
- Angiosperm Phylogeny Group III (APG III). 2009.** An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 105-121.
- Aoki, K.K., Sasaki, J., Shiotani, T., 2001.** Jelly Foods Containing Agar, Xanthan and Locust Bean Gum. Europe Patent EP1, 074,183 A2.

Arocas A., Sanz T., Fiszman S. M., 2009. Improving effect of xanthan and locust bean gums on the freeze-thaw stability of white sauces made with different native starches. *Food Hydrocolloids*, 23: 2478–2484.

Arribas C., Pereira E., Barros L., Alves M.J., Calhelha, R.C., Guillamón, E., Ferreira, I.C., 2019. Healthy novel gluten-free formulations based on beans, carob fruit and rice : Extrusion effect on organic acids, tocopherols, phenolic compounds and bioactivity. *Food chemistry*, 292: 304-313.

Avallone, R., Plessi, M., Baraldi, M. & Monzani, A., (1997). Determination of chemical composition of carob (*Ceratonia siliqua*): Protein, fat, carbohydrates, and tannins. *J. Food Com. Anal.* 10: 166-172.

Ayaz, F.A., Torun, H., Ayaz, S., Correia, P.J., Alaiz, M., Sanz, C., Gruz, J., Strnad, M., 2007. Determination of chemical composition of anatolian carob pod (*Ceratonia siliqua* L.): Sugars, amino and organic acids, minerals and phenolic compounds. *J. Food Qual.* 30, 1040–1055.

Ayaz F. A., Torum H., R. H. Glew, Bak Z. D., Chuang L.T., Presley J. M. & Andrews R., 2009. Nutrient Content of Carob Pod (*Ceratonia siliqua* L.) Flour Prepared Commercially and Domestically. *Plant Foods Hum Nutr* 64, 286–292.

B

Barak, S., Mudgil, D., 2014. Locust bean gum: Processing, properties and food applications—A review. *Int. J. Biol. Macromol.*, 66, 74–80.

Baraldi, M., 2004. Extract of *Ceratonia siliqua* Leaves and Pods Containing Polyphenols with Antioxidant and Antitumor Activities. U.S. Patent 20, 040,265,404 A1.

Barracosa, P., Almeida, M.T., et Cenis, J., 1996. Characterization of cultivars of carob tree in Algarve (Portugal). In: Proceeding of the III International Carob Symposium. Cabanas-Tavira, Portugal

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.

Barracosa, P., Lima, M.B., Cravador, A., 2008. Analysis of genetic diversity in Portuguese *Ceratonia siliqua* L. cultivars using RAPD and AFLP markers. *Scientia Hort.* 118 : 189-199.

Bastida, S., Sánchez-Muniz, F. J., livero, R., Pérez-Olleros, L., Ruiz-Roso, B., et Jiménez-Colmenero, F., 2009. Antioxidant activity of Carob fruit extracts in cooked pork meat systems during chilled and frozen storage, *Food Chemistry* Vol. 116, N° 3, pp. 748-754.

Battle, I., Tous, J., 1997. Carob tree *Ceratonia siliqua* L., Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 17, Gatersleben: Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Rome: International Plant Genetic Resources Institute. 92 pages.

Baum, N., 1989. Arbres et arbustes de l’Egypte ancienne, pp. 354

Baumgartner, S., Gennerritzmann, R., Haas, J., Amado, R., Neukom, H., 1986. Isolation and identification of cyclitols in carob pods (*Ceratonia-siliqua* L). *J. Agric. Food Chem.* 34, 827–829.

- Baytop, T., 1984.** « Thrapy with medicinal plant in Turkey (Past and present) », Publication of the Istanbul University, Istanbul. pp 3255.
- Beagger, M., Andersen, O., Neilsen, J. D., et Rytting, K. L., 1996.** Dietary fibre reduce blood pressure serum total cholesterol and platelet aggregation in rats. *British J. Nutr.* 75: 483-493.
- Bengoechea, C., Romero, A., Villanueva, A., Moreno, G., Alaiz, M., Milla'n, F., Guerrero, A., Puppo, M.C., 2008.** Composition and structure of carob (*Ceratonia siliqua* L.) germ proteins. *Food Chem.* 107, 675-683.
- Ben Hsouna, A., Trigui, M., Jaoua, S., 1986.** Evaluation of antimicrobial and antioxidant activities of the ethyl acetate extract of endemic *Ceratonia siliqua* leaves *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 34, N° 5, pp. 827-829.
- Benmahioul, B., Kaïd-Harche, M., Dagun, F., 2011.** Le caroubier, une espèce méditerranéenne à usages multiples. *Forêt méditerranée*, pp. 51–58 t. XXXII n°1.
- Bergmann, W., Reichel, M., 2012.** Producing a Locust Bean Gum Comprising Food Product, Preferably a Powdered Baby Food, Comprises Heating a Liquid Foodstuff Mixture and Spray Drying the Mixture. German Patent DE102, 011, 106,409A.
- Bernardo-Gil, M. G., Roque R., Roseiro L.B., Duarte L.C., Gírio, F., Esteves P., 2011.** Supercritical extraction of carob kibbles (*Ceratonia siliqua* L.). *J. of Supercritical Fluids* 59, 36– 42.
- Berrougui, G., 2007.** « Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.), une richesse nationale aux vertus médicinales, *Maghreb Canada Express* Vol. 5 », N° 9.
- Biner B., Gubbuk H., Karhan M., Akus M., Pekmezei M., 2007.** « Sugar profiles of the pods of cultivated and wild types of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.) in Turkey». *Food chemistry* 100: pp. 1453-1455.
- Biernacka B., Dziki D., Gawlik-Dziki U., Różyło R., Siastala, M., 2017.** Physical, sensorial, and antioxidant properties of common wheat pasta enriched with carob fiber. *LWT*, 77: 186-192.
- Biesalski, H.K., Hemmes, C., Hopfenmaller, W., Schmid, C., Gollnick, H.P., 1996.** Effects of controlled exposure of sunlight on plasma and skin levels of β -carotene, *Free Radio Res*, 24: 215-224.
- Blaizi, M., Bolein, M. R., et Boxus, P., 1994.** « Régénération in vitro et acclimatation du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) », in *Quel avenir pour l'amélioration des plantes ?* Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris, pp : 227-232.
- Bock, B., 2012.** Base de Données Nomenclaturale de la Flore de France. Tela Botanica. BDNFF v4.02. (<http://www.tela-botanica.org>)
- Bonnier, G., 1990.** La grande flore en couleurs (tome 3), pp.309-310.
- Bostan, S. Z., Kaşko Arici Y., 2015.** Evaluation of some Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Genotypes in Silifke (Mersin, Turkey) province by Cluster Analysis. *Fruit Science*, 2(1): 35-41.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Bouaziz, A., Zidi, I., Mnif, W., 2013.** La gomme de caroube : trésor industriel ?. Microbiol. Hyg. Alim.-Vol 25, N° 72.
- Boublenza, I., Lazouni, H.D., Ghaffari, L., Ruiz, K., Tixir, A.S.F., Chemat, F., 2018.** Etude et valorization de la caroube *Ceratonia siliqua* L. torréfiée. Th. Doc. Biologie., ABOUBEKR Belkaïd –Tlemcen.104 p.
- Boublenza, I., El Haitoum, A., Ghezlaoui, S., Mahdad, M., Vasai, F., et Chemat, F., 2019.** Algerian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations. Morphological and chemical variability of their fruits and seeds. *Scientia Horticulturae*, 256, 108537.
- Boudy, P., 1950.** « Economie forestière Nord-Africain (tome II) : Monographie et traitement des essences forestière ». Ed. Larose, Paris, pp.443-445.
- Bouzouita, N., Khaldi,A., Zgoulli,S.,Chebil,L.,Chekki,R., M.M.Chaabouni,M.M.,et Thonart,P., 2007.** The analysis of crude and purified locust bean gum: A comparison of samples from different carob tree populations in Tunisia Food Chemistry Vol. 101, N°4, pp. 1508-1515.
- Bozzano, M., Jalonen, R., Thomas, E., Boshier, D., Gallo, L., Cavers, S., Bordács, S., Smith, P., Loo, J., 2014.** Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. Forest Ecology and Management, Vol 333: 66-75
- Breugel, P.V. et Stephan, J., 1999.** Carob distribution in Lebanon. FAO-IHEAM Nucis Newsletter 8: 30.
- Bureš, P., Pavlíček, T., Horová, L., et Nevo, E., 2004.** Microgeographic genome size differentiation of the carob tree, *Ceratonia siliqua*, at ‘Evolution Canyon’. Israel. *An. Bot.* 93: 529-535.

C

- Cabrita, R., Graça, J. M., schwab, L., et Martins-Loução., 1988.** Evaluation of paraters affecting the rootings of hardwood cutting in *Caratonia siliqua* L. in Proceedings of the II International Carob Symposium (P. Fito and Mulet, eds.). Valencia, Spain. pp. 237-244.
- Calixto, F. S., et Canellas, J., 1982.** Components of nutritional interest in carob pods *Ceratonia siliqua*, Journal of the Science of Food Agriculture N°33, pp. 1319– 1323.
- Camero, B.M., Merino, C.S., 2004.** Method of Obtaining Pinitol from Carob Extracts. U.S. Patent 6699511 B2.7p
- Carlson, W. A., 1986.** The carob: Evaluation of trees, pods and kernels. The international Tree Crops Journal. 3 : 281–290.
- Caruso, M., La Malfa, S., Pavlíček, T., Frutos Tomñs, D., Gentile, A., & Tribulato, E., 2008.** Characterisation and assessment of genetic diversity in cultivated and wild carob (*Ceratonia siliqua* L.) genotypes using AFLP markers, The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 83:2, 177-182,
- Catarino, F., 1993.** Le caroubier une plante exemplaire. Naturopa conseil de l’Europe. Centre Naturopa. N° 73, pp. 14-15.
- Catarino, F.M. & Bento-Pereira, F., 1976.** Ecological characteristics and CO2 fixation in a xerophytic plant (*Ceratonia siliqua* L.). Vardar, Sheikh, Ozturk. Turquia.

- Cavallaro, V., Barbera, A. C., Maucieri, C., Gimma, G., Scalisi, C., Patanè, C., 2016.** Evaluation of variability to drought and saline stress through the germination of different ecotypes of carob (*Ceratonia siliqua* L.) using a hydrotime model. *Ecological Engineering*. 95 : 557-566.
- Cavdarova, M., Makris, D.P., 2014.** Extraction kinetics of phenolics from carob (*Ceratonia siliqua* L.) kibbles using environmentally benign solvents. *Waste Biomass Valoris*. 5, 773–779.
- 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., et Chalak, L., 2018.** Assessment of Ancient Carob Germplasm of Lebanon by Morphological Traits. *Journal of the American Pomological Society* 72(4) : 260-278.
- Charalamabous, J. and Papaconstantinou, J., 1966.** Current result on the chemical composition of the carob bean. In the composition uses of carob bean (J. Charalambous, ed.). Cyprus Agricultural Research Institute Ministry of Agriculture and Natural Resources Nicosia, Cyprus. 25 p
- Christodoulakis, N.S. et Mitrakos, K.A., 1987.** Structural analysis of sclerophylly in eleven evergreen phanerophytes in Greece. *NATO ASI series G*. 15 : 547-551.
- Correia, P. J., & Martins-Loucao, M. A., 1995.** Seasonal variations of leaf water potential and growth in ferrigated carob-trees (*Ceratonia siliqua* L.). *Plant and Soil*, 172, 199–206.
- Correia, P. J., & Martins-Loucao, M. A., 2005.** The use of macronutrients and water in marginal mediterranean areas : the case of carob-tree. *Field Crops Research*, 91, 1–6.
- Corsia, L., Avallonea, R., Cosenzab, F., Farinab, F., Baraldia, C. & Baraldia, M., 2002.** Antiproliferative effects of *Ceratonia siliqua* L. on mouse hepatocellular carcinoma cell line. *Fitoterapia*. 73 : 674-684.
- Craig, W. J., et Nguyen, T. T., 1984.** Caffeine and theobromine level in cacao and carob products. *J. Food Sci.* 49:302-305.
- Cronquist, A., 1981.** An Integrated System of Classification of Flowering Plants. Columbia University Press, New York, 248-250.
- Custodio, L., Fernandes, E., Escapa, A. L., Aligué, R., Albericio, F., et Romano, A., 2011.** In vitro cytotoxic effects and apoptosis induction by a methanol leaf extract of carob tree (*Ceratonia siliqua*), *J. Med. Plants Res.* 5, 1987– 1996.
- Custodio, L., Escapa, A.L., Fernandes, E., Fajardo, A., Aligue, R., Albericio, F., Neng, N., Nogueira, J.M.F., Romano, A., 2011.** Phytochemical profile, antioxidant and cytotoxic activities of the carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) germ flour extracts. *Plant. Food. Hum. Nutr.* 66, 78–84.
- Custodio, L., Patarra, J., Albericio, F., Neng, N.R., Nogueira, J.M., Romano, A., 2015.** In vitro antioxidant and inhibitory activity of water decoctions of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) on cholinesterases, -amylase and -glucosidase. *Nat. Prod. Res.* 29, 2155–2159.

D

- Daget, P., 1977.** Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation ? *Végétation* 34:1–20

Dakia, P. A., Blecker, C., Robert, C., Wathelet B., Paquot, M., 2008. Composition and physicochemical properties of locust bean gum extracted from whole seeds by acid or water dehulling pre-treatment. *Food Hydrocolloids*, 22(5), 807-818.

Darley, E., et Sarafis, V., 1996. Physiological plant anatomy of the phloem in seedlings of the carob. In: Proc. Third International Carob Symposium (Tavira, Portugal), University of Lisbon: Portugal.

Debrach, J., 1953. Notes sur les climats du Maroc occidental. *Maroc Oriental* 32(242) :1122–1134

De Candolle, A., 1983. L'origine des plantes cultivées. Balière, Paris, France. 397p

De Martonne, E., 1926. Aréisme et indice d'aridité. *Compt Rend Acad Science* 181:1395–1398.

Diamantoglou, S., et Mitrakos, K., 1981. Leaf longevity in Mediterranean evergreen sclerophylls. In *Components of Productivity of Mediterranean Climate Region. Basic and Applied Aspects* (N.S.Margaris and H.A. Mooney, eds), Junk Publishers, The Hague ISBN. 90: 6193-9445. pp: 17-19.

Di Guardo, M., Scollo, F., Ninot, A., Rovira, M., Hermoso, J. F., Distefano, G., La Malfa, S., & Batlle, I., 2019. Genetic structure analysis and selection of a core collection for carob tree germplasm conservation and management. *Tree Genetics & Genomes* **15**, 41.

Durazzo A, Turfani V, Narducci V, Azzini E, Maiani G, Carcea M. 2014. Nutritional characterisation and bioactive components of commercial carob flours. *Food Chem* 153:109–13.

E

El Allagui, N., Tahrouch, S., Bourijate, M., et Hatimi, A., 2007. Action de différents extraits végétaux sur la mortalité des nématodes à galles du genre *Meloidogyne* ssp., *Acta Botanica Gallica*, 154:4, 503-509,

El Batal, H., Hasib, A., Ouatmane, A., Dehbi, F., Jaouad, A. and Boulli, A., 2011. Sugar composition and yield of syrup production from the pulp of Moroccan carob pods (*Ceratonia siliqua* L.). *Arab. J. Chem.*, 9 (2), 955–959.

El Batal, H., Hasib, A., Ouatmane, A., Boulli, A., Dehbi, F., Jaouad, A., 2013. Yield and composition of carob bean gum produced from different Moroccan populations of carob (*Ceratonia siliqua* L.). *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (2): 309-314.

El Bouzdoudi, B., Saïdi, R., Embarch, K., El Mzibri, M., Nejjar El Ansari, Z., El Kbiach, M.L., Badoc, A., Patrick, M., Lamarti, A., 2017. Mineral composition of mature carob (*Ceratonia siliqua* L.) pod : study. *Int. Food Sci. Nutr. Eng.* 7 (4), 91–103.

El Ferchichi Ouarda, H., Naghmouchi, S., Walker, D.J., Correal, E., Boussaïd, M., Larbi Khouja, M., 2008. Variability in the pod and seed parameters and nuclear DNA content of Tunisian populations of *Ceratonia siliqua* L. *Agroforest Syst* 74(1): 73-81.

EL Hajaji, H., Lachkar, N., Alaoui, K., Cherrah, Y., Farah, A., Ennabili, A., El Bali, B. & Lachkar, M., 2010. Antioxidant activity, phytochemical screening, and total phenolic

Chapitre I : Synthèse bibliographique

content of extracts from three genders of carob tree barks growing in Morocco. *Arabian Journal of Chemistry*.

El Kahkahi, R., Zouhair, R., Ait Chitt, M., Errakhi, R., 2014. Morocco carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *Int. J. Pure App. Biosci.* 2 (4) : 38-47.

El Kahkahi, R., Mouhajir, M., Bachir, S., Lemrhari, A., Zouhair, R., Ait Chitt, M., Errakhi, R., 2015. Morphological and Physiological Analysis of Salinity Stress Response of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. *Science International* 3 (3): 73-81.

El Kahkahi, R., Zouhair, R., Diouri, M., Ait Chitt, M., et Errakhi, R., 2015. Morphological and biochemical characterization of Morocco carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Int. J. Biol Med Res.* 6 (2): 4946-4952.

El-Refaey F.A. El-Dengawy., Ahmed A. Hussein., Saad A. Alamri., 2011. Improving Growth and Salinity Tolerance of Carob Seedlings (*Ceratonia siliqua* L.) by *Azospirillum* Inoculation. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 11 (3): 371-384.

Emberger, L. et Maire, R., 1941. Catalogue des plantes du Maroc (Spermaphytes et Pteridophytes). Imprimerie Minerva. Alger. Vol 4. 1171 p.

Eshghi, S., Rostami, A.A., Jamali, B., 2018. Carob tree: a suitable species for the future. *Acta Hort.* 1190, 67-70

Estrada, C., Vázquez, M., Melis, B. & Vadell, J., 2006. Fruticultura de secano. El Algarrobo. In: Labrador. J, Porcuna. J.L & Bello. A (Cords), Manual de agricultura y ganadería ecológica. Eumedia. España, pp. 186-195.

Evreinoff, V. A., 1947. Agriculture tropicale ; Le caroubier ou *Ceratonia siliqua* L., *Rev. Bot. Appl.* 389-401.

Evreinoff, V.A., 1955. Le pistachier. *Journal d'Agriculture Tropicale et de Botanique Appliquée.* 2: 389-414.

Evreinoff, V.A., 1960. Étude pomologique sur le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.). *Trav. Lab. For. Toulouse* 1(VI): 14 p.

F

Gaouar, N., 2011. Etude de la valeur nutritive de la caroube de différentes variétés Algériennes. Mémoire de Magistère. Université de Tlemcen. 95 p.

Fahn, A., Cutler, D.F., 1992. Xerophytes. Gebrüder Borntraeger, Berlin, p. 180

FAOSTAT. 2013. 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 Bull.* 35 : 273-277.

Feillet, P., & Roulland, T. M. 1998. Caroubin : A gluten-like protein isolate from carob bean germ. *Cereal Chemistry*, 75, 488–492.

Fletcher, R., 1997: Carob agroforestry in Portugal and Spain in the Australian New Crops Newsletter Issue No 7.4p

Fournier, P., 1977. Les quatre flores de la France (générale, alpine, méditerranéenne, littorale). *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, vol. 47, no 3, p. 90-90.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Foury, A., 1954. Les légumineuses fourragères au Maroc. *Les Cahiers de la Recherche Agronomique (Rabat)* 3-5: 33-38.

Frutos, D., 1988. Efecto de los ácido sulfúrico y giberelico (GA3) en la germinación del galgarrobo (*Ceratonía siliqua* L.). in Proceeding of the II International Carob Symposium (P. Fito and A. Mulet, eds.). Valencia, Spain. pp. 265-280.

G

Gadoum, A., Adda, A., Sahnoune, M., Aid, F., 2019. Physiological and biochemical responses of three ecotypes of carob (*Ceratonía siliqua* l.) Against drought stress in Algeria. *Applied Ecology and Environmental Research* 17(2):1929-1945

Gaouar, N., 2011. Etude de la valeur nutritive de la caroube de différentes variétés Algériennes. Mémoire de Magistère. Université de Tlemcen. 95 p.

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

Germeç, M., Turhan, İ., Karhan, M., Demirci, A., 2015. Ethanol production via repeated batch fermentation from carob pod extract by using *Saccharomyces cerevisiae* in biofilm reactor. *FUEL*, vol.161, pp.304-311.

Germec, M., Yatmaz, E., Karahalil, E., Turhan, I., 2017. Effect of different fermentation strategies on beta-mannanase production in fed-batch bioreactor system. *Biotech*, 7(1)77p.

Gharnit, N., 1997. Le caroubier (*Ceratonía siliqua* L.) : essais de propagation in vitro et intérêt socio-économique au Cercle de Mokrisset (NW du Maroc). Mémoire DESA, N° 576. 5, GHA., Université Abdelmalek Essaadi, Faculté des Sciences de Tétouan (Maroc). 48 p.

Gharnit, N., El Mtili, N., Toubi Ennabilin A., Ennabili, A., 2001. Social characterisation and exploitation of carob tree (*Ceratonía siliqua* L.) from Mokrisset and Bab Taza (NW of Morocco). *Science Letters* 3(2): 10 p.

Gharnit, N., 2003. Caractérisation du caroubier (*Ceratonía siliqua* L.) originaire de la Province de Chefchaouen (Nordouest du Maroc). Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et Techniques, Tanger, 141 p

Gharnit, N., El Mtili, N., Ennabili, A., et Sayah, F., 2005. Caractérisation foliaire du caroubier (*Ceratonía siliqua* L.) originaire de la province de Chefchaouen (Nord-ouest du Maroc). *J Bot Soc Bot France* 31: 75-84.

Gharnit N., El Mtili N., Ennabili A., Sayah F., 2006a. Importance socio-économique du caroubier (*Ceratonía siliqua* L.) dans la Province de Chefchaouen (nord-ouest du Maroc). *J. Bot. Soc. Bot. France* 33: 43-48.

Gharnit N., El Mtili N., Ennabili A., Sayah F., 2006b. Pomological characterization of carob tree (*Ceratonía siliqua* L.) from the province of Chefchaouen (NW of Morocco). *Moroccan J. Biol.* 2-3: 1-11.

Gharnit, N. & Ennabili, A., 2009. Essais préliminaires de culture *in vitro* du caroubier (*Ceratonía siliqua*) originaire du nord-ouest du Maroc. *Biomatec Echo.* 3: 18-25.

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. 205p.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Gillet, S., Blecker, C., Aguedo, M., Laurent, P., Paquot, M., Richel, A., 2014.** Impact of purification and process on the chemical structure and physical properties of locust bean gum, Carbohydr. Polym. 108, 159-168.
- Giordano, L., 2008.** «Taille et greffe». Ed. Hachette, Paris, 122p.
- Goldblatt, P., 1981.** Cytology and phylogeny of the leguminosea. In: Polhill R.M & Raven P.H., (Eds). Advances in Legume Systematic. Vol. 2. Royal Botanic Gardens, Kew, England, pp. 237-464.
- Gonçalves, S. et Romano, A., 2005.** Locust bean gum (LBG) as a gelling agent for plant tissue culture media. Scientia Horticulturae, 106(1): 129-134.
- Gonçalves, S., Correia, P.J., Martins-Loução, M.A. & Romano, A., 2005.** A new medium formulation for *in vitro* rooting of carob tree based on leaf macronutrients concentrations. Biologia plantarum 49: 277-280.
- Goor, A. Y. et Barney, C. W., 1968.** Forest tree planting in arid zones. New York: Ronald Press. 409p.
- Goulas, V., Stylos, E., Chatziathanasiadou, M.V., Mavromoustakous, T., Tzakos, A.G., 2016.** Review functional component of carob fruit : linking the chemical and biological space. Int. J. Mol. Sci. 17, 1875.
- Goycoolea, F.M., Morris, E.R., Gidley, M.J., 1995.** Viscosity of galactomannans at alkaline and neutral pH : evidence of “hyperentanglement” in solution. Carbohydr. Polym. 27,69-71.
- Graniti, A., 1959.** « La nebbia del carrubo ». Iform. Fitopatologico 9 :317.
- Gubbuk, H., Kafkas, E., Guven, D., Gunes, E., 2010.** Physical and phytochemical profile of wild and domesticated carob (*Ceratonia siliqua* L.) genotype. Spanisch J. Agri. Res. 8(4), 1129-1136.
- Guinochet, M., et Vilmorin, R., 1984.** Flore de France. Edit. CNRS, Paris.

H

- Haber, B., 2002.** Carob fiber benefits and applications. Cereal Foods World, 47, 365–369.
- Haddarah A., Ismail A., Bassal A., Hamieh T., Ioannou I., Ghoul M., 2013.** Morphological and chemical variability of Lebanese carob varieties. European Scientific Journal, 9 (18): 353-369.
- Hariri, A., Ouis, N., Sahnouni, F., et Bouhadi, D., 2009.** Mise en œuvre de la fermentation de certains ferments lactiques dans des milieux a base des extraits de caroube, rev. microbiol. ind. san et environn. pp. 37-55.
- Hartmann, H.T. and Kester, D. E., 1983.** Plant propagation. Principles and Practices. 4th edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. 16p
- Haselberg C., 1988.** A contribution to the classification and characterization of female and male varieties of *Ceratonia siliqua* L. Proceedings of the II International Carob Symposium. Valencia, pp. 137-151.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Heywood, V.H., 1996. Les Plantes à Fleurs - 306 Familles de la Flore Mondiale. Paris, France: Nathan.336p

Hillcoat, D., Lewis, G., & Verdcourt, B., 1980. A new species of *Ceratonia* (LeguminoceaCaesalpinoideae) from Arabia and the Somali Republic. *Kew bull.* 35 : 261-271.

Hirsch, A.M., Lum, M.R. & Downie, J.A., 2001. What makes the rhizobial-legume symbiosis so special? *Plant Physiol.* 127: 1484-1492.

Hmamouchi, M., 1999. Les plantes médicinales et aromatiques marocaines. Prix ISESCO. ISBN : 99548007-0-0. 450p (389).

Hong, T. D., Linington, S. and Ellis, R. H., 1996. Seed storage behaviour: a Compendium. Handbooks for Genebanks: No. 4. International Plant Gentic Institute, Rome.

I

Ibrahim, A. H., Rehab, M. A.E.B., Samar Y.D., Ahmed, A.L. et Mohamed, S.K., 2013. Bacterial Growth Inhibitory Effect of *Ceratonia siliqua* L. Plant Extracts Alone and in Combination with Some Antimicrobial Agents. *J. Adv. Biotechnol. Bioeng.*(1): 3-13

Irwin, H.S. & Barneby, R.C., 1981. Cassieae. In: Polhill R.M & Raven P.H., (Eds). *Advances in Legume Systematic.* Vol. 1. Royal Botanic Gardens, Kew, England, pp. 97-106.

Iserin, P., 1997. Encyclopédies des plantes Médicinales identification, préparation, soins Ed. Larousse-Bordas, pp.247.

ISO 659:2009. Graines oléagineuses -- Détermination de la teneur en huile (Méthode de référence) .Ed.4, 13p

J

Johnson, S., Bruun, P., et Okkala, P., 1988. Application of LBC in food and pet food systems. *in Proceedings of the II International Carob Symposium* (P. Fito anf A. Mulet, eds.). Valencia, Spain. Pp. 577-587.

Joslyn, M.A., Nishira, H., Ito, S., 1968. Leucoanthocyanins and related phenolic compounds of carob pods (*Ceratonia siliqua*). *J. Sci. Food Agric.*, 19, 543-550.

K

Kaderi, M., Ben Hamouda, G., Zaheir, H., Hanana, M., Hamrouni, L., 2014. Notes ethnobotanique et phytopharmacologique sur *Ceratonia siliqua* L. *Lavoisier SAS 2014* (13), 144-147.

Karkacier, M., Artuk, N., 1995. Determination of physical properties, chemical composition and extraction conditions of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.). *Gıda* 20 (3), 131–136.

Khanbabae, K., van Ree, T., 2001. Tannins : Classification and definition. *Nat. Prod. Rep.* 18, 641–649.

Keles, H., Bilir N., 2015. Interaction of growth and reproduction characteristics in Carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) populations. *Agriculture & Forestry / Poljoprivreda i Sumarstvo*, Vol. 61 Issue 4, pp: 369-377.

Kelly, D., 1994. The evolutionary ecology of mast seeding. *Tree* vol.9 n°12: 665-670.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Kelly, D., Sork V. L., 2002.** Mast Seeding in Perennial Plants: Why, How, Where? Annual Review of Ecology and Systematics. Vol. 33:427-447.
- Khelifa, M., Bahloul, A., Kitane, S., 2013.** Determination of chemical composition of carob pod (*Ceratonia siliqua* L.) and its morphological study. J. Mater. Environ. Sci. 4 (3), 348-353.
- Kivçak, B., et Mert, T., 2002.** «Antimicrobial and cytotoxic activities of (*Ceratonia siliqua* L.) extracts». Turk J. Biol., vol. 26, pp.197-200.
- Klenow, S., Gleib, M., Haber, B., Owen, R., Pool-Zobel, B.L., 2008.** Carob fiber compounds modulate parameters of cell growth differently in human HT29 colon adenocarcinoma cells than in LT97 colon adenoma cells. Food Chem. Toxicol. 46, 1389-1397.
- Kök, M.S., Hill, S.E., Mitchell, J.R.A., 1999.** Comparison of the rheological behavior of crude and refined locust bean gum preparations during thermal processing. Carbohydr. Polym. 38, 261-265.
- Konaté, I., 2001.** Amélioration de la culture du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) via la multiplication *in vitro* et la fixation biologique de l'azote. Dans le mémoire du D.E.S.A., Univ. Ibn Tofail. Fac. Sci. Kénitra, Maroc. 58p
- Konate, I., 2007.** « Diversité Phénotypique et Moléculaire du Caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) et des Bactéries endophytes qui lui sont associées ». Université Mohammed V-Agdal Faculté des sciences Rabat, thèse de doctorat.196p
- Konaté, I., Filali-Maltouf A., Berraho B., 2007.** Diversity analysis of Moroccan carob (*Ceratonia siliqua* L.) accessions using phenotypic traits and markers. Acta Botanica Malacitana, 32: 79- 90.
- Konate, I., Berraho, E.B., et Filali-Maltouf, A., 2009.** Inter-simple sequence repeat markers variation among natural accessions of Moroccan carob tree (*Ceratonia siliqua*). Int. J. Agric. Biol., 11: 168–172
- Korkmaz, N., Akin, M., Koc, A., Eyduran, S.P., Ilhan, G., Sagbas, H. I., Ercisli, S., 2020.** Morphological and biochemical diversity among wild-grown carob trees (*Ceratonia siliqua* L.). Folia Hort. 32(1): 69–78.
- Kumazawa, S., Taniguchi, M., Suzuki, Y., Shimura, M., Kwon, M., Nakayama, T., 2002.** Antioxidant activity of polyphenols in carob pods. J. Agric. Food Chem., 50, 373-377.

L

- Ladipo, D. O., Fondoun, J.M., Ganga, N., 1996.** Domestication of the bush mango (*Irvingia* spp.): some exploitable intraspecific variations in west and central Africa. In Proceedings of the international conference on domestication and commercialization of non timber forest products in agroforestry systems, Nairobi, Kenya 19-23. Edited by R.R.B. Leakey, A.B. Temu, M. Melnyk and P. Vantomme, pp :193 - 204.
- La Malfa, S., Avola, C., Brugaletta, M., La Rosa, G., Muratore, G., 2012.** Morphological and technological characterization of different Carob cultivars in Sicily. Proc. XXVIIIth IHC –

Chapitre I : Synthèse bibliographique

IS on the challenge for a sustainable production, protection and consumption of Mediterranean fruits and nuts. Eds. A.M. D'Onghia et al. Acta Hort. 940, ISHS, Italy.

La Malfa S., Currò S., Bugeja Douglas A., Brugaletta M., Caruso M., Gentile A., 2014. Genetic diversity revealed by EST-SSR markers in carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Biochem Syst Ecol* 55:205–211.

Lapie G., Maige A., 1916. Flore forestière de l'Algérie, éditeur : Librairie générale de l'Enseignement, ORLHAC. Paris. 357p.

Lavallée, P., 1962. « Le caroubier, son utilisation dans l'alimentation du bétail en Algérie et en Tunisie ». Alger, 47p.

Lee, C. L., Paul, J. L., et Hackett, W. P., 1977. Promoting of rooting in stem cutting of structure plant by pre-treatment with acid or base. *Hort Science*. 12 (1) : 41-42.

Leroy, A., 1929. Elevage rationnel des animaux domestiques. Hachette ed., 448p.

Lewis, G., Schrire, B., Mackinder, B & Lock, M., 2005. Legumes of the world. London, UK: Royal Botanic Gardens Kew.

Lipumbu, L., Sigge, G.O., Britz, T.J., 2008. Compositional Analysis of Locally Cultivated Carob (*Ceratonia Siliqua* L.) Cultivars and Development of Nutritional Food Products for a Range of Market Sectors. Faculty of Agri Sciences, Department of Food Sciences, Stellenbosch University, South Africa. 117p

Linskens, H., et Scholten, W., 1980. « The flower of carob ». *Ptug. Acta. Bilo. (A) XVI* (1-4): pp. 95-102.

Livesey, G., 2003. Health potential of polyols as sugar replacers, with emphasis on low glycaemic properties. *Nutr. Res. Rev.* 16, 163–191.

Lizardo, R., Cañellas, J., Mas, F., Torrallardona, D. & Brufau, J., 2002. L'utilisation de la farine de caroube dans les aliments de sevrage et son influence sur les performances et la santé des porcelets. *Journées de la Recherche Porcine*. 34: 97-101.

Loeb, H., Vandenplas, Y., Wursch P., Guesry, P., 1989. Tannin-rich carob pod for the treatment of acute-onset diarrhea. *J. Pediatr. Gastroenterol. Nutr.* N°8, pp. 480-485.

Loreto, F., Burdsall, H.H., et Tirro, A., 1993. «Armillaria infection and water stress influence gasexchange properties of Mediterranean trees». *Hort Science* 28 (3) :222- 224.

Loubelo, E., 1990. Etude comparative de quelques éléments du fonctionnement de deux peuplements d'eucalyptus au Congo. Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques. Université de Rennes, France. 150 p.

M

Magini, E., et Tulstrup, N.P., 1955. *Tree seed notes*. Rome, F.A.O., U.N, p. 59-60.

Mahdad M. Y., Guaour S.B., 2016. Le caroubier (*Ceratonia Siliqua* L.) dans le Nord-Ouest de l'Algérie, Situation et perspective d'amélioration. Éditions Universitaires Européennes. 90 pages.

Mahtout, R., Ortiz-Martínez, V.M., Salar-García, M.J., Gracia, I., Hernández-Fernández, F.J., Pérez de los Ríos, A., Zaidia, F., Sanchez-Segado, S., Lozano-Blanco,

- L.J., 2018.** Algerian Carob Tree Products: A Comprehensive Valorization Analysis and Future Prospects. *Sustainability*10, 90.
- Maier, H., Anderson, M., Karl, C., Magnuson, K. & Whistler, R. L., 1993.** Guar, locust bean, Tara and fenugreek gums. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller (Eds.), *Industrial Gums, Polysaccharides and their Derivates* (pp. 205-215). Academic Press, San Diego.
- Makris, D.P., Kefalas, P., 2004.** Carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) as a source of polyphenolic antioxidant. *Food Technol. Biotechnol.* 42 : 105-108.
- Manganaris, G.A., Goulas, V., Vicente, A.R., Terry, L.A., 2014.** Berry antioxidants: Small fruits providing large benefits. *J. Sci Food Agric.*94, 825–833.
- Mapa., 1994.** «Ministerio de Agriculture, pesca Y Alimentation ». Anuario de Estadística Agraria. Ed . Secretaria General Técnica, Madrid, Spain.
- Marakis, S., 1996.** Carob bean in food and feed: Current status and future potentials- A critical appraisal. *J. Food Sci. Technol.*, 33, 365-383.
- Marakis, S., Lambraki, M., Diamantoglou, S., 1993.** Tannin chemistry of nine Cretan carob varieties. *Chimica Chronica, New Series*, 22, 213-224.
- Marakis, S., Marakis, G., Lambraki, M., 1997.** Tannins of eight carob varieties from the island of Lefkada, Greece. *Chimica Chronica, New Series*, 26, 57-66.
- Marchelli P., Gallo L.M., 1999.** Annual and geographic variation in seed traits of Argentinean populations of southern beech *Nothofagus nervosa* (Phil.) Dim. et Mil. *Forest Ecology and Management* 121:239-250.
- Marco, A.M.R., De Mora, B.R.C., Diaz, C.S., 1997.** Method of Making Natural Carob Fiber. U.S. Patent 5, 609,905 A.
- Martins-Loução, M.A. & Rodríguez-Barrueco, C., 1982.** Studies in nitrogenase activity of carob (*Ceratonia siliqua* L.) callus cultures associated with Rhizobium, in *Proceedings V International Congress Plant Tissue Culture*, Tokyo. pp. 671-672.
- Martins-Loução, M.A., Correia, P., & Pereira, F., 1996.** The role of plant/soil microorganisms interaction in carob development. In *Proceedings of the III International Carob Symposium*. Cabanas. Tavira. Portugal (in press).
- Martins-Loucao, M.A., Cabrita, R. and Silva, J.M., 1996.** Pollination studies in Portuguese carob landraces. In: *Proc. Third International Carob Symposium* (Tavira, Portugal), University of Lisbon: Portugal.
- Martorell, J., 1987.** « Elalgarrobo, victim del llamado desarrollo agrario ». in *Congreso Int. de Tecnologia de Alimentos Naturales Y Biologicos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion (MAPA), Madrid. Pp. 62-84.
- Matthausa B., Ozcan M. M., 2011.** Lipid evaluation of cultivated and wild carob (*Ceratonia siliqua* L.) seed oil growing in Turkey. *Scientia Horticulturae* 130 181–184.
- Melgarejo, P., & Salazar, D.M., 2003.** Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas. Vol. II. Mundi-Prensa. España, pp. 19-162.
- Merwin, M.L., 1981.** The culture of carob (*Ceratonia siliqua*) for food. Fooder and fuel in semi-arid environments. *International Tree Crops Institute USA Inc.*, California.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Metro., et Sauvage., 1955.** Flore des végétaux ligneux de la Maâmora. La nature au Maroc 1, Sco. Sci. Nat. Physi. Rabat (Maroc). 498p.
- Meziani S., Dave Oomah B., 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.
- Meziou-Chebouti, N., Merabet, A., Behidj, N., Kirouani, M. and Aliouat, S., 2015.** Chemical composition and antibacterial activity of *Ceratonia siliqua* L. growing in Boumerdes (Algeria). In New Developments in Biology, Biomedical & Chemical Engineering and Materials Science. Proc. Int. Conf. Chem. Engin. Mater. Sci. (CEMS 2015), Vienna, Austria, March 15-17, pp. 96-99.
- Min, B.R., & Hart, S.P., 2003.** Tannins for suppression of intestinal parasites. *J. Anim. Sci.* 81: 102-109.
- Missbah, M.E.I., Aujjar, N., Belabed, A., Dessaux, Y. & Filali-Maltouf, A., 1996.** Characterization of rhizobia isolated from carob (*Ceratonia siliqua* L.). *J. App. Bacteriol.* 80: 165-173.
- Mitrakos, K., 1981.** Temperature germination responses in three Mediterranean evergreen sclerophylls, in Components of Productivity of Mediterranean-climate Regions-Basic and Applied Aspects (N.S. Margaris and H. A. Mooney, eds.). Dr. W. Junk Publishers, The Hague/Boston/London, pp. 277-279.
- Mole, S., Waterman, P.G., 1987.** Tonic acid proteolic enzymes: enzyme inhibition substrat derivation, Photochemistry, N° 26, pp. 99-102.

N

- Nachtomi, E., Alumot, E., 1963.** Tannins and polyphenols in carob pods (*Ceratonia siliqua*). *J. Sci. Food Agric.*, 14, 464-468.
- Naghmouchi, S., Khouja, M.L., Romero, A., Tous J., Boussaid, M., 2009.** Tunisian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *Scientia Horticulturae*, 121:125–130.
- NAS., 1979.** Tropical Legumes: Resources for the Future. National Academy of Sciences. Washington DC, USA, pp. 109-116.
- Nasar-Abbas, S. M., e-Huma, Z., Vu T.-H., Khan, M. K., Esbenshade, H., et Jayasena, V., 2016.** “Carob Kibble: A Bioactive-Rich Food Ingredient,” *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 15, no. 1, pp. 63–72.
- Neukom, H., 1988.** Carob bean gum: properties and application. *in* Proceedings of the II International Carob Symposium (P. Fito and A. Mulet, eds.). Valencia, Spain. Pp. 551- 555.
- Ndir, B., Lognay, G., Wathelet, B., Cornelius, C., Marlier, M., Thonart P., 2000.** Composition chimique du netetu, condiment alimentaire produit par fermentation desgraines du caroubier africain *Parkia biglobosa* (Jacq.) Benth, (4, 5) *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* Vol.4, N° 2, pp.101–105.

O

- Okuda, T., Yoshida, T., Hanato, T., 1989.** New methods of analysing tannins. *J. Nat. Prod.*, 52, 1- 31.
- ONM. Office National de Météorologie. 2013.** Ministère des Transports. Algérie.
- Orphanos, P.I., & Papaconstantinou, J., 1969.** The carob varieties of Cyprus. *Tech. Bull.*5. Cyprus Agricultural Research Institute. Ministry of Agriculture and Natural Resources, Nicosia. 27p
- Ortega, N., Macia, A., Romero, M.P., Trullols, E., Morello, J.R., Angles, N., Motilva, M.J., 2009.** Rapid determination of phenolic compounds and alkaloids of carob flour by improved liquid chromatography tandem mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.* 57, 7239–7244.
- Ortiz, P.L., Arista, M., & Talavera, S., 1996.** Producción de néctar y frecuencia de polinizadores en *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpiniaceae). *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 54: 540- 546.
- Ouis, N., et Hariri, A., 2017.** Phytochemical analysis and antioxidant activity of the flavonoids extracts from pods of *Ceratonia siliqua* L. *J Pharm Pharmaceutics* 4(2): 159-165.
- Owen ,R.W., Haubner, R., Hull ,W.E., Erben, G., Spiegelholder, B., Bartsch, H., Haber, B., 2003.** Isolation and structure elucidation of the major individual polyphenols in carob fibre. *Food Chem. Toxicol.*, 41, 1727-1738.
- Özcan, M. M., Arslan, D. and Gökçalik, H., 2007.** Some compositional properties and mineral contents of carob (*Ceratonia siliqua*) fruit, flour and syrup. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 58(8), 652-658.
- Oziyici, H.R.; Tetik, N.; Turhan, I.; Yatmaz, E.; Ucgun, K.; Akgul, H.; Gubbuk, H.; Karhan, M., 2014.** Mineral composition of pods and seeds of wild and grafted carob (*Ceratonia siliqua* L.) fruits. *Sci. Hortic.* 167, 149–152.

P

- Padulosi S., Eyzaquirre P., Hodgkin T., 1999.** Challenges and Strategies in Promoting Conservation and Use of Neglected and Underutilized Crop Species. Reprinted from: *Perspectives on new crops and new uses.* J. Janick (ed.), Alexandria, VA. 140-145.
- Papagiannopoulos, M., Wollseifen, H.R., Mellenthin, A., Haber, B., Galensa, R. 2004.** Identification and quantification of polyphenols in carob fruits (*Ceratonia siliqua* L.) and derived products by HPLC-UV-ESI/MSN. *J. Agric. Food Chem.* 52, 3784–3791.
- Parciak W., 2002.** Environmental Variation in Seed Number, Size, and Dispersal of a Fleshy-Fruited Plant. *Ecology.* 83(3), 780-793
- Parrado, J., Bautista, J., Romero, E.J., García-Martínez, A.M., Friaiza, V., et Tejada, M., 2008.** Production of a carob enzymatic extract: Potential use as a biofertilizer *Bioresource Technology* Vol. 99, N°7, pp. 2312-2318.
- Passos de Carvalho, J., 1988.** Carob pollination aspects. in *Proceedings of the II International Carob Symposium* (P. Fito and A. Mulet, eds.). Valencia, Spain. Pp. 281-291.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Prajapati Vipul D., Jani Girish K., Moradiya Naresh G., Randeria Narayan P., Nagar Bhanu J., 2013. Locust bean gum: A versatile biopolymer. *Carbohydrate Polymers* 94:814–821.

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

Puhan, Z. and Wielinga, M. W., 1996. Products derived from carob pods with particular emphasis on carob bean gum (CBG). Report Technical Committee of INEC (unpublished). 12 : 123-127.

Putod, R., 1982. Les arbres fouragers. Le Févier. *Forêt Méditerranéenne* 4 (1): 33-42.

Q

Quezel, P., Santa S., 1962. Nouvelles flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Tome I. Paris : Centre National de la Recherche Scientifique. 1170p.

Quezel, P. et Santa, S., 1963. « Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales (tome 1). Edition du centre national de la recherche scientifique, 557 p.

Quézel, P., Médail, F., 2003. Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Environmental series. Elsevier. 571 p.

R

Rababah, T.M., Ereifej, K.I., Esoh, R.B., Al-u'datt, M.H., Alrababah, M.A., Yang, W., 2011. Antioxidant activities, total phenolics and hplc analyses of the phenolic compounds of extracts from common mediterranean plants. *Nat. Prod. Rep.* 25, 596–605.

Ramon-Laca, L., et Mabberley, D.J., 2004. The ecological status of the carob-tree (*Ceratonia siliqua*, Leguminosae) in the Mediterranean. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 114: 431-436.

Rao, V.R., Hodking T., 2002. Genetic diversity and conservation and utilization of plant genetic resources. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 68: 1–19.

Rebour, H., 1968. « Fruits Méditerranéen ». La maison rustique Paris : pp 330.

Refass, A., 2000. Analyse multi-élémentaire et analyse statistique de plantes à usage médicinal traditionnel au Maroc. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Université Hassan II - Mohammedia Casablanca, Maroc.

Rejeb, M.N., 1989. Mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse du Caroubier, *Rev Res Amélior Prod Milieu Aride I*, pp.47-55.

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

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Retana, J., Ramoneda, J., García del Pino, F., & Bosch, J., 1994.** Flowering phenology of carob, *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinaceae). *J. Hort. Sci.* 69: 97-103.
- Retana, J., Ramoneda, J. & García del Pino, F., 1990.** Importancia de los insectos en la polinización del algarrobo. *Bol. San. Veg. Plagas.* 16: 143-150.
- Rivière, C.H., & Leco, H., 1900.** Manuel pratique de l'agriculteur algérien. Editeur: Augustin CHALLAMEL. Paris, pp. 349-353.
- Rizzo, V., Tomaselli, F., Gentile, A.; La Malfa, S., Maccarone, E., 2004.** Rheological properties and sugar composition of locust bean gum from different carob varieties (*Ceratonia siliqua* L.). *J. Agric. Food Chem.* 52, 7925–7930.
- Romano, A., Barros, S., et Martins-Louçao, M.A., 2002.** Micropropagation of the Mediterranean tree *Ceratonia siliqua*. In "Plant cell, tissue and organ culture". Springer Science-, 68(1): 35-41.
- Roseiro L. B., Duarte L.C., Oliveira D.L., Roque R.M., Bernardo-Gil G., Martins A.I., Sepúlveda C., Almeida J., Meireles M., Gírio F. M, Rauter A. P., 2013.** Supercritical, ultrasound and conventional extracts from carob (*Ceratonia siliqua* L.) biomass: Effect on the phenolic profile and antiproliferative activity. *Industrial Crops and Products* 47:132–138.
- Russo, G., Polignano, G.B., 1996.** Variation of seed and fruit characters in *Ceratonia siliqua* L. cultivars. *Genet Resour Crop Evol* 43, 525–531.
- Rtibi K., Jabri M.A., Selmi S., Sebai H., Amri M., Marzouki L., El-Benna J., 2016 a.** Preventive effect of carob (*Ceratonia siliqua* L.) in a dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis in rat. *RSC Adv.*, 6, 19992-20000.
- Rtibi K., Jabri M.A., Selmi S., Sebai H., Amri, M., El-Benna, J. et Marzouki, L., 2016 b.** *Ceratonia siliqua* leaves exert a strong ROS-scavenging effect in human neutrophils, inhibit myeloperoxidase in vitro and protect against intestinal fluid and electrolytes secretion in rats. *RSC Adv.*, 6, 65483-65493.
- Rtibi K., Selmi S., Grami, D., Amri, M., Eto, B., El-Benna, J. Sebai H. et 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.
- Russo G., 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.

S

- Saidi, R., Lamarti, A. & Badoc, A., 2007.** Micropropagation du caroubier (*Ceratonia siliqua*) par culture de bourgeons axillaires issus de jeunes plantules. *Bull. Soc. Pharm. Bordeaux.* 146: 113-129.
- Salih, G., Jilal A., 2020.** Utilisation alimentaire de la pulpe de caroube : Formulation et test consommateur. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* 8(2) : 249-252.
- Sánchez, S., Lozano, L.J., Godinez, C., Juan, D., Pérez, A. & Hernández, F.J., 2010.** Carob pod as a feedstock for the production of bioethanol in Mediterranean areas. *Applied Energy* 87: 3417-3424.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Sandolo C., Coviello T., Matricardi P., Alhaique F. (2007).** Characterization of polysaccharide hydrogels for modified drug delivery. *Eur. Biophys. J.* 36 (7) : 693–700.
- Santos M., Rodrigues A, Teixeira J. A., 2005.** Production of dextran and fructose from carob pod extract and cheese whey by *Leuconostoc mesenteroides* NRRL B512 (f), *Biochemical Engineering Journal* 25, 1–6.
- Saura-Calixto, F., 1988.** Effect of condensed tannins in the analysis of dietary fiber in carob pods. *J. Food Sci.*, 53, 1769-1771.
- Sbay, H. & Abourouh, M., 2006.** Apport des espèces à usages multiples pour le développement durable : cas du pin pignon et du caroubier. Centre de recherche forestière haut commissariat aux eaux et forêts et à la lutte contre la désertification, Rabat, pp. 1 -9.
- Sbay, H., 2008.** Le caroubier au Maroc, Un arbre d'avenir. CRF Collection Maroc Nature. 50 p
- Scalbert, A., 1992.** Plant polyphenols. In: Quantitative Methods for the Estimation of Tannins in Plant Tissues. R.W. Hemingway and P.E. Laks Eds, 259-280.
- Schweinfurth, G., 1894.** Sammlung arabisch-aethiopischer Pflanzen, Ergebnisse von Reisen in dem Jahren 1881, 1888-89, 1891-92. *Bull, Herb. Boissier* 2:1-114.
- Schneider, A., et Huyghe, C., 2015.** Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Paris, France. Edit Quæ. 515p
- Sebastian, K. T., et McComb, J. A., 1986.** A micropropagation system for carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Scientia Hort.* 28:127-131.
- Sfakiotakis, E. M., 1978.** Germination in vitro of carob (*Ceratonia siliqua* L.) pollen. *Z. Pflanzenphysiol.* 89:443-447.
- Seghir, N., Harki, E., Dahchour, A., Gharnit, N., Ennabili A., 2016.** Vegetative and efflorescence characterization of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) from the Province of Sefrou, the Middle Atlas of Morocco. *Moroccan J. Biol.* 13: 13-22.
- Serairi-Beji, R., Mekki-Zouiten L., Tekaya-Manoubi L., Loueslati M.H., Guemira F., Ben Mansour A., 2000.** Can carob powder be used with oral rehydration solution for the treatment of acute diarrhea? *Med. Top.* 60: 125. *Med. Trop.* 60 (2): 125-8.
- Shawakfeh, K., Ereifej, K.I., 2005.** Pod Characteristics of two *Ceratonia siliqua* L. Varieties from Jordan. *Ital J Food Sci* 17(2) : 187-194.
- Shi, X., Wang J. C., Zhang, D. Y., Pan, B. R., 2010.** Pollen source and resource limitation to fruit production in the rare species *Eremosparton songoricum* (Fabaceae). *Nordic Journal of Botany.* 28(4):438 - 444.
- Sidina M.M., El Hansali M., Wahid N., Ouatmane A., Boulli A., Haddioui A., 2009.** Fruit and seed diversity of domesticated carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. *Scientia Horticulturæ* 123:110-116.
- Sigge, G.O., Lipumbua, L., Britza, T.J., 2011.** Proximate composition of carob cultivars growing in South Africa. *S. Afr. J. Plant Soil*, 28, 17–22.
- Silanikove, N., Gilboa, N., Nitsan, Z., 2001.** *Small Rum. Res.* 40: 95–99.
- Singh, G., Arora, S., Sharma, G.S., Sangwan, R.B., 2007.** Heat stability and calcium bioavailability of calcium-fortified milk. *Lebensm. Wiss. Technol.* 40, 625–631.

Smith B.M., Bean S.R., Schober T.J., Tilley M., Herald T.J., Aramouni F., 2010. Composition and molecular weight distribution of carob germ protein fractions. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 58(13) : 7794-800.

Srećec, S., D. Kremer, K. Karlović, T. Peremin Volf, R. Erhatic, Z. Augustinović, I. Kvaternjak, S. Bolarić, D. Dujmović Purgar, V. Dunkić and N. Bezić. 2016. Comparison of Morphological Characteristics of Carob Tree (*Ceratonia siliqua* L.) Pods and Seeds of Populations Collected from Two Distant Croatian Islands: Drvenik Mali and Mali Lošinj. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 81(1): 61-64.

T

Tahiri, A., Fadel Tahrouch, F.S., El Madidi, S. et Hatimi, A., 2009. Symposium sur les composés phénoliques. Ed. Amyris. Agadir, Maroc, p. 145.

Talhok, S.N., Van Breugel, P., Zurayk, R., Al-Khatib, A., Estephan, J., Ghalayini, A., Debian, N., 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 : 49–59.

Tamir, M., Nachtomi, E., Alumot, E., 1971. Degradation of tannins from carob pods by thioglycolic acid. *Phytochem.*, 10, 2769-2774.

Tetik N., Turhan I., Oziyci H.R., Gubbuk H., Karhan M., Ercişli S. (2011). Physical and Chemical Characterization of *Ceratonia siliqua* L. germplasm in Turkey. *Scientia Horticulturae*, 129(4), 583-589.

Thomson, P., 1971. The carob in California. *California Rare Fruit Growers Yearbook III*: 61-102. Tous J., 1984. Cultivo del Algarrobo. *Hoja Divulgativa N2*: 10. Ministerio de Agricultura. Madrid. 16 p.

Tous, J., Olarte, C., Truco, M., Arus, P., 1992. Isozyme polymorphisms in carob cultivars. *HortScience* 27:257–258.

Tous, J., Romero, A., Plana, J. et Batlle, I., 1996. Current situation of carob plant material. In: *Proc. Third International Carob Symposium (Tavira, Portugal)*, University of Lisbon: Portugal. pp. 33-38

Tous J., Romero A., Hermoso J. F., Ninot A., Plana J., Batlle I., 2009. Agronomic and commercial performance of four Spanish Carob cultivars. *Horttechnologie*. April–June, 19(2): 465-470.

Tsatsaragkou, K., Yiannopoulos, S., Kontogiorgi, A., Poulli, E., Krokida, M., & Mandala, I., 2014. Effect of Carob Flour Addition on the Rheological Properties of Gluten-Free Breads. *Food Bioprocess Technol* (7):868–876.

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

Tucker, S.C., 1992b. The role of floral development in studies of legume evolution. *Can. J. Bot.* 70: 692-700.

Turhan, I., 2013. Relationship between sugar profile and D-pinitol content of pods of wild and cultivated types of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.). *Int. J. Food Prop.* 17, 363–370.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Turhan, I., Bialka, L.K., Demirci, A., Karhan, M., 2010a. Enhanced lactic acid production from carob extract by *Lactobacillus casei* using invertase pretreatment. *Food Biotechnology*. 24(4):364-374.

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

Turnbull, L.A., Luis Santamaria L., Martorell, T., Rallo J., Hector, A., 2006. Seed size variability: from carob to carats. *Biol. Lett.* 2 : 397–400.

V

Vardar, Y., Seçurenand, Ö., et Ahmed, M., 1972. Preliminary results on the chemical composition of the Turkish carob beans, *Qual. Plant Mater*, vol. XXI N°4, pp. 318- 327.

Vavilov, N.I., 1951. *The Origin, Variation, Immunity, and Breeding of Cultivated Plants* [translated from the Russian by K.S. Chester]. The Ronald Press Co., New York.364p

Vinterhalter, D., Grubisic, D., Bojovic-Cvetic, D. & Budimir, S., 1992. Lenticel hypertrophy shoot cultures of *Ceratonia siliqua* L. *Plant Cell Tissue Organ Culture*, 31: 111-114.

Vinterhalter, D., & Vinterhalter, B., 1992. Factors affecting *in vitro* propagation of carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Arch. Biol. Sci. Belgrade*, 44(3-4): 177-186.

Von Haselberg, C., 1996. Factors influencing flower and fruit development in carob (*Ceratonia siliqua* L.).” in *Proceedings of the Third International Carob Symposium*, (Tavira: University of Lisbon). Portugal. p. 11.

Vourdoubas, J., Makris, P., Kefalas, J., Kaliakatsos, G., 2002. In: *Proceedings of the 12th National Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy. Industry and Climate Protection*, Amsterdam, pp. 489–493.

W

Wang, Y., Belton P. S, Bridon H., Garanger E., Wellner N., Parker M. L., Grant A., Feillet, P., et Noel T.R., 2001. Physicochemical Studies of Caroubin: A Gluten-like Protein, *J. Agric. Food Chem.*, 49, 3414-3419.

Wenzl, T. G., Schneider, S., Scheele, F., Silny, J., Heimann, G., Skopnik, H., 2003. Effects of thickened feeding on gastroesophageal reflux in infants: a placebo-controlled crossover study using intraluminal impedance. *Pediatrics*, 111: 355-359.

Whiteside, L., 1981. *The carob cookbook*. Ed. Thorsons Publishers Limited, Wellingborough. Northamptonshire. 96p

Whiteley, L.O., Klurfeld D.M., 2000. *Nutrition and Cancer* 36 -131-149.

Williams, C. L., Bollella M., Spack A. and Puder D., 1995. Soluble fibre enhances the hypocholesterolemic effect and the step I diet in childhood. *J. Am. College Nutr.* 14: 251- 257.

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

Wisniewski M. & Arora R., 2000. Structural and biochemical aspects of cold hardiness in woody plants. In: Jain. S.M & Minocha. S.C. (Eds), *Molecular biology of woody plants*. Vol. 2. Kluwer Academic publishers. Netherlands, pp. 419-437.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Wisniewski, M., Fuller, M., Palta, J., Carter, J. & Arora, R., 2004. Ice nucleation, propagation, and deep supercooling in woody plants. In: Arora, R (Ed), Adaptations and responses of woody plants to environmental stresses. Food products press. New York. USA, pp. 5-16.

Wisniewski, M., Lindow, S.E. & Ashworth, E.N., 1997. Observations of ice nucleation and propagation in plants using infrared video thermography. *Plant Physiol.* 113: 327-334.

Wojciechowski, M.F., Lavin, M & Sanderson, M.J., 2004. A phylogeny of Legumes (Leguminosae) based on analysis of the plastid MATK gene resolves many well-supported subclades within the family. *American Journal of Botany*, 91(11), 1846-1862.

Würsch, P., Vedovo, S., Rosset, J., Smiley, M., 1984. The tannins granules from ripe carob pod. *Lebensm.-Wiss.u.-Technol.*, 17, 351-354.

Y

Yahiaoui, R., 2015. Antibacterial activity of carob (*Ceratonia siliqua* L.) extracts against phytopathogenic bacteria *Pectobacterium atrosepticum*. *Microbial Pathogenesis* 78: 95-102

Yan, C., Given, P.S., Huvad, G., Mallepally, R.R., McHugh, M.A., 2016. Method of Loading Flavor into an Aerogel and Flavor Impregnated Aerogel Based on Food Grade Materials. U.S. Patent 20, 160, 058,045 A1.

Yatmaz, E., Karahalil, E., Germeç, M., Ilgın, M., Turhan, İ., 2016. Controlling Filamentous Fungi Morphology with Microparticles to Enhanced β -mannanase Production. *Bioprocess and Biosystems Engineering.* 39:1391–1399.

Yatmaz, E., Turhan, I., Karhan, M., 2012. Optimization of ethanol production from carob pod extract using immobilized *Saccharomyces cerevisiae* cells in a stirred tank bioreactor. *Bioresource Technology.*135:365-371.

Yousif, Ali. K., Alghzawi, H.M., 2000. Processing and characterization of carob powder. *Food Chem.* 69, 283-287.

Youssef, M.K.E., El-Manfaloty, M.M., Ali, H.M., 2013. Assessment of proximate chemical composition, nutritional status, fatty acid composition and phenolic compounds of carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Food Public Health* 304-308.

Z

Zitouni, A., 2010. « Monographie et perspectives d'avenir du caroubier (*Ceratonia siliqua*) en Algérie. Th. Ing. Agro. INA, El-Harrach, 201 p.

Zografakis, N., et Dasenakis, D., 2002. Biomass in Mediterranean Studies on the Exploitation of Carob for Bioethanol Production. Commission of the European Communities Directorate General for Energy and Transport, Region of Crete-Regional Energy Agency.

Zohary, M. & Orshan, G., 1959. The maquis of *Ceratonia siliqua* in Israel. *Palest. J. Bot.* Jerusalem. 8: 385-397.

Zouhair, O., 1996. Le caroubier : situation actuelle et perspectives d'avenir. Document interne, Eaux et forêts, Maroc, 22p.

Zohary M. & Orshan G., 1959. The maquis of *Ceratonia siliqua* in Israel. *Palest. J. Bot.* Jerusalem. 8: 385-397.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Zohary, M., 1973. Geobotanical Foundations of the Middle East, Geobotanical foundations of the Middle East. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. vol. 2, Stuttgart. pp. 199-200

Zunft H.J., Luder W., Harde A., Haber B., Graubaum H.J., Koebnick C., Grunwald J, 2003. Carob pulp preparation rich in insoluble fibre lowers total and LDL cholesterol in hypercholesterolemic patients. Eur J Nutr, 42, 235–242.

Chapitre II :

Aperçu sur la zone d'étude et
méthodologie globale

II.1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude correspond à la région Est-Ouest d'Algérie (Fig.1), elle comprend sept wilayas à savoir, celle d'Annaba, Jijel, Sétif, Blida, Tipaza, Relizane et la wilaya de Tlemcen. La zone est limitée au Nord par la mer méditerranéenne, à l'Est par la Tunisie, à l'Ouest par le Maroc et au Sud par les wilayas de Guelma, Mila, Msila, Batna, Médéa, Mascara, Tiaret et Naâma.

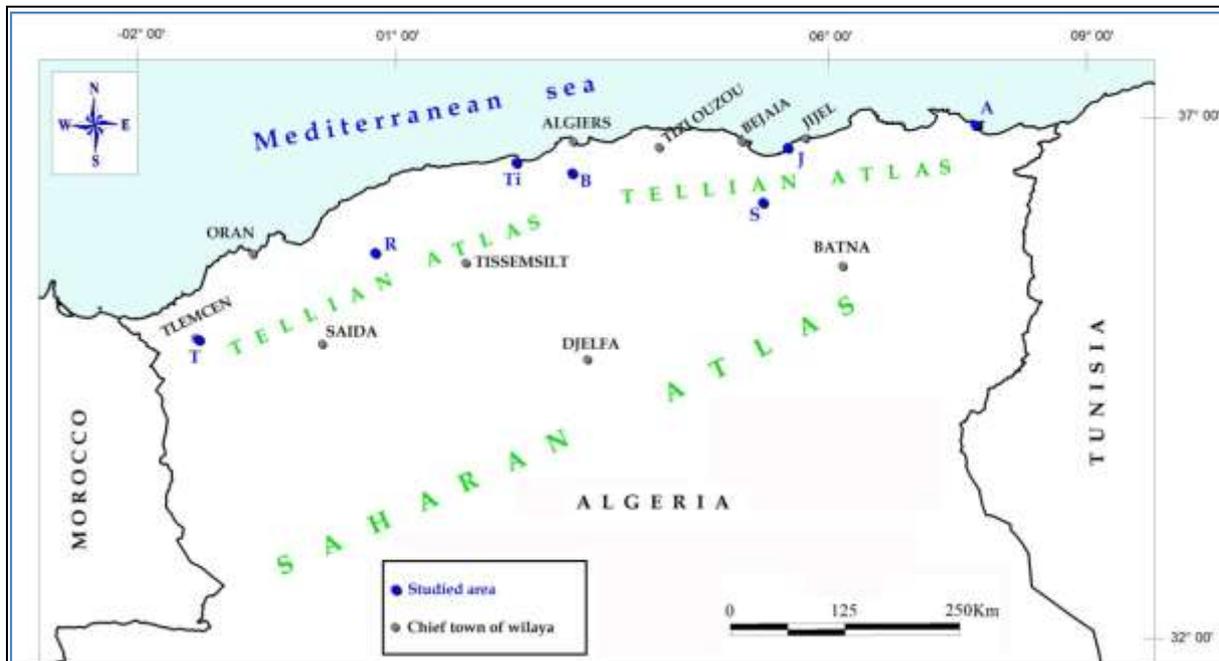


Fig. 1. Localisation des sites d'échantillonnage du caroubier en Algérie

- T : Tlemcen ; R : Relizane ; Ti : Tipaza ; B : Blida ; S : Sétif; J : Jijel ; A : Annaba.

II. 2. Choix des sites d'étude

Le choix des sites obéit à certains critères d'ordre pratique et scientifique à savoir : (1) la présence de l'espèce dans le site avec un nombre d'individus suffisant et au houppier facilement accessible pour la réalisation d'un échantillonnage statistiquement adéquat, (2) l'accessibilité et la sécurité des sites, (3) la réalisation de transect Est-Ouest et (4) la diversité des bioclimats étudiés.

II.3. Description des sites

Pour chaque site, un échantillonnage aléatoire de 20 arbres, 20 gousses à maturité et 20 graines par arbre a été réalisé. C'est un ensemble de 2800 gousses et 2800 graines récoltées sur 140 arbres au total.

❖ Site "Seraïdi", wilaya d'Annaba

Le chef-lieu de notre localité d'échantillonnage est la commune de Seraïdi qui est un village forestier très ancien, s'étend sur une superficie de 139 Km² (ANIREF, 2011 ; ANDI, 2013). Son relief est constitué principalement de montagnes à vocation forestier (52,16 %), des collines et piémonts (25,82 %) et des plaines (18,08 %). Dans cette région, on trouve l'une des plus importantes subéraie de chêne-liège de l'est Algérien (DGRF, 2006). Les arbres dans ce site sont éparpillés, il y a des sujets âgés, jeunes et très jeunes, ils sont associés avec *Olea europea* et *Pistacia lentiscus*

Le sous-sol offre des ressources appréciables quant aux roches sédimentaires, dans les régions de Seraïdi et Chetaïbi. Le climat de la wilaya est du type méditerranéen, humide en hiver, chaud en été et la pluviométrie varie entre 650 et 1000 mm/an, la température moyenne varie entre 14 °C et 34 °C. La région d'Annaba dispose aussi d'un réseau hydrographique assez dense, constitué du lac Fetzara (eau douce) qui s'étend sur 18 670 ha et de l'Oued Seybouse d'une longueur de 127,5 km (ANDI, 2013).

❖ Site "Forêt domaniale Dar el Oued", wilaya de Jijel

La forêt domaniale de Dar El Oued, commune de Ziama Mansouria, wilaya de Jijel, situé à 40 km à l'ouest de Jijel, appartient au Parc National de Taza est une zone montagneuse à altitudes relativement peu élevées. Il se situe principalement dans le massif forestier de Guerrouch, son territoire culmine à 1121 m au pic de « Djebel el Kern », situé à l'extrême nord-est du Parc.

Le relief est très accidenté, les pentes dépassant les 25 % dominant près de 50 % du territoire du Parc. L'exposition nord est dominante sur environ 35 % du territoire. Les formations au relief tourmenté présentent une succession d'anticlinaux et de synclinaux en général d'Est en Ouest. Les terrains calcaires à forte proportion de grès et de marnes expliquent la présence de chêne liège. Deux principaux Oueds sillonnent la zone du Parc National de Taza : l'Oued Dar El Oued et l'Oued Taza (Sfaksi, 2012). D'après nos observations, de nombreux singes peuplent les abords de l'oued avec un cortège floristique très diversifié qui est caractérisé par une végétation forestière composée par les forêts sclérophylles à chêne liège de l'oued Taza proche du niveau de la mer et par les forêts caducifoliées à chêne zeen et à chêne afares au Djebel Guerrouche.

Le bioclimat dominant est celui de l'étage humide tempéré, la région de Jijel est considérée parmi les régions les plus pluvieuses d'Algérie (Meddour, 2010). Elle reçoit chaque année des apports d'eaux de pluie très importants avec une pluviométrie de (800 à 1400 mm/An), qui ruissellent généralement vers les principaux Oueds existants dans la région. En outre, elle recèle plusieurs nappes phréatiques, dont les plus importantes sont : la nappe d'Oued Nil, la nappe d'Oued El-Kebir, la nappe d'Oued Djen-Djen, la nappe d'Oued Kissir, et la nappe d'Oued Mencha (Bouldjedri, 2013).

❖ Site " Guenzet", wilaya de Sétif

Le site de Guenzet est située dans l'est -ouest du chef-lieu Sétif s'élève à 1050 m d'altitude qui est une zone de montagnes à vocation agro-sylvicole dans sa partie est couverte par des sols calcaires ainsi que des alluviaux (Zerroug, 2012). Le site de Guenzet jouit d'un climat continental semi- aride se caractérisant par des étés chauds et secs et des hivers pluvieux et froids. Le mois le plus pluvieux est avril et le plus sec est juillet (Barkat, 2014). La moitié Nord envoie ses eaux de surface vers le bassin méditerranéen par les réseaux d'Oueds. Ces réseaux d'Oueds alimentent les barrages et autres retenues collinaires de la région, le reste possède une hydrographie endoréique centrée sur les Chotts (Kaabach et Mebrak, 2010).

Les arbres dans ce site sont éparpillés ; le relief est très accidenté ; les sujets sont majoritairement âgés avec des troncs tortueux et un feuillage très dense, en association avec des arbres tels que le pin d'Alep et le figuier de Barbarie avec dominance des arbres d'oléastres.

❖ Site "Hammam Melouane", wilaya de Blida

Le site d'échantillonnage de Hammam Melouane (Daïra de Bougara, wilaya de Blida) à environ 40 Km au sud-ouest d'Alger, situé à 187 m d'altitude. Le secteur de Hammam Melouane situé à la pointe nord-est du Parc National de Chréa, la vallée de Hammam Melouane et son prolongement amont jusqu'à Imma Hlima en passant par Megtaâ Lazreg, forment ensemble un secteur de tranquillité touristique. C'est une petite localité qui se trouve dans un cadre qui nous rappelle les gorges de la Chiffa par ses montagnes et son ruisseau.

L'état du relief de la wilaya de Blida scinde le territoire en deux parties, la partie plaine appartenant à la grande plaine de la Mitidja et la partie montagne très accidentée faisant partie de l'Atlas tellien. La région de Blida appartient à l'étage bioclimatique subhumide à humide.

La partie plaine et le versant nord de la partie montagnarde sont plus arrosés en raison de la dominance des influences méditerranéennes fraîches et humides, en revanche le versant sud de la partie montagnarde est sous des influences à dominance continentale. Les précipitations varient de 550 à 650 mm au niveau de la plaine et les piémonts du nord et entre 900-1000 mm sur les altitudes à partir de 1200 m (Lakhal, 2018). Les températures moyennes fluctuent entre 10° C en hiver et 27° C en été pour les plaines et de 0,5° C en hiver et 22° C en été pour les altitudes supérieures à 1200 m (Boussouf, 2004). Les caroubiers dans ce site sont distancés les uns des autres, associées avec *Calycatum spinosa* et d'autres arbres tels que le pin d'Alep, le lentisque, l'oléastre et le thuya de berbérie.

❖ Site "Nador", wilaya de Tipaza

Le site de Nador est une plaine qui fait partie de la grande unité littorale appelée Sahel d'Alger, située à 75 km à l'ouest de la ville d'Alger. Administrativement, notre site se trouve dans la wilaya de Tipaza. Ce secteur est limité : - Au Nord, par la mer méditerranée. - Au Sud et à l'Est, par les pentes du Sahel. - A l'Ouest, par le massif du Chenoua. Cette vallée empreinte un sillon synclinal d'orientation NNE – SSW dont l'axe principal est occupé par l'Oued Nador qui a donné son nom à la plaine alluviale (Hachemi, 2016). Notre localité s'élève à 32 m d'altitude où les caroubiers sont éparpillés, on trouve des sujets jeunes voire âgés avec dominance des rejets sous forme de basse touffe avec un cortège floristique est très diversifié.

Compte tenu de sa position géographique, le site de Tipaza dispose d'un réseau hydrologique relativement important d'Est en Ouest. La région de Tipaza se situe dans un seul étage bioclimatique subdivisé en 02 variantes : l'étage sub-humide caractérisé par un hiver doux dans la partie Nord et l'étage sub-humide caractérisé par un hiver chaud dans la partie sud. Les vents ont des fréquences différentes durant l'année, les plus dominants sont de direction sud et ouest, quant au Sirroco, il est rarement enregistré au cours de l'hiver par contre les gelées sont fortement influencées par l'altitude.

❖ Site "Maison forestière Menassfa", wilaya de Relizane

La maison forestière de Menassfa, wilaya de Relizane situé au Nord-Ouest du pays à 155 m d'altitude. Les caroubiers dans ce site sont proches les uns des autres, on trouve des sujets jeunes voire peu âgés avec une diversité du cortège floristique.

Le relief du site de Relizane se divise en deux reliefs montagneux (les monts d'Ouancheris au sud-est et les monts de Beni Chougrane au sud – ouest). Le climat de la région est chaud et sec en été et frais et pluvieux en hiver. La pluviométrie moyenne a été estimée à 211 mm/an au cours de la dernière décennie ; elle dispose de 03 barrages et de 03 retenues collinaires (ANDI, 2013).

❖ Site "Commune de Tlemcen", wilaya de Tlemcen

Les échantillons ont été prélevés à la commune de Tlemcen, dont elle est le chef-lieu. Elle est située au sud du groupement Tlemcen, elle est limitée administrativement par la commune de Chetouane et Hennaya au Nord ; la commune de Terni au Sud ; la commune d'Ain Fezza à l'Est ; la commune de Mansourah à l'Ouest. Le site situé à 757 m d'altitude, les sujets du caroubier sont éparpillés et majoritairement ce sont des sujets âgés et parfois jeunes dont plus de 30 sujets jeunes inclus. Ils sont associées à *Olea europea* et *Pistacia lentiscus*.

La région de Tlemcen se situe au Nord-Ouest du pays à la frontière Algéro-marocaine et occupant l'Oranie occidentale. Elle s'étale sur le versant septentrional des monts éponymes, l'un des chaînons de l'Atlas Tellien dans sa terminaison occidentale extrême (A.S.P.E.W.I.T, 2008). Le climat de Tlemcen, qui est de type méditerranéen, est caractérisé par deux saisons nettement tranchées : les hivers doux et pluvieux et les étés secs et chauds avec des taux élevés de rayonnement solaire et d'évaporation. Le climat régnant est du type semi-aride supérieur avec présence de stations à microclimat humide telles l'Ourit et Hafir. La région immédiate de Tlemcen, fait partie du Jurassique supérieur. Les grès de Boumediène, grès de Franchetti, se trouvent immédiatement sous les dolomies de Tlemcen. Celles-ci sont largement karstifiées à Lalla Setti jusqu'à EI-Mafrouch, Sud de Tlemcen, englobant Ain Fezza et surtout EI-Ourit (Cascades) à l'ouest de Tlemcen. C'est en effet dans les grottes d'Ain Fezza et dans celles de EI-Ourit qu'on remarque le mieux ce phénomène de karstification par la présence de stalagmites et celle de la présence d'un réseau hydrographique sous-terrain très important (Gaouar, 1980).

II.4. Etude climatique des sites d'échantillonnage

II.4.1. Introduction

La caractéristique principale des climats méditerranéens, outre la clémence générale des températures, tient en la présence d'une saison sèche estivale (la période sèche) plus ou moins marquée associée à une variabilité et une irrégularité des précipitations, imposant à la végétation

en place un stress hydrique de durée variable (Emberger, 1955 ; Quezel et Médail, 2003 ; Le Houérou, 2004). De même, une période pluvieuse correspondant aux saisons relativement froides allant de l'automne au printemps. Ce climat est caractérisé par une grande diversité de climats régionaux dans notre pays, et joue un rôle déterminant en raison de son importance dans l'établissement, l'organisation et le maintien des écosystèmes (Aidoud, 1997).

L'Algérie est caractérisée par le contraste entre le climat méditerranéen de la bordure littorale et le climat désertique au sud, en passant par le climat des hauts plateaux et les hautes plaines. De nombreux travaux sur la climatologie ont été réalisés sur l'Algérie : (Seltzer, 1946 ; Bagnauls et Gaussen, 1953 ; Chaumont et Paquin, 1971 ; Aidoud, 1983 ; Dahmani, 1984 ; Derridj, 1990 ; Aime, 1991 ; Quezel et Berbero, 1993 ; Mekioui, 1989, 1997 ; Benabadji et Bouazza, 2000 ; Bestaoui, 2001).

Le climat régional peut être défini à l'aide de l'exploitation des données climatiques de la station météorologique la plus proche de la zone d'étude. Dans le cadre de notre étude, nous avons pris en considération comme paramètres climatiques, la pluviosité et les températures qui sont d'une part, les données les plus disponibles et d'autre part, les variables les plus influentes sur la végétation ; mais cela n'exclue pas l'influence des vents qui sont considérés comme des facteurs mécaniques, et d'autres composantes telles que les neiges, les gelées. D'après Kadik (1987), les paramètres climatiques (précipitations, vent, températures) varient en fonction de l'altitude, de l'orientation des chaînes de montagne et de l'exposition. Pour connaître les caractéristiques du climat, l'étude doit reposer sur une période d'observation assez longue. Estienne et Godar (1970) recommandent une durée de 20 ans pour l'étude des pluies. Pour Sauvage (1963) cette période doit s'étaler sur 30 ans. Selon Djellouli (1981), il faut une période d'au moins 25 à 30 ans.

II.4.2. Méthodologie

Par manque de données climatiques pour l'ensemble des sites étudiés sur une période suffisante pour une étude fiable, Les données utilisées, sont extraites des travaux de Seltzer, (1946) pour la période de 1913-1938 citées dans Le Houérou (1995), complétées par des données récentes (1987-2008) ; (1981-2011) ; (1980-2001) ; (2004-2014), issues de l'Office National de Météorologie de Dar El Beida sur des stations de référence. Les stations météorologiques de références retenues figurant dans le [tableau 1 \(Annexe 1\)](#).

II.4.3. Les précipitations

Les précipitations exercent une action prédominante pour la définition de la sécheresse globale du climat (Le Houerou *et al.*, 1977). Selon Kadik (1987) l'origine des pluies en Algérie est plutôt orographique. Djebaili (1978) définit la pluviosité comme étant le facteur primordial qui permet de déterminer le type de climat. En effet, celle-ci conditionne le maintien et la répartition du tapis végétal d'une part, et la dégradation du milieu naturel par le phénomène d'érosion d'autre part. L'altitude, la longitude et la latitude, sont les principaux gradients définissant la variation de la pluviosité. En effet, la quantité de pluies diminue du Nord au Sud et d'Est à l'Ouest ; et devient importante au niveau des montagnes. Ceci a été confirmé par Chaâbane (1993). Cet auteur précise que le gradient pluviométrique est décroissant d'Est en Ouest ; cela est dû au fait que les nuages chargés de pluies qui viennent de l'atlantique sont arrêtées ou déviées vers l'Est par la Sierra Nevada en Espagne et aussi par la barrière constituée par les hautes montagnes du Maroc et que ne laissent passer que les nuages les plus hauts. Pour Le Houerou (1995), la variabilité des pluies elle-même, peut expliquer certaines limites de végétation, tel le passage entre la végétation forestière et la végétation steppique. Du point de vue quantitatif, la pluviosité est exprimée par la pluviosité moyenne annuelle. En effet quand la pluviosité diminue, l'évapotranspiration et la durée de la saison sèche augmente (Le Houerou, 2000). Gaouar (1980) mentionne que c'est en fonction du relief que la pluviosité donne à la végétation ses caractéristiques et au sol sa typologie.

II.4.3.1. Pluviométrie moyenne mensuelle et annuelle

a. Gradient altitudinal des précipitations :

La plus part des régions montagneuses d'Algérie, sont dépourvus de poste d'observations météorologiques. L'indisponibilité des données climatiques rend le recours aux extrapolations indispensables.

Plusieurs auteurs, comme Seltzer (1946), Chaumont et Paquin (1971) Le Houerou (1989), et Derridj (1990) ont noté l'existence d'une relation linéaire entre les précipitations et l'altitude. Plus l'altitude est élevée, plus les précipitations augmentent. Nous avons effectué des corrections climatiques de la station la plus proche. Seltzer (1946) révéla qu'à chaque augmentation altitudinale de 100 m, La pluviométrie augmente de 40 mm, la température maximale baisse de 0.7 °C, la température minimale baisse de 0.45 °C. D'après ces révélations, les données seront extrapolées et corrigées pour notre zone d'étude (l'ensemble des sites) sur la base du principe de la différence altitudinale (Tableau 2 ; Annexe 1).

Chapitre II : Aperçu sur la zone d'étude et méthodologie globale

On constate d'une manière générale que pour l'ensemble des sites considérés, les moyennes annuelles de la période ancienne sont plus élevées que celle de la période récente, cela signifie qu'il y a une baisse de pluviométrie d'une période à l'autre. Inversement pour les sites 'Annaba et Tlemcen.

Nos sites d'étude reçoivent une tranche pluviométrique annuelle de l'ordre de 415.05 mm pour le site de Sétif et 1044.1 mm pour le site de Jijel (Tableau 3) durant la période (2004-2014). La période la plus arrosée s'étend du mois d'octobre à avril. Par ailleurs les mois de juin, juillet et août présentent une sécheresse récurrente. Les précipitations moyennes les plus élevées dans la période récente se situent au mois de Décembre avec 410 mm pour le site d'Annaba, et Janvier avec 250.7 mm pour le site de Tlemcen. Les précipitations moyennes les plus basses se situent au mois de juillet avec 1,7 mm (Tableau .2 ; Annexe 1 ; Fig.2).

Tableau.3 : Précipitations moyennes, mensuelles et annuelles en (mm) corrigés pour la période (2004-2014)

Site/Mois	J	F	M	A	Mai	J	Juil	A	S	O	N	D	Annuel
Annaba	387,3	378,5	383,1	349,8	330,5	306,6	296,5	303,4	341,3	352,7	382,6	410	979,3
Jijel	131	138,4	114,6	80,2	51	16,4	1,7	19,1	68,6	99,5	159,4	168,9	1044,1
Sétif	39,73	44,95	42,28	54,82	45,28	20,86	13,68	14,22	28,90	29,92	35,16	39,79	415,05
Blida	137,5	149,6	135,4	119,5	118,9	73,5	66,5	77,3	91,9	123,5	184,6	158,6	738,7
Tipaza	36,7	61,2	46	18,3	33,8	5,3	3,9	4	46,4	56,6	148,01	118	574,8
Relizane	142,3	145,4	133,2	151,3	134,8	110,8	103,3	110,6	119	127,9	162,9	151,9	457,3
Tlemcen	250,7	240	244,7	242,9	239,9	213	207,9	206,6	227,3	234,1	248	241,4	548

Source : ONM, 2015

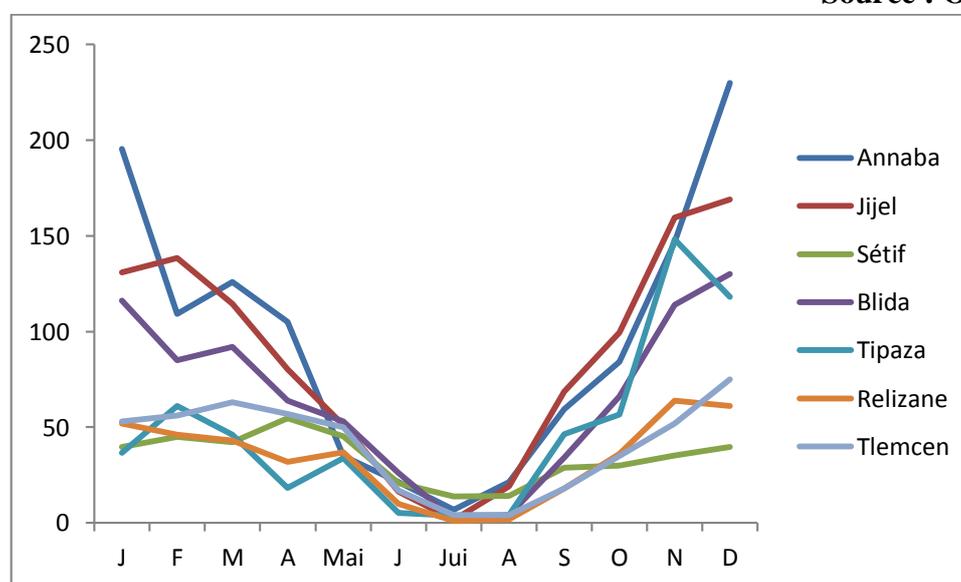


Fig. 2 : Variation mensuelle des précipitations en mm (2004-2014)

II.4.3.2. Régimes saisonniers des précipitations :

C'est [Musset \(1953\)](#) (in [Chaabane, 1993](#)) qui, le premier, a défini cette notion. Elle consiste à calculer la somme des précipitations par saison et à effectuer le classement des stations par ordre de pluviosité décroissante en désignant chaque saison par l'initiale P.H.E ou A. ; désignant respectivement le printemps, l'hiver, l'été et l'automne.

Le régime saisonnier est la somme des précipitations par saison ce qui permet de classer les saisons par ordre de pluviosité décroissante, on se basant sur les critères suivants :

*Automne (A)..... Septembre, Octobre et Novembre. *Hiver (H)..... Décembre, Janvier et Février. *Printemps (P).....Mars, Avril et Mai. * Eté (E)..... Juin, Juillet et Aout.

Tableau. 4 : Régime saisonnier des précipitations au niveau des sites étudiés pour la période (2004-2014)

Site/Saison	H	P	E	A	Régime saisonnier
Annaba	534,40	265,70	49,50	290,09	HAPE
Jijel	438,30	245,80	37,20	327,50	HAPE
Sétif	124,46	142,38	48,76	93,98	PHAE
Blida	331,00	209,00	32,00	214,00	HAPE
Tipaza	215,90	98,10	13,20	251,01	AHPE
Relizane	159,00	112,00	13,00	118,00	HAPE
Tlemcen	184,00	170,00	25,00	105,00	HPAE

D'après le [tableau 4](#), le régime saisonnière des précipitations actuel dans les sites d'étude est variable, il est de type HAPE pour les sites Jijel, Annaba et Blida ; de type HP AE pour les sites de Relizane et Tlemcen ; de type PHAE pour le site de Sétif et de type AHPE pour le site de Tipaza. On remarque que les précipitations les plus importantes sont celles qui tombent en hiver et en automne, par rapport à celle de printemps, bien que ces dernières constituent un rapport non négligeable ([Fig.3](#)). On a conclu que le régime saisonnier est de type (**HPAE**) caractéristique du climat méditerranéen de type semi-continentale (cas de nos sites de Relizane et Tlemcen).

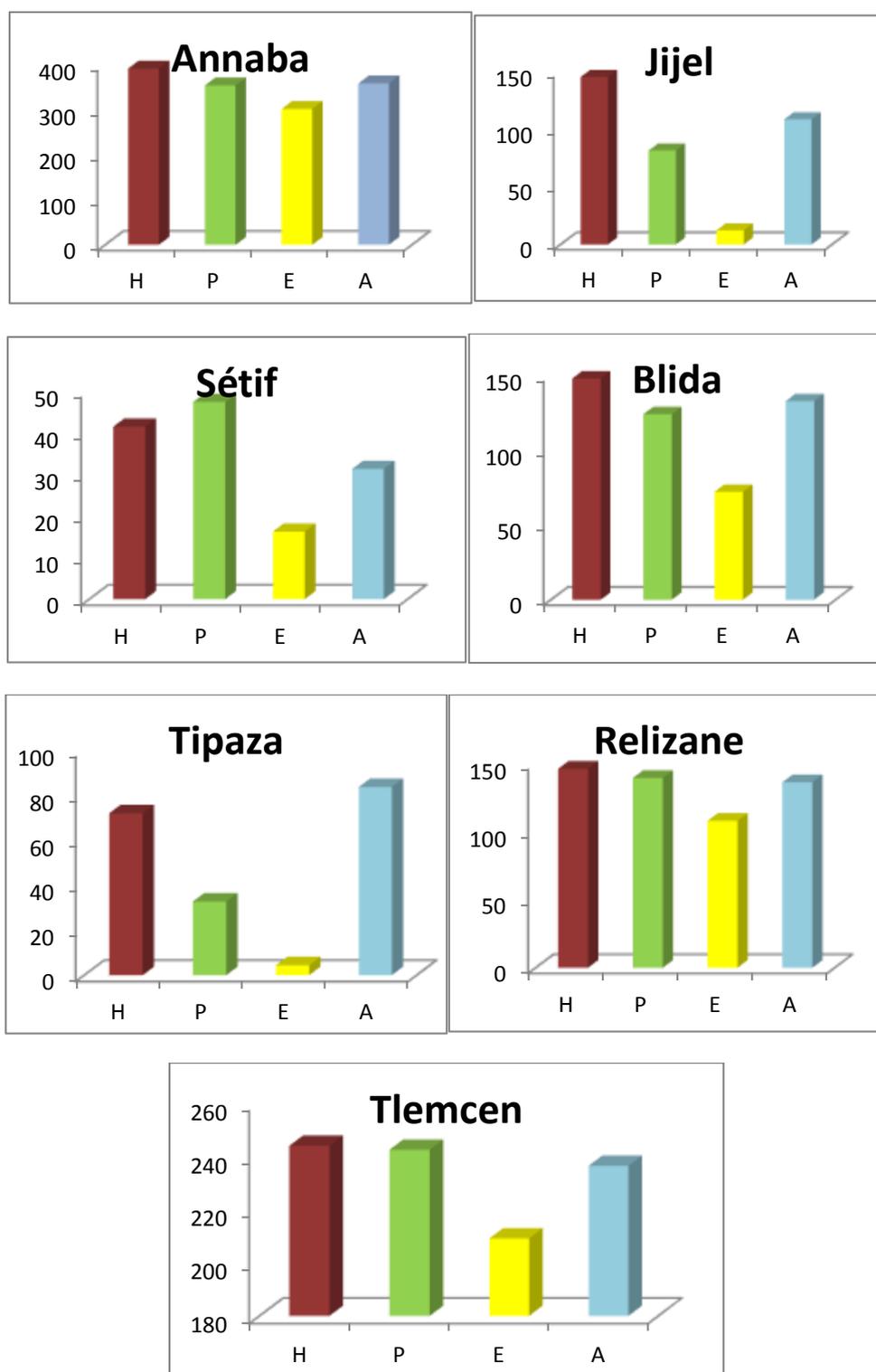


Fig. 3 : Les régimes saisonniers (précipitation en mm) durant la période (2004-2014)

II.4.4 Les températures

La température est considérée comme un facteur constitutif après la pluviométrie et joue un rôle déterminant dans la vie végétale. La température intervient dans le déroulement de tous les processus de la croissance, la reproduction, la survie et par conséquent la répartition géographique du végétal, générant les paysages les plus divers (Soltner, 1987). Elle est aussi, un élément écologique fondamental. Peguy (1970), l'a défini comme une qualité de l'atmosphère et non comme une grandeur physique mesurable. Estienne et Godard (1970), précise que la température règle les modalités de la météorisation des roches, elle conditionne l'évaporation physique et physiologique et intervient largement dans le régime des cours d'eaux tout en fixant aux êtres vivants des limites plus ou moins strictes de répartition.

II.4.4.1. Les températures moyennes mensuelles et annuelles

Les dernières décennies ont connu une légère élévation de la température à cause du réchauffement climatique global qui est un phénomène d'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère, à l'échelle mondiale et sur plusieurs années (Boublenza, 2012). La température moyenne annuelle durant la période (2004-2014) pour l'ensemble des sites étudiés varie de 14.20 °C à Annaba jusqu'à 19.9 °C à Tipaza (Tableau 5 ; Annexe 1).

II.4.4.2 Températures moyennes des maxima du mois le plus chaud « M » :

Le maxima thermique « M » c'est une valeur du mois le plus chaud de l'année, elle est aussi importante que « m » puisque elle représente un facteur limitant pour certains végétaux. Pour nos sites d'étude les températures sont assez élevées durant la saison sèche, "M" oscille entre 26.34 °C au site d'Annaba et 36.8 °C pour le site de Relizane. Celle de Tlemcen est proche de celle d'Annaba. Les valeurs de "M" pour les sites de Jijel, Blida et Tipaza sont presque proches. Cependant, la valeur "M" du site de Sétif vient avant Relizane avec 34,30 °C (Tableau 6), le mois d'Aout est le mois le plus chaud pour la majorité des sites.

Comparant les moyennes des températures maximales de la nouvelle période par apport à l'ancienne, on remarque une légère augmentation de la moyenne des températures maximales actuelle (Tableau 7 ; Annexe 1). Les températures maximales donnent un aperçu sur la résistance de végétal aux Températures élevées (jusqu'à 36,8 °C à Relizane).

II.4.4.3. Températures moyennes des minima du mois le plus froid « m » :

Ce paramètre en relation directe avec le degré de gelée, est très important à considérer. En effet,

Chapitre II : Aperçu sur la zone d'étude et méthodologie globale

Djebaili (1984) fait constater qu'il permet de classer les espèces climax en fonction de leur réaction aux températures basses.

On remarque que "m" varie entre 1.92 °C pour le site de Sétif et 9.5 °C pour le site de Tipaza. Le site de Sétif présente la "m" la plus basse, suivie par les sites Annaba, Blida, Relizane et Tlemcen. Alors que le site de Jijel présente une "m" proche celle de Tipaza (Tableau 6).

Pour la plupart des sites, le mois de Janvier est le mois le plus froid dont la température la plus basse se situe dans le site de Sétif. Au contraire le site de Tipaza présente la température la plus élevée. La période récente est caractérisée par des valeurs de "m" proches voire inférieures que celles de la période ancienne (Tableau.7 ; Annexe 1).

Tableau. 6 : Moyenne des Minima (m) et Moyenne des Maxima (M) durant la période (2004-2014)

Sites	Moyennes des minima "m" (°C)	Moyennes des maxima "M"(°C)
Annaba	3.75 (Février)	26.34 (Aout)
Jijel	6.8 (Février)	31.6 (Aout)
Sétif	1.92 (Janvier)	34.30 (Juillet)
Blida	4.85 (Janvier)	31.57 (Aout)
Tipaza	9.5 (Janvier)	32.1 (Aout)
Relizane	4.27 (Janvier)	36.8 (Juillet)
Tlemcen	4.56 (Janvier)	26.43 (Aout)

II.4.4.4. Amplitude thermique (M-m) ou Indice de continentalité :

L'amplitude thermique « **M-m** » est un indice qui permet de définir si la zone est sous l'influence maritime ou continentale. L'amplitude thermique se définit par la différence entre les moyennes des maximums extrêmes d'une part, et des minimums extrêmes d'autre part. D'après Djebaili (1984), L'amplitude thermique a une valeur écologique importante à connaître, car elle représente la limite thermique extrême à laquelle chaque année en moyenne les végétaux doivent résister. L'amplitude thermique base sur la classification thermique de (Debrach, 1953) :

*Climat insulaire où $M-m < 15\text{ °C}$; *Climat littoral où $15\text{ °C} < M-m < 25\text{ °C}$;

*Climat semi continental où $25\text{ °C} < M-m < 35\text{ °C}$; *Climat continental où $M-m > 35\text{ °C}$.

M : Moyenne mensuelle des maxima du mois le plus chaud.

m : Moyenne mensuelle des minima du mois le plus froid.

Pour l'amplitude thermique, ou indice de continentalité, définissent bien notre climat pour les sites étudiés. Partant de cette classification, d'après le [tableau 7 \(Annexe 1\)](#), on remarque que notre zone d'étude se rattache au climat méditerranéen littoral pour les sites côtiers tels qu'Annaba, Jijel et Tipaza pour la période (2004-2014). Alors que se caractérise par un climat semi- continentale pour les sites d'intérieurs tels que Blida, Sétif, Relizane et Tlemcen aussi bien pour la période (2004-2014). On peut constater que les sites de Sétif et Relizane sont restées avec le même type de climat (Semi-continental) pour les différentes périodes. Ainsi, les sites d'Annaba et Jijel demeurent au même type de climat (Insulaire-littoral). Seulement les sites de Tipaza et Tlemcen qui ont connu une évolution du climat Semi-continental vers le climat littoral durant la période récente. Cette évolution se traduit par une diminution d'écarts thermique ou l'indice de continentalité.

II.4.5. Synthèse Climatique

La combinaison des paramètres climatiques (précipitations et températures) ont permis à plusieurs auteurs de mettre en évidence des indices. Tel est le cas de [De martonne \(1926\)](#), [Emberger \(1936\)](#) et [Gausson \(1958\)](#). La synthèse climatique met en évidence les caractéristiques du climat méditerranéen permettant ainsi une délimitation des différents étages bioclimatiques ([Rivas-Martinez, 1981](#) ; [Dahmani, 1997](#)).

Après avoir étudié les éléments essentiels du climat (Température et pluviométrie en particulier), nous pouvons caractériser le climat des sites étudiés. La synthèse des données climatiques fait appel à plusieurs indices, dont nous retenons particulièrement : le diagramme Ombrothermique de Gausson, l'indice de sécheresse estivale, le quotient pluviométrique et le climagramme d'Emberger.

II.4.5.1. Indice de sécheresse estivale d'Emberger-Giacobbe et méditerranéité

[Emberger \(1943\)](#) a caractérisé l'intensité de la sécheresse estivale par un indice "S", qui est le rapport des précipitations estivales "Pe", à la moyenne des maxima du mois le plus chaud "M". Si celui-ci est inférieur à 5, il y'a sécheresse estivale, est la station en question est méditerranéenne ([Daget, 1977](#)).

Tableau.8 : Valeurs de l'indice de sécheresse estivale d'Emberger-Giacobbe pour les sites pluviométriques de la zone d'étude pour la période 2004-2014.

Site	PE	M	S
Annaba	302,16	25,07	12,05
Jijel	12,4	30,07	0,41
Sétif	16,25	32,42	0,50
Blida	72,43	30,14	2,40
Tipaza	4,4	30,57	0,14
Relizane	108,23	35,30	3,07
Tlemcen	209,16	24,70	8,47

D'après les résultats de l'indice "S" (Tableau.8), la méditerranéité de notre aire biogéographique ne se prête à aucune équivoque sauf pour les sites d'Annaba et Tlemcen

II.4.5.2. Indice d'aridité de De Martonne :

L'aridité étant une notion spatiale, c'est-à-dire on qualifie une région d'aride et non une période, encore l'aridité ne doit pas être confondue avec la sécheresse qui est un concept météorologique à référence temporelle (période, année). De Martonne propose un indice qui combine la température moyenne (T), et la pluviométrie moyenne (P), qui sont deux facteurs fondamentaux agissant sur le développement de la végétation, c'est un indice très largement utilisé. De Martonne a ainsi proposé l'indice annuel ($IDM = P/t + 10$), En fonction des valeurs seuils de cet indice, De Martonne distingue divers bioclimats (Tableau. 9).

Tableau. 9 : valeurs de l'indice de De Martonne et bioclimats correspondants.

Valeurs de l'indice	Type de bioclimat	Valeurs de l'indice	Type de bioclimat
0 - 5	Hyperaride(HA)	20 -30	Subhumide(SH)
5 - 10	Arde(A)	30-55	Humide(H)
10 - 20	Semi-aride(SA)	>55	Perhumide(PH)

Les résultats de calcul de l'indice d'aridité de DE Martonne présentent dans le tableau 10, nous a révélé que notre zone d'étude présente un bioclimat varié de l'Humide (Annaba, Jijel) au semi-aride (Sétif, Tipaza et Relizane) passant par le subhumide (Blida et Tlemcen).

Tableau. 10 : Valeurs de l'indice d'aridité des stations étudiées pour la période 2004-2014.

Site d'étude	P (mm/an)	T moyennes annuelles(°C)	Indice d'aridité	Type de climat
Annaba	979,3	14,2	40,47	Humide
Jijel	1044,1	18,4	36,76	Humide
Sétif	415,05	15,43	16,30	Semi-aride
Blida	738,7	17,31	27,05	Subhumide
Tipaza	574,8	19,9	19,22	Semi-aride
Relizane	457,3	18,29	16,16	Semi-aride
Tlemcen	548	14,36	22,50	Subhumide

II.4.5.3. La période sèche : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953)

Selon le mode établi par [Bagnouls et Gaussen \(1953\)](#), le diagramme ombrothermique permet de dégager deux périodes l'une sèche et l'autre humide. Ils sont construits en portant en abscisse les mois de l'année et en ordonnée les précipitations moyennes mensuelles « P » sur un axe et les températures moyennes mensuelles « T » sur le second axe, en prenant soin de doubler l'échelle des températures par rapport à celle des précipitations ($P= 2T$).

Un mois est considéré sec lorsque la courbe des températures (T °C) est supérieure à celle des précipitations ($2T>P$). La partie du graphe comprise entre les deux courbes, traduit à la fois la durée et l'intensité de la sécheresse. Le climat est sec lorsque la courbe des températures est au-dessus de celle de précipitations et humide dans le cas contraire ([Dreux, 1980](#)). Selon [Bagnouls et Gaussen](#)

(1953), un mois peut être considéré sec, si le total des précipitations est inférieur ou égal au double de la température. Sa formule comme suit : $P < 2 T$

P : précipitation moyenne du mois (mm) ;

T : température moyenne du même mois (°C).

Lorsque les températures passent au-dessus de la courbe des précipitations, la saison correspondante est déficitaire en eau ; et lorsque la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures, la saison correspondante est humide.

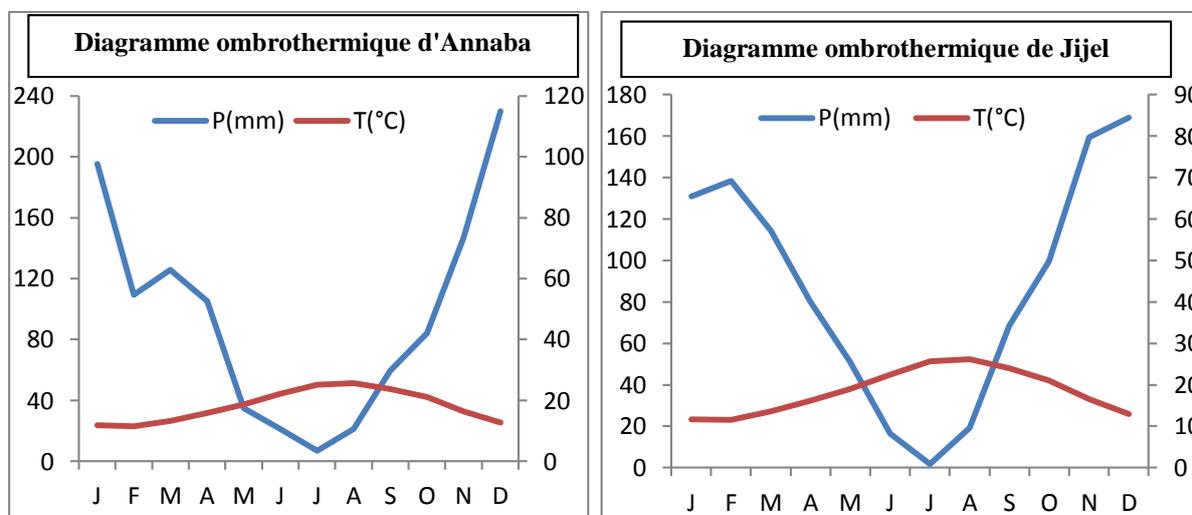
Notre zone d'étude se situe dans un climat méditerranéen donc elle possède une période sèche. La durée de la saison sèche subit fortement l'influence de l'altitude ([Bagnouls et Gaussen, 1953](#)). En d'autres termes, en montagne, les températures s'élèvent plus tardivement et diminuent plus tôt qu'en bord de la mer.

Chapitre II : Aperçu sur la zone d'étude et méthodologie globale

Les diagrammes ombrothermiques sont représentés par la [fig. 4](#) où sont portées les courbes ombriques des périodes humides et sèche, ainsi que les courbes thermiques correspondant à la période sèche. On remarque que le site d'Annaba se caractérise par deux saisons bien distinctes, l'une humide s'étale du mois de Septembre jusqu'au mois d'Avril, et l'autre saison sèche s'étale du mois de Mai au mois d'Avril. Pour le site de Jijel, on constate qu'elle est caractérisé par deux saisons bien distinctes ([Fig.4](#)) : L'une humide s'étale du mois de Septembre jusqu'au mois de Mai, et l'autre saison sèche s'étale du mois de Juin au mois d'Avril. Cette période sèche coïncide avec la saison chaude, ce qui est la caractéristique commune aux climats méditerranéens. A travers le diagramme ombrothermique, nous avons observé que la période sèche à «Guenzet » Sétif comprend cinq mois allant de Juin à Octobre avec une faible sécheresse au mois d'Octobre, alors qu'une période de sept mois pour la période humide. Pour le site de Blida, l'examen de diagramme ombrothermique ([Fig.4](#)) montre que notre site présente une période sèche de quatre mois allant de Juin à Septembre et une période humide de huit mois d'Octobre au Mai. Tandis que le site de Tipaza se caractérise par une période sèche de six mois allant d'Avril à Septembre et une période humide de six mois allant d'Octobre au Mars.

Cependant, on remarque que le site de Relizane se caractérise par une période sèche de six mois allant d'Avril à Septembre et une période humide de six mois d'Octobre au Mars.

Ainsi, Tlemcen visualisent une période humide qui s'étend de huit mois avec des précipitations irrégulières allant d'Octobre à Mai et une période sèche de quatre mois allant de Juin au Septembre.



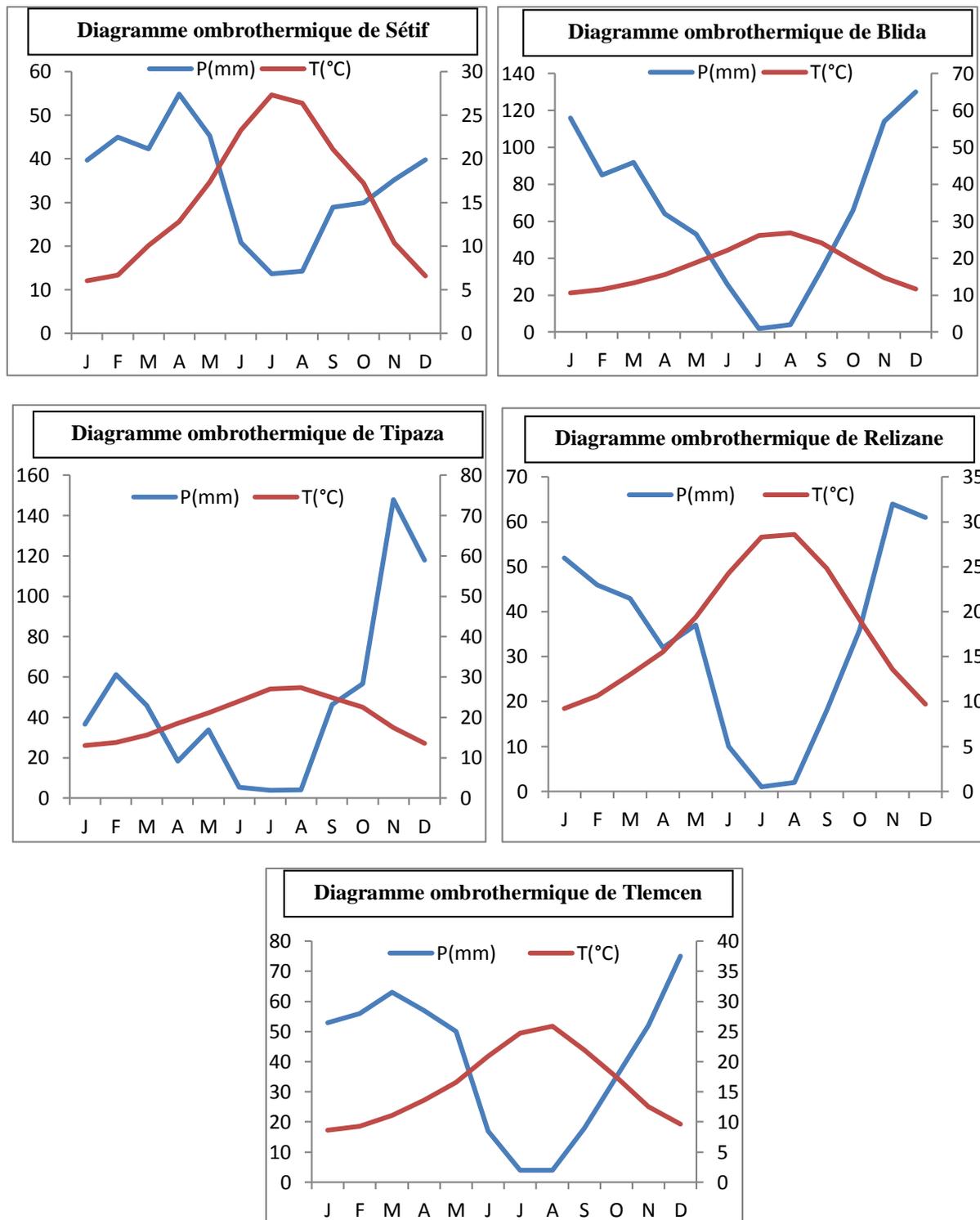


Fig.4 : Diagrammes ombrothermiques des sites d'étude pour la période (2004-2014)

II.4.5.4. Le quotient pluviothermique d'Emberger :

Cet indice climatique est le plus fréquemment utilisé pour caractériser le bioclimat d'une région méditerranéenne, et notamment en Afrique du nord (Benabadji et Bouazza M., 2000b).

Chapitre II : Aperçu sur la zone d'étude et méthodologie globale

Le quotient pluviométrique « Q2 » ou « Q3 » est déterminé par la formule établie par [Emberger](#).

$$Q2 = 2000 \cdot P / M2 - m2 \text{ (Tableau 11)}$$

Dont : **P** : Moyenne des précipitations annuelles (mm) ;

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud ($t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,2$) ;

m : Moyenne des minima du mois le plus froid ($t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,2$).

Sur la base du quotient pluviométrique et la valeur de « m », [Emberger](#) a proposé une classification des climats méditerranéens en étages bioclimatiques et en leurs variantes thermiques. Cette formule a été modifiée par Stewart en 1969, il se calcule par la formule suivante : $Q3 = (P / M - m) \cdot 3,43$ où **Q3** : Quotient pluviométrique d'[Emberger](#) modifié Stewart.

Tableau.11 : Etages bioclimatiques selon [Emberger \(1952\)](#)

Zones climatiques	Q ₂	P en mm
Saharienne	Q ₂ <10	P<100
Aride	10<Q ₂ <45	100<P<400
Semi-aride	45<Q ₂ <70	400<P<600
Subhumide	70<Q ₂ <110	600<P<800
Humide	110<Q ₂ <150	800<P<1200
Perhumide	Q ₂ >150	P>1200

"D'une manière générale, un climat méditerranéen est d'autant moins sec que le quotient est plus grand". L'obtention des étages bioclimatiques ou ambiances bioclimatiques consiste en une combinaison sur un même climagramme où (m) en abscisse et le quotient pluviométrique (Q2) en ordonnée ([Fig.5](#))

La lecture du [tableau. 7 \(Annexe 1\)](#) montre qu'il existe une différence entre l'ancienne et la nouvelle période : Selon le climagramme pluviométrique d'Emberger on constate qu'il a un changement de l'étage Subhumide tempéré à l'étage Subhumide chaud(Tipaza), de l'étage Humide chaud à l'étage Humide tempéré (Annaba et Jijel) et de l'étage Semi-aride tempéré à l'étage Subhumide tempéré (Tlemcen). Donc, comme tous les sites littoraux algériens et en raison de la régulation thermique de la mer, Annaba et Jijel se placent dans l'étage bioclimatique humide tempéré ; Tipaza et Tlemcen se placent dans l'étage bioclimatique subhumide tempéré à chaud. Alors que les sites Sétif et Relizane garde le même l'étage bioclimatique Semi-aride frais à tempéré.

II.4.6. Conclusion

Du point de vue climatique et après extrapolation à partir des anciennes données de [Seltzer \(1946\)](#) et des données plus récentes, ces deux pas de temps (1913-1938, 1980-2014), nous ont permis de remarquer que, la méditerranéité du climat de notre aire biogéographique est confirmée par l'indice de sécheresse estivale d'Emberger-Giacobbe ; sauf pour les sites d'Annaba et Tlemcen où l'indice de sécheresse estivale est supérieur à 5. Également, l'analyse des différents diagrammes permettent de visualiser une période pluvieuse qui s'étend généralement d'octobre à la fin d'avril et une période sèche pour le reste de l'année. Toutefois les mois de juin, juillet et août demeurent les mois les plus secs pour les deux périodes et l'ensemble des sites considérés. D'une manière générale, les périodes de sécheresse englobent une partie du printemps, tout l'été et une partie de l'automne.

Pour la plupart des sites, les températures et les précipitations divisent l'année en deux saisons distinctes : Une saison sèche peut aller jusqu'à six (06) mois pour les différents sites. Une saison humide qui se caractérise par des précipitations irrégulières. A partir de cette étude on peut dire que les précipitations montrent une grande variabilité des apports d'eau d'une année à l'autre. Les températures moyennes minimales, du mois le plus froid, se situent en général au mois de Janvier. Les températures moyennes maximales, du mois le plus chaud se situent au mois d'Août dans la plus part des sites.

Le climat de la zone étudiée est pratiquement du type méditerranéen caractérisé par :

- La concentration de pluies pendant la période froide (automne et hiver)
- Une sécheresse apparente pendant les mois les plus chauds (l'été).
- La durée de la saison sèche est en moyenne de 4mois, elle couvre la saison d'été. L'utilisation du quotient pluviothermique d'Emberger et indice d'aridité de De Martonne permettent de classer la zone étudiée dans l'étage bioclimatique humide tempéré ; subhumide tempéré à chaud avec quelques sites semi-aride frais à tempéré.

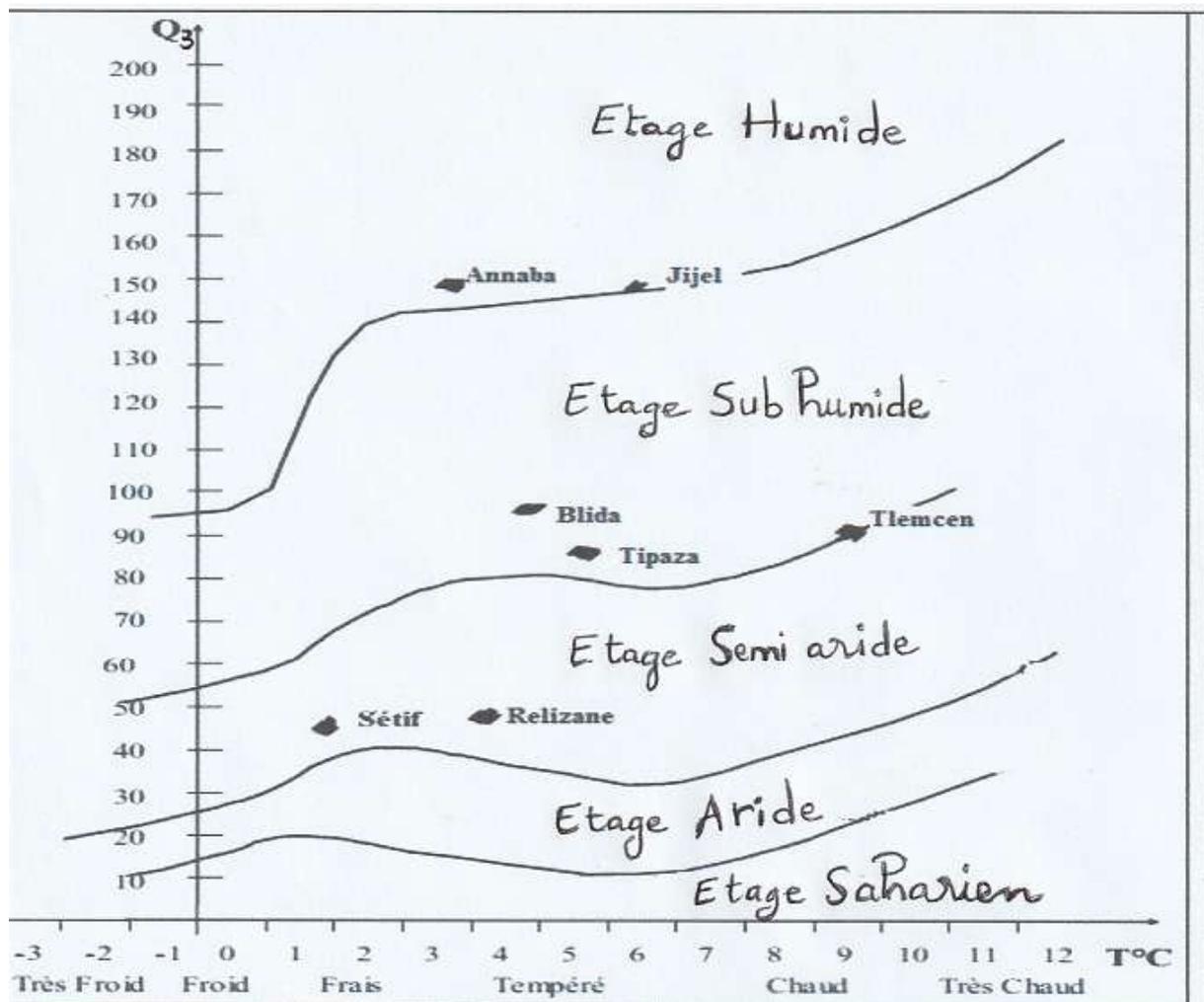


Fig. 5 : Position des sites d'étude pour les deux périodes (1913-1938) et (1980-2014) sur le climagramme pluviothermique d'Emberger.

Références bibliographiques

- Aidoud, A., 1983. Contribution à l'étude des écosystèmes steppiques du Sud oranais : phytomasse, productivité primaire et applications pastorales. Thèse Doct. d'Etat, U.S.T.B.H. Alger, 250 p.
- Aidoud, A., 1997. Fonctionnement des écosystèmes méditerranéens. Recueil des Conférences. Lab. Ecol. Vég. Univ. Rennes 1. France. 50p.
- Aime, S., 1991. Etude écologique de la transition entre les bioclimats sub-humides, semiaride et aride dans l'étage thermoméditerranéen du tell oranais (Algérie occidentale). Thèse. Doct. Fac. Sci. Et Tech. St Jérôme, Marseille, pp : 185-194.
- ANDI, 2013. Agence Nationale de Développement de l'Investissement. 24p.
- ANIREF, 2011. Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière.

- A.S.P.E.Wi.T., 2008.** Atlas de l'environnement de la wilaya de Tlemcen-(conception et réalisation sous la direction de Mr Bouayed M.M.). 240p
- Barkat, H., 2014.** Analyse des groupements Herpétologiques dans les Hautes Plaines Sétifiennes (*cas de la région de Beni Aziz*). Mém. Mag. En biologie animale. Uni. Ferhat Abbas. Sétif.101p.
- Bagnouls, F. et Gaussen H., 1953.** Les climats biologiques et leurs classifications. Ann. Geog. Pp 220-335.
- Bagnouls, F., et Gaussen H., 1953.** Saison sèche et indice xérothermique. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse (88), pp: 3-4 et 193-239.
- Benabadj N. et Bouazza M., 2000(a).** Contribution à une étude bioclimatique de la steppe à *Artemisia herba-alba* Asso. dans l'Oranie (Algérie occidentale). Rev. Sci. Chang. Plan. Paris Vol. 11, N° 2, 117-23.
- Benabadj, N. et Bouazza, M., 2000(b).** Quelques modifications climatiques intervenues dans le Sud-Ouest de l'Oranie (Algérie occidentale). Rev. En. Ren. (3) 177-125.
- Bestaoui, K., 2001.** Contribution à une étude syntaxonomique et écologique des matorrals de la région de Tlemcen. Mém. Mag. En écologie. Univ. Tlemcen, 173p.
- Bouldjedri, M., 2013.** Contribution à l'Etude Ecologique d'un Hydro-système de la région de Jijel : cas de la zone humide de Beni-Belaid (Algérie). Thèse Doc. En écologie végétale. Univ. Badji Mokhtar -ANNABA, 152 p.
- Boussouf, L., 2004.** Contribution à l'étude phytoécologique et phytosociologique de quelques groupements préforestiers de de gradation dans l'atlas Blideen (secteur Algérois) (Doctoral dissertation), 180p.
- Chaabane, A., 1993.** Etude de la végétation du littoral septentrionale de Tunisie : typologie, syntaxonomie et éléments d'aménagements. Thèse. Doct. Sci. Univ. Aix-Marseille III, 205p+ annexes.
- Chaumont, M. et Paquin, C., 1971.** Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500 000. Alger, Soc. Hist. Afr. Nord, 4 p.
- Daget, P.H., 1977.** Le bioclimat méditerranéen, caractères généraux, méthodes de classification. Végétation. 34, 1 : 1 - 20.
- Dahmani, M., 1984.** Contribution à l'étude des groupements à chêne vert (*Quercus rotundifolia* L.) des monts de Tlemcen (Ouest Algérien) : Approche phytosociologique et phytoécologique. Thèse Doct. 3 cycle. Univ. Aix Marseille III, 238p.
- DGRF, 2006.** Vitalité des peuplements de chênes- liège et chênes verts : Situation actuelle, état des connaissances et actions à entreprendre. Actes du colloque en Portugal «*Association internationale forêts Méditerranéennes*». 6 p.
- De Martonne, E., 1926.** Une nouvelle fonction climatologique indice d'aridité La météo. 449-459.
- Derridj, A., 1990.** Etude des populations de *Cedrus atlantica* M. en Algérie. Thèse. Doct.u.p.s.Toulouse.288p
- Djebaili, S., 1984.** Steppe algérienne, phytosociologie et écologie. O.P.U. Alger, 171p.
- Djebaili, S., 1978.** Recherche phytosociologique sur la végétation des hautes plaines steppiques de l'Atlas Saharien. Thèse. Doct. Univ. Sci. Tech. Lang. Dox Montpellier, 229p.

Chapitre II : Aperçu sur la zone d'étude et méthodologie globale

- Djellouli, Y., 1981.** Étude climatique et bioclimatique des hauts plateaux du Sud oranais (Wilaya de Saida). Thèse Doct. 3ème Cycle, Univ. Sci. Tech. H. BOUMEDIENE, Alger, 178p. + Annexe.
- Dreux, P., 1980** – Précis d'écologie. Ed. Presses Universitaires de France. Paris, 231p
- Emberger, L., 1936.** Remarques critiques sur les étapes de végétation dans les montagnes marocaines. Bull. Soc. Bot. Suisse. Vol. Jub. Inst. Rübél, 46 : 614- 631.
- Emberger, L., 1943.** Les limites de l'aire de végétation méditerranéenne en France. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse 78(3), pp 159-180.
- Emberger, L., 1952.** Sur le Quotient pluviothermique des climats. C.R. Sci ; n°234, Paris pp : 2508-2511.
- Emberger, L., 1955.** Une classification biogéographique des climats. Rech. Trav. Lov. Géol. Bot. Zool. Fax. Sci. Montpellier, 47p.
- Emberger, L., 1955.** Une classification des climats du point de vue phytogéographique. Bull. Sci. Hist. Nat. Toulouse, pp : 97_124.
- Estienne, P., et Godard, A., 1970.** Climatologie. Collection Unis. 3 ème Ed. 80 p.
- Gaouar, A., 1980.** Hypothèse et réflexion sur la dégradation des écosystèmes forestiers dans la région de Tlemcen (Algérie). For. Med. Tome II, N°2, 131 -146.
- Gaussen, H., 1956.** L'étude des climats par les courbes ombrothermiques : application à la cartographie. In : L'information géographique, volume 20, n°5, 1956. pp. 191-193 ;
- Hachemi, A., 2016.** Etude de l'intrusion marine dans les aquifères côtiers. Cas de l'aquifère côtier de l'Oued Nador (w. Tipaza). Thèse de Doctorat. ENSA El Harrach – Alger. 194p
- Kaabeche, T. et Mebrak, A.R., 2010.** Contribution à l'étude des risques naturels (sismiques et mouvements de terrain) dans la Wilaya de Sétif. Mém. Ing . Uni. Ferhat Abbas. Sétif. PP 46-56.
- Kadik B., 1987.** Contribution à l'étude du pin d'Alep en Algérie : Ecologie, dendrométrie, morphologie. O.P.U. 580p.
- Lakhal, A., 2018.** Analyse spatio-temporelle des précipitations dans la zone de la Mitidja. The se de Master, ANRH Blida, 57P.
- Le Houerou H.N., Claudin J., et Pouget M., 1977.** Etude bioclimatique des steppes algériennes avec une carte bioclimatique au 1/1000000, Bull. Soc, Hist. Nat. Afri. Nord. pp.36-40.
- Le Houerou, H. N., 1989.** An agro-bioclimatic classification of arid and semi- arid lands in the isoislamic mediterranea.XV3-4., 95-144.
- Le Houerou, H. N., 1995.** Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du nord de l'Afrique, Diversité biologique, développement durable et désertification, CIHEAM option méditerranéennes, série B, N° 10 Montpellier, France, 396p.
- Le Houerou, H. N., 2000.** Use of fodder trees and shrubs (shrubs in the arid and semiarid zones of west Asia and North Africa. Proceeding of works shop on native and exotic fodder shrubs in arid and semi-arid zone, 27 October-2 November 1996, Hammamet, Tunisia. I.C.A.R.D.A, Aleppo (Syria). Vol. I: 9-53.
- Le Houerou, H. N., 2004.** Classification écoclimatique des zones arides (S.I) de l'Afrique du nord.Ecologia mediterranea, 95-143.

Chapitre II : Aperçu sur la zone d'étude et méthodologie globale

- Meddour, R., 2010.** Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie : exemple des groupements forestiers et préforestiers de la Kabylie Djurdjurenne. Thèse Doct., Univ. Mouloud Mammeri, TiziOuazou, 397 p + annexes.
- Mekioui, A., 1989.** Etude Bioclimatique de la méditerranée occidentale et de l'Ouest Algérien. Mém. D.E.S. en Biologie. Univ. Tlemcen, 83p +Annexe.
- Mekioui, A., 1997.** Etude bioclimatique de la faune orthoptérologique de deux stations dans la région de Hafir (monts de Tlemcen) et mise en évidence d'*Ampelodesma mauritanica* (espèce pâture) dans les fèces de différentes espèces de Caelifère. Mém. Mag. Ecol. Univ Aboubekr BELKAID Tlemcen 129 p.
- Musset, R., 1953.** Les régimes pluviométriques saisonniers dans l'Ouest de la France et particulièrement en Normandie. Bull Soc Linn de Normandie (1934) s8, t7 : 49–65.
- ONM, 2015 :** Office National de Météorologie. 2015. Ministère des Transports. Algérie.
- Quezel, P., et Medail, F., 2003.** Ecologie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier. Paris. 592 p.
- Quezel, P. et Barbero, M., 1993.** Variations Climatiques au Sahara et en Afrique sèche depuis le Pliocène : enseignements de la flore et de la végétation actuelle. Bull. Ecol. (24), pp 191-202
- Peguy, C. P., 1970.** « Précis de climatologie ». Ed. Masson et Cie, 444 P
- Rivas Martínez S., 1981.** Les étages bioclimatiques de la péninsule Ibérique Anal. Gard. Bot. Madrid 37(2), pp 251-268.
- Sauvage, C., 1963.** Le coefficient pluviothermique d'Emberger, son utilisation et la représentation graphique de ses variations au Maroc. Ann. Sér. Phys. Du Globe et de la Météo., Ins. Sc. Chérifien 20 : 11-23.
- Seltzer, P., 1946.** Le climat de l'Algérie. Inst. Météor. Et de phys-Du glob. Univ. Alger, 219p.
- Sfaksi, N., 2012.** Suivi de la dynamique paysagère au sein d'un espace naturel protégé : Cas du Parc National de Taza (Wilaya de Jijel, Algérie). Mém. Mag. En biologie végétale. Uni. Ferhat Abbas. Sétif.146 p.
- Soltner, D., 1987.** Les Bases de la production végétale : 2 : Le climat. Édition 4. Éditeur Dominique Soltner, 315 p.
- Stewart, P., 1969.** « Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique ». Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, 59, pp. 23-36.
- Zerroug, K., 2012.** Elaboration d'un système d'information géographique (flore) dans la Wilaya de Sétif. Mém. Mag. Uni. Ferhat Abbas. Sétif.32 p.

Aperçu méthodologique global

1-Récolte du matériel végétal

La récolte du matériel végétal s'est faite en deux sessions au niveau de 7 provenances spontanées du caroubier en Algérie. Les feuilles matures de couleur vert foncé ont été récoltées aléatoirement sur une période de deux mois (Mai et Juin 2013), alors que les gousses ont été récoltées en début Septembre et Octobre 2014.

Au niveau de chaque site, 20 arbres ont été échantillonnés au hasard. 20 gousses par arbres ont été récoltées. 20 feuilles par arbre ont été récoltées. Soit un total de un total de 2800 gousses (7 provenances x 20 arbres par provenance x 20 gousses par arbre) et un total de 2800 feuilles (7 provenances x 20 arbres par provenance x 20 feuilles par arbre).

Les échantillons récoltés ont tous été séchés à la température ambiante du laboratoire et des échantillons de référence ont été déposés dans l'herbier de l'Université de Djelfa.

Ce matériel végétal a servi aux différentes mesures et dosages.

2. Aspects abordés :

2.1. Etude de la variabilité intra et inter-population de la morphologie des gousses et des graines

L'étude de la variabilité intra et inter population de la morphologie des gousses et graines du caroubier a été faite au plan qualitatif et quantitatif : (1) sur le plan quantitatif à l'échelle de la gousse (longueur, largeur, épaisseur, poids total de la gousse, poids de la pulpe, nombre total de graines par gousse, poids total des graines) et à l'échelle de la graine (longueur, largeur, épaisseur, poids moyen). Certaines variables synthétiques ont été également calculées : rapport « Longueur/Largeur de la gousse » ; rapport « longueur de la corde de la gousse/longueur de la gousse » ; et rapport « poids total de la graine/poids total de la gousse » correspondant au rendement en graines. Le poids moyen des graines a été calculé en divisant le poids total des graines par gousse sur le nombre total de graines par gousse. (2) sur le plan qualitatif, les gousses et les graines sont caractérisées par leur couleur, forme et leur surface.

2.2. Etude de la variabilité inter-population de la morphologie de la feuille

Huit traits quantitatifs mesurés pour la morphologie des feuilles : la longueur de la feuille (cm), largeur de la feuille (cm), longueur du pétiole (cm), longueur et largeur la foliole basale et terminale (cm), ainsi le nombre de folioles par feuille. À partir de ces mesures, certains rapports synthétiques ont été déduits : [longueur de la feuille/largeur de la feuille], [longueur de la feuille/longueur du pétiole], etc.

De plus, les feuilles ont été caractérisées qualitativement par leur couleur et la présence ou l'absence de la foliole terminale.

2.3. Etude de la variabilité inter-provenance de quelques paramètres physico-chimiques de différentes parties végétales

Les feuilles, les gousses et les graines de *C. siliqua* utilisées pour l'étude morphologique ont servi aux analyses physico-chimiques (taux de matière sèche, taux de cendres, teneur en matière grasse, teneur en sucres totaux) après avoir été réduites en poudres fines et conservées à l'abri de l'humidité et de la lumière dans des flacons en verre.

Chaque dosage a été répété 3 fois pour une provenance donnée ce qui donne un total de 21 mesures par partie végétale. Soit un total de 63 mesures.

3. Analyse statistique des résultats

Des statistiques descriptives des variables (moyenne, l'intervalle de variation, écart-type ou coefficient de variation) ont été faites ainsi que des graphes de type histogrammes ou boxplots.

La comparaison de moyennes a été faite par l'analyse de la variance.

Les corrélations linéaires de Pearson ont été analysées entre certaines variables.

L'analyse en composantes principale ACP a aussi été appliquée aux données quand jugé nécessaire.

Les logiciels Statistica 10 (version d'essai) et R×64.3.4.0. ont été servi aux analyses.

Chapitre III :

Genetic resources of carob tree
(*Ceratonia siliqua* L.) in
Algeria: insight from pod and
seed morphology

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

Chapitre III. Article 1: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology. *Revue Agrobiologia* (2019) **9**(2): 1581-1600

Résumé de l'article

En Algérie, le caroubier, une composante de l'*Oleo-Ceratonion*, s'étend sur une vaste zone allant d'Est en Ouest, englobant des altitudes basses et moyennes ; des bioclimats semi-arides et humides, mais on manque de données sur la structure de la variation morphologique de ses gousses et de ses graines dans cette zone, malgré l'utilité d'une bonne compréhension de la variation intra-spécifique de ces caractères pour la domestication ; la conservation et la gestion durable de cette ressource. La présente étude vise à décrire la variabilité morphologique des caractères des gousses et des graines de ces populations et aborde les questions suivantes : a) quel est le niveau de variation inter et intra-populations du caroubier ; (b) et comment est répartie cette variation sur le plan géographique ?

Sept (07) populations spontanées de caroubier du nord de l'Algérie, situées à différentes altitudes, incluant notamment des paysages de basse altitude, de collines et de montagnes, et évoluant sous différentes conditions bioclimatiques, ont été étudiées pour la morphologie des gousses et des graines. 2800 gousses et 2800 graines, récoltées sur 140 arbres, ont été mesurées pour les caractères quantitatifs (taille des gousses et graines, nombre de graines) et qualitatifs (couleur, forme et aspect de la surface des gousses et des graines).

Des différences significatives entre les provenances ont été observées pour tous les caractères quantitatifs, mais elles sont plus prononcées pour certains caractères de la graine (épaisseur, poids et longueur) et de la gousse (largeur et épaisseur) et moins prononcées pour la largeur de la graine et la corde de la gousse. De légères mais significatives différences intra-provenance c'est-à-dire entre les arbres, ont également été observées.

Parmi les caractères qualitatifs des gousses et des graines, la forme et l'aspect de surfaces des gousses sont les plus uniformes entre les provenances. Au sein de la provenance, la proportion d'arbres polymorphes pour un caractère qualitatif donné est variable. Le patron de variation ne reflète pas les conditions bioclimatiques et l'altitude du site d'origine ou la distance à la mer, suggérant plutôt une mosaïque de variation à travers la zone prospectée. Cette étude fournit un premier aperçu sur les ressources génétiques du caroubier en Algérie à travers les caractères morphologiques des gousses et des graines. Elle indique un bon potentiel des populations algériennes en tant que source de matériel de base pour les futurs programmes de sélection.

Mots clés : *Ceratonia siliqua* L., Algérie ; morphologie ; gousse ; graine ; provenance ; variabilité.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

GENETIC RESOURCES OF CAROB TREE (*Ceratonia siliqua* L.) IN ALGERIA: INSIGHT FROM POD AND SEED MORPHOLOGY

KOCHERANE Rima ^{1*}, KROUCHI Fazia ², DERRIDJ Arezki ²

1. Department of Agronomy, Faculty of Nature and life Science, ZIANE Achour University, Djelfa, 17000, Algeria.
2. Laboratoire de production, amélioration et protection des végétaux et des denrées alimentaires, Department of Agronomic Sciences, Faculty of Biological and Agronomic Sciences, Mouloud MAMMERI University, Tizi-Ouzou, 15000, Algeria

Abstract

Description of the subject. In Algeria, the carob tree, a component of the *Oleo-Ceratonion*, extends over a large area from East to West encompassing low and medium elevations and semi-arid and humid bioclimates. Yet data on the pattern of morphological variation of its pods and seeds across such area are lacking despite the usefulness of a good understanding of the within- species variation of such traits for domestication, conservation and sustainable management purposes.

Objective: The present study aims at describing morphological variation in pod and seed traits of such populations and addressed the following questions: (a) what is the level of variation within and between wild carob populations; (b) and how is such variation geographically distributed?

Methods: Seven (07) spontaneous carob populations of northern Algeria located at various elevations including low land, hilly and mountainous landscape and evolving under different bioclimatic conditions were investigated for pod and seed morphology. 2800 pods and 2800 seeds, collected on 140 trees, were measured for quantitative traits (pod and seed size, seed number) and qualitative ones (pod and seed color, shape and surface).

Results: Significant differences between provenances were observed for all quantitative traits but these differences are more pronounced for some seed traits (thickness, weight and length) and pod ones (width and thickness) and less pronounced for seed width and pod chord. Slight but significant differences within-provenances, i.e. between trees, were also observed. Among the qualitative traits of pods and seeds, pod shape and seed surface were the most uniform ones across provenances. Within-provenance, the proportion of polymorphic trees for a given qualitative trait was variable. The pattern of variation did not reflect bioclimatic conditions and elevation at site of origin or distance from the sea coast, suggesting rather a mosaic of variations across the prospected area.

Conclusion: This study provides a first insight into carob genetic resources in Algeria through morphological characters of pods and seeds. It indicates a good potential of Algerian populations as a source of raw material for future breeding programs.

Keywords : *Ceratonia siliqua* L., Algeria; morphology; pod; seed; provenance; variation.

* Auteur correspondant : KOCHERANE Rima. e-mail : rimrim53@ymail.com

INTRODUCTION

The Carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) is one of the most characteristic species of the Mediterranean region [39]. It is a legume of the Fabaceae family and Caesalpiniaceae sub-family. It is a spontaneous or a cultivated tree that may reach a height of 5 to 15 m [50, 9]. Together with *Pistacia lentiscus* L. and *Olea europaea* L. var. *sylvestris*, this species forms one of the most characteristic associations of the lowest zone of the Mediterranean vegetation and is thus considered to be a climax community (*Oleo-Ceratonion*) [9]. The Carob tree is cultivated in the Mediterranean countries including Spain, Portugal, Italy, Morocco, Tunisia and Algeria [50, 1, 4, 9, 8, 54, 45, 59], in Turkey [11], in South Africa and USA[27].

In Algeria, carob tree has been reported to be very common in the Tell region by [39] and [50] and frequently cultivated in the Saharan Atlas[50]. The Carob tree is tolerant to salt stress and drought [15, 21, 20, 14, 22]. In Algeria, it grows on all types of soils except very moist ones and it resprouts abundantly [39]. In Morocco, it grows under arid, semi-arid, sub humid and humid bioclimates in their warm and mild variants and it is also adapted to all soil types[1].

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

Carob cultivation in marginal and prevailing calcareous soils of the Mediterranean region is important environmentally and economically [9]. The species may contribute to developing disadvantaged marginal areas of Morocco [27] and salted zones of northwestern Algeria particularly Relizane region[40].

Carob tree produces an edible sweet pod with a much appreciated pulp in the Mediterranean region. Besides its consumption as fresh, dry or transformed material, the pod represents a valuable source of forage for livestock and is largely used in food industry [10]. The fruit provides flour used in food industry for its polyphenols antioxidant properties and in industrial production of bioethanol [44]. Carob pod extracts are also used for ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* [63, 67, 25], citric acid production [44], β -mannanase production [66, 26] and for enhancement of lactic acid production by *Lactobacillus casei* [62].

Carob seeds contain a gum called locust bean gum (LBG) or “E410” used in food industry as a stabilizing and gelatinous agent in various products [6], as an additive into sugar-free, starch-free flour for diabetics [65], as drug ingredient in pharmaceutical industry [57, 49] and as a source of dietary fibers in foods [16].

Pods extracts play a role in suppression of intestinal parasites [43] in the treatment of diarrhea [56], in the treatment or control of hyperlipidaemia (high cholesterol in plasma) and have antiproliferative [53], antibacterial [42], antioxidant and anti-inflammatory properties [44].

Such examples of multipurpose uses illustrate the growing importance of carob products mainly pulp and locust gum likely to promote its cultivation, use and conservation.

Indeed, despite its economic importance, *Ceratonia siliqua* an agroforestry tree in North Africa [30] is underutilized in such region particularly in Algerian, which occupies only the 8th rank for carob production [9, 24]. Lack of research on diversity assessment is one of the constraints in national programs to promote conservation and use of underutilized crop species [47] and characterization, evaluation and descriptors lists are among the required activities to overcome such constraints [47]. A better understanding of genetic diversity and its distribution is essential for its conservation and use [51]. Seed source choice is important in a restoration and management perspective [12].

Morphological characterization of carob pods and seeds around the Mediterranean region has been carried out on spontaneous populations of the species [35, 11] ; on cultivars [4, 54, 8, 59, 38, 29] or both types [28, 18, 45, 23, 19]. Carob pod and seed traits (i.e. size and quality of pods, seed yield) have been reported by [9] to vary according to cultivars as a result of centuries of cultivation. Significant variations of pod and seed traits have also been reported on wild populations of the species [28, 35, 18]. Such variation is suggested to be under influence of environmental factors [28] ; edapho-climatic site factors[18] ; latitude [29] and/or agronomic practices in the case of varieties [18].

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

In Algeria, the carob tree, a component of the *Oleo-Ceratonion*, extends over a large area from East to West encompassing low and medium elevations and semi-arid and humid bioclimates. Yet data on the pattern of morphological variation of its pods and seeds across such area are lacking despite the usefulness of a good understanding of the within- species variation of such traits for domestication, conservation and sustainable management purposes.

The present study aims at describing morphological variation in pod and seed traits of such populations and addressed the following questions: (a) what is the level of variation within and between wild carob populations; (b) and how is such variation geographically distributed ?

Material and methods

2.1. Study sites

The study has been undertaken on 7 spontaneous carob populations in north Algeria which are Annaba, Jijel, Setif, Blida, Tipaza, Relizane and Tlemcen respectively from East to West (Fig.1). Such populations are located at various elevations (including low land, hilly and mountainous landscape) and evolve under different bioclimates based on calculations made on data provided by National Meteorology Office of Algeria (Table1).

2.2. Plant material

Pods and seeds used in this study were collected from the 7 carob populations during September and October 2014 coinciding with the peak maturity of pods. In each population, a random sample of 20 trees was retained and 20 pods per tree were randomly harvested, totalizing 140 trees and 2800 pods. The collected material was labelled with respect of tree and population identity then brought to the lab for measurements. The 20 pods of each tree were crashed of individually for seed extraction. Given the homogeneity of seed size within pods, one seed per pod was randomly retained for subsequent measurements totalizing 20 measured seed per tree and 2800 seeds in total.

2.3. Measured traits

A. Qualitative traits

Pods and seeds were characterized by their color, shape and surface aspect. Modalities of such qualitative traits were inspired from data literature [9].

B. Quantitative traits

Characterization of pods and seeds was made basing on descriptors of the International Plant Genetic Resources Institute “IPGRI” [9]. Pod and seed description were carried out on the basis of 14 variables namely: length; width; thickness chord; weight; pulp weight; total number of seeds per pod in the case of pods; length; width; thickness and total seed weight, mean seed weight in the case of seeds. Some synthetic variables were also calculated: ratio “pod length/pod width”; ratio “pod chord/pod length” and ratio “total seed weight/ pod weight \times 100” corresponding to seed yield. Mean seed weight was calculated by dividing the total seed weight per pod on total number of seeds per pod.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

In all 17 morphological characters were measured, of which 3 are qualitative and 14 are quantitative. Quantitative measurements were done using a caliper with a precision of ± 0.1 mm and an electronic balance (SCALTEC SBA33, Heiligenstadt, Germany) with accuracy of ± 0.1 mg. Qualitative measurements were based on naked eye observations.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

2.4. Statistical analysis

In order to compare morphological variability of carob populations, data obtained on quantitative traits were subjected to statistical analysis. A descriptive analysis (mean and coefficient of variation) was performed on quantitative traits followed by a two-way nested ANOVA. Linear correlations between variables were also calculated. Data obtained on qualitative traits were subjected to analysis of relative frequencies of modalities for each variable at three levels : on the whole sample, at provenance level and within-provenance. The Statistica10 software (Shareware) and R64.3.4.0 software were used for analyses.

Results

3.1. Qualitative traits

Pod and seed qualitative traits (color, shape and surface aspect) and corresponding modalities are given in table 2.

Pod color: Three pod shade colors were identified among the whole sample of pods (Table 2) : dark-brown (45.97 %), reddish-brown (28.36 %) and light-brown (25.67 %).

Light-brown pods were represented at a very high proportion in Relizane (i.e. 98.75 %) and at an intermediate one in Annaba (40.75 %). Dark-brown pods were dominant in Tlemcen, Jijel and Blida (i.e. 59.25; 80.50 and 90.50 % respectively). Reddish-brown pods were better represented in Setif; Tipaza and Annaba (i.e. 57.75; 53.50 and 38.50 % respectively) but were absent in Relizane and Blida and on all but one individual of Jijel. Monomorphic individuals with exclusively light-brown pods were dominant in Relizane (95 %). Monomorphic ones with exclusively dark-brown pods were dominant in Blida (85 %) ; Jijel (70%) and Tlemcen (50 %). Polymorphic individuals for pod color were dominant in Tipaza (100%) ; Annaba (65%) and Setif (60 %).

Pod shape: Three pod shapes were recorded (Table 2): curved (90.07%); straight (6.29 %) and spiral (3.64%).

At provenance level, curved pods were represented at high proportions across all provenances (Table 2) while spiral shape reached a maximum of 14.5 % in Tlemcen and 10.25 % in Annaba. Within-provenance, monomorphic individuals for the straight or spiral pod shape were absent. Monomorphic ones for curved pod shapes were dominant in Relizane (80 %) but were also present in Setif (55 %) and Tipaza (45 %). Polymorphic individuals were dominant in Tlemcen; Jijel; Annaba; Blida where they accounted for 80 to 85%.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

Table 2: Distribution of trees for pod and seed qualitative traits.

Trait	Modalities	% of trees within-provenance (n=20)							% of total trees (n=140)
		Annaba	Jijel	Setif	Blida	Tipaza	Relizane	Tlemcen	
Pod color	Light -brown	40,75	14,5	0,25	0	19	98,75	6,50	25.67
	Dark-brown	20,75	80,5	42	90,50	27,5	1,25%	59,25	45.97
	Reddish- brown	38,50	5	57,75	9,5	53,5	0	34,25	28.36
Pod shape	Straight	1,75	8	0	11	1,50	0,50	2,75	3.64
	Curved	88	85,75	97	85,75	92,75	98,50	82,75	90.07
	Spiral	10,25	6,25	3	3,25	5,75	1	14,50	6.29
Pod surface	Smooth	37,75	27,5	58	43,25	75,75	34,25	4,25	40.11
	Wrinkled	62,25	72,5	42	56,75	24,25	65,75	91,25	59.25
	Very rough	0	0	0	0	0	0	4,50	0.64
Seed color	Reddish brown	0	36,75	7,25	3,5	16,75	0	0	9.18
	Dark-brown	51,75	48	22,75	28,5	35,50	31	39,50	36.71
	Blakish-brown	28,25	5,25	0,25	0	0,50	3,50	1	5.54
	Light- brown	20	10	69,75	68	47,25	65,50	59,50	48.57
Seed shape	Rounded	59,25	31	96,25	10,25	22,75	96	49,75	52.18
	Oval	23,25	35,5	0,25	58,5	17,25	0	21,50	22.32
	Elliptical	17,50	33,5	3,5	31,25	60	4	28,75	25.50
Seed surface	Smooth	81,50	69,5	88,75	53,75	90	82,25	77	77.54
	Wrinkled	18,50	27,75	11,25	42	10	17,75	22	21.32
	Very rough	0	2,75	0	4,25	0	0	1	1.14

Pod surface: Three pod surfaces were recorded (Table 2): wrinkled (59.25 %); smooth (40.11 %) and very rough (0.64 %).

At provenance level, wrinkled pod surfaces were better represented in Tlemcen, Jijel, Annaba, Relizane and Blida (91.25 to 56.75 %) and smooth ones better represented in Tipaza i.e. 75.75 %. Within-provenance, a very rough pod surface was present only on 3 individuals in Tlemcen. Individuals with an exclusively wrinkled pod surface were better represented in Tlemcen; Jijel, Annaba and Relizane (80 ; 65 ; 55 and 50 % respectively) contrarily to Tipaza where they accounted for only 10 %. Those with an exclusively smooth pod surface were absent in Tlemcen and best represented in Tipaza (60 %) followed by Setif (50%). Polymorphic individuals for pod surface were best represented in Blida (60 %).

Seed color: 4 seed colors were identified (Table 2): light-brown (48.57 %); dark-brown (36.71 %) ; reddish-brown (9.18 %) and blackish-brown (5.54 %).

Light-brown seeds were dominant among 5 out of 7 provenances (Setif, Blida, Tipaza, Relizane and Tlemcen) with proportions ranging from a low of 47.25 % to a high of 69.75 % (Table 2). Dark-

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

brown seeds were better represented in Jijel (48 %) and Annaba (51.75 %). Reddish-brown ones were absent among three provenances (Annaba, Relizane and Tlemcen).

Blackish-brown seeds were absent in Blida and did not exceed 5.25% in other provenances except Annaba where they reached a maximum of 28.25%. The proportion of polymorphic individuals for seed color is higher than that of monomorphic ones for all provenances except Relizane and Blida which showed relatively balanced proportions of monomorphic and polymorphic trees.

Seed shape: Three modalities of this trait were observed (Table 2): rounded; oval and elliptical, which accounted respectively for 52.18; 22.32 and 25.50% of the whole sampled seeds.

Rounded seeds were highly represented in Relizane and Setif (96 %) followed by Annaba (59.25 %) and Tlemcen (49.5 %); elliptical seeds were better represented in Tipaza (60 %) and oval ones better represented in Blida (58.5 %). Jijel contained these three modalities at comparable rates. Polymorphic individuals for seed shape were best represented in Jijel; Tlemcen and Blida (65 to 60 %). Individuals with only rounded seeds were dominant in Setif (80 %) and Relizane (70 %), while those with only elliptical seeds best represented in Tipaza (40 %).

Seed surface: Seed surface comprised three modalities (Table 2): smooth (77.54 %), wrinkled (21.32 %) and very rough (1.14 %). The latter category is absent in 3 provenances (Tipaza, Setif and Relizane) and present at very low rates i.e. 1; 2.75 and 4.25 % in Tlemcen; Jijel and Blida respectively.

For this trait, the proportion of polymorphic trees is higher than that of monomorphic ones for all provenances except Tipaza which contained 60 % of monomorphic trees with an exclusively smooth seed surface.

3.2. Quantitative traits

Statistical parameters for pod and seed traits (i.e. overall means and corresponding coefficients of variation and range per tree) are given in Table 3. Boxplots of main traits are given in Fig 2. The distribution of trees within-provenance for along their mean values of pod and seed traits are given in Table 4 /Fig 3. The results of the two-way nested Anova on pod and seed traits are given in Table 5. The correlation matrix between traits is given in table 6.

3.2.1. Within and between provenance variations for quantitative traits

Pod length: The overall mean for this trait is 15.27 cm. The longest pods were observed in Tlemcen, followed by Annaba, and the shortest ones in Relizane followed by Jijel. All provenances contained individuals pertaining to the class of low and intermediate pod length even at fluctuating rates, while the class of longest pods was absent among individuals of Relizane, Jijel and Setif.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

Pod width: The overall mean for this trait is of 1.97 cm. The largest pods were recorded in Setif ; the narrowest ones in Jijel followed by Tipaza. 100 % of individuals from Setif pertained to the class of the largest pods i.e.]2-2.5]cm and 100% of those from Jijel to the class of intermediate pod width i.e.]1.5 - 2]cm (Table 4). The remaining provenances contained individuals pertaining both to the class of intermediate and high values of pod width.

Pod thickness: The overall mean for this trait is of 0.76 cm. The thickest pods were found in Blida; the thinnest ones in Relizane. Overall, the intermediate class of pod width was recorded on 79 % of individuals and was represented within each provenance. Contrary to the class of low values, it recorded only among 25 and 35 % individuals from Tlemcen and Relizane respectively and the class of high values recorded only among 35 to 45 % of individuals from Annaba and Blida respectively.

Pod weight: The overall mean for this trait is 11.08 g. The heaviest pods were found in Blida, followed by Tlemcen, and the lightest ones in Relizane. As a whole, half of individuals pertained to the same class of mean values of pod weight. Individuals with low and intermediate pod weights were observed in each provenance while those with heavy pods were observed only in Blida, Tipaza and to a lesser extent in Tlemcen.

Total number of seeds per pod: In average there were 10.56 seeds per pod. The highest number of seeds per pod was recorded in Blida and the lowest one in Relizane. Indeed, Relizane contained a great proportion of individuals with no more than 8 seeds per pod, contrary to Blida and Tlemcen which contained a consistent proportion of individuals with more than 13 seeds/pod (Table 4/Fig 3).

Seed yield: Overall, total seed mass represented 18.19 % of pod weight. The highest mean was recorded in Tipaza and the lowest one in Relizane. Indeed, this parameter was below 10 % among 80 % of individuals from Relizane and exceeded 20 % for 70 % of individuals from Jijel and Tlemcen and for 55 % of those from Blida and Tipaza.

Pod chord: This trait averaged 11.97 cm. The highest mean was registered in Tlemcen, followed by Blida, and the lowest one in Jijel. Between provenances variation of this trait was less pronounced comparatively to other pod traits.

In average, pod chord represented 79 % of pod length (range per provenance: 73-84 % and per tree : 49-98%). 71.43 % of individuals pertained to the intermediate class i.e.] 0.65 - 0.85]. At provenance level, 100% of individuals from Setif pertained to this class whereas 70 % of those from Jijel pertained to the class] 0.85 - 1.00].

Ratio “pod length/pod width”: In average, pods were 7.82 times longer than wider (range per tree: 5.52 – 13.13 and per provenance: 6.57 - 8.94 % for Setif and Tlemcen respectively).

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

As a whole, 65% of individuals pertained to the same class of ratio i.e.]7 - 10]. Relizane and Setif showed respectively 65 and 70% of individuals in the class of low ratio i.e.]5 - 7] which indicates their relatively larger pods.

Mean seed weight: In average, a seed weighed 0.17 g. The heaviest seeds were registered in Blida and the lightest ones in Relizane. The former provenance had 75% of individuals with mean seed weight ≥ 0.20 g and the latter 100 % of individuals with mean seed weight < 0.15 g.

Seed length: Overall, seed length averaged 9.12 mm. The longest seeds were found in Annaba followed by Blida and the narrowest ones in Relizane. Annaba contained no individual in the class of short pods, contrary to Relizane which contained 100 % of individuals in this class (Table 4/Fig3).

Seed width: Seed width averaged 6.84 mm. The largest seeds were observed in Tipaza followed by Setif and the thinnest ones in Relizane. Individuals with large seeds are missing in Relizane and those with narrow seeds are missing in Tipaza. The other provenances contained individuals pertaining to the 3 classes of this trait (Table 4).

Seed thickness: In average seeds are 4.04 mm thick. The thickest seeds were recorded in Blida and Jijel and the thinnest ones in Relizane. Indeed, 100 % of individuals from Relizane pertained to the class of low mean values; 100 % of those from Setif pertained to the class of high mean values. Individuals of the remaining provenances pertained mainly to the class of intermediate means.

As a whole, the ranking of provenances for mean values of pod and seed traits showed an inconsistent pattern according to the trait of interest. Relizane segregated from the other provenances by the lowest means for 9 traits of which 4 are related to seed size, 3 to pod size and 2 others to seed production (number of seeds per pod and seed yield). The only trait for which such provenance was ranked in an intermediate position is pod width which registered the lowest mean at Jijel. The top position for high mean values was occupied by some provenances (Annaba, Blida and Tlemcen) for 3 to 4 traits; by Tipaza for seed width and seed yield and by Setif for pod width. Conversely, the bottom position for the lowest mean values was occupied by Jijel just behind Relizane for 2 pod traits (length and weight) and 2 seed ones (length and width).

The two-way nested Anova revealed significant differences between provenances for all considered traits (Table 5). It also revealed slight but significant differences within-provenance, i.e. among trees. The extent of among provenance differences for pod and seed traits is the highest for seed thickness and the lowest for pod chord (Fig. 2).

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

Table 3: Statistical parameters on quantitative traits of pods and seeds.

Character	Pod											Seed			
	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)	Chord (cm)	Weight (g)	Pulp weight (g)	Seed number/pod	Total seed weight (g)	Seed yield (%)	Length / width	Chord/Length	Mean seed weight(g)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
	pl	pwd	pth	pch	pwg	ppwg	tsn	swg	sy	pl/pwd	chr/pl	mswg	sl	swd	sth
Annaba	16.91	2.04	0.85	12.27	12.24	10.43	10.01	1.81	15.95	8.38	0.73	0,18	9.91	6.85	3.90
Jijel	13.64	1.76	0.81	11.50	9.38	7.45	11	1.92	21.88	7.78	0.84	0,18	8.86	6.65	4.28
Setif	15.36	2.34	0.66	11.52	11.48	9.99	9.32	1.49	13.32	6.57	0.75	0,16	8.90	6.98	4.14
Blida	15.46	1.98	0.90	12.50	14.30	11.57	12.76	2.73	21.34	7.81	0.81	0,23	9.76	6.82	4.34
Tipaza	14.66	1.84	0.78	11.72	10.25	8.20	11.01	2.04	23.98	8.02	0.80	0,19	9.33	7.09	4.19
Relizane	13.76	1.95	0.60	11.56	8.67	7.97	7.15	0.70	8.58	7.25	0.84	0,10	8.07	6.56	2.96
Tlemcen	17.08	1.91	0.68	12.63	11.18	8.84	12.63	2.34	22.55	8.94	0.74	0,19	8.98	6.86	4.44
Overall mean	15.27	1.97	0.76	11.97	11.08	9.22	10.56	1.86	18.19	7.83	0.79	0,17	9.12	6.84	4.04
Coefficient of variation (%)	18.47	14.91	22.18	21.28	36.20	40.67	29.54	41.89	49.51	20.42	17.03	33,13	10.05	7.66	15.18
Range per tree	10,09 - 20,59	1,02 - 2,47	0,30 - 1,25	7,40 - 17,09	5,27 - 22,60	3,23 -19,00	5,50 – 15,00	0,54 - 3,60)	6,25 - 46,50	5,52 - 13,13	0,49 - 0,98	0,09-0,31	7,82 - 11,80	6,05 - 7,80	2,79 - 5,56

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

Table 4: Distribution of trees within-provenance per class of mean values of pod and seed traits.

Trait	Class of mean values per tree	% of trees within-provenance (n=20)							% of trees (n=140)
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Pod length (cm)	≤14	15	30	75	95	15	10	55	42,14
	]14-18]	40	45	25	5	85	55	35	41,43
	>18	45	25	0	0	0	35	10	16,43
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Pod width (cm)	]1 - 1.5]	0	0	0	5	0	5	20	4.29
	]1.5 - 2]	70	65	100	50	0	65	45	56.43
	]2 - 2.5]	30	35	0	45	100	30	35	39.29
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Pod thickness (cm)	]0.30 - 0.60]	0	0	5	30	0	25	0	8.57
	]0.60 - 0.90]	70	55	90	70	100	75	90	78.57
	> 0.90	30	45	5	0	0	0	10	12.86
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Pod weight (g)	]5 - 10]	20	15	60	85	15	30	50	39.29
	]10 - 15]	80	50	40	15	85	65	25	51.43
	> 15	0	35	0	0	0	5	25	9.29
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Total number of seeds	]5,5 - 8]	10	0	5	85	15	0	5	17,14
	]8 - 10,5]	45	0	35	15	70	0	25	27,14
	]10,5 - 13]	45	55	60	0	15	75	60	44,29
	>13	0	45	0	0	0	25	10	11,43
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Seed yield (%)	≤10	0	0	0	80	0	0	0	11,43
	]10-15]	60	15	0	20	95	0	20	30
	]15-20]	30	30	30	0	5	30	25	21,43
	>20	10	55	70	0	0	70	55	37,14
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Mean seed weight(g)	<0,15	0	0	0	100	0	0	0	14,29
	]0,15 -0,20[	90	20	85	0	100	0	0	42,14
	]0,20 -0,25[	10	55	10	0	0	60	70	29,29
	≥0,25	0	25	5	0	0	40	30	14,29
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Seed thickness (mm)	]2.5-3.5]	0	0	0	20	0	0	0	14.29
	]3.5-4.5]	18	16	16	0	0	13	17	57.14
	> 4.5	2	4	4	0	20	7	3	28.57
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Total seed weight (g)	≥1	0	0	0	20	0	0	0	14.29
	] 1-2]	18	0	12	0	20	1	12	45
	>2	2	20	8	0	0	19	8	40.71
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Seed width (mm)	]6-6.5]	45	15	40	25	5	15	0	20.71
	]6.5-7]	20	50	50	75	50	40	55	48.57
	>7	35	35	10	0	45	45	45	30.71
		A	B	J	R	S	T	Ti	
Seed length (mm)	] 7-9]	0	10	70	100	75	50	45	50
	] 9-11]	95	85	30	0	25	50	50	47.86
	>11.00	5	5	0	0	0	0	5	2.14

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

Table 5: Results of two way nested Anova on quantitative traits of pods and seeds.

Trait	Source of variation	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Pod width	st	6	82.76	13.793	631.01	<2e-16 ***
	st:tree	133	102.79	0.773	35.36	<2e-16 ***
	Residuals	2660	58.14	0.022		
Pod thickness	st	6	28.72	4.786	504.83	<2e-16 ***
	st:tree	133	25.18	0.189	19.97	<2e-16 ***
	Residuals	2660	25.22	0.009		
Pod length	st	6	4540	756.6	271.94	<2e-16 ***
	st:tree	133	10320	77.6	27.89	<2e-16 ***
	Residuals	2660	7401	2.8		
Pod weight	st	6	8513	1418.8	235.87	<2e-16 ***
	st:tree	133	20489	154.1	25.61	<2e-16 ***
	Residuals	2660	16001	6.0		
Pod chord	st	6	577	96.20	27.83	<2e-16 ***
	st:tree	133	8394	63.11	18.26	<2e-16 ***
	Residuals	2660	9196	3.46		
Seed yield	st	6	79404	13234	392.93	<2e-16 ***
	st:tree	133	57944	436	12.94	<2e-16 ***
	Residuals	2660	89589	34		
Total number of seeds/pod	st	6	9187	1531.1	307.973	<2e-16 ***
	st:tree	133	4822	36.3	7.293	<2e-16 ***
	Residuals	2660	13224	5.0		
Mean seed weight	st	6	3.538	0.5897	345.844	
	st:tree	133	1.272	0.0096	5.609	<2e-16 ***
	Residuals	2660	4.536	0.0017		
Seed thickness	st	6	605.8	100.97	1218.4	<2e-16 ***
	st:tree	133	225.9	1.70	20.5	<2e-16 ***
	Residuals	2660	220.4	0.08		
Seed weight	st	6	1002.9	167.14	890.384	<2e-16 ***
	st:tree	133	201.9	1.52	8.086	<2e-16 ***
	Residuals	2660	499.3	0.19		
Seed length	st	6	929.9	154.98	701.42	<2e-16 ***
	st:tree	133	837.1	6.29	28.49	<2e-16 ***
	Residuals	2660	587.7	0.22		
Seed width	st	6	77.8	12.961	89.32	<2e-16 ***
	st:tree	133	303.0	2.278	15.70	<2e-16 ***
	Residuals	2660	386.0	0.145		

Significance code: '***' : '0.001'

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

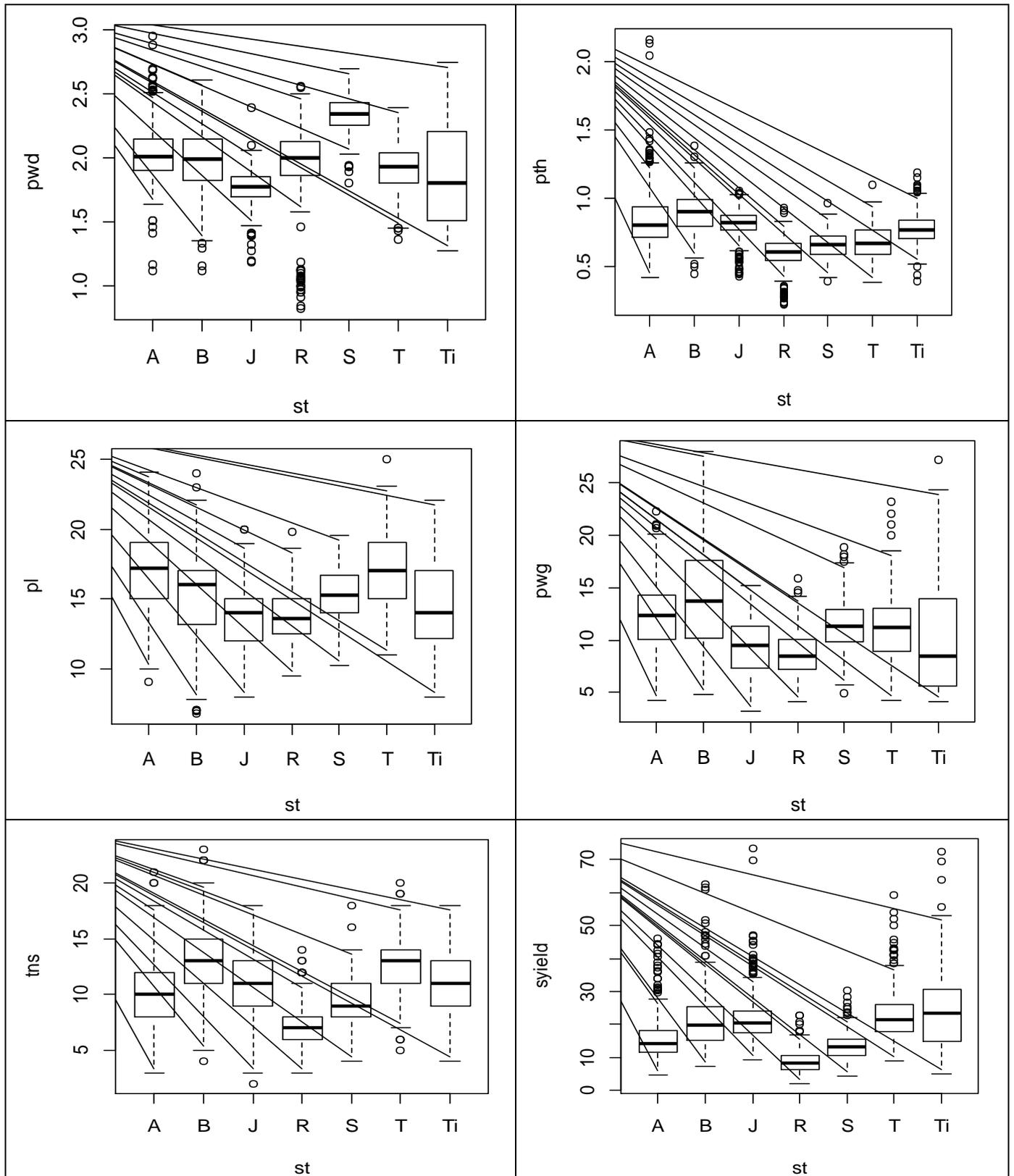


Fig.2: Boxplot of pod and seed traits per population.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

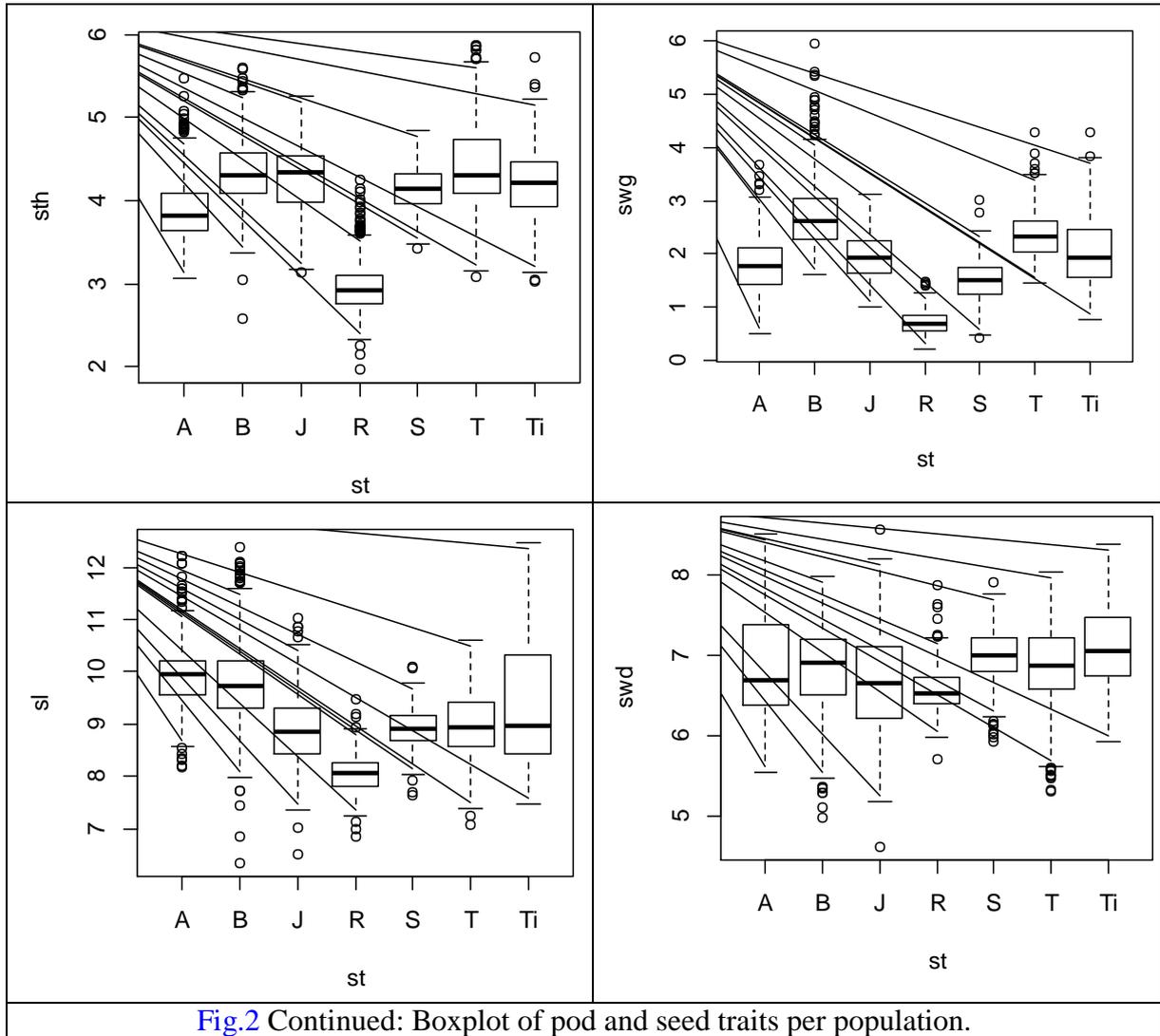
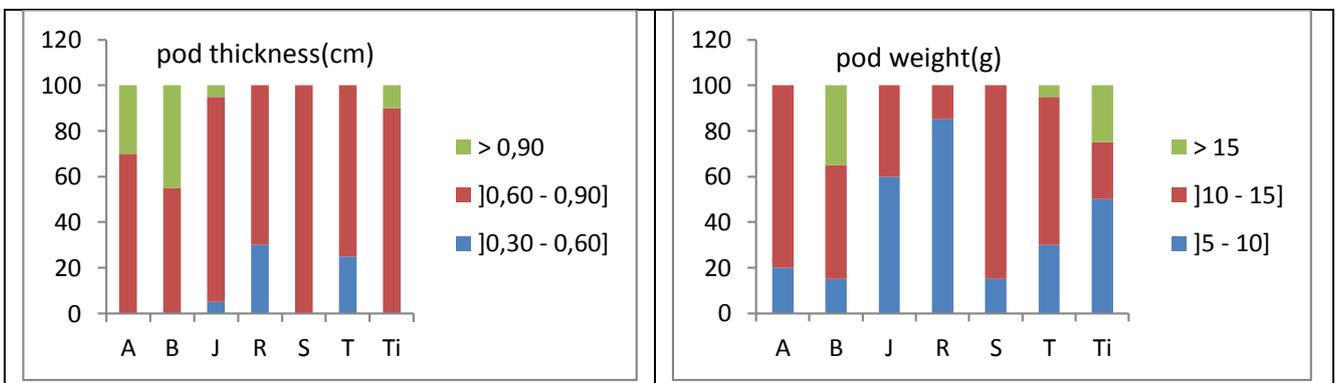


Fig.2 Continued: Boxplot of pod and seed traits per population.



Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

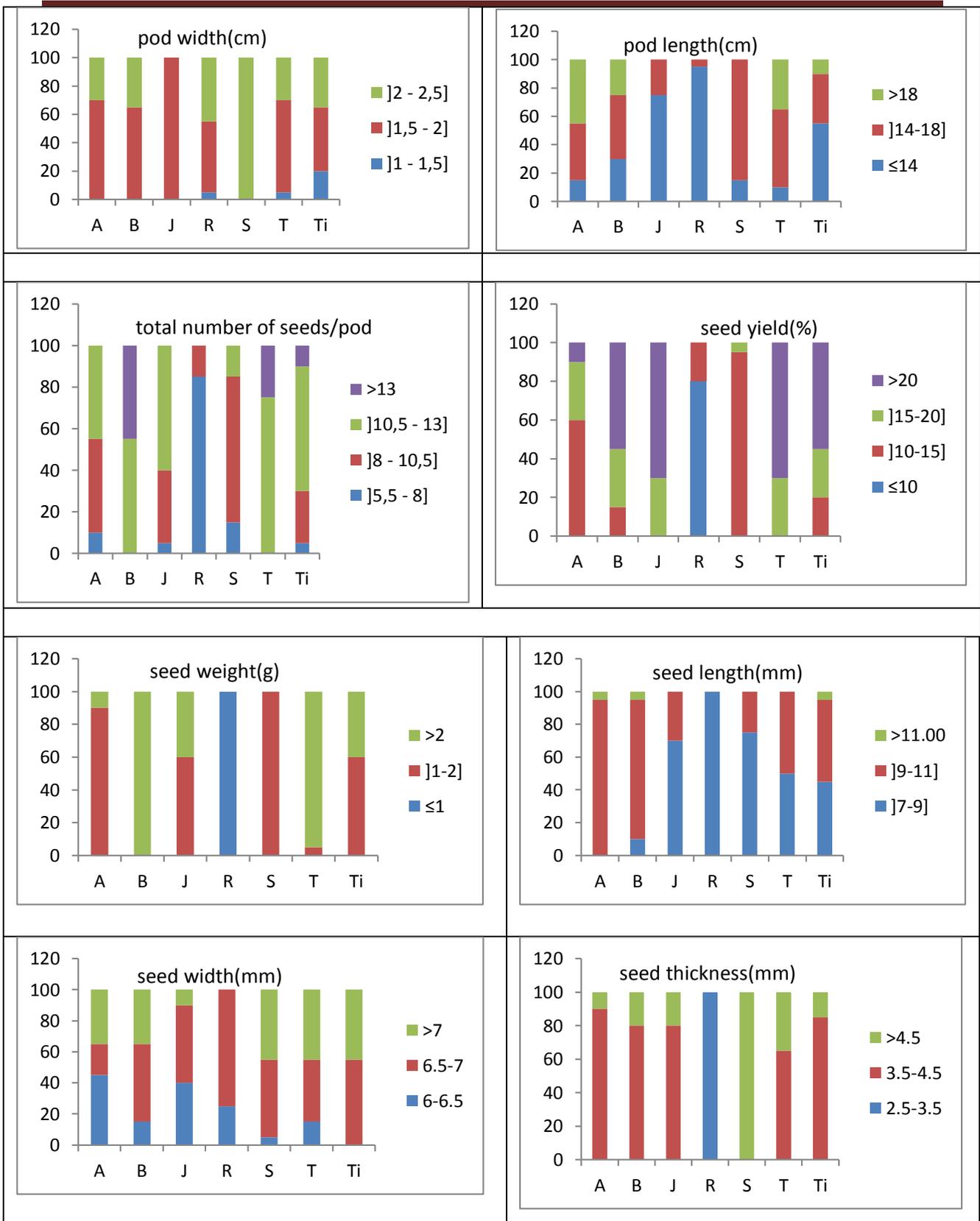


Fig.3 Distribution of trees within-provenance for mean values of pod and seed traits.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

3.2.2. Correlation between quantitative traits

The strongest correlation was observed between pod weight and pulp weight ($r = 0.98$) indicating that pod weight is mainly determined by pulp weight (Table 6).

Among the 4 pod size traits (i.e. pod weight, length, width and thickness), pod weight revealed positive correlations with all other pod traits and with seed length.

Among the 4 seed size traits (i.e. mean seed weight; length; width and thickness), seed length showed positive correlations with all other seed traits and with all pod size traits except pod width.

Seed yield revealed slight but positive correlations with seed weight ($r = 0.38$) and seed thickness ($r = 0.38$) and negative correlations with pulp weight ($r = -0.54$); pod weight ($r = 0.42$) and pod width ($r = -0.42$).

Table 6: Correlation matrix between quantitative traits of pods and seeds.

	pl	pwd	pth	chr	pwg	tsn	mSWG	sl	swd	sth	tswg	ppwg	syield
pl	1												
pwd		1											
pth			1										
chr	0,58			1									
pwg	0,63	0,45	0,43	0,49	1								
tsn					0,30	1							
mSWG			0,30				1						
sl	0,37		0,37		0,42	0,31	0,39	1					
swd								0,36	1				
sth			0,35			0,40	0,42			1			
tswg	0,31		0,38			0,78	0,64	0,50		0,54	1		
ppwg	0,61	0,48	0,38	0,48	0,98			0,35				1	
syield		-0,42			-0,42	0,49	0,38			0,38	0,57	-0,57	1

Correlation coefficients lower than 0.30 are not shown. All correlation coefficients are significant at $\alpha = 0.001$ ($n = 2800$).

3.2.3. Correspondence between quantitative and qualitative traits

The examination of a possible correspondence between pod and seed qualitative traits indicated a variable pattern with only a few cases of concordance between modalities of traits. For example, the dark-brown color was dominant both among pods and seeds of Jijel and the light brown color both among pods and seeds of Relizane, contrary to Tlemcen and Blida where the dark brown-color was dominant on pods and the light- brown color on seeds. Setif and Tipaza were the only provenances which had pods and seeds of similar surface (i.e. smooth).

Qualitative pod traits did not seem to be linked to quantitative pod ones, suggesting for example, that pod color at tree level may not be a good predictor of seed yield. Indeed, this agronomic trait ranged between 10.40 and 30.53 % ; 10.18 and 38.32 % ; 6.25 and 21.60 % among trees bearing 100 % reddish-brown; dark-brown and light-brown pods respectively. This applies also to the relationship between aspect of pod surface and seed yield. In Tipaza for example, trees bearing pods of 100 % smooth surface

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

showed either high i.e. 46.5 % or low i.e. 13.70 % seed yield. Similarly, in Relizane seed yield was invariably low both among trees with 100 % smooth pod surface and those with 100 % rough pod surface.

Discussion and conclusion

The morphological analysis of carob pod and seed quantitative traits revealed significant variations between and within-populations. Qualitative traits (color, shape and surface aspect of pods and seeds) also proved variable within and between populations.

3 pod colors were registered as a whole: Light-brown, dark-brown and reddish brown in agreement with data literature on the species [52, 9, 2, 46]. The dominant pod color varied according to provenance: blackish-brown in Tlemcen, Blida and Jijel; light-brown in Relizane and reddish-brown in Tipaza and Setif.

3 modalities of pod shapes were registered: straight; curved and spiral, in concordance with literature [9, 46], but the curved shape was dominant across all provenances.

Pod surface varied from smooth to wrinkled in concordance with other authors [9, 46]. The wrinkled surface was better represented among 5 provenances and the smooth surface in one provenance.

Among the 4 modalities of seed color recorded, the light-brown was the most represented across all provenances except Annaba and Jijel which rather showed a higher proportion of dark-brown seeds.

Among the three modalities of seed surface recorded, the dominant one corresponded to the smooth surface in agreement with other sources [4, 9, 46].

Among the three modalities of seed shapes registered, the rounded shape concerned half of the seeds and was represented at very high rates in Setif and Relizane. Oval seed shapes were dominant in Blida and elliptical ones dominated in Tipaza.

Regarding the quantitative traits of pods and seeds, the extent of their variation within and between population depended on the trait of interest: the least pronounced between-provenance variation was registered for pod chord and the most pronounced one for seed thickness.

The rank of provenances for their mean values depended on the trait of interest: Relizane cumulated the lowest mean values for 9 quantitative pod and seed traits; followed by Jijel for 4 traits; while the top position for high mean values was occupied by 3 provenances (Annaba, Blida and Tlemcen) for 3 to 4 traits, Tipaza for seed width and seed yield and by Setif for pod width.

Comparatively to authors' findings, overall means registered for pod size proved either similar [3, 18] in the case of pod weight ; lower [8, 54, 60, 11, 45, 18] in the case of pod length or even higher [28, 23,19].

The population range for pod traits proved larger than those reported by one source [59] and overlapping with those mentioned by other sources [9, 7, 35, 46, 38, 29].

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

The overall mean registered on total seed weight per pod lies within the range reported for carob [19, 28, 11, 8]. The population range for this trait is larger than that found by [35] and it overlaps with that registered by [29].

Seed dimensions (i.e. length, width and thickness) displayed overall means which are also lie within the range of values reported for carob [54, 28, 23, 19, 11]. Indeed, the lowest means displayed by Relizane population for traits such as seed thickness, length, seed yield and mean seed weight lie within those reported in the Berkane ecoregion in Northern Morocco [59].

Comparatively to the authors findings [61, 46, 59], range per population for these traits proved either lower or similar. Mean seed weight proved slightly lower than other Authors' findings [3, 64, 18, 8]. The population range for this trait overlaps with that given by other authors [7, 61, 59, 45, 38]. [61] reports that a seed weight of 0.20 g is the minimum required for a cultivar to be considered of medium quality for industrial applications. In the present study only the Blida population reached such threshold with an average of 0.23 g.

Overall, seed yield proved higher than that of European cultivars [3, 8] and lower than that of Moroccan samples [28, 19]. The population range proved comparable to that reported by [45] and overlaps with that reported by other authors [31, 61, 7, 10, 59, 38, 17]. At population level, Tipaza registered the highest seed yield followed by Blida and Tlemcen which contained respectively 50% and 70% of individuals with seed yield >20%. Such individuals may be promising as a potential source of raw material.

Regarding correlations between traits, contrary to pod thickness and seed width, pod weight proved to be the most correlated trait to both other pod traits and seed ones. Correlations between pod weight and other pod and seed traits are concordant with those mentioned by [11]. Those between pod length and other pod traits are concordant with [59].

The high positive correlation between pod weight and pulp weight ($r = 0.98$) indicates that the heavier the pods the higher may be their pulp content. Conversely, pod weight was negatively correlated to seed yield in agreement with [4, 7, 45] but the strength of such relationship is higher according to [45].

Correlations between the total number of seeds per pod and pod size traits are weak. This trend is concordant with [13] who observed no apparent relationship between the number of kernels per pod and the size of pod.

The examination of a possible concordance between qualitative and quantitative traits at tree and provenance level did not show any particular trends. For example, pod color, an easily measurable trait, did not show a particular concordance with seed yield. That is, similar ranges of seed yield were observed among trees which produced either 100 % of clear; reddish or blackish brown pods. On the

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

other hand, only in a few cases were concordances between qualitative attributes of pods and seeds signaled.

The geographic range explored in this study, corresponds to the northern fringe of carob in North Africa. Moroccan carob has been studied both in the same fringe [35, 59] and more Southward in the high Atlas regions [59]. Some Tunisian sampling sites [18, 45] extend more Southward than Tlemcen which represents the southernmost sampled site in our study but not the southernmost one in Algeria. Indeed, carob populations are also found more southerward in sites such as El-Bayadh, though in marginal situations, probably due to their degradation [40].

Despite the large geographic area presently explored, from East to West, results indicated a pattern of variation not clearly related to bioclimate, elevation or distance from the sea coast. Relizane (an inland population located at an elevation of 155 m within a mild semi arid bioclimate) segregated from the other populations by the lowest means (for 9 quantitative traits) followed by Jijel for 4 traits (a coastal population of eastern Algeria, located at an elevation of 81 m and evolving under a mild humid bioclimate) and then by Tipaza for 2 traits (pod length and pod weight). On the other hand, Blida (a north-central provenance located at an elevation of 187 m in a warm subhumid bioclimate) shared high mean values of seed length, pod weight and pod thickness with Annaba (a coastal population of eastern Algeria located at 740 m and evolving under a mild humid bioclimate). Blida also shared high mean values of seed thickness; mean seed weight and total seed weight with Tlemcen (a Western population located at 757 m and evolving under a mild semi-arid bioclimate). The two most distant populations, i.e. Annaba and Tlemcen, shared high means of pod length. The two coastal provenances of eastern Algeria (Jijel and Annaba) were ranked each with a provenance from either North central or North-western Algeria. The coastal provenances (Annaba, Jijel and Tipaza) and the inland ones (Tlemcen, Relizane and Setif) showed a segregation pattern that did not totally match their distance from the sea coast.

The absence of concordance between ecological conditions (bioclimate, elevation and distance from the sea coast) at the site of origin and the variation pattern of carob pod and seed morphology is in discordance with the general trend, under natural conditions, where there is a close relationship between the morphological and the physiological traits of plants and of habitats in which the traits have evolved and are expressed [51]. The observed trend is also in discordance with authors who carried out similar studies on carob. [18] and [45] suggested edapho-climatic factors as a source of variation observed among Tunisian populations. Environmental factors have also been suggested as a possible source of carob pod and seed traits variation among Moroccan populations by [28] and [59] who found highest pod traits among Northern ecoregions of Morocco comparatively to southern ones. Similarly,

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

[29] observed a latitudinal gradient among Lebanese varieties of carob for pod and seed traits with seed mass in the field positively correlated with latitude and longitude.

The present study of carob populations is based on fruits and seeds which are components of plant sexual reproduction and traits such as seed number per fruit and seed weight. These may be subjected to plant adjustment [48,58] as may also be adjusted other reproductive parameters such as the number of fruits per plant as a consequence of predation [5] and resource limitation [58]. Fruit production may also fluctuate from year to year as a result of alternation, a phenomenon largely acknowledged in perennial plants [33, 34]. Such alternation may result in fluctuation of reproductive parameters such as the number of cones per tree and of seeds per cone [36] on Atlas cedar and seed weight on *Nothofagus nervos* [41] and carob [13, 61, 32]. Therefore, it may be interesting to test the stability of the variation pattern presently observed.

On the other hand, in the perspective of identifying the best genotypes for breeding programs and/or accession collection, additional descriptors should be examined such as regular bearing [13, 61, 32]; gender and harvest period or fruit ripening [13, 61], pedicel length as a criterion of pod abscission [61]; trunk cross section and canopy volume [61], fruit sweetness, flowering and fruiting phenology and precocity [37].

The study showed consistent variation among wild carob populations for pod and seed morphology even though such variation did not seem to be geographically structured. The analyzed traits may be considered under an agronomic and an industrial perspective (seed yield and pulp weight) and/or an ecological one (seed size and number are components of plant sexual reproduction that may have implication on its regeneration potential). Such descriptors, together with additional ones, will contribute to the characterization of carob genetic resources and guide the choice of populations for *in situ* conservation or as a source of material for restoration; breeding programs and germplasm collections.

Acknowledgements

We are thankful to the forest conservation staff (Annaba, Relizane and Tipaza) and the National Park staff (Tlemcen, Blida and Jijel) for their crucial help during field sampling. We would like to thank also H. BAAZIZ for his help as guide in Setif site.

References

- [1]. Aafi A. (1996). Note technique sur le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.). Centre National de la Recherche Forestière, Rabat. Maroc. pp10.
- [2]. Ait Chitt A., Belmir H., Lazrak A. (2007). Production des plants sélectionnés et greffées du caroubier. Transfert de technologie en Agriculture. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA MAPM/DERD 153, 1–4.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

- [3]. **Albanell E., Caja G., Plaixats J. (1991)**. Characteristics of Spanish carob pods and nutritive value of carob kibbles. In : Tisserand J.-L. (Ed.), Alibés X. (Ed.). Fourrages et sousproduits méditerranéens. Zaragoza : CIHEAM. p. 135-136 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n°16).
- [4]. **Albanell E., Caja G., Plaixats J. (1996)**. Characterization of carob fruits (*Ceratonia siliqua* L.), cultivated in Spain for agroindustrial use. *International Tree Crops Journal* 9: 1- 9.
- [5]. **Anto M., Jothish P. S., Angala M., Anilkumar C. (2018)**. Fruit predation and adaptive strategies of *Garcinia imberti*, an endangered species of southern Western Ghats. *CURRENT SCIENCE*, 115:12- 25.
- [6]. **Arocas A., Sanz T., Fizman S. M., (2009)**. Improving effect of xanthan and locust bean gums on the freeze-thaw stability of white sauces made with different native starches. *Food Hydrocolloids*, 23: 2478–2484.
- [7]. **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.
- [8]. **Barracosa P., Lima M.B., Cravador A. (2008)**. Analysis of genetic diversity in Portuguese *Ceratonia siliqua* L. cultivars using RAPD and AFLP markers. *Scientia Hort.*118:189-199.
- [9]. **Battle I., Tous J., (1997)**. Carob tree *Ceratonia siliqua* L., Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 17, Gatersleben: Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Rome: International Plant Genetic Resources Institute. 92 pages.
- [10]. **Biner B., Gubbuk H., Karhan M., Akus M., Pekmezei M. (2007)**. «Sugar profiles of the pods of cultivated and wild types of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.) in Turkey». *Food chemistry* 100: pp. 1453-1455.
- [11]. **Bostan S. Z., Kaşko Arici Y. (2015)**. Evaluation of some Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Genotypes in Silifke (Mersin, Turkey) province by Cluster Analysis. *Fruit Science*, 2(1): 35-41.
- [12]. **Bozzano M., Jalonen R., Thomas E., Boshier D., Gallo L., Cavers S., Bordács S., Smith P., Loo J. (2014)**. Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. *State of the World's Forest Genetic Resources – Thematic Study*. Rome, FAO and Bioversity International. Vol 333: 66-75
- [13]. **Carlson W.A. (1986)**. The carob: Evaluation of trees, pods and kernels. *The international Tree Crops Journal*. 3 : 281–290.
- [14]. **Cavallaro V., Barbera A.C., Maucieri C., Gimma G., Scalisi C., Patanè C.(2016)**.Evaluation of variability to drought and saline stress through the germination of different ecotypes of carob (*Ceratonia siliqua* L.) using a hydrotime model. *Ecological Engineering*. 95: 557-566.
- [15]. **Correia P. J., Gama F., Pestana M., Martins-Loução M.A. (2010)**. Tolerance of young (*Ceratonia siliqua* L.) carob rootstock to NaCl. *Agricultural Water Management*, 97: 910- 916.
- [16]. **Dakia P. A., Blecker C., Robert C., Wathelet B., Paquot M (2008)**. Composition and physicochemical properties of locust bean gum extracted from whole seeds by acid or water dehulling pre-treatment. *Food Hydrocolloids*, 22(5), 807-818.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

- [17]. El Batal H., Hasib A., Ouatmane A., Boulli A., Dehbi F., Jaouad A. (2013). Yield and composition of carob bean gum produced from different Moroccan populations of carob (*Ceratonia siliqua* L.). J. Mater. Environ. Sci. 4 (2): 309-314.
- [18]. El Ferchichi Ouarda H., Naghmouchi S., Walker D.J., Correal E., Boussaïd M., Larbi Khouja M. (2008). Variability in the pod and seed parameters and nuclear DNA content of Tunisian populations of *Ceratonia siliqua* L. Agroforest Syst 74(1): 73-81.
- [19]. El Kahkahi R., Zouhair R., Ait Chitt M., Errakhi R. (2014). Morocco carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. Int. J. Pure App. Biosci. 2 (4): 38-47.
- [20]. El Kahkahi R., Mouhajir M., Bachir S., Lemrhari A., Zouhair R., Ait Chitt M., Errakhi R. (2015). Morphological and Physiological Analysis of Salinity Stress Response of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. Science International 3 (3): 73-81.
- [21]. El-Refaey F.A. El-Dengawy., Ahmed A. Hussein., Saad A. Alamri. (2011). Improving Growth and Salinity Tolerance of Carob Seedlings (*Ceratonia siliqua* L.) by *Azospirillum* Inoculation. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci., 11 (3): 371-384.
- [22]. Eshghi S., Rostami A.A., Jamali B. (2018). Carob tree: a suitable species for the future. Acta Hort. 1190, 67-70
- [23]. Fadel F., Tahrouch S., Elmadidi S., Benddou Q., Hatimi A. (2011). Etude morphométrique et physicochimique comparative du caroubier forestier et celui d'une plantation privée. Biomatec-Echo.V4 n°7.pp.3-10. Maroc.
- [24]. FAOSTAT. (2013). FAO Statistics Division.
- [25]. Germeç M., Turhan İ., Karhan M., Demirci A. (2015). Ethanol production via repeated batch fermentation from carob pod extract by using *Saccharomyces cerevisiae* in biofilm reactor. FUEL, vol.161, pp.304-311.
- [26]. Germec M., Yatmaz E., Karahalil E., Turhan I., (2017). Effect of different fermentation strategies on beta-mannanase production in fed-batch bioreactor system. Biotech, (7), Article Number 77.
- [27]. Gharnit N., El Mtili N., Ennabili A., Sayah F. (2006). Importance socio-économique du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) dans la Province de Chefchaouen (nord-ouest du Maroc). J. Bot. Soc. Bot. France 33: 43-48.
- [28]. Gharnit N., El Mtili N., Ennabili A., Sayah F. (2006). Pomological characterization of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) from the province of Chefchaouen (NW of Morocco). Moroccan J. Biol. 2-3: 1-11.
- [29]. Haddarah A., Ismail A., Bassal A., Hamieh T., Ioannou I., Ghouli M. (2013). Morphological and chemical variability of Lebanese carob varieties. European Scientific Journal, 9 (18) : 353-369.
- [30]. Harfouche A., Nedjahi A., Ellatifi M., Daly-Hassen H. (2005). Les ressources génétiques forestières nord-africaines et leur conservation. Biologie et écologie, Rev. For. Fr. LVII - 1.
- [31]. Haselberg C. (1988). A contribution to the classification and characterization of female and male varieties of *Ceratonia siliqua* L. Proceedings of the II International Carob Symposium. Valencia, pp. 137-151.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

- [32]. **Keles H., Bilir N. (2015)**. Interaction of growth and reproduction characteristics in Carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) populations. *Agriculture & Forestry / Poljoprivreda i Sumarstvo.*, Vol. 61 Issue 4, p : 369-377.
- [33]. **Kelly D. (1994)**. The evolutionary ecology of mast seeding. *Tree* vol.9 n°12: 665-670.
- [34]. **Kelly D., Sork V. L. (2002)**. Mast Seeding in Perennial Plants: Why, How, Where? *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 33:427-447.
- [35]. **Konaté I., Filali-Maltouf A., Berraho B. (2007)**. Diversity analysis of Moroccan carob(*Ceratonia siliqua* L.) accessions using phenotypic traits and markers. *Acta BotanicaMalacitana*, 32: 79- 90.
- [36]. **Krouchi F., Derridj A., Lefevre F. (2004)**. Year and tree effect on reproductive organisation of *Cedrus atlantica* Manetti in a natural forest. *Forest ecology and management*, 197: 181-189.
- [37]. **Ladipo D. O., Fondoun J.M., Ganga N. (1996)**. Domestication of the bush mango (*Irvingia* spp.): some exploitable intraspecific variations in west and central Africa. *In* Proceedings of the international conference on domestication and commercialization of non timber forest products in agroforestry systems, Nairobi, Kenya 19-23. Edited by R.R.B. Leakey, A.B. Temu, M. Melnyk and P. Vantomme, pp:193 - 204.
- [38]. **La Malfa S., Avola C., Brugaletta M., La Rosa G., Muratore G. (2012)**. Morphological and technological characterization of different Carob cultivars in Sicily. *Proc.XXVIIIth IHC – IS on the challenge for a sustainable production, protection and consumption of Mediterranean fruits and nuts*. Eds. A.M. D’Onghia et al. *Acta Hort.* 940, ISHS, Italy.
- [39]. **Lapie G., Maige A. (1916)**. Flore forestière de l'Algérie, éditeur : Librairie générale de l'Enseignement, ORLHAC. Paris. 357p.
- [40]. **Mahdad M. Y., Guaour S.B. (2016)**. Le caroubier (*Ceratonia Siliqua* L.) dans le Nord-Ouest de l’Algérie, Situation et perspective d’amélioration. Éditions Universitaires européennes. 90 pages.
- [41]. **Marchelli P., Gallo L.M. (1999)**. Annual and geographic variation in seed traits of Argentinean populations of southern beech *Nothofagus nervosa* (Phil.) Dim. et Mil. *Forest Ecology and Management* 121:239-250.
- [42]. **Meziani S., Dave Oomah B., 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.
- [43]. **Min B.R., Hart S.P. (2003)**. Tannins for suppression of intestinal parasites. *J. Anim. Sci.*81: 102-109.
- [44]. **Makris D.P., Kefalas P. (2004)**. Carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) as a source of polyphenolic antioxidant. *Food Technol. Biotechnol.* 42: 105-108.
- [45]. **Naghmouchi S., Khouja M.L., Romero A., Tous J., Boussaid M. (2009)**. Tunisian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *Scientia Horticulturae*, 121:125–130.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

- [46]. Orwa C., Mutua A., Kindt R., Jamnadass R., Simons A. (2009). Agroforestry: une version de référence de l'arbre et guide de sélection 4.0. World Agroforestry Centre, Kenya. pp : 1- 6.
- [47]. Padulosi S., Eyzaguirre P., Hodgkin T. (1999). Challenges and Strategies in Promoting Conservation and Use of Neglected and Underutilized Crop Species. Reprinted from: Perspectives on new crops and new uses. J. Janick (ed.), ASHS Press, Alexandria, VA.
- [48]. Parciak W. (2002). Environmental Variation in Seed Number, Size, and Dispersal of a Fleshy-Fruited Plant. *Ecology*. 83(3), 780-793
- [49]. Prajapati Vipul D., Jani Girish K., Moradiya Naresh G., Randeria Narayan P., Nagar Bhanu J. (2013). Locust bean gum: A versatile biopolymer. *Carbohydrate Polymers* 94:814–821.
- [50]. Quezel P., Santa S. (1962). Nouvelles flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Tome I. Paris : Centre National de la Recherche Scientifique. 1170p.
- [51]. Rao V.R., Hodking T. (2002). Genetic diversity and conservation and utilization of plant genetic resources. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 68: 1–19.
- [52]. Rejeb M.N. (1995). Le caroubier en Tunisie : Situations et perspectives d'amélioration. Dans : Quel avenir pour l'amélioration des plantes ? Edit. AUPELFUREF. John Libbey Eurotext. Paris. 79-85.
- [53]. Roseiro L. B., Duarte L.C., Oliveira D.L., Roque R.M., Bernardo-Gil G., Martins A.I., Sepúlveda C., Almeida J., Meireles M., Gírio F., Rauter A. P. (2013). Supercritical, ultrasound and conventional extracts from carob (*Ceratonia siliqua* L.) biomass: Effect on the phenolic profile and antiproliferative activity. *Industrial Crops and Products* 47:132–138.
- [54]. Russo G., 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.
- [55]. Rtibi K., Jabri M.A., Selmi S., Sebai H., Amri M., Marzouki L., El-Benna J. (2016). Preventive effect of carob (*Ceratonia siliqua* L.) in a dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis in rat. *RSC Adv.*, 6, 19992-20000.
- [56]. Serairi-Beji R., Mekki-Zouiten L., Tekaya-Manoubi L., Loueslati M.H., Guemira F., Ben Mansour A. (2000). Can carob powder be used with oral rehydration solution for the treatment of acute diarrhea? *Med. Top.* 60: 125. *Med. Trop.* 60 (2): 125-8.
- [57]. Sandolo C., Coviello T., Matricardi P., Alhaique F. (2007). Characterization of polysaccharide hydrogels for modified drug delivery. *Eur. Biophys. J.* 36 (7): 693–700.
- [58]. Shi X., Wang J. C., Zhang D. Y., Pan B. R. (2010). Pollen source and resource limitation to fruit production in the rare species *Eremosparton songoricum* (Fabaceae). *Nordic Journal of Botany*. 28(4):438 - 444.
- [59]. Sidina M.M., 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.

Chapitre III: Genetic resources of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria: insight from pod and seed morphology

- [60]. Tetik N., Turhan I., Oziyci H.R., Gubbuk H., Karhan M., Ercişli S. (2011). Physical and Chemical Characterization of *Ceratonia siliqua* L. germplasm in Turkey. *Scientia Horticulturae*, 129(4), 583-589.
- [61]. Tous J., Romero A., Hermoso J. F., Ninot A., Plana J., Batlle I. (2009). Agronomic and commercial performance of four Spanish Carob cultivars. *Horttechnologie*. April–June, 19(2): 465-470.
- [62]. Turhan I., Bialka L.K., Demirci A., Karhan M. (2010a). Enhanced lactic acid production from carob extract by *Lactobacillus casei* using invertase pretreatment. *Food Biotechnology*. 24(4):364-374.
- [63]. Turhan I., Bialka L.K., Demirci A., Karhan M., (2010b). Ethanol production from carob extract by using *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource Technology*. 101 (14), 5290-5296.
- [64]. Turnbull L. A., Luis Santamaria L., Martorell T., Rallo J., Hector A. (2006). Seed size variability: from carob to carats. *Biol. Lett.* 2 : 397–400.
- [65]. Wenzl T. G., Schneider S., Scheele F., Silny J., Heimann G., Skopnik H. (2003). Effects of thickened feeding on gastroesophageal reflux in infants: a placebo-controlled crossover study using intraluminal impedance. *Pediatrics*, 111: 355-359.
- [66]. Yatmaz E., Karahalil E., Germeç M., Ilgın M., Turhan İ. (2016). Controlling Filamentous Fungi Morphology with Microparticles to Enhanced β -mannanase Production. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 39 : 1391–1399.
- [67]. Yatmaz E., Turhan I., Karhan M. (2012). Optimization of ethanol production from carob pod extract using immobilized *Saccharomyces cerevisiae* cells in a stirred tank bioreactor. *Bioresource Technology*.135:365-371.

Chapitre IV :

Caractérisation foliaire du
caroubier(*Ceratonia siliqua* L.)
chez sept provenances
Algériennes

IV.1. Introduction

L'Algérie est connue par sa diversité en ressources phytogénétiques, parmi lesquelles le caroubier *Ceratonia siliqua* L., un arbre spontané qui pousse sur tout le bassin méditerranéen. Grâce à ses caractéristiques morphologiques et physiologiques, le caroubier est capable de développer différentes stratégies pour limiter les contraintes hydriques. Les produits de l'arbre sont le feuillage, apprécié par le cheptel, et la gousse qui est très recherchée pour ses divers atouts (Naggar et Lahssini, 2015).

L'utilisation des feuilles du caroubier dans l'alimentation des animaux constitue une ressource renouvelable qui peut fournir une biomasse sur pied régulière tout au long de l'année, comme elle peut constituer un investissement à moyen et à long terme, vu les prix élevés des fourrages et des aliments concentrés (Mebirouk-Boudechiche et al., 2014).

La feuille de caroubier peut fournir une foule d'indices sur l'espèce et sur l'état d'une plante. Il importe de savoir reconnaître sa morphologie, sa distribution sur la tige.

La morphologie et la physiologie des feuilles du caroubier a suscité de l'attention de la part de Mitrakos et Christodoulakis (1981) ; Lo Gullo et al. (1986) ; Nunes et al. (1989) ; Rejeb (1995) ; Gharnit et al. (2005) ; El Kahkahi et al. (2015) ; Bostan et KaskoArici (2015) ; Seghir et al. (2016) ; El Bakkali et al. (2019) et Korkmaz et al. (2020). Ces derniers auteurs ont mis en évidence une importante variabilité foliaire selon les écotypes, les différents génotypes et même en fonction de l'âge de l'arbre.

En Algérie, à notre connaissance, aucune étude morphologique complète sur les feuilles de *Ceratonia siliqua* n'est disponible sur les populations de l'espèce. La présente étude a pour objet de caractériser phénotypiquement les feuilles de *C. siliqua* en Algérie, en tenant compte de l'effet du site et de l'effet de l'arbre dans le site sur cette morphologie. En vérifiant si la variabilité morphologique des feuilles est significative entre les populations naturelles échantillonnées et si les facteurs bioclimatiques affectent la morphologie de la feuille car plusieurs études ont signalé que l'effet des facteurs bioclimatiques sur la morphologie foliaire se traduit par des adaptations en réduisant la surface des feuilles et leurs enroulements (Rejeb, 1995 ; Batlle et Tous, 1997 ; Gadoum et al., 2019).

IV. 2. Matériel et méthodes

Cette étude a concerné les mêmes populations pour lesquelles une étude morphologique sur les gousses et les graines a été menée (Chapitre III).

IV.2.1. Matériel végétal et préparation des échantillons aux analyses

Les échantillons ont porté sur des feuilles du caroubier qui proviennent de sept régions en Algérie (Fig.1 ; Tableau 1 ; Chapitre III). Les feuilles matures de couleur vert foncé ont été

récoltées aléatoirement sur 20 arbres (20 feuilles par arbre) soit au total 140 arbres, 2800 feuilles sur l'ensemble des sept populations, sur une période de deux mois (Mai et Juin 2013). Les feuilles libellées selon l'arbre et la provenance ont été séchées à l'air libre sous forme d'herbier puis conservées au laboratoire.

IV.2.2. Analyse morphologique des feuilles

Une caractérisation par des traits morphologiques a été réalisée en se basant sur la méthode décrite dans le référentiel de l'International Plant Genetic Resources Institute (Batlle et Tous, 1997) (Fig. 1).

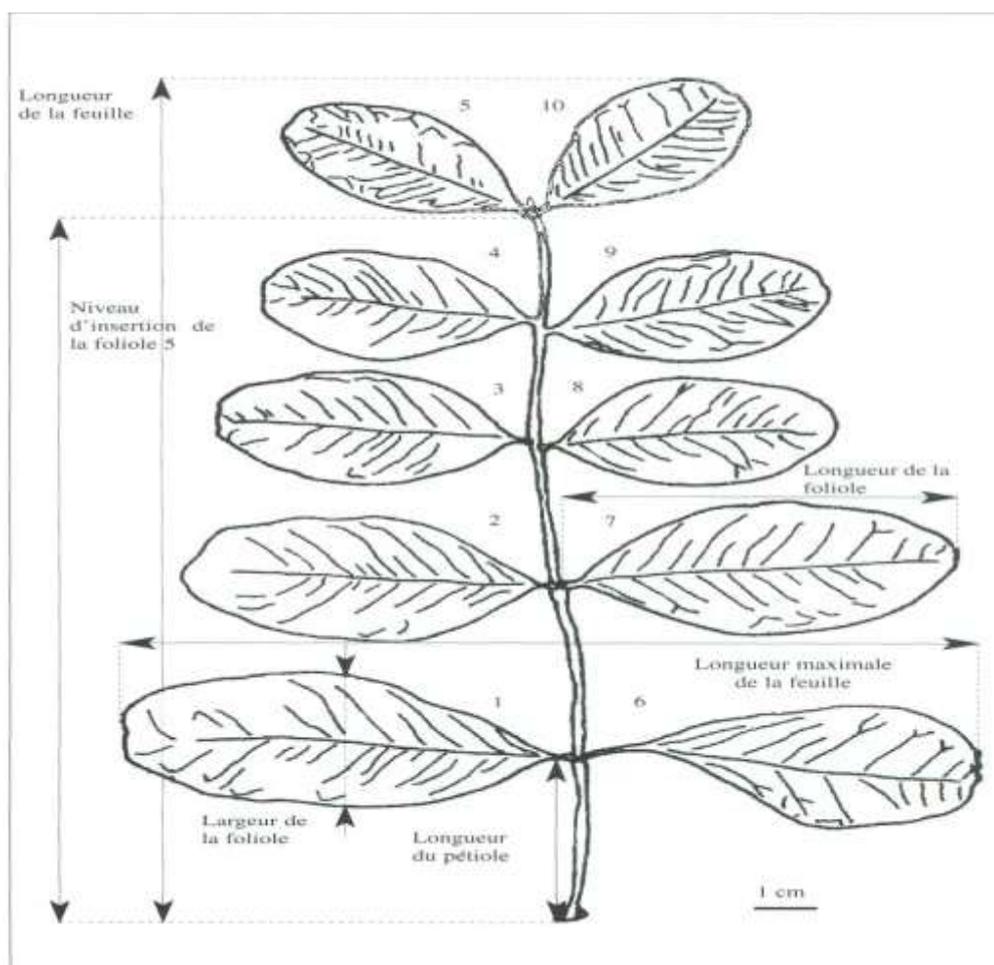


Fig.1 : Schéma descriptif d'une feuille paripennée du caroubier (Gharnit et al., 2005).

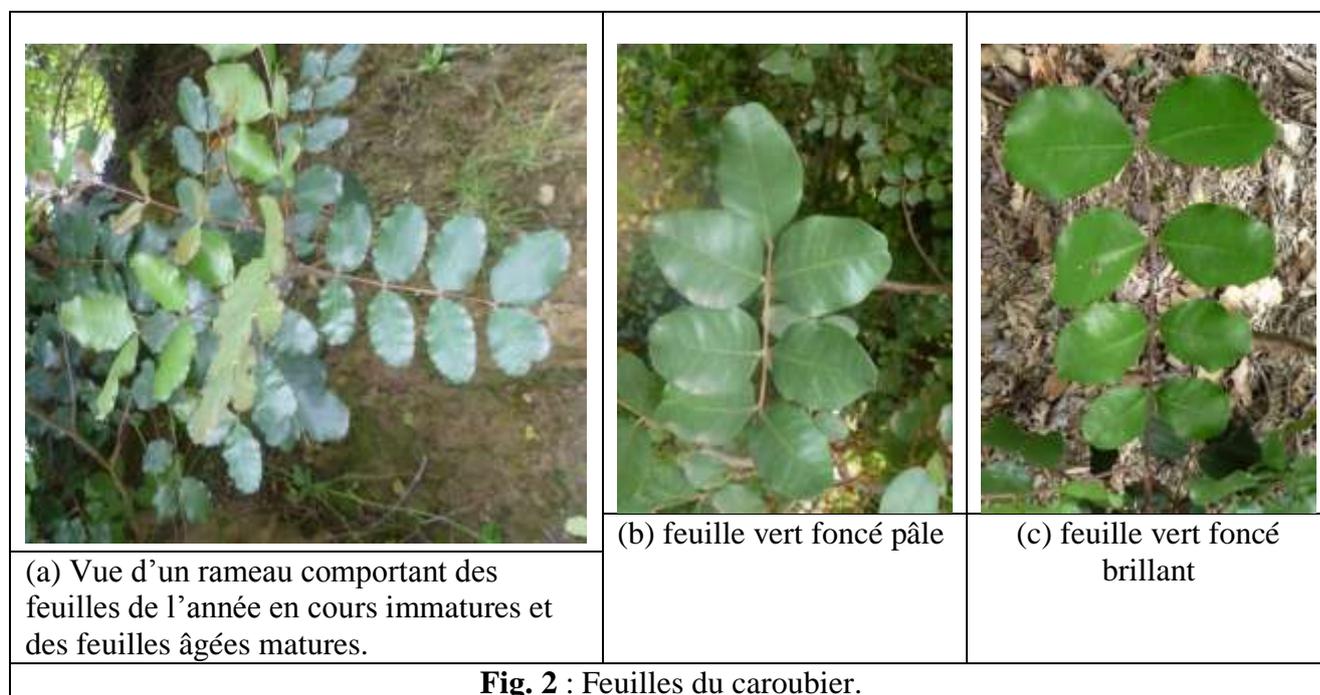
a. Traits quantitatifs

Les traits mesurés sont la longueur et la largeur de la feuille pétiole compris ; la longueur du pétiole ; le nombre de folioles par feuille ; la longueur et la largeur de la foliole basale et terminale.

Des rapports susceptibles d'aider à la caractérisation des populations ont été calculés : [longueur de la feuille/largeur de la feuille], [longueur de la feuille/longueur du pétiole], etc. Les mesures ont été faites à l'aide d'une règle graduée et d'un papier millimétré.

b. Traits qualitatifs

Les feuilles ont été aussi caractérisées par leur couleur (vert foncé brillant ou vert foncé pâle), et par la présence ou l'absence de la foliole terminale (Fig. 2).



IV.2.3. Analyses statistiques

Les données obtenues ont été dans une première phase soumises à une analyse descriptive : calcul de moyennes, écarts types et l'intervalle de moyennes par arbre d'une part et graphiques de distribution des paramètres d'autre part, puis soumises à une analyse de la variance « ANOVA » à deux facteurs : provenance et arbres dans provenance. Les corrélations linéaires entre les caractères foliaires ont été analysées suivies d'une analyse en composantes principales (ACP) de ces variables sur les moyennes par provenance.

Le logiciel Statistica 10 et R 64 x3.4.0 ont servi aux analyses.

- Les données obtenues sur les traits qualitatifs ont fait l'objet d'une analyse des fréquences relatives des modalités.

IV.3. Résultats des traits quantitatifs

La moyenne, l'écart type et l'étendue des différents traits mesurés chez les sept populations du caroubier sont présentés dans le [tableau 1](#). Les résultats de l'analyse de la

variance de l'effet provenance et de l'effet arbre dans provenance sur les caractères foliaires sont donnés dans le [tableau 2](#). Les boxplots de distribution de quelques caractères foliaires selon les provenances sont donnés dans la [figure 3](#). Les corrélations entre les caractères foliaires sont données dans le [tableau 3](#), les résultats de l'analyse en composantes principales sur les moyennes des caractères foliaires par provenance sont donnés dans le [tableau 4 et les figures 4 et 5](#)).

IV.3.1. Niveau de variation des caractères foliaires

L'analyse de la variance indique des différences hautement significatives entre les provenances pour les caractères foliaires. Elle indique aussi l'existence d'une variation inter-arbres dans la provenance mais de moindre importance.

a-Dimensions de la feuille et du pétiole

La longueur des feuilles de *C. siliqua* échantillonnés est en moyenne de 15.37 cm (intervalle par provenance de 13.30 à 17.40 cm à Relizane et Blida (respectivement)).

La largeur des feuilles est moyenne de 9.99 cm, avec des moyennes par provenance variant entre 8.24 cm (Relizane) et 11.22 cm (Blida).

La longueur moyenne du pétiole est de 3.69 cm avec un intervalle par provenance de 3.13 à 4.44 cm respectivement à Relizane et Tlemcen.

b- Nombre de folioles par feuille

Les feuilles possèdent en moyenne 8.44 folioles. Tlemcen se distingue par le nombre de folioles le plus bas (7.74) et Sétif par le nombre le plus élevé (9.30).

c- Dimensions de la foliole basale

La longueur moyenne de la foliole basale est de 5.50 cm (intervalle par provenance de 4.81 à 6.35 cm à Tipaza et Sétif respectivement). Sa largeur est en moyenne de 3.52 cm, avec des valeurs par provenance variant entre 3.10 cm à Relizane et 3.81 cm à Tlemcen.

d- Dimensions de la foliole terminale

La longueur de la foliole terminale est en moyenne de 5 cm (intervalle par provenance de 4.14 à 5.60 cm à Tipaza et Blida respectivement). La largeur de la foliole terminale est de 3.24 cm en moyenne (intervalle par provenance de 2.81 à 3.59 cm à Relizane et Tlemcen respectivement).

e- Rapport entre les variables

Le rapport "longueur / largeur de la feuille" est en moyenne de 1.58 (intervalle par provenance de 1.39 à 1.77 à Jijel et Tipaza respectivement).

Le rapport "longueur de la feuille / longueur du pétiole" est de 3.85 cm en moyenne (intervalle par site de 3.86 à 4.69 à Tlemcen et Tipaza respectivement).

A l'échelle des 507 feuilles pourvues d'une foliole terminale, nous avons trouvé un rapport « longueur de la foliole basale / longueur de la foliole terminale » de l'ordre de 1.03 indiquant une allocation à la longueur de la foliole basale et terminale globalement similaire ; un rapport « largeur foliole basale / largeur foliole terminale » de l'ordre de 1.22 indiquant une allocation à la largeur de la foliole basale légèrement supérieure à celle de la foliole terminale ; un rapport « longueur de la foliole terminale / largeur de la foliole terminale » de l'ordre de 1.56 et qui est du même ordre de grandeur que celui trouvé chez les folioles basales (1.57) indiquant une similarité des formes des folioles basales et terminales où la longueur de la foliole représente environ 1.5 fois sa largeur.

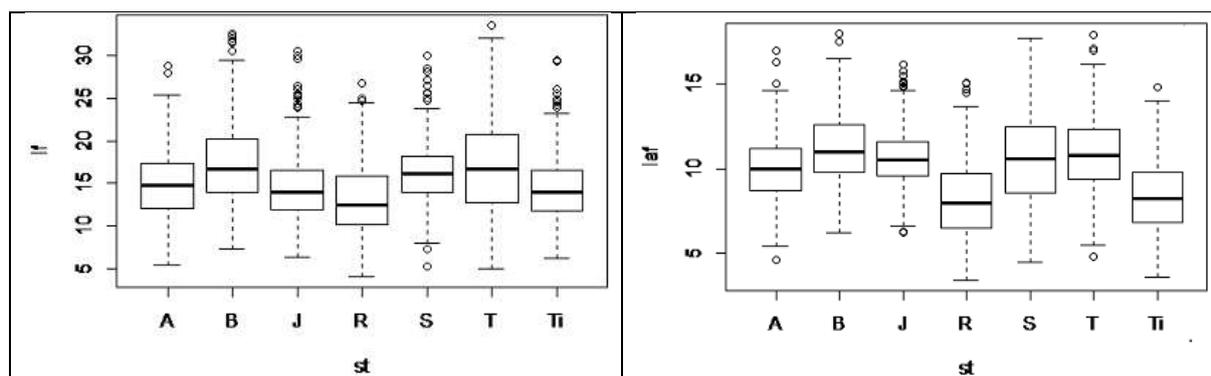
Tableau. 1 : Paramètres statistiques sur les caractères quantitatifs des feuilles de *C.siliqua*

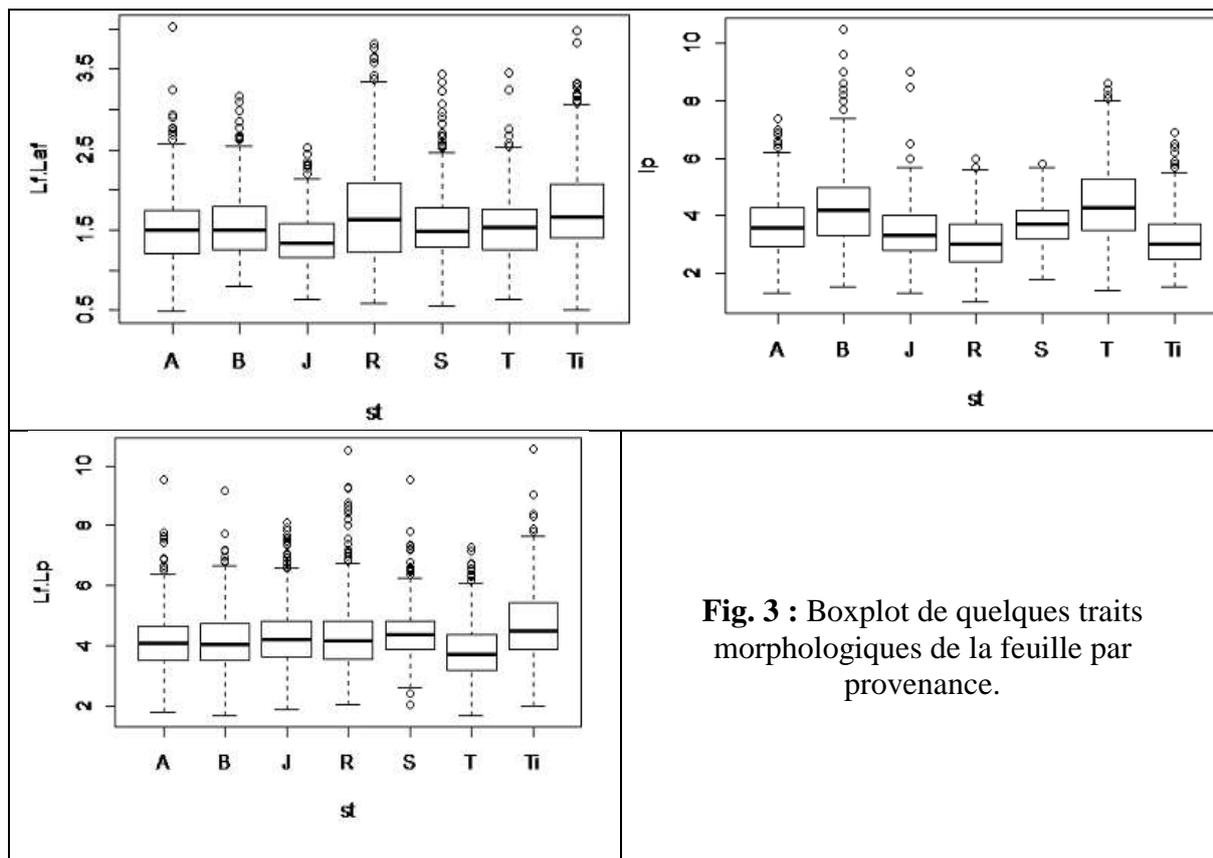
Caractère	Feuille						Foliole basale		Foliole terminale	
	Longueur (cm)	Largeur (cm)	Longueur du pétiole (cm)	Nombre de folioles	Longueur/ largeur	Longueur /Longueur du pétiole	Longueur (cm)	Largeur (cm)	Longueur (cm)	Largeur (cm)
Site	Lf	Laf	Lp	N.fo	L/La	Lf/Laf	L.fb	La.fb	L.ft	La.ft
Annaba (A)	14.89±4.05	10.04±1.94	3.65±1.02	8±1.49	1.51±0.45	4.18±1.01	5.43±0.90	3.79±0.60	4.71±1.25	3.46±0.78
Jijel (J)	14.71±3.91	10.63±1.68	3.46±0.90	8.40±1.34	1.39±0.62	4.36±1.90	5.56±0.85	3.51±0.60	4.87±1.12	3.12±0.70
Sétif (S)	16.12±3.59	10.62±2.52	3.67±0.71	9.30±1.24	1.57±0.42	4.44±0.89	6.35±1.02	3.48±0.57	5.38±1.18	3.05±0.61
Blida (B)	17.40±4.99	11.22±2.08	4.29±1.37	8.12±1.32	1.56±0.41	4.21±1.02	5.71±1.12	3.70±0.66	5.60±1.11	3.59±0.75
Tipaza (Ti)	14.37±3.83	8.39±2.06	3.16±0.92	8.95±1.52	1.77±0.51	4.69±1.16	4.81±0.91	3.25±0.58	4.14±0.85	2.81±0.50
Relizane(R)	13.30±4.14	8.24±2.36	3.13±0.93	8.56±1.63	1.71±0.64	4.38±1.21	4.85±1.07	3.10±0.71	4.26±1.29	2.62±0.73
Tlemcen(T)	16.80±5.45	10.80±2.18	4.44±1.37	7.74±1.29	1.54±0.39	3.86±0.95	5.78±1.11	3.81±0.76	5.40±1.16	3.52±0.79
Moyenne générale	15.37±4.52	9.99±2.40	3.69±1.16	8.44±1.50	1.58±0.47	3.85±1.54	5.50±1.12	3.52±0.69	5±1.26	3.24±0.79
Min- Max absolus	4.1-33.5	3.4-18	1-10.5	4-16	0.48-4.03	0.73-10.56	1.9-9.2	1.2-6.3	1.3-8.3	1.2-5.7
intervalle par arbre	8.87 - 27.5	5.97 -14.08	1.80 - 6.80	6 - 10.90	0.97 - 2.67	2.53 - 5.67	3.79 -7.50	2.36 -5.18	-	-

Tableau. 2 : Analyse de la variance "ANOVA" de l'effet du site et de l'arbre dans site sur les caractères des feuilles de *C.siliqua*.

Trait	Source de variation	ddl	SC	CM	F value	Pr(>F)
Longueur de la feuille (Lf)	site	6	5071	845.1	68.96	<2e-16 ***
	Site : arbre	133	19745	148.5	12.11	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	2660	32600	12.3		
Largeur de la feuille(Laf)	site	6	3438	572.9	203.00	<2e-16 ***
	Site : arbre	133	5213	39.2	13.89	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	2660	7508	2.8		
Longueur du pétiole(Lp)	site	6	626.1	104.35	158.64	<2e-16 ***
	Site : arbre	133	1410.0	10.60	16.12	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	2660	1749.6	0.66		
Nombre de folioles(N.fo)	site	6	722	120.36	94.22	<2e-16 ***
	Site : arbre	133	2209	16.61	13.00	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	2660	3398	1.28		
Longueur de la foliole basale(L.fb)	site	6	700.5	116.75	172.85	<2e-16 ***
	Site : arbre	133	1043.8	7.85	11.62	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	2660	1796.7	0.68		
Largeur de la foliole basale(Lafb)	site	6	175.9	29.314	106.3	<2e-16 ***
	Site : arbre	133	436.7	3.283	11.9	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	2660	733.7	0.276		
Longueur de la feuille/largeur de la feuille	site	6	38.7	6.451	43.83	<2e-16 ***
	Site : arbre	133	205.6	1.546	10.50	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	2660	391.5	0.147		
Longueur de la feuille/longueur du pétiole	site	6	159.3	26.548	28.551	<2e-16 ***
	Site : arbre	133	639.5	4.808	5.171	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	2660	2473.4	0.930		

Code de signification : *** Hautement significative au seuil $\alpha=0.001$.





IV.3.2. Corrélations entre les caractères foliaires

a-Corrélations linéaires de Pearson

Les coefficients de corrélation entre les traits mesurés (Tableau 3) montrent des corrélations positives de la largeur et de la longueur de la feuille entre elles et avec la longueur du pétiole ; des corrélations positives des dimensions de la feuille avec les dimensions des folioles terminales et basales et des corrélations positives entre les dimensions des folioles basales et terminales. Ce qui indique des variations corrélées de ces caractères à l'échelle de la provenance. Le nombre de folioles s'est révélé relativement plus indépendant des autres traits foliaires. Ainsi, les caractères foliolaires sont significativement et positivement corrélés entre eux.

Il se dégage des relations d'allométrie positive entre les différentes dimensions de la feuille et des folioles à l'exception du nombre de folioles qui s'est révélé négativement corrélé à la largeur de la foliole basale et terminale.

Tableau 3 : Corrélations entre les caractéristiques morphologiques des provenances du caroubier.

	Lf	Laf	Lp	N.fo	L.fb	La.fb	L.ft	La.ft
Lf	1,00							
Laf	0,85*	1,00						
Lp	0,93**	0,82*	1,00					
N.fo	-0,32	-0,38	-0,62	1,00				
L.fb	0,74	0,85*	0,63	0,04	1,00			
La.fb	0,75	0,82*	0,84*	-0,68	0,60*	1,00		
L.ft	0,93**	0,94**	0,88**	-0,29	0,88**	0,72	1,00	
La.ft	0,87*	0,89**	0,89**	-0,57	0,69**	0,97**	0,84*	1,00

Note : ** très significative au seuil $\alpha=0.01$; * significative au seuil $\alpha=0.05$.

b- Projections des variables dans les plan factoriel 1x2 de l'analyse en composantes principales

Le tableau 4 donne la variabilité représentée par chaque axe. Deux axes ayant une valeur propre supérieure à 1 ont été obtenus, permettant d'expliquer 95 % de la variance totale. Le premier axe décrit 75.43 % de la variance. Cette composante se définit par la largeur de la feuille (Laf), la longueur de pétiole (Lp), la longueur de la foliole basale (L.fb) et la longueur et la largeur de la foliole terminale (L.ft ; La.ft) qui lui sont négativement corrélées.

Le second axe décrit 19.27 % de la variance. Il se définit uniquement par le nombre de folioles par feuille (N.fo) qui lui est corrélé négativement.

Ainsi, la composante principale 1 caractérise les provenances dont les feuilles sont de grande taille, bien développées avec un long pétiole, tandis que la composante principale 2 sépare les provenances selon leur nombre de folioles.

Tableau. 4 : Vecteurs propres et pourcentage de variation expliquée par les trois premiers axes à partir de 6 caractères analysés chez 2800 feuilles du caroubier.

Composantes principales	Axe1	Axe2
Variance propre	5,52	1,15
% variance totale	75,43	19,27
%variance cumulée	75,43	94,70
Laf	-0,961***	-0,126
Lp	-0,934***	0,221
N.fo	0,490	-0,855**
L.fb	-0,817***	-0,541
L.ft	-0,958***	-0,210
La.ft	-0,948***	0,146

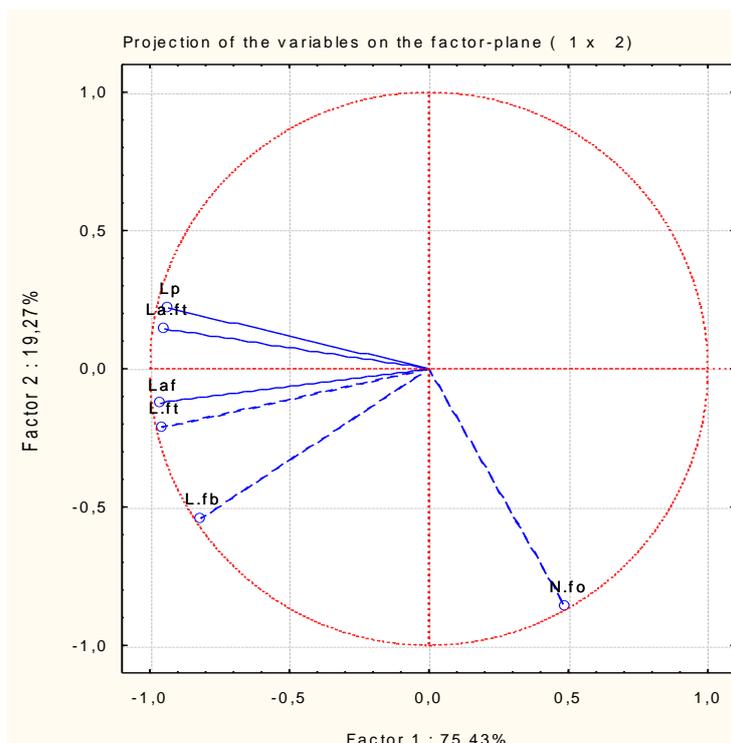


Fig. 4 : Cercle de corrélation des variables quantitatives des feuilles dans le plan 1-2.

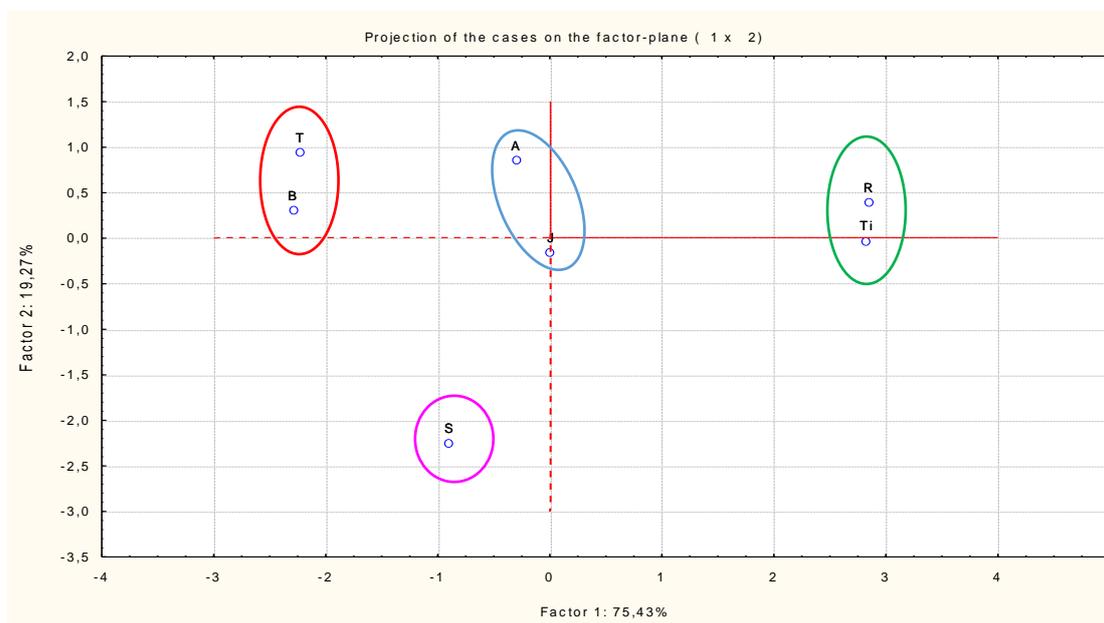


Fig. 5 : Projection des variables morphologiques de la feuille et des provenances dans le plan 1-2 de l'analyse en composantes principales.

La représentation graphique de l'analyse en composantes principales dans le plan 1x2 (Fig. 5), montre que le premier axe décrit 75.43 % de la variation. C'est un axe de la taille de la feuille et qui permet de répartir les provenances dans différents groupes : le groupe 1 formé des provenances Blida et Tlemcen caractérisées par de longues et larges feuilles avec un long

pétiole et de grandes dimensions de la foliole terminale ; le groupe 2 qui réunit es provenances de Jijel et Annaba caractérisées par des dimensions moyennes des feuilles ; le groupe 3 formé par les provenances Relizane et Tipaza caractérisées par les plus petites dimensions des feuilles. La deuxième composante principale décrit 19.27 % de la variation et correspond à un axe du nombre de folioles et distingue la provenance Sétif des autres provenances par la valeur la plus élevée de ce caractère.

IV.4. Résultats des traits qualitatifs

a-Couleur de la feuille : Deux couleurs de feuilles ont été identifiées dans l'ensemble nos échantillons : vert foncé brillant (87.54 %) et vert foncé pâle (12.46 %). La couleur vert foncé brillant est dominante dans tous les sites ([tableau 5](#)). Les feuilles d'Annaba sont exclusivement de couleur vert foncé brillant (100 %), celles de Tlemcen, Blida et Sétif sont de couleur vert foncé brillant prépondérante (94.50 ; 92.75 et 87.50 % respectivement). Tandis que celles de Jijel et Tipaza présentent environ 23.50 % de feuilles vert foncé pâle. Il est à noter que ce caractère n'est pas en concordance avec les dimensions foliaires des provenances.

b-Présence de la foliole terminale

La foliole terminale est absente dans 81.89 % des échantillons. Néanmoins sa présence a été notée au niveau de tous les sites à des fréquences allant de 13.50 % à Sétif à 31.25 % à Blida.

Tableau 5 : Fréquences des caractères qualitatifs des feuilles de *C. siliqua* selon les provenances.

site	Couleur de la feuille (%)		présence de la foliole terminale (%)	
	Vert foncé brillant	Vert foncé pâle	présente	absente
Annaba	100,00	00,00	15,75	84,25
Jijel	77,00	23,00	16,25	83,75
Sétif	87,50	12,50	13,50	86,50
Blida	92,75	07,25	31,25	68,75
Tipaza	76,50	23,50	14,75	85,25
Relizane	84,50	15,50	15,75	84,25
Tlemcen	94,50	05,50	19,50	80,50
Total N= 2800	87,54	12,46	18,11	81,89

IV.5. Discussion

La présente étude a montré l'existence d'une variabilité de la morphologie foliaire du caroubier en Algérie avec des provenances aux feuilles nettement plus dimensionnées que d'autres et des provenances comportant un nombre de folioles supérieur aux autres.

Les provenances Blida et Tlemcen présentent de grandes feuilles atteignant en moyenne 17.40 cm de long et 11.22 cm de large avec un long pétiole (4.44 cm). Les feuilles de Tipaza et Relizane sont les moins dimensionnées. Les feuilles de Sétif en position intermédiaire du point de vue dimension entre Tlemcen et Blida d'une part et Annaba et Jijel d'autre part, ont par contre un nombre de folioles supérieur.

Les dimensions moyennes de la feuille enregistrées dans cette étude sont concordantes avec celles rapportées par [Bostan et KaskoArici \(2015\)](#) sur 17 populations naturelles du caroubier en Turquie ; par [Seghir et al. \(2016\)](#) sur des populations spontanées de la province de Sefrou pour les caractères largeur de la feuille et longueur du pétiole. Ces moyennes sont inférieures à celles trouvées par [Gharnit et al. \(2005\)](#) sur des populations naturelles de la province de Chefchaouen au Maroc et supérieures à celles des travaux de [Christodoulakis et Mitrakos \(1981 ; 1987\)](#) sur 11 arbres en Grèce ([Tableau. 6 ; Annexe 1](#)). Les nombres de folioles dans les populations algériennes sont supérieurs à ceux des populations marocaines selon les travaux de [Gharnit et al. \(2005\)](#) ; [El Kahkahi et al. \(2015\)](#) et [Seghir et al. \(2016\)](#), même nombre de folioles cités par [Lapie et Maige \(1916\)](#) ; [Quezel et Santa \(1962\)](#) et [Batlle et Tous \(1997\)](#) ([Tableau. 6 ; Annexe 1](#)).

Pour les caractères foliolaires, la longueur et la largeur moyenne de la foliole basale mentionnée dans cette étude sont incluses dans les valeurs rapportées par [Batlle et Tous, \(1997\)](#) ; [Rejeb et al. \(1991\)](#) ; [Gharnit et al. \(2005\)](#) ; [Ait chitt et al. \(2007\)](#) ; [El Kahkahi et al. \(2015\)](#) et [Seghir et al. \(2016\)](#). Selon nos données la longueur de la foliole basale est comparable à celle de la foliole terminale (rapport de 1) tandis que sa largeur est légèrement supérieur (rapport de 1.22) en concordance avec [Albanell \(1990\)](#) selon lequel les dimensions de la foliole terminale chez les feuilles imparipennées sont semblables ou inférieures à la taille de foliole basale.

Pour ce qui est de la variation des caractères foliaires en rapport avec les conditions bioclimatiques des sites d'origine, il ne ressort pas de lien particulier. Nous avons plutôt mis en évidence une mosaïque de variation inter-provenances où ne se reflètent pas les conditions écologiques. Ainsi, comme pour les gousses et les graines, les provenances Relizane et Tipaza se regroupent pour les petites dimensions des gousses et de la feuille, tandis que les provenances Blida et Tlemcen se distinguent par la supériorité des dimensions de leurs gousses et feuilles.

L'existence d'une variabilité géographique des caractères foliaires en rapport avec un gradient de facteurs du milieu a été mise en évidence dans d'autres études.

En effet, chez les plantes, les feuilles sont les organes les plus exposés aux conditions aériennes et les changements de leurs caractères ont été interprétés comme des adaptations à des environnements spécifiques (Fahn et Cutler 1992).

IV.6. Conclusion

Les résultats présentés dans cette étude sont les premiers qui décrivent la morphologie foliaire du caroubier algérien avec un échantillon consistant de feuilles représentant 140 arbres issus de 7 provenances englobant l'est, l'ouest et le centre de l'Algérie du nord. Les seules travaux réalisés sur cette espèce remontent à la description de Lapie et Maige (1916) ; Boudy (1955) et Quezel et Santa (1962). L'analyse de la diversité morphologique des feuilles du caroubier (*Ceratonia siliqua*) en Algérie a révélé des différences entre les traits analysés, ce qui montre une forte hétérogénéité phénotypique chez les sept populations de caroubier étudiés. Leur grande variabilité phénotypique chez les différentes populations met en évidence la résistance et l'adaptation de l'espèce à différentes conditions bioclimatiques. Ce qui permet d'envisager son exploitation dans la lutte contre la désertification et la reforestation des zones côtières dégradées sous l'effet de l'érosion, ainsi pour la valorisation des terres marginales, comme barrière et brise vent.

En perspective, il serait intéressant d'élargir ce travail en incluant d'autres sites forestiers et comparer des populations d'origines géographiques différentes par le biais des marqueurs moléculaires. De même, des recherches complémentaires sont orientées vers l'analyse de la composition chimique détaillée de la feuille, l'huile de la caroube, des acides aminés qu'elle contient, les sucres qui le composent, les minéraux et les divers polyphénols ceci pour générer de l'intérêt à la fois pour les études nutritionnelles pour son utilisation thérapeutique, ce qui pourrait donner un coup de fouet au caroubier dans le contexte socio-économique du pays.

Références bibliographiques

Ait Chitt, A., Belmir, H., Lazrak, A., 2007. Production des plants sélectionnés et greffés du caroubier. Transfert de technologie en Agriculture. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA MAPM/DERD 153, 1–4.

Albanell, E., 1990. Caracterización morfológica, composición química y valor nutritivo de distintas variedades de garrofa (*Ceratonia siliqua* L.) cultivadas en España. Tesis doctoral. Barcelona. España, pp. 209.

- Battle, I., Tous, J., 1997.** Carob tree *Ceratonia siliqua* L., Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 17, Gatersleben: Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Rome: International Plant Genetic Resources Institute. 92 p.
- Seghir, N., Harki, E., Dahchour, A., Gharnit, N., Ennabili A., 2016.** Vegetative and efflorescence characterization of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) from the Province of Sefrou, the Middle Atlas of Morocco. *Moroccan J. Biol.* 13:13-22.
- Bostan, S. Z., Kaşko Arici, Y., 2015.** Evaluation of some Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Genotypes in Silifke (Mersin, Turkey) province by Cluster Analysis. *Fruit Science*, 2(1): 35-41.
- Boudy, P., 1950.** « Economie forestière Nord-Africain (tome II) : Monographie et traitement des essences forestière ». Ed. Larose, Paris, pp.443-445.
- Christodoulakis, N.S. et Mitrakos, K.A., 1987.** Structural analysis of sclerophylly in eleven evergreen phanerophytes in Greece. *NATO ASI series G.* 15: 547-551.
- 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. *Int. J. Pure App. Biosci.* 7 (1) : 22-34.
- El Kahkahi, R., Zouhair, R., Diouri, M., Ait Chitt, M., et Errakhi, R., 2015.** Morphological and biochemical characterization of Morocco carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Int. J. Biol Med Res.* 6(2): 4946-4952.
- Fahn, A., Cutler, D.F., 1992.** Xerophytes. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 180 p.
- Gharnit, N., El Mtili, N., Ennabili, A., et Sayah, F., 2005.** Caractérisation foliaire du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) originaire de la province de Chefchaouen (Nord-ouest du Maroc). *J Bot Soc Bot France* 31: 75-84.
- Korkmaz, N., Akin, M., Koc, A., Eydurun, S.P., Ilhan, G., Sagbas, H. I., Ercisli, S., 2020.** Morphological and biochemical diversity among wild-grown carob trees (*Ceratonia siliqua* L.). *Folia Hort.* 32(1) : 69–78.
- Lapie, G., Maige, A., 1916.** Flore forestière de l'Algérie, éditeur : Librairie générale de l'Enseignement, ORLHAC. Paris. 357p.
- Lo Gullo, M. A., Salleo, S., Rosso, R., 1986.** Drought Avoidance Strategy in *Ceratonia siliqua* L., a Mesomorphic-leaved Tree in the Xeric Mediterranean Area, *Annals of Botany*, Vol 58(5) :745–756
- Mebirouk-Boudechiche, L., Boudechiche, L., Miroud, K., Bouhadja, N., 2014.** La caroube comme complément au pâturage avant la lutte des brebis Ouled Djellal. *Renc. Rech. Ruminants*, 21: 177.
- Mitrakos, K. & Christodoulakis, N., 1981.** Leaf Structural Diversity in Mediterranean Evergreen Sclerophylls. Insitute of General Botany, University of Athens, Greece.21-25pp.10.1007/978-94-009-8683-1_5
- Naggar, M., Lahssini, S., 2015.** La filière caroubier au service du développement socio-économique des territoires forestiers de montagne. XIV Congrès forestier mondial, Durban, South Africa. Les forêts et les populations : investir dans un avenir durable. 9 p.
- Nunes, M.A., Catarino, F.M. Pinto. E., 1989.** Seasonal drought acclimatation strategies in *Ceratonia siliqua* leaves. *Physiol. Plant.* 77 : 150-156
- Quezel, P., Santa S., 1962.** Nouvelles flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Tome I. Paris : Centre National de la Recherche Scientifique.1170p.
- Rejeb, M.N., Laffray, D., et 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, pp. 79-85.

Chapitre V :
Analyse de quelques
paramètres physico-chimiques

V.1.Introduction

Depuis longtemps, le fruit du caroubier a été utilisé comme un aliment en raison de sa teneur élevée en sucre (Calixto, 1982). La caroube est un fruit très riche en sucres, en particulier saccharose, glucose, fructose et maltose ce qui lui vaut sa saveur très sucrée et son utilisation comme aliment de bétail (Biner *et al.*, 2007).

Ces derniers temps, l'utilisation alimentaire des caroubes s'est limitée à ses graines, qui ne représentent qu'environ 10% du poids de la gousse (Bouzouita *et al.*, 2007). La séparation des graines se traduit par une importante quantité de caroubes cassées sans graines utilisées comme un sous-produit, communément connu sous le nom de pulpe. Ces pulpes sont utilisées pour l'alimentation animale (Karabulut *et al.*, 2006 ; Kotrotsios *et al.*, 2011 ; Obeidat *et al.*, 2012) et pour la fabrication de sirop ou de bioéthanol (Sanchez-Segado *et al.*, 2010 ; Mazaheri *et al.*, 2012 ; Ercan *et al.*, 2013).

Les sucres, les acides organiques et les acides aminés sont des constituants naturels de nombreux fruits et jouent un rôle important dans le maintien de la qualité de la valeur nutritive (Khlifa *et al.*, 2013). La nature et la concentration de ces constituants dans les fruits sont également d'intérêt en raison de leurs importantes propriétés organoleptiques.

La composition chimique du caroubier et ses différentes parties a fait l'objet d'études dans différents pays de la région méditerranéenne (Avallone *et al.*, 1997 ; Yousif et Alghzawi, 2000 ; El-Shatnawi et Ereifej, 2001 ; Fadel *et al.*, 2011 ; Youssef *et al.*, 2013 ; Khlifa *et al.*, 2013 ; Nasar-Abbas *et al.*, 2016 ; Mahtout *et al.*, 2018 ; Salih et Jalil, 2020..etc.). Il a été observé que cette composition ne dépend pas seulement de facteurs technologiques tels que l'extraction et la méthode d'analyse, mais aussi du génotype de la plante, de l'origine géographique, des conditions climatiques ; de la récolte et des procédures de stockage du type d'arbre (femelle ou hermaphrodite) et du cultivar (Owen *et al.*, 2003 ; Biner *et al.*, 2007 ; Custodio *et al.*, 201 ; Oziycia *et al.*, 2014 ; El Kahkahi *et al.*, 2015 ; El Batal *et al.*, 2016 ; Ghanemi, 2017). Plusieurs travaux se sont intéressés à la physico-chimie du caroubier algérien dont Gaouar (2011) sur trois différentes régions, Ghanemi (2017) sur les feuilles du caroubier collectés dans la région de Nedroma (Tlemcen) au Nord-Ouest de l'Algérie. Mahtout *et al.* (2018) sur les feuilles et les gousses du caroubier collectées à Tazmalt au Nord de l'Algérie et Boublenza *et al.* (2019) sur dix variétés de caroube spontanées ou cultivées, localisées dans différents régions du nord de l'Algérie, etc. Toutefois, notre approche envisage l'étude physico-chimique des parties végétales du caroubier (pulpe, graine et feuilles) de façon concomitante à l'étude morphologique des gousses et des graines et à l'étude morphologique des feuilles en

vue de fournir un ensemble de descripteurs sur les mêmes provenances et ce en vue de contribuer à une meilleure connaissance de cette ressource phylogénétique en Algérie.

V.2. Matériel et méthodes

Les feuilles, les gousses et les graines de *C.siliqua* utilisées pour l'étude morphologique vont servir aussi bien aux analyses phytochimiques.

V.2.1.Préparation du matériel végétal

D'abord, les feuilles, les pulpes et les graines de chaque site ont été séchées réduites en fines poudres à l'aide d'un broyeur électrique et conservé à l'abri de l'humidité et de la lumière dans des flacons en verre pour des analyses ultérieures.

V.2.2. Méthodes d'analyse des paramètres physico-chimiques

La poudre des feuilles, des pulpes et des graines de chaque site a servi au calcul des paramètres physico-chimiques.

V.2.2.1. Détermination de l'humidité et de la matière sèche :

La détermination de l'humidité conditionne la précision des résultats du fait qu'elle nous permet de rapporter les résultats par rapport à la matière sèche. Nous avons utilisé la méthode d'[Audigie et Dupont \(1982\)](#) qui consiste en une dessiccation de l'échantillon à analyser dans une étuve à 105°C, sous pression atmosphérique jusqu'à l'obtention d'une masse pratiquement constante. Pour éviter toute reprise d'humidité, il convient d'opérer dans des vases de tare, placés dans un dessiccateur.

Il ya lieu de noter que ce dosage a été réalisé avant chaque analyse.

La détermination de l'humidité nous permet de ramener tous nos résultats à une même échelle de grandeur à savoir la matière sèche. L'analyse biochimique a été réalisée sur des échantillons de gousses (et graines 7 mois après la récolte faite en Septembre 2014 et sur des échantillons de feuilles 5 mois après la récolte faite en Mai et Juin 2013. D'où la nécessité d'exprimer les résultats en matière sèche.

a. Mode opératoire :

Introduire dans chaque vase de tare 2 g de l'échantillon frais ;

Placer les dans une étuve réglée à 105 °C pendant 3 h ;

Peser les vases de tare et remettre dans l'étuve à 105 °C pendant 24 h. Répéter l'opération avec chaque pesée jusqu'au poids constant ou à une différence de 2 mg entre deux pesées successives.

b. Expression des résultats :

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

$$\text{Humidité (\%)} = (P-P1) / M * 100$$

Avec :

P : La masse initiale en g (l'échantillon frais + creuset) avant séchage.

P1 : La masse finale en g (l'échantillon frais + creuset) après séchage.

M : La masse de la prise d'essai.

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

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

V.2.2.2. Dosage des cendres :

Le principe consiste en une incinération du matériel végétal au four à moufle, dans un creuset en porcelaine, à une température de 900°C (Audigie et Dupont, 1982).

a. Mode opératoire :

On procède d'abord à une pré- incinération des creusets en porcelaine à 300°C pendant 15 minutes ; après refroidissement dans un dessiccateur, ils sont pesés (poids A) ;

on met 2 g de l'échantillon (la poudre) dans les creusets et on les introduit dans un four à moufle à 900 °C jusqu'à ce que le contenu des creusets prenne une couleur blanc grisâtre pendant une durée allant de 1 h 15 min qui blanchit après refroidissement dans un dessiccateur. Enfin, on pèse les creusets avec les cendres (c'est le poids B).

b. Expression des résultats :

Les résultats sont exprimés selon la formule suivante :

$$T_c (\%) = \frac{B - A}{M} \times 100$$

Avec :

T_c : teneur en cendres (%).

A : poids du creuset vide (g).

B : poids du creuset + échantillon après l'incinération.

M : masse de l'échantillon (g).

V.2.2.3. Dosage de la matière grasse :

a-Mode opératoire : Le dosage a été effectué selon la méthode [ISO 659:2009](#), l'extraction est réalisée avec un appareil de type Soxhlet par un solvant organique (Hexane), spécifique pour la détermination du taux de la matière grasse. A la fin de l'extraction, on peut admettre que toute la matière grasse est transférée dans le solvant. Le protocole de dosage illustré dans la [Fig.1](#).

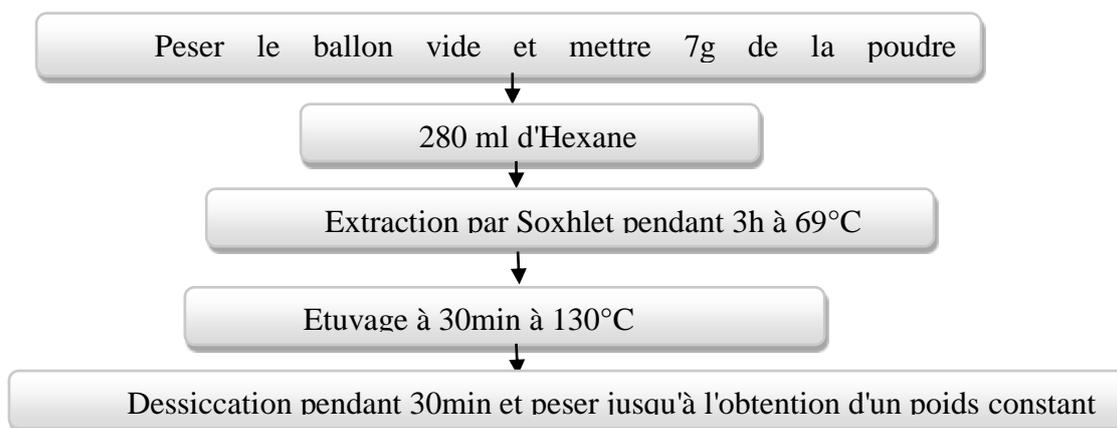


Fig. 1 : Protocole de dosage de la matière grasse (ISO 659, 2009).

b-Expression des résultats :

Le taux de la matière grasse est calculé par la formule suivante :

Avec :

P2 : poids du ballon vide.

ME : masse de la prise d'essai

P1 : poids du ballon après évaporation.

MG : taux de la matière grasse.

$$\text{MG (\%)} = \frac{\text{P1} - \text{P2}}{\text{ME}} \times 100$$

V.2.2.4. Dosage des sucres totaux :

Le dosage des sucres totaux est effectué par la méthode de phénol / acide sulfurique (Dubois *et al.*, 1956). Cette dernière nécessite une hydrolyse acide qui permet la rupture de toutes les liaisons glucidiques dans le polysaccharide. A ce moment-là, il se forme des chromophores de couleur jaune-orange, leur apparition est suivie en mesurant l'augmentation de la densité optique à 490nm. La teneur des sucres est exprimée en mg/ ml de α D (+) Glucose (Fig.2). En parallèle, on trace la courbe d'étalonnage de la façon décrite dans la Fig.3 ; annexe 1

V.2.3. Analyse statistique

Toutes les expériences ont été réalisées en triple. Les résultats sont exprimés en moyenne \pm ET. Une analyse de la variance a été appliquée aux résultats des dosages en tenant compte de l'effet provenance et de l'effet partie végétale ainsi que de leur interaction. L'étude statistique a été réalisée avec le logiciel Statistica.10 et le logiciel R version 64 3.4.0.

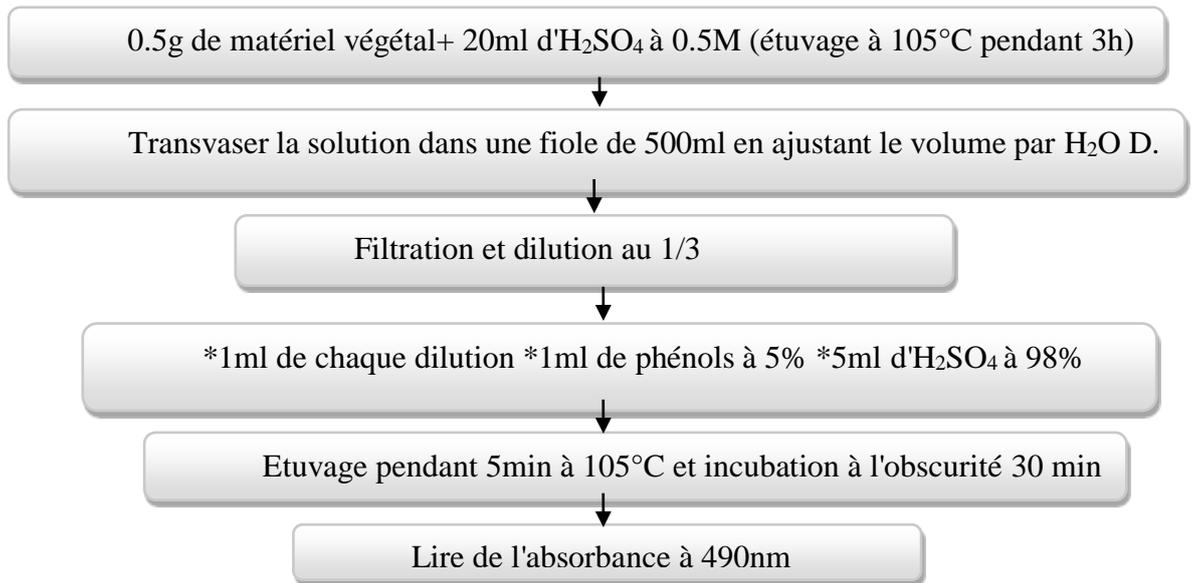


Fig.2 : Protocole de dosage des sucres totaux (Dubois *et al.*, 1956)

V.3.Résultats

La moyenne et l'écart type des résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques obtenus chez les sept populations du caroubier sont présentés dans le [tableau 1](#).

V.3.1.Taux de matière sèche

En moyenne, le taux de matière sèche est similaire dans les feuilles et les graines et légèrement inférieur dans la pulpe ([Tableau 1](#) ; [Fig. 4](#)).

Par provenance, le taux de matière sèche est de 83 à 91.33 % dans les pulpes d'Annaba et Jijel respectivement ; de 86 à 92 % dans les feuilles de Relizane et Annaba respectivement et de 85.33 à 93.66 % dans les graines d'Annaba et Tlemcen respectivement.

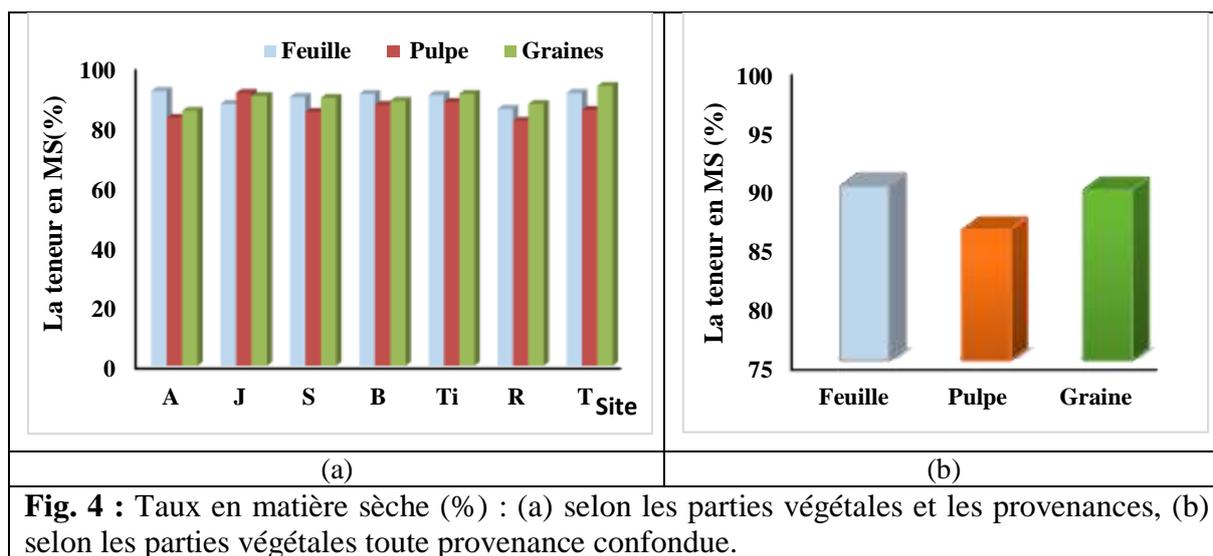
L'analyse de la variance a révélé des différences significatives entre provenances et des différences très significatives entre parties de la plante ([Tableau 2](#)).

Chapitre V : Analyse de quelques paramètres physico-chimiques

Tableau 1 : Teneur en quelques paramètres physico-chimiques selon les parties végétales et les provenances de *C. siliqua*.

Partie végétale	paramètre	Sites							Moyenne ±ET
		Annaba	Jijel	Sétif	Blida	Tipaza	Relizane	Tlemcen	
Feuille	MS (%)	92± 4.35	87.66±2.08	90±1.73	91±1	90.66±1.15	86±2.64	91.33±3.78	89.81±3.04
	TC (%)	5±1	5.5±0.50	3.58±0.87	6±1	4±0.75	5.41±1.37	5.83±1.04	5.04±1.19
	MG(%)	3.7±0.26	2.58±0.20	2.03±0.05	3.7±0.75	4.42±0.43	4.27±0.30	2.86±0.47	3.36±0.91
	ST (%)	5.46±1.19	1.90±0.81	5.01±1.49	5.01±1.49	1.90±0.36	1.04±0.08	1.21±0.17	3.07±2.05
Pulpe	MS (%)	83±2.64	91.33±3.51	85±1.73	87.33±0.57	88.33±2.51	82±12.12	85.66±2.88	86.09±5.26
	TC (%)	3.13±0.80	3.02±0.08	2.86±0.32	2.68±0.73	2.21±0.26	2.15±0.51	2.76±0.78	2.69±0.59
	MG(%)	5.7±0.26	2.14±0.41	1.56±0.21	2.29±0.52	1.65±0.47	1.27±0.15	4.85±0.18	2.78±1.69
	ST (%)	48.92±0.58	46.33±0.42	36.14±0.95	36.66±0.38	34.17±1.37	31.58±0.45	39.50±1.43	39.05±6.10
Graine	MS (%)	85.33±1.52	90.33±3.05	89.66±1.15	88.66±3.05	91±1.73	87.66±3.51	93.66±1.52	89.47±3.20
	TC (%)	6.90±0.23	7.94±0.05	7±0.21	7.76±0.24	7.20±0.51	6.41±0.39	7±0.11	7.17±0.55
	MG(%)	6±0.91	6.58±0.43	2.28±0.40	5.78±0.24	2.56±0.48	2.95±0.13	6.34±0.30	4.64±1.88
	ST (%)	38.23±0.77	39.41±0.57	16.39±0.39	17.23±0.63	16.02±0.16	15.42±0.49	17.05±0.19	22.82±10.39

Moy±ET : Moyenne ± Ecart type. **Paramètre** : MS : Matière sèche ; C : Cendres ; MG : Matière grasse ; ST : Sucres totaux.

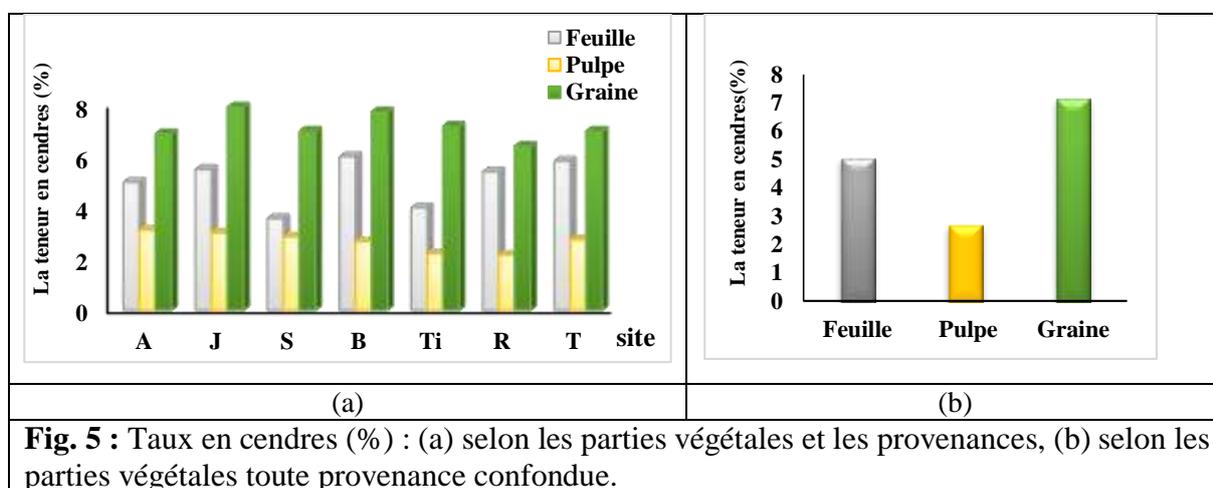


V.3.2. Teneur en cendres

Les résultats obtenus montrent que la teneur moyenne en cendres toute provenance confondue est plus élevée dans les graines et les feuilles par rapport aux pulpes avec respectivement des valeurs de 7.17 ; 5.04 et 2.69 % (Tableau 1, Fig.5).

Par provenance, la teneur en cendres des feuilles varie entre 3,58 % (à Sétif) et 6 % (à Blida). Celle des graines varie de 6.41 % (à Relizane) à 7.94 % (à Jijel). Et celle des pulpes varie de 2.15 % à Relizane à 3.13 % à Annaba.

L'analyse de la variance a montré des différences très significatives entre les sites étudiés, une différence hautement significative entre les parties végétales et une interaction partie végétale x site légère mais significative (Tableau 2).



V.3.3. Teneur en matières grasses

Nous avons enregistré une teneur moyenne en lipides toute provenance confondue de 2.78 % dans les pulpes ; de 3.36 % dans les feuilles et de 4.64 % dans les graines (Tableau 1 ; Fig.6).

Dans les pulpes, ce paramètre fluctue entre 1.27 % à Relizane et 5.7 % à Annaba. Pour cette partie végétale, seules Annaba et Tlemcen ont des valeurs élevées supérieures à la moyenne.

Dans les feuilles, la teneur en matière grasse varie entre 2.03 % à Sétif et 4.42 % à Tipaza. Seules Tipaza et Relizane ont dépassé une teneur de 4 %. Tandis que Sétif, Jijel et Tlemcen n'ont pas atteint la moyenne.

Dans les graines, la teneur en matière grasse fluctue entre 2.28 % à Sétif et 6.58 % à Jijel. Les provenances Blida, Annaba, Tlemcen et Jijel ont des valeurs supérieures à la moyenne au contraire de Sétif, Tipaza et Relizane dont les valeurs sont inférieures à la moyenne.

Le classement des provenances pour le taux de lipides varie avec la partie végétale : il est le plus faible aux sites de Sétif et Relizane pour les deux organes (feuille et graine) et le plus élevé à Tipaza pour les feuilles (4,42 %), à Annaba pour les pulpes (5,7 %) et à Jijel pour les graines (6,58 %) (Fig.6). L'analyse de la variance a révélé de différences hautement significatives entre les provenances d'une part et entre parties végétales d'autre part (Tableau 2) ainsi qu'une interaction partie végétale x site très hautement significative.

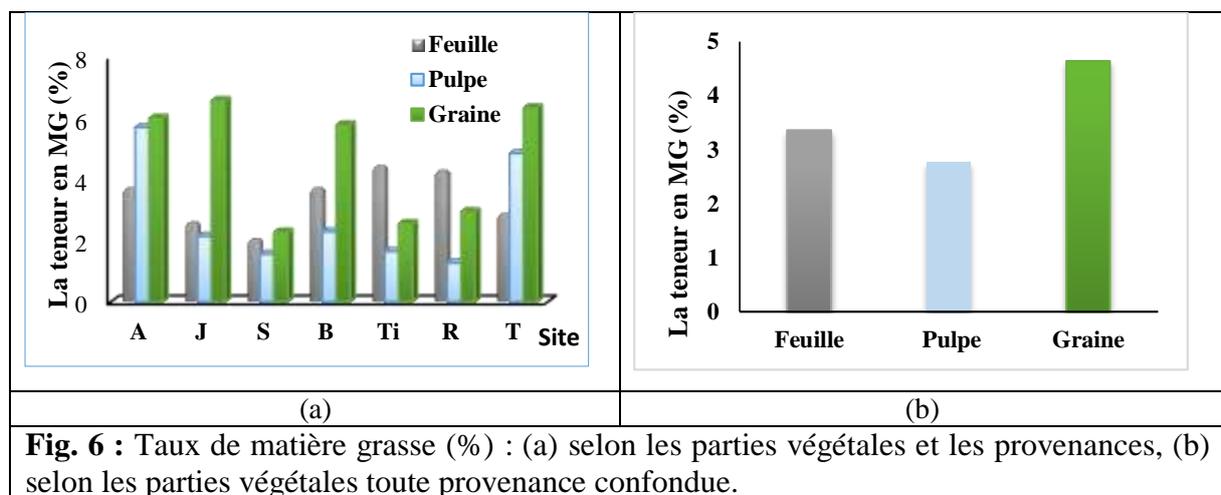


Fig. 6 : Taux de matière grasse (%) : (a) selon les parties végétales et les provenances, (b) selon les parties végétales toute provenance confondue.

V.3.4. Teneur en sucres totaux

En moyenne le taux de sucres est de 3.07 % dans les feuilles ; de 22.82 % dans les graines et de 39.05 % dans les pulpes.

Dans les feuilles, c'est Annaba qui a le taux le plus élevé (5.46 %) suivie de Sétif et Blida avec des taux de 5 % tandis que le reste des provenances ont des taux inférieurs à 2 %.

Dans les graines, la teneur en sucres est faible à Relizane, Tipaza, Sétif, Tlemcen et Blida et supérieure à la moyenne à Annaba et Jijel.

Dans les pulpes, Jijel et Annaba ont une teneur en sucres dépassant 45% alors que Tlemcen a une teneur plutôt moyenne et le reste des provenances des teneurs inférieures à la moyenne en particulier Relizane et Tipaza.

Ainsi, il ressort de ces résultats la supériorité d'Annaba et Jijel pour le taux de sucres des pulpes et des graines, contrairement, à Relizane qui détient le taux le plus faible des trois parties végétales. On remarque aussi que les graines de Jijel et Annaba ont une teneur en sucres proche de celle de la pulpe de Tlemcen (Fig.7). L'analyse de la variance a indiqué une différence hautement significative entre les sites et entre les parties végétales (Tableau 2) et une interaction partie végétale x site très hautement significative.

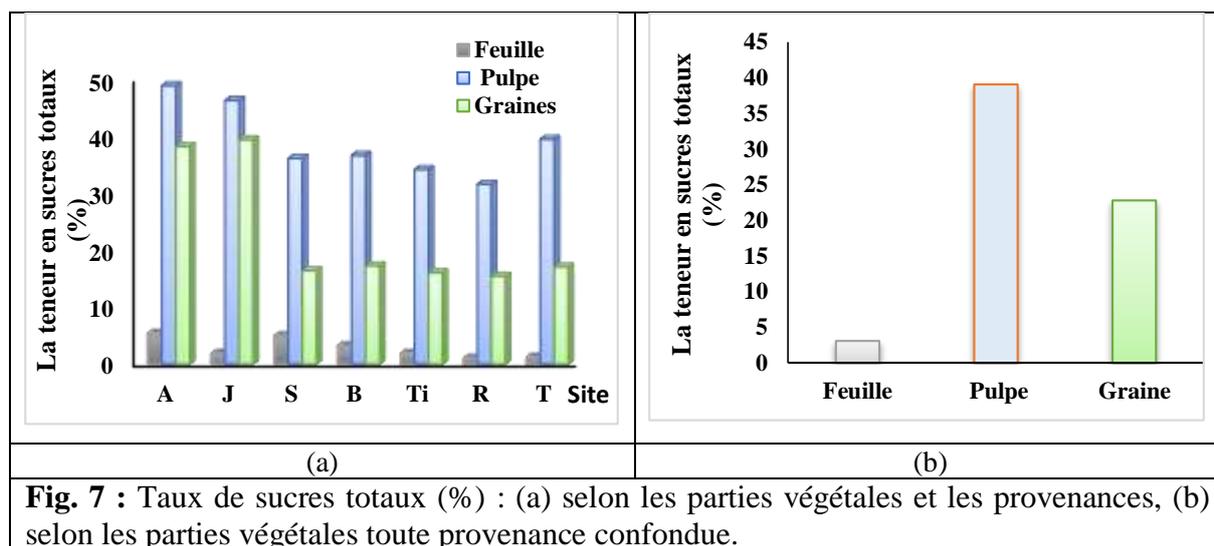


Fig. 7 : Taux de sucres totaux (%) : (a) selon les parties végétales et les provenances, (b) selon les parties végétales toute provenance confondue.

Tableau 2 : Analyse de la variance de l'effet provenance et de la partie végétale sur les teneurs de quelques paramètres physico-chimiques de *C.siliqua*.

Paramètre	Source de variation	ddl	SC	CM	F value	Pr(>F)
Matière sèche (MS)	site	6	187.9	31.31	2.397	0.04411*
	Partie	2	177.4	88.68	6.789	0.00279**
	Site : partie	12	207.7	17.31	1.325	0.24097
	Valeurs résiduelles	42	548.7	13.06		
Cendres (TC)	site	6	10.52	1.75	3.911	0.00342**
	Partie	2	211.42	105.71	235.910	<2e-16 ***
	Site : partie	12	12.36	1.03	2.300	0.02328*
	Valeurs résiduelles	42	18.82	0.45		
Matière grasse (MG)	site	6	67.20	11.201	64.75	<2e-16 ***
	Partie	2	38.02	19.012	109.92	<2e-16 ***
	Site : partie	12	70.40	5.866	33.91	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	42	7.26	0.173		
Sucres totaux (ST)	site	6	1874	312	460.5	<2e-16 ***
		2	13629	6815	10048.4	<2e-16 ***
	Site : partie	12	1088	91	133.7	<2e-16 ***
	Valeurs résiduelles	42	28	1		

Codes de Signification : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

V.4.Discussion

V.4.1.Teneur en matière sèche

L'analyse des paramètres physico-chimiques de la pulpe, des graines et des feuilles de caroubier indique que les feuilles et les graines renferment légèrement plus de matière sèche que la pulpe. Les valeurs par provenance sont dans un intervalle 83 à 94 % toute partie végétale confondue. Toutefois, le classement des provenances n'est pas stable ainsi, Annaba a la teneur en MS des feuilles la plus élevée mais les teneurs les plus faibles pour ce qui est de la pulpe et des graines.

En moyenne, la teneur en matière sèche des pulpes de cette étude (i.e. 86%) est similaire à celles d'Ouis et Hariri (2017) pour les gousses de caroube algérien, d'El Kahkahi et al. (2015) ; El Batal et al. (2016) pour les pulpes de caroube marocain (82,58 - 87,84 %), d'Albanell et al. (1991) qui est de 87,31 %. Elle est inférieure à celles de Fadel et al. (2011) ; Khlifa et al. (2013) et Boublenza et al. (2019) ; de Yousif et Alghzawi (2000) qui est de 88.93 % ; de Hussein et al. (2011) qui est de 89,9 % et elle est nettement inférieure à celles d'Ozcanet et al. (2007) sur la caroube de Turquie (93.94 %).

A l'échelle de la provenance, la teneur en matière sèche des feuilles de Tlemcen (91.33 %) de cette étude est supérieure à celle de Ghanemi (2017) pour la même région de récolte soit 87.62% et est similaire à celle de Mahtout et al. (2018) qui est de 91.60 %.

La matière sèche dans les graines, qui est de 89.47 % en moyenne, est supérieure à celle d'Avallone *et al.* (1997) ; Fadel *et al.* (2011) ; Mahtout *et al.* (2018) et inférieure à celle d'El Kahkahi *et al.* (2015) (91.77 % - 95.34 %) pour les graines de caroube marocain. Cette différence pourrait être causée par les facteurs climatiques, la durée du stockage ou le conditionnement de nos échantillons après le broyage.

V.4.2. Teneur en cendres

La teneur en cendres est en moyenne plus élevée dans les graines suivie des feuilles puis de la pulpe. La teneur en cendre la plus élevée (8 %) est obtenue sur les graines de Jijel et la plus faible obtenue sur la pulpe de Relizane qui a aussi la plus faible teneur en cendres des graines.

La teneur moyenne en cendres des pulpes (2.69 %) se rapproche de celles citées dans la bibliographie qui est comprise entre 2 et 3 % selon plusieurs auteurs à savoir Yousif et Alghzawi (2000) ; El-Shatnawi et Ereifej (2001) ; Fadel *et al.* (2011) ; Youssef *et al.* (2013) ; Khelifa *et al.* (2013) ; Nasar-Abbas *et al.* (2016) ; Mahtout *et al.* (2018) ; Salih et Jalil (2020). Cette teneur est supérieure à celle d'Avallone *et al.* (1997) et inférieure à celles d'autres auteurs (Albanell *et al.*, 1991 ; Hussein *et al.*, 2011 ; Ouis et Hariri, 2017 ; Boublenza *et al.*, 2019). Cette légère variation peut être due à la provenance géographique des échantillons, notamment les conditions climatiques et les caractères édaphiques des sols (Bezzala, 2005).

A l'échelle de la provenance, la teneur en cendre des feuilles de Tlemcen (5.83 %) est supérieure à celle de Ghanemi (2017) et inférieure à celle de Mahtout *et al.* (2018) pour la même région de récolte.

Concernant la teneur moyenne en cendres des graines (7.17 %) elle est supérieure à celles de Samil Kök (2007), de Dakia *et al.* (2006), Bouzouita *et al.* (2007) et Fadel *et al.* (2011), de Mahtout *et al.* (2018) pour la caroube algérienne et d'Avallone *et al.* (1997) pour des caroubes d'Italie.

A l'échelle de la provenance, les valeurs moyennes de la présente étude pour Tlemcen, Blida et Jijel (7.00 ; 7.76 et 7.94 %) sont supérieures à celles enregistrées par Guaour (2011) sur les graines des mêmes provenances (respectivement 1.83 ; 2.67 ; 2.83 % pour Tlemcen, Blida et Jijel). Quant à l'inégalité de la teneur en cendres de la pulpe et de la graine elle dépend de l'activité biologique des deux parties de la plante (Linden et Lorient, 1994).

V.4.3. Teneur en matière grasse

La teneur en matière grasse est plus élevée dans les graines suivies des feuilles puis des pulpes. La teneur en lipides la plus faible est obtenue à Sétif dans les graines et dans les feuilles

et à Relizane dans la pulpe. La teneur en lipides la plus élevée est obtenue à Jijel dans les graines, à Annaba dans la pulpe et à Tipaza dans les feuilles.

La teneur en matière grasse des feuilles enregistrée dans cette étude (3.36 %) est inférieure à celle rapportée par [Ghanemi \(2017\)](#) pour le site de Tlemcen (4,45 %) et par [Mahtout et al. \(2018\)](#) pour le site de Tazmalt, Bejaia (4,5 %) et s'accorde avec celles des feuilles du caroubier tunisien selon [Dallali et al. \(2018\)](#).

Les variations de la teneur totale en lipides pourraient être dues à l'effet des facteurs génétiques, des conditions environnementales et édaphiques ([Uzun et al., 2002](#) ; [Ravi et al., 2007](#)).

La teneur moyenne en matière grasse des pulpes dans cette étude (2.78 %) est inférieure à celle d'[Ayaz et al. \(2009\)](#) qui est de 4,44 %, mais elle est beaucoup plus élevée que les teneurs de [Yousif et Alghzawi \(2000\)](#) pour le caroubier de Jordanie (i.e.0.74 %) ; et d'[Avallone et al. \(1997\)](#) pour le caroubier d'Italie (i.e.0.6 %).

A l'échelle des provenances, les teneurs en lipides sont supérieures à celle de [Mahtout et al. \(2018\)](#) qui est de 1,5 % pour le caroubier de Tazmalt (Bejaia, Algérie), tandis qu'elles concordent avec les teneurs enregistrées par [Guaour \(2011\)](#) sur les graines et pulpe des mêmes provenances : Jijel (Gr : 6,5 % et pp : 2,33 %) ; Blida (Gr : 6 % et pp : 1,83 %) et Tlemcen (Gr : 6,33 % et pp : 4,83 %). Cette comparaison montre la supériorité de la teneur en lipides des pulpes de Tlemcen sur les autres provenances aussi bien selon nos résultats que selon [Guaour \(2011\)](#).

Pour les graines, nous avons enregistré une teneur moyenne en lipides de 7.17 %, qui est une valeur légèrement supérieure à celle de [Dakia et al. \(2007\)](#) qui est de 6,6 %, mais nettement supérieure à celle de [Mahtout et al. \(2018\)](#) qui est de 2 % pour les graines de caroube algérien. Les différences pourraient s'expliquer par l'influence de multiples paramètres sur le taux de matière grasse comme l'humidité, la nature du solvant, la méthode d'extraction utilisée et la région géographique.

Sur le plan qualitatif, selon [Ayaz et al. \(2009\)](#), la matière grasse de la pulpe est représentée par 11 acides gras avec une prédominance de l'acide oléique ; l'acide palmitique est l'acide gras saturé le plus abondant, et une quantité nutritionnellement appréciable des acides gras essentiels tels que l'acide linoléique et l'acide α -linoléique. De plus, ces auteurs ont montré que la pulpe de caroube contient plus d'acides gras insaturés que d'acides gras saturés ($897 \pm 53 \mu\text{g/g}$ de MS et $335 \mu\text{g/g}$ de MS respectivement), ce qui confère à la caroube la propriété de diminuer le risque de maladies cardiovasculaires.

Concernant la composition qualitative en matière grasse des graines, elle représentée selon [Dakia et al. \(2007\)](#) en majeure partie par l'acide oléique (34,4 %) et l'acide linoléique (44,5 %), tandis que l'acide palmitique (16,2 %) et l'acide stéarique (3,4 %) sont les principaux acides gras saturés.

S'agissant des facteurs de variation de la teneur en matière grasse, de multiples paramètres la déterminent comme la granulométrie, l'humidité, la nature du solvant et la méthode d'extraction utilisée ([Efthymiopoulos et al., 2009](#)). Dans cette présente étude nous avons mis en évidence un effet partie végétale et un effet provenance.

V.4.4. Teneur en sucres totaux

Le taux de sucres est le plus élevé dans la pulpe suivie des graines puis des feuilles chez lesquelles il est très faible ne dépassant pas 3 %. Annaba et Jijel se distinguent par les teneurs en sucres les plus élevées des trois parties végétales.

Relizane et Tipasa ont les teneurs en sucres les plus faibles dans les pulpes. Elles partagent ce classement avec Sétif, Tlemcen et Blida dans le cas des graines et avec Tlemcen dans les cas des feuilles.

La teneur en sucres totaux des pulpes (39.05 %) est concordante avec celles trouvées par [El batal et al. \(2016\)](#) ; [El Kahkahi et al. \(2015\)](#) pour différentes régions du Maroc (31,5-50,1 g/100g) et (32,11- 52,59 %) respectivement. En revanche, elle est inférieure aux teneurs rapportées par [Khelifa et al. \(2013\)](#) ; [Youssef et al.\(2013\)](#) ; [Nasar-Abbas et al. \(2015\)](#) ; [Ouis et Hariri \(2017\)](#) ; [Mahtout et al. \(2018\)](#) ; [Boublenza et al. \(2019\)](#) ; [Salih et Jalil \(2020\)](#) et à [Ozcan et al. \(2007\)](#) qui ont trouvé chez les gousses de caroube de Turquie une teneur en sucres totaux de 48,35 %. D'un autre côté, elle est nettement supérieure à celle obtenue par [Hussein et al. \(2011\)](#) sur la caroube d'Egypte (i.e.9.17 %).

A l'échelle des provenances, la teneur en sucres totaux des pulpes est supérieure à celle trouvée par [Gaouar \(2011\)](#) sur les pulpes et les graines de Jijel, Blida et Tlemcen. La teneur en sucres totaux des feuilles de Tlemcen (1.21 %) est inférieure à celle trouvée par [Ghanemi \(2017\)](#) pour la même provenance (5,541 %). Quant à la teneur trouvée par [Mahtout et al. \(2018\)](#) pour le site de Tazmalt (15,7 %) elle est nettement supérieure à celles de toutes les provenances présentement étudiées.

La teneur en sucres de la pulpe de nos échantillons est supérieure à celles des autres parties (graines et feuilles) en concordance avec [Avallone et al. \(1997\)](#) qui ont trouvé des teneurs élevées en sucres dans la pulpe par rapport à la graine.

La teneur moyenne en sucres totaux des graines est dans l'intervalle (i.e.19.23%-25.17 %) avancé par [El Kahkahi et al. \(2015\)](#). Par contre, les teneurs par provenance notamment dans les sites d'Annaba et Jijel (38.23 - 39.41 %) sont supérieures à celles d'[El Kahkahi et al. \(2015\)](#) et à celle de [Mahtout et al. \(2018\)](#) qui est de 5.2 %.

Sur le plan qualitatif, [Ayaz et al. \(2007\)](#) ont montré sur la caroube d'Anatolie (Turquie) que les sucres sont représentés majoritairement par le sucrose avec 437,3 mg/g MS, le glucose avec 395,8 mg/g MS et le fructose avec 42,3 mg/g MS. [Dakia et al. \(2008\)](#) ont trouvé une composition des graines en sucres représentée par 77.3 %.

Les différences de teneurs au sein de la littérature sont attribuées à de nombreux facteurs tels l'origine géographique, les conditions climatiques, la diversité entre les variétés, la récolte et le stockage et les facteurs technologiques ([Owen et al., 2003](#) ; [Papagiannopoulos et al., 2004](#)).

[Shawakfeh et Ereifej \(2005\)](#) ont signalé une variation considérable de la teneur en sucres entre deux types de caroubier en Jordanie.

Sur le plan qualitatif, les études effectuées par [Biner et al. \(2007\)](#) sur les gousses de caroube ont montré que les contenus en sucres sont représentés majoritairement par le sucrose avec 384 mg/g MS, le glucose avec 33 mg/g MS et le fructose avec 115 mg/g MS quel que soit la variété et l'origine.

V. 5. Conclusion

L'étude biochimique a permis de distinguer deux provenances : Jijel et Annaba pour leur teneur en sucres les plus élevées dans la pulpe, elles peuvent être valorisés et utilisés pour la production de la poudre de la caroube. En outre, la plantation de ces variétés de caroube, qui sont très nécessaires pour les industries agro-alimentaires, peut être une ressource économique importante pour la population rurale.

La pulpe en tant que partie végétale a les valeurs les plus faibles pour 3 paramètres physico- chimiques : taux de matière sèche, de cendres et de matière grasse. En revanche, elle est caractérisée par le taux de sucres le plus élevé des 3 parties végétales.

La graine pour sa part, a le meilleur classement pour le taux de cendres et celui de matière grasse. La feuille se distingue par le taux de matière sèche le plus élevé des trois parties végétales et par le taux de sucres le plus faible, tandis qu'elle occupe une position intermédiaire entre la graine et la pulpe pour le taux de cendres et celui de matière grasse.

L'interaction provenance x partie végétale mise en évidence pour certains paramètres chimiques, notamment le taux de sucres et de matière grasse, suggère de considérer les provenances pour ces paramètres en envisageant chaque partie végétale seule.

Références bibliographiques

- Albanell, E., Caja, G., Plaixats, J., 1991.** Characteristics of Spanish carob pods and nutritive value of carob kibbles. In : Tisserand J.-L. (Ed.), Alibés X. (Ed.). Fourrages et sous-produits méditerranéens. Zaragoza : CIHEAM. p. 135-136 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n°16)
- Audigie, C.L. et Dupont, G., 1982.** Principes des méthodes d'analyses biochimiques, Paris, pp. 566-567.
- Avallone, R., Plessi, M., Baraldi, M. & Monzani, A., 1997.** Determination of chemical composition of carob (*Ceratonia siliqua*): Protein, fat, carbohydrates, and tannins. J. Food Com. Anal. 10 : 166-172.
- Ayaz, F.A., Torun, H., Ayaz, S., Correia, P.J., Alaiz, M., Sanz, C., Gruz, J., Strnad, M., 2007.** Determination of chemical composition of anatolian carob pod (*Ceratonia siliqua* L.): Sugars, amino and organic acids, minerals and phenolic compounds. J. Food Qual. 30, 1040–1055.
- Ayaz F. A., Torum H., R. H. Glew, Bak Z. D., Chuang L.T., Presley J. M. & Andrews R., 2009.** Nutrient Content of Carob Pod (*Ceratonia siliqua* L.) Flour Prepared Commercially and Domestically. Plant Foods Hum Nutr 64, 286–292.
- Bezzala, A., 2005.** Essai d'introduction de l'arganier dans la zone de M'doukel et évaluation de quelques paramètres de résistance à la sécheresse, Magister en Sciences Agronomiques, Université El Hadj Lakhdar, Batna.
- Biner B., Gubbuk H., Karhan M., Akus M., Pekmezei M., 2007.** «Sugar profiles of the pods of cultivated and wild types of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.) in Turkey». Food chemistry 100: pp. 1453-1455.
- Boublenza, I., El Haitoum, A., Ghezlaoui, S., Mahdad, M., Vasai, F., et Chemat, F., 2019.** Algerian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations. Morphological and chemical variability of their fruits and seeds. *scientia horticulturae*, 256, 108537.
- Bouzouita, N., Khaldi, A., Zgoulli, S., Chebil, L., Chekki, R., M.M. Chaabouni, M.M., et Thonart, P., 2007.** The analysis of crude and purified locust bean gum: A comparison of samples from different carob tree populations in Tunisia Food Chemistry Vol. 101, N°4, pp. 1508-1515.
- Calixto, F.S., et Canellas, J., 1982.** Components of nutritional interest in carob pods *Ceratonia siliqua*, Journal of the Science of Food Agriculture N°33, pp. 1319– 1323.
- Custodio, L., Escapa, A.L., Fernandes, E., Fajardo, A., Aligue, R., Albericio, F., Neng, N., Nogueira, J.M.F., Romano, A., 2011.** Phytochemical profile, antioxidant and cytotoxic activities of the carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) germ flour extracts. Plant. Food. Hum. Nutr. 66, 78–84.
- Dallali, S., Aloui, F., Selmi, H., Sebei, H., 2018.** Comparison of the chemical composition and the antioxidant activity of the leaves of Carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) collected in three sites

of Djebel Zaghouan (Tunisia). *Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology, CIRS* (21), 3429-3438.

Dakia, P. A., Wathelet B. et Paquot, M., 2007. Isolation and chemical evaluation of carob (*Ceratonia siliqua* L.) seed germ,” *Food Chemistry*, vol. 102, no. 4, pp. 1368–1374, 2007.

Dakia, P. A., Blecker, C., Robert, C., Wathelet B., Paquot, M., 2008. Composition and physicochemical properties of locust bean gum extracted from whole seeds by acid or water dehulling pre-treatment. *Food Hydrocolloids*, 22(5), 807-818.

Dubois, M., Gilles K.A, Hamilton, J.K., Rebers, P. A. et Smith, F., 1956. Colometric method for determination of sugari et related substances. *Analytical chemistry*, Vol 28(3) : 350-356.

Efthymiopoulos, I., Hellier, P., Ladommatos, N., Kay, A., Mills-Lampsey, B., 2019. Effect of Solvent Extraction Parameters on the Recovery of Oil from Spent Coffee Grounds for Biofuel Production. *Waste and Biomass Valorization*. 10 : 253–264

El Batal, H., Hasib, A., Dehbi, F., Zaki, N., Ouatmane, A., Boulli, A., 2016. Assessment of nutritional composition of Carob pulp (*Ceratonia Siliqua* L.) collected from various locations in Morocco. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (9) : 3278-3285.

El Kahkahi, R., Zouhair, R., Diouri, M., Ait Chitt, M., et Errakhi, R., 2015. Morphological and biochemical characterization of Morocco carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Int. J. Biol Med Res.* 6 (2): 4946-4952.

El-Shatnawi, M.K.J., Ereifej, K.I., 2001. Chemical composition and livestock ingestion of carob (*Ceratonia siliqua* L.) seeds. *J. Range Manage*, 54 : 669-673.

Ercan, Y., Irfan, T., Mustafa, K., 2013. Optimization of ethanol production from carob pod extract using immobilized *Saccharomyces cerevisiae* cells in a stirred tank bioreactor. *Bioresource Technol* 135:365–71.

Fadel, F., Tahrouch, S., Elmadidi, S., Benddou, Q., Hatimi, A., 2011. Etude morphométrique et physicochimique comparative du caroubier forestier et celui d’une plantation privée. *Biomatec-Echo. Maroc*.V4 (7)3-10.

Gaouar, N., 2011. Etude de la valeur nutritive de la caroube de différentes variétés Algériennes. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen. 95 p.

Hussein. A.M.S., Shedeed. N.A., Abdel-Kalek. H.H., Shams El-Din. M.H.A., 2011. Antioxidative, Antibacterial and Antifungal Activities of Tea Infusions from Berry Leaves, Carob and Doum. *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, Vol. 61, No. 3, pp. 201-209.

ISO 659:2009. Graines oléagineuses -- Détermination de la teneur en huile (Méthode de référence) .Ed.4, 13p

Karabulut, A., Canbolat, O., et Kamalak, A., 2006: Evaluation of carob, *Ceratonia siliqua* pods as a feed for sheep. *Livestock Research for Rural Development. Volume 18, Article #104.*

Khelifa, M., Bahloul, A., Kitane, S., 2013. Determination of chemical composition of carob pod (*Ceratonia siliqua* L.) and its morphological study. *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (3), 348-353.

Korkmaz, N., Akin, M., Koc, A., Eyduran, S.P., Ilhan, G., Sagbas, H. I., Ercisli, S., 2020. Morphological and biochemical diversity among wild-grown carob trees (*Ceratonia siliqua* L.). *Folia Hort.* 32(1): 69–78.

Kotrotsios, N., Christaki, E., Bonos, E., et Florou-Paneri, P., 2012. Dietary carob pods on growth performance and meat quality of fattening pigs. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 25(6), 880–885. <https://doi.org/10.5713/ajas.2011.11521>

Linden G. et Lorient D., 1994. Biochimie agro-industrielle, valorisation alimentaire de la production agricole, Edition Masson, pp. 75.

- Mahtout, R., Ortiz-Martínez, V.M., Salar-García, M.J., Gracia, I., Hernández-Fernández, F.J., Pérez de los Ríos, A., Zaidia, F., Sanchez-Segado, S., Lozano-Blanco, L.J., 2018. Algerian Carob Tree Products: A Comprehensive Valorization Analysis and Future Prospects. *Sustainability* 10, 90.
- Mazaheri, D., Shojaosadati, S.A., Mousavi, S.M., Hejazi, P., Saharkhiz, S., 2012. Bioethanol production from carob pods by solid-state fermentation with *Zymomonas mobilis*. *Appl Energ* 99 : 372–8.
- Nasar-Abbas, S. M., e-Huma, Z., Vu T.-H., Khan, M. K., Esbenshade, H., et Jayasena, V., 2016. « Carob Kibble: A Bioactive-Rich Food Ingredient », *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 15, no. 1, pp. 63–72.
- Obeidat, B.S., Alrababah, M.A., Alhamad, M.N., Gharaibeh, M.A., Abu Ishmais, M.A., 2012. Effects of feeding carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) on nursing performance of Awassi ewes and their lambs, *Small Ruminant Research*, Volume 105, Issues 1–3, Pp 9-15.
- Ouis, N., et Hariri, A., 2017. Phytochemical analysis and antioxidant activity of the flavonoids extracts from pods of *Ceratonia siliqua* L. *J Pharm Pharmaceutics* 4(2):159-165.
- Owen, R.W., Haubner, R., Hull, W.E., Erben, G., Spiegelholder, B., Bartsch, H., Haber, B., 2003. Isolation and structure elucidation of the major individual polyphenols in carob fibre. *Food Chem. Toxicol.*, 41, 1727-1738.
- Özcan, M. M., Arslan, D. and Gökçalik, H., 2007. Some compositional properties and mineral contents of carob (*Ceratonia siliqua*) fruit, flour and syrup. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 58(8), 652-658.
- Papagiannopoulos, M., Wollseifen, H.R., Mellenthin, A., Haber, B., Galensa, R. 2004. Identification and quantification of polyphenols in carob fruits (*Ceratonia siliqua* L.) and derived products by HPLC-UV-ESI/MSN. *J. Agric. Food Chem.* 52, 3784–3791.
- Ravi, R., Prakash, M., Bhat, K.K., 2007. Aroma Characterization of coriander (*Coriandrum sativum* L.) oil samples. *European Food Research and Technology*, 225, 367-374.
- Salih, G., Jilal A., 2020. Utilisation alimentaire de la pulpe de caroube : Formulation et test consommateur. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* 8(2): 249-252.
- Samil Kök, M., 2007. A comparative study on the compositions of crude and refined locust bean gum: In relation to rheological properties, *Carbohydrate Polymers*, Vol. 70, N°1, pp. 68-76
- Sanchez-Segado, S., De Juan Garcia, D., Lozano, L.J., Godínez, C., De Los Ríos, A.P., Hernández-Fernández, F.J., 2010. Fuel ethanol production from carob pod. *Chem Engr Trans* 21:1255–60.
- Shawakfeh, K., Ereifej, K.I., 2005. Pod Characteristics of two *Ceratonia siliqua* L. Varieties from Jordan. *Ital J Food Sci* 17(2) : 187-194.
- Uzun, B., Ulger, S., Cagirgan, I.M., 2002. Comparison of determinate and indeterminate types of sesame for oil content and fatty acid composition. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 26, 269-274.
- Yousif, Ali. K., Alghzawi, H.M., 2000. Processing and characterization of carob powder. *Food Chem.* 69, 283-287.
- Youssef, M.K.E., El-Manfaloty, M.M., Ali, H.M., 2013. Assessment of proximate chemical composition, nutritional status, fatty acid composition and phenolic compounds of carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Food Public Health* 304-308.

Chapitre V : Analyse de quelques paramètres physico-chimiques

Conclusion et perspectives

Conclusion

Cette étude apporte une contribution à une meilleure connaissance des ressources génétiques du caroubier en Algérie à travers les caractères morphologiques des gousses et des graines et des feuilles et quelques caractéristiques physico-chimiques des différentes parties végétales (pulpe, graine et feuilles) de sept provenances de caroubier spontané. L'étude indique une variabilité significative de la morphologie des gousses et des graines chez les sept populations de caroubes spontanées sans toutefois que cette variabilité se superpose aux conditions du site d'origine (i.e. bioclimat, altitude et continentalité).

L'étude de la morphologie foliaire du caroubier algérien avec un effort d'échantillonnage conséquent (20 arbres par provenance, 20 feuilles par arbre et 7 provenances) a révélé des différences inter-provenances pour les traits analysés, avec l'existence de provenances à dimensions des feuilles relativement élevées et d'autres à dimensions plus modestes.

L'étude de quelques paramètres physico-chimiques (matière sèche, cendres, matière grasse et sucres totaux) de trois parties végétales du caroubier (feuille, pulpe et graine) a montré la supériorité de certaines provenances pour la teneur de l'un ou l'autre de ces composés. Elle a permis de distinguer deux provenances : Jijel et Annaba pour leur teneur en sucres les plus élevées.

La pulpe en tant que partie végétale a les valeurs les plus faibles pour 3 paramètres physico-chimiques : taux de matière sèche, de cendres et de matière grasse. En revanche, elle est caractérisée par le taux de sucres le plus élevé des 3 parties végétales. La graine pour sa part, a le meilleur classement pour le taux de cendres et celui de matière grasse. La feuille se distingue par le taux de matière sèche le plus élevé des trois parties végétales et par le taux de sucres le plus faible, tandis qu'elle occupe une position intermédiaire entre la graine et la pulpe pour le taux de cendres et celui de matière grasse. L'interaction provenance x partie végétale mise en évidence pour certains paramètres chimiques, notamment le taux de sucres et de matière grasse, suggère de considérer les provenances pour ces paramètres en envisageant chaque partie végétale seule.

Pour ce qui est du classement des provenances pour l'ensemble des descripteurs utilisés, il ressort globalement une concordance entre les caractères de la gousse et des feuilles et une discordance pour ce qui est des caractéristiques physico-chimiques. Ainsi, si pour les dimensions des gousses Tlemcen et Blida sont en tête de liste, pour ce qui est de la teneur en

sucres totaux de la pulpe, c'est Annaba et Jijel qui le sont alors que la provenance Relizane est la moins bien classée pour les dimensions des gousses, des graines et des feuilles. Tandis que la provenance de Tipaza se caractérise par le rendement en graines le plus élevé.

Il y a lieu de mentionner que les caractères analysés sur la gousse et les graines peuvent être considérés sous un angle agronomique et industriel (rendement en graines et poids de la pulpe) et/ou écologique (la taille et le nombre des graines sont des composantes de la reproduction sexuée des plantes qui peuvent avoir une incidence sur leur potentiel de régénération naturelle). Ces descripteurs, ainsi que d'autres (genre ; période de maturité et de récolte des fruits ; longueur du pédicelle comme critère d'abscission ; section du tronc et volume de la canopée ; douceur des fruits ; phénologie de la floraison et la fructification, etc.) contribueront à une meilleure caractérisation des ressources génétiques du caroubier et guideront le choix des populations pour la conservation *in situ* ou comme source de matériel de base pour les programmes de sélection et de collection de matériel génétique.

Comme perspective à l'étude des caractéristiques physico-chimiques nous suggérons d'analyser le taux de sucres des pulpes non pas par provenance mais par arbre. En effet, sur le plan gustatif, il existe une différence dans la teneur en sucres totaux selon les arbres et que nous n'avons pas analysée dans ce travail faute de moyens. D'autres composés chimiques des organes du caroubier (huile, acides aminés, métabolites secondaires, etc.) pourraient être analysés pour compléter la présente étude.

Par ailleurs, il serait intéressant d'identifier et de caractériser les cultivars en Algérie vu qu'ils très peu référencés dans la littérature alors que dans d'autres pays de tels rangs taxonomiques sont clairement identifiés.

L'étude de la morphologie foliaire sur des arbres adultes échantillonnés dans les sites d'origine pourrait être complétée par un test de comparaison des provenances dans un environnement identique. Par ailleurs, le recours aux marqueurs moléculaires, neutres vis-à-vis de la sélection naturelle, renseignera sur l'étendue de la variabilité génétique du caroubier spontané en Algérie.

Enfin, il serait intéressant d'élargir ce travail à d'autres sites forestiers et d'inclure l'étude des sols des sites d'origine.

Bibliographie

- Ahmed, M.M., 2010.** Biochemical Studies on Nephroprotective Effect of Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Growing in Egypt. *Nature and Science* ; 8(3) : 41-47.
- Ayaz, F.A., Torun, H., Ayaz, S., Correia, P.J., Alaiz, M., Sanz, C., Gruz, J., Strnad, M., 2007.** Determination of chemical composition of anatolian carob pod (*Ceratonia siliqua* L.): Sugars, amino and organic acids, minerals and phenolic compounds. *J. Food Qual.* 30, 1040–1055.
- Battle, I., Tous, J., 1997.** Carob tree *Ceratonia siliqua* L., Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 17, Gatersleben: Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Rome: International Plant Genetic Resources Institute. 92 pages.
- Benchikh, Y., et Louailèche, H., 2014.** Effects of extraction conditions on the recovery of phenolic compounds and *in vitro* antioxidant activity of carob (*Ceratonia siliqua* L.) pulp, *Acta Botanica Gallica*, 161:2, 175-181.
- Bengoechea, C., Romero, A., Villanueva, A., Moreno, G., Alaiz, M., Milla'n, F., Guerrero, A., Puppo, M.C., 2008.** Composition and structure of carob (*Ceratonia siliqua* L.) germ proteins. *Food Chem.* 107, 675-683.
- Ben Hsouna, A., Saudi, M., Trigui, M., Jamoussi, K., Boudawara, T., Jaoua, S., et Feki, A. E., 2011.** Characterization of bioactive compounds and ameliorative effects of *Ceratonia siliqua* leaf extract against CCl₄ induced hepatic oxidative damage and renal failure in rats. *Food and Chemical Toxicology*, 49(12), 3183–3191.
- Benmahioul, B., Kaïd-Harche, M., Dagun, F., 2011.** Le caroubier, une espèce méditerranéenne à usages multiples. *Forêt méditerranée*, pp. 51–58 t. XXXII n°1.
- Bernardo-Gil, M. G., Roque R., Roseiro L.B., Duarte L.C., Gírio, F., Esteves P., 2011.** Supercritical extraction of carob kibbles (*Ceratonia siliqua* L.). *J. of Supercritical Fluids* 59, 36– 42.
- Biner B., Gubbuk H., Karhan M., Akus M., Pekmezei M., 2007.** «Sugar profiles of the pods of cultivated and wild types of carob bean (*Ceratonia siliqua* L.) in Turkey». *Food chemistry* 100: pp. 1453-1455.
- Bostan, S. Z., Kaşko Arici Y., 2015.** Evaluation of some Carob (*Ceratonia siliqua* L.) Genotypes in Silifke (Mersin, Turkey) province by Cluster Analysis. *Fruit Science*, 2(1): 35-41.
- Boublenza, I., El Haitoum, A., Ghezlaoui, S., Mahdad, M., Vasai, F., et Chemat, F., 2019.** Algerian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations. Morphological and chemical variability of their fruits and seeds. *Scientia Horticulturae*, 256, 108537.
- Christodoulakis, N.S. et Mitrakos, K.A., 1987.** Structural analysis of sclerophylly in eleven evergreen phanerophytes in Greece. *NATO ASI series G.* 15: 547-551.
- Corsia, L., Avallonea, R., Cosenzab, F., Farinab, F., Baraldia, C. & Baraldia, M., 2002.** Antiproliferative effects of *Ceratonia siliqua* L. on mouse hepatocellular carcinoma cell line. *Fitoterapia.* 73 : 674-684.
- Custodio, L., Fernandes, E., Escapa, A. L., Aligué, R., Albericio, F., et Romano, A., 2011.** In vitro cytotoxic effects and apoptosis induction by a methanol leaf extract of carob tree (*Ceratonia siliqua*), *J. Med. Plants Res.*5, 1987– 1996.
- Custodio, L., Escapa, A.L., Fernandes, E., Fajardo, A., Aligue, R., Albericio, F., Neng, N., Nogueira, J.M.F., Romano, A., 2011.** Phytochemical profile, antioxidant and cytotoxic activities of the carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) germ flour extracts. *Plant. Food. Hum. Nutr.* 66, 78–84.
- El Bouzdoudi, B., Saïdi, R., Embarch, K., El Mzibri, M., Nejjar El Ansari, Z., El Kbiach, M.L., Badoc, A., Patrick, M., Lamarti, A., 2017.** Mineral composition of mature carob (*Ceratonia siliqua* L.) pod : study. *Int. Food Sci. Nutr. Eng.* 7 (4), 91–103.

- El Kahkahi, R., Zouhair, R., Diouri, M., Ait Chitt, M., et Errakhi, R., 2015.** Morphological and biochemical characterization of Morocco carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Int. J. Biol Med Res.* 6 (2): 4946-4952.
- Gaouar, N., 2011.** Etude de la valeur nutritive de la caroube de différentes variétés Algériennes. Mémoire de Magistère. Université de Tlemcen. 95 p.
- Gharnit, N., El Mtili, N., Toubi Ennabilin A., Ennabili, A., 2001.** Social characterisation and exploitation of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) from Mokrisset and Bab Taza (NW of Morocco). *Science Letters* 3(2): 10 p.
- Gharnit, N., El Mtili, N., Ennabili, A., et Sayah, F., 2005.** Caractérisation foliaire du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) originaire de la province de Chefchaouen (Nord-ouest du Maroc). *J Bot Soc Bot France* 31: 75-84.
- Gillet, S., 2018.** Etude des relations entre la structure des Galactomannanes de caroube et leurs propriétés fonctionnelles. Thèse de Doctorat. Université de Liege – Gembloux Agro-Bio Tech. 208p
- Goulas, V., Stylos, E., Chatziathanasiadou, M.V., Mavromoustakous, T., Tzakos, A.G., 2016.** Review functional component of carob fruit : linking the chemical and biological space. *Int. J. Mol. Sci.* 17, 1875.
- Haddarah A., Ismail A., Bassal A., Hamieh T., Ioannou I., Ghoul M., 2013.** Morphological and chemical variability of Lebanese carob varieties. *European Scientific Journal*, 9 (18): 353-369.
- Ibrahim, A. H., Rehab, M. A.E.B., Samar Y.D., Ahmed, A.L. et Mohamed, S.K., 2013.** Bacterial Growth Inhibitory Effect of *Ceratonia siliqua* L. Plant Extracts Alone and in Combination with Some Antimicrobial Agents. *J. Adv. Biotechnol. Bioeng.* (1): 3-13
- Khelifa, M., Bahloul, A., Kitane, S., 2013.** Determination of chemical composition of carob pod (*Ceratonia siliqua* L.) and its morphological study. *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (3), 348-353.
- Kivçak, B., et Mert, T., 2002.** «Antimicrobial and cytotoxic activities of (*Ceratonia siliqua* L.) extracts». *Turk J. Biol.*, vol. 26, pp.197-200.
- Kök, M.S., Hill, S.E., Mitchell, J.R.A., 1999.** Comparison of the rheological behavior of crude and refined locust bean gum preparations during thermal processing. *Carbohydr. Polym.* 38, 261–265.
- Korkmaz, N., Akin, M., Koc, A., Eyduran, S.P., Ilhan, G., Sagbas, H. I., Ercisli, S., 2020.** Morphological and biochemical diversity among wild-grown carob trees (*Ceratonia siliqua* L.). *Folia Hort.* 32(1): 69–78.
- Mahtout, R., Ortiz-Martínez, V.M., Salar-García, M.J., Gracia, I., Hernández-Fernández, F.J., Pérez de los Ríos, A., Zaidia, F., Sanchez-Segado, S., Lozano-Blanco, L.J., 2018.** Algerian Carob Tree Products: A Comprehensive Valorization Analysis and Future Prospects. *Sustainability* 10, 90.
- Maier, H., Anderson, M., Karl, C., Magnuson, K. & Whistler, R. L., 1993.** Guar, locust bean, Tara and fenugreek gums. In R. L. Whistler, J. N. BeMiller (Eds.), *Industrial Gums, Polysaccharides and their Derivates* (pp. 205-215). Academic Press, San Diego.
- Makris, D.P., Kefalas, P., 2004.** Carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) as a source of polyphenolic antioxidant. *Food Technol. Biotechnol.* 42 : 105-108.
- Mebirouk-Boudechiche, L., Boudechiche, L., Miroud, K., Bouhadja, N., 2014.** La caroube comme complément au pâturage avant la lutte des brebis Ouled Djellal. *Renc. Rech. Ruminants*, 21: 177.

- Mekhoukhe, A., Kicher, H., Ladjouzi, A., Medouni-Haroune, L., Brahmi, F., Medouni-Adrar, S., Madani, K., 2018.** Antioxidant activity of carob seeds and chemical composition of their bean gum by-products. *J. Complement. Integr. Med.* 16, 1.
- Meziani S., Dave Oomah B., 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.
- Meziou-Chebouti, N., Merabet, A., Behidj, N., Kirouani, M. and Aliouat, S., 2015.** Chemical composition and antibacterial activity of *Ceratonia siliqua* L. growing in Boumerdes (Algeria). In *New Developments in Biology, Biomedical & Chemical Engineering and Materials Science. Proc. Int. Conf. Chem. Engin. Mater. Sci. (CEMS 2015), Vienna, Austria, March 15-17*, pp. 96-99.
- Naggat, M., Lahssini, S., 2015.** La filière caroubier au service du développement socio-économique des territoires forestiers de montagne. XIV Congrès forestier mondial, Durban, South Africa. *Les forêts et les populations : investir dans un avenir durable.* 9 p.
- Ouis, N., et Hariri, A., 2017.** Phytochemical analysis and antioxidant activity of the flavonoids extracts from pods of *Ceratonia siliqua* L. *J Pharm Pharmaceutics* 4(2):159-165.
- Rtibi K., Jabri M.A., Selmi S., Sebai H., Amri, M., El-Benna, J. et Marzouki, L., 2016 b.** *Ceratonia siliqua* leaves exert a strong ROS-scavenging effect in human neutrophils, inhibit myeloperoxidase in vitro and protect against intestinal fluid and electrolytes secretion in rats. *RSC Adv.*, 6, 65483-65493.
- Sebai, H., Souli, A., Chehimi, L., Rtibi, K., Amri, M., El-Benna, J. et Sakly, M., 2013.** « In vitro and in vivo antioxidant properties of Tunisian carob (*Ceratonia siliqua* L.) ». *Journal of Medicinal Plants Research* 7 (2): 85–90.
- Seghir, N., Harki, E., Dahchour, A., Gharnit, N., Ennabili A., 2016.** Vegetative and efflorescence characterization of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) from the Province of Sefrou, the Middle Atlas of Morocco. *Moroccan J. Biol.* 13: 13-22.
- Yousif, Ali. K., Alghzawi, H.M., 2000.** Processing and characterization of carob powder. *Food Chem.* 69, 283-287.
- Youssef, M.K.E., El-Manfaloty, M.M., Ali, H.M., 2013.** Assessment of proximate chemical composition, nutritional status, fatty acid composition and phenolic compounds of carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Food Public Health* 304-308.

Annexes

Annexe 1

Tableau. 1 : Caractéristiques des sites retenus dans l'étude.

Site	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période
Séraïdi (Annaba)	36°55	07°41	870	1913-1938
Aéroport (Annaba)	36°50	07°48	03	2001-2011 2004-2014
Jijel (Achaouat)	36°49	05°47	06	1913-1938
Jijel(Aéroport)	36°48	05°53	08	1987-2008 2004-2014
Guenzet	36°11	05°26	1080	1913-1938
Sétif(Sfiha)	36°11	05°15	1033	1981-2011 2004-2014
Blida	36°41	03°13	267	1913-1938
Aéroport (Alger)			25	2004-2014
Merad(Tipaza)	36°28	02°25	176	1978-2004
Bouharoune(Tipaza)	36°40	02°38	05	2005-2008
Relizane	35°44	00°32	95	2004-2014
Zenata(Tlemcen)	35°1	01°27	285	1980-2001
	35°01	01°28	246	2004-2014

Source : ONM, 2015

Tableau. 2 : Valeurs des précipitations moyennes annuelles en (mm) corrigées pour les périodes retenues.

Site	Période	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Précipitations (mm/an)
Annaba	1913-1938 2001-2011 2004-2014	36°55'N	007°43'E	740	860 978.93 979.3
Jijel	1913-1938 1987-2008 2004-2014	36°42'N	005°32'E	81	1204 953.86 1044.1
Sétif	1913-1938 1981-2011 2004-2014	36°11'N	005°15'E	1050	469 414.7 415.05
Blida	1913-1938 2004-2014	36°29'N	003°02'E	187	954 738.7
Tipaza	1978-2004 2005-2008	36°34'N	002°24'E	32	600 574.8
Relizane	2004-2014	35°42'N	000°46'E	353	457.3
Tlemcen	1913-1938 1980-2001 2004-2014	34°52'N	001°16'W	757	474 453.3 548

Tableau. 5 : Les températures moyennes mensuelles et annuelles en (°C) corrigées pour la période (2004-2014)

Site/Mois	J	F	M	A	Mai	J	Juil	A	S	O	N	D	Annue l
Annaba	7,75	7,55	9,25	11,85	14,70	18,15	21,15	21,60	19,65	17,00	12,29	8,75	14,20
Jijel	11,7	11,6	13,6	16,2	19	22,5	25,7	26,2	24	21,1	16,5	12,9	18,4
Sétif	6,03	6,66	10,08	12,80	17,34	23,28	27,33	26,39	21,08	17,18	10,38	6,59	15,43
Blida	10,36	10,51	12,66	15,06	17,96	21,76	24,81	25,46	22,91	20,01	14,81	11,21	17,31
Tipaza	13	13,8	15,6	18,5	21,1	24	27	27,4	24,9	22,5	17,5	13,6	19,9
Relizane	9,49	10,34	12,94	15,94	19,89	24,54	28,49	28,59	24,49	20,64	14,34	10,74	18,29
Tlemcen	9,45	9,70	11,25	12,65	13,95	17,15	20,00	20,95	18,70	16,35	12,40	9,70	14,36

Source : ONM, 2015

Tableau. 7 : Les paramètres climatiques caractérisant le bioclimat des sites d'étude pour les périodes retenues.

Site	Altitude (m)	Période	Précipitation (mm/an)	M (°C)	M (°C)	(M-m)	Q3	Etage bioclimatique	Type de climat
Séraïdi (Annaba)	740	1913-1938	860	3,8	11,7	7,9	373,39	Perhumide tempéré	Insulaire
		2001-2011	978,93	7,51	24,8	17,29	194,20	Humide chaud	littoral
		2004-2014	979,3	3,75	26,34	22,59	148,69	Humide Tempéré	littoral
Echouat, Aéroport (Jijel)	81	1913-1938	1204	8,3	30,2	21,9	188,57	Humide chaud	littoral
		1987-2008	953,86	11,46	25,56	14,1	232,04	Perhumide très chaud	Insulaire
		2004-2014	1044,1	6,8	31,6	24,8	144,41	Humide Tempéré	littoral
Guenzet (Sétif)	1050	1913-1938	469	0,4	32,1	31,7	50,75	Semi-aride frais	Semi-continental
		1981-2011	415,7	1,7	33,5	31,8	44,84	Semi-aride frais	Semi-continental
		2004-2014	414,5	1,92	34,3	32,38	43,91	Semi-aride frais	Semi-continental
Blida	187	1913-1938	954	7,3	30,9	23,6	138,65	Humide chaud	littoral
		2004-2014	738,7	4,85	31,57	26,72	94,83	Subhumide tempéré	Semi-continental
Nador, Merad (Tipaza)	32	1978-2004	600	5,7	33	27,3	75,38	Subhumide tempéré	Semi-continental
		2005-2008	574,8	9,5	32,1	22,6	87,24	Subhumide chaud	littoral
Relizane	353	2004-2014	457,3	4,27	36,8	32,53	48,22	Semi-aride tempéré	Semi-continental
Zenata (Tlemcen)	757	1913-1938	474	6,7	32,04	25,34	64,16	Subhumide tempéré	Semi-continental
		1980-2001	453,3	5,5	32,49	26,99	57,61	Semi-aride tempéré	Semi-continental
		2004-2014	548	4,56	26,43	21,87	85,95	Subhumide tempéré	littoral

Tableau 6 : Comparaison des données recueillies dans la littérature pour la feuille de *Ceratonia siliqua*.

Caractère	Nos résultats	Références
Feuille		
Longueur	4.1- 33.5 cm	36 mm (Christodoulakiset Mitrakos, 1987) 10-20 cm (Batlle et Tous, 1997) 9.2-31.9 cm (Gharnit et al., 2005) 10-20 cm (Orwa et al., 2009) 51.76 mm (Bostan et KaskoArici, 2015) 13,49 -18,58 cm (El Kahkahi et al., 2015) 11.4-14.5 cm (Seghir et al., 2016)
Largeur	3.4-18 cm	28 mm (Christodoulakiset Mitrakos, 1987) 5.5-19 cm (Gharnit et al., 2005) 32.72 mm (Bostan et KaskoArici, 2015) 9,50 - 12,22 cm (El Kahkahi et al., 2015) 9.38-11 cm (Seghir et al., 2016)
Longueur du pétiole	1-10.5 cm	1.2- 8.9 cm (Gharnit et al., 2005) 3.60 mm (Bostan et KaskoArici, 2015) 3,4 -4,66cm (El Kahkahi et al., 2015) 3.23-4.13 cm (Seghir et al., 2016)
Nombre de folioles	4-16	6-10 (Lapie et Maige, 1916) 4-10 (Quezel et Santa, 1962) 8-15 (Batlle et Tous, 1997) 4-10 (Gharnit et al., 2005) 6.30-7.08 en moyenne (Seghir et al., 2016) 8-10 (El Kahkahi et al., 2015)
Foliole basale		
Longueur	1.9-9.2 cm	2-5 cm (Quezel et Santa, 1962) 2.6-8.38 cm (Gharnit et al., 2005) 3-7 cm (Orwa et al., 2009) 4.98-6.55 cm (El Kahkahi et al., 2015) 4.62-5.57 cm (Seghir et al., 2016)
largeur	1.2-6.3 cm	1.5- 4 cm (Quezel et Santa, 1962) 1.61-5.08 cm (Gharnit et al., 2005) 3.08- 4.55 cm (El Kahkahi et al., 2015) 2.88-3.59 cm (Seghir et al., 2016)

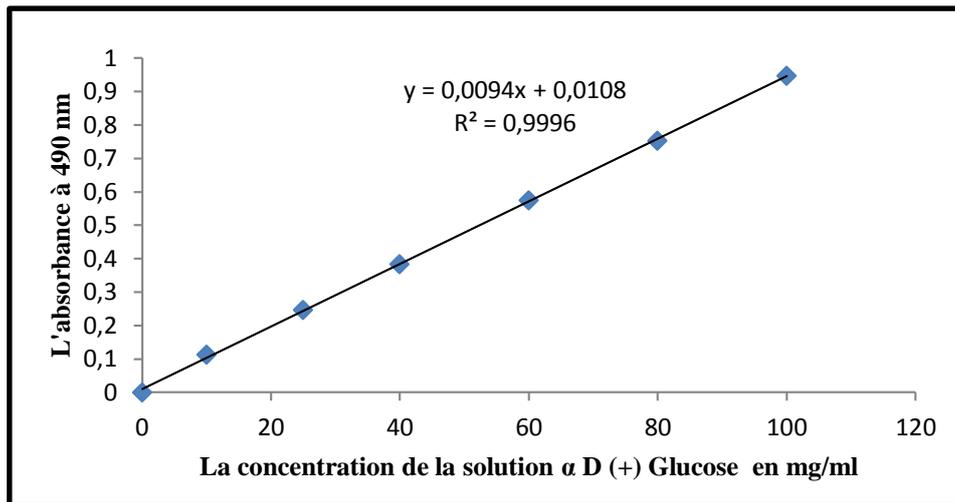


Fig. 3 : Courbe d'étalonnage pour le dosage des sucres totaux