



PROJET DE FIN D'ÉTUDES
PRESENTE EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES
GESTION ET CONSERVATION DE LA BIODIVERSITE

**Caractérisation pomologique et biochimique des caroubes de
la région de Meknès et Khénifra**

Présenté par : Mtalai Salma

**Encadré par : Pr. HALOTI Said
: Pr. OUTGHOULIAST Hakim**

Soutenu le : 13/07/2021 Devant le jury composé de :

- | | |
|--------------------------|-------------|
| - Pr. HALOTI Said | FST Fès |
| - Pr. AZZOUZI Amal | FST Fès |
| - Pr. FADEL Fatima | FST Fès |
| - Pr. ERRACHIDI Faouzi | FST Fès |
| - Pr. OUTGHOULIAST Hakim | CRRA Meknès |

Lieu de Stage : Centre Régional de la Recherche Agronomique.

Année Universitaire : 2020/2021

RÉSUMÉ

La présente étude porte sur la caractérisation pomologique, physico-chimique et l'estimation quantitative des sucres totaux, polyphénols totaux, des flavonoïdes et des anthocyanes des caroubes (*Ceratonia siliqua* L.) récoltée dans différentes régions du Maroc.

L'étude pomologique effectuée sur les graines et les gousses mures de caroube montre que les caroubes de DRKH3, DAT1, TGHB6, TGHB5, ABMW et AOMG sont celles qui ont des valeurs élevées pour l'ensemble des variables morphologiques.

La caractérisation quantitative des sucres totaux des extraits éthanoliques de caroube a révélé que l'extrait éthanolique des pulpes renferme une quantité plus élevée que celle des graines.

La teneur en polyphénols totaux, flavonoïdes totaux et en anthocyanes totaux a été effectuée sur les extraits éthanoliques des graines et des pulpes par les méthodes de Folin-Ciocalteu, trichlorure d'aluminium ($AlCl_3$) et la méthode du pH différentiel respectivement. Les résultats obtenus confirment la richesse de caroube en composés phénoliques.

L'analyse statistique des résultats via l'ANOVA, l'ACP et la classification ascendante hiérarchique ont révélé l'existence d'une diversité intra et inter-populations et ont permis de regrouper certains échantillons dans des groupes homogènes ayant plusieurs paramètres similaires. La discrimination des échantillons a révélé trois groupes :

Le premier groupe a été formé à $d = 1$. Il englobe les échantillons de DRKH5, DRKH7 et DRKH 2 ayant des valeurs très proches en métabolites secondaires présents au niveau des graines de caroubes et des valeurs faibles pour l'ensemble des paramètres morphologiques des gousses et des graines.

Le deuxième groupe, formé à $d = 8$, formé par des échantillons homogènes pour la plupart des paramètres morphologiques des caroubes DAT1, DRKH3, TGHB4, TSKT, DRKH4, DRKH6, ABMW, AOMG, TGHB5 et TGHB6.

Le troisième groupe, formé également à $d = 8$, est composé de TNHL2, TNHL4, DRKH1 et TNHL5 qui ont des valeurs proches concernant ANT et FVT présent dans les pulpes des caroubes et ont les plus petites concentrations en SST et PPT dans leurs pulpes, et les accessions TGHB2, TGHB3, TGHB1, TNHL3 qui se distinguent des autres échantillons puisqu'ils sont homogènes pour la longueur, la largeur des gousses, la longueur des graines ainsi que les ANT et FVT présent dans la pulpe de ces échantillons.

Mots clés : Caroubes, étude pomologique, caractérisation quantitative, classification.

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes très chers parents : Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance.

C'est avec beaucoup de fierté que je vous dédie ce travail, et qui n'est en réalité que le fruit de l'aide d'ALLAH et de vos efforts, en témoignage de mon profond amour. Puisse DIEU vous protéger et vous procure bonne santé et longue vie.

À mes chers frères : Mohammed et Salim

À mes chères sœurs : Safae et Fadwa

À mes nièces : Douae, Nour et Nada

À toute ma famille

À mes chères amies

À tous ceux qui me sont chers

À tous ceux qui comptent pour moi

REMERCIEMENTS

Le présent mémoire est le fruit de la collaboration entre le Centre Régional de la Recherche Agronomique de Meknès et la Faculté des Sciences et Technique Fès.

Au terme de ce travail, je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la faculté de penser, d'étudier et de réaliser ce travail.

Ma profonde gratitude et mes vifs remerciements sont adressés à M.Outghouliast Hakim Ingénieur chercheur au CRRRA Meknès pour son soutien technique et son encadrement durant toute la période nécessaire pour la réalisation de cette étude.

Je tiens à remercier également M.Haloti Saïd professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour son encadrement ainsi que ses importantes directives.

J'aimerais aussi gratifier les efforts de Mme. Lyousfi Nadia, Anas, Irchad et Othmane qui ont eu l'amabilité de répondre à mes questions et de fournir les explications nécessaires.

Je remercie également Marwa et l'ensemble des personnes de l'unité d'amélioration génétique des plantes.

Un grand merci à tous les membres du jury qui me font l'honneur d'assister et de bien vouloir juger mon Projet de Fin d'Études.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers M.Taysire Mohamed et M.Rhnama Amine pour leur aide dans la rédaction de mon rapport de stage.

Je désire aussi remercier Chaymae Elboukhrissi pour son soutien inconditionnel.

Mes vifs remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants de la FST Fès et en particulier ceux de la filière GCB pour l'effort qu'ils ont déployé afin d'assurer notre formation.

Enfin je suis redevable à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

LISTE DES AVREVIATIONS

ACP : Analyse en composantes principales.

ANOVA: Analysis OF the Variance.

ANT : Anthocyanes totaux.

AT : Acidité titrable.

CHA : Classification Hiérarchique Ascendante.

CRRA : Centre régional de la recherche agronomique.

E-Gr : Epaisseur des Graines

E-Gs : Epaisseur des Gousses.

Lar-Gr : Largeur des Graines

Lar-Gs : Largeur des Gousses

Log-Gr : Longueur des Graines

Log-Gs : Longueur des Gousses

P-Gs : Poids des Gousses

P-Gr-Gs : Poids de graines par gousses

FAOSTAT: Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics.

FVT : Flavonoïdes totaux.

HCl : Acide chlorhydrique.

MS : Matière Sèche.

PPT : Composés phénoliques.

S-N-K: Student Newman Keul.

ST : Sucres totaux.

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification systématique de l'espèce <i>Ceratonia siliqua</i> L	4
Tableau 2: Principaux cultivars de caroubier dans le monde	8
Tableau 3: Estimation de la surface cultivée et la production de la caroube dans le monde, année 2019.....	12
Tableau 4: composition moyenne de la pulpe de caroube.	14
Tableau 5: Composition de la caroube en minéraux.....	16
Tableau 6: Valeurs moyennes de la teneur en vitamines de la poudre de caroube.....	17
Tableau 7: Origine des accessions du caroubier analysées dans cette étude	23
Tableau 8: Caractéristiques morphologiques des gousses et des graines de caroubes.	51
Tableau 9: Caractérisation biochimique des pulpes de la caroube.....	53
Tableau 10 : Caractérisation biochimique des graines de la caroube.	54
Tableau 11: Corrélations entre les différents paramètres morphologiques et biochimiques mesurés.....	55

Liste des figures

Figure 1 : L'arbre du caroubier.	5
Figure 2 : Feuilles du caroubier.....	5
Figure 3 : Inflorescence du caroubier.....	6
Figure 4 : Fruit du caroubier (<i>a</i> : la gousse ; <i>b</i> : les graines ; <i>c</i> : la pulpe).....	7
Figure 5 : Fructification du caroubier sur des rameaux secondaires (A), Rameau principal (B) et sur le tronc (C).....	9
Figure 6 : Production mondiale de la caroube, année 2019.	13
Figure 7 : Farine de la pulpe de la caroube	18
Figure 8 : Sirop ou mélasse de caroube.....	19
Figure 9 : Différents constituants de la graine	19
Figure 10 : Variabilité dans la morphologie des gousses et des graines du caroubier.	30
Figure 11 : Longueur des gousses (cm).....	31
Figure 12 : Largeur des gousses des différents échantillons.	32
Figure 13 : Poids des gousses en gramme.	33
Figure 14 : Résultats de la détermination du nombre et du poids de graines par gousses des différents échantillons.	33
Figure 15 : Caractérisation morphologique des graines.	34
Figure 16 : Taux de la matière sèche exprimé en pourcentage (%) de pulpe et graine des caroubes étudiées.....	35
Figure 17 : pH des pulpes et des graines de caroubes.	35
Figure 18 : Acidité titrable exprimé en g/100g des pulpes et des graines de caroube de différentes origines.....	36
Figure 19 : Concentrations en sucres totaux de l'ensemble des échantillons (Pulpes et graines).	36
Figure 20 : Composition en PPT des extraits éthanoliques des graines et des pulpes de caroube de différentes origines.	37
Figure 21 : Concentrations en flavonoïdes totaux de l'ensemble des échantillons (Pulpes)	38
Figure 22 : Concentrations en anthocyanes totaux de l'ensemble des échantillons (Pulpes et graines).....	40
Figure 23 : Regroupement des échantillons de caroube selon les caractéristiques pomologiques et biochimiques étudiées.	41
Figure 24 : Droite d'étalonnage de l'acide gallique.	56
Figure 25 : Droite d'étalonnage de glucose.	56
Figure 26 : Droite d'étalonnage de la quercétine	57

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

Partie I : Synthèse bibliographique

1	Terminologie et taxonomie	4
2	Description botanique du caroubier	4
2.1	Feuilles.....	5
2.2	Fleurs	6
2.3	Fruits.....	6
2.4	Graines.....	7
3	Variétés	7
4	Biologie du caroubier.....	9
5	Exigences édaphoclimatiques	10
5.1	Le climat.....	10
5.2	Le sol	10
6	Origine et distribution géographique	11
6.1	Origine.....	11
6.2	Distribution géographique	11
7	Production mondiale du caroubier	12
8	Production du caroubier au Maroc.....	13
9	Composition chimique du caroubier.....	13
9.1	Sucres.....	13
9.2	Composés phénoliques	14
9.3	Fibres	16
9.4	Protéines et les lipides	16
9.5	Teneur en cendre	16

9.6	Teneur en minéraux	16
9.7	Teneur en Vitamines.....	17
10	Intérêts et utilisations du caroubier	17
10.1	Arbre.....	17
10.2	Fruit	18
10.3	Feuilles.....	20
10.4	Ecorce	20

PARTIE II : Matériel et méthodes

1	Présentation de l'établissement d'accueil	22
2	Préparation du matériel végétal	23
3	Caractérisation pomologique	24
3.1	Longueurs	24
3.2	Largeurs	24
3.3	Epaisseurs	24
3.4	Poids	24
4	Caractérisation physico-chimique.....	24
4.1	Détermination de la matière sèche.....	24
4.2	Analyse de l'acidité titrable et du pH	25
4.3	Détermination du pH	25
5	Analyse des propriétés biochimiques.....	25
5.1	Protocole d'extraction.....	25
5.2	Dosage des sucres solubles totaux.....	26
5.3	Dosage des polyphénols totaux	26
5.4	Dosage des anthocyanes totaux	26
5.5	Dosage des flavonoïdes	27
6	Analyse statistique	27

Partie III : Résultats et discussions

1	Etude pomologique	29
2	Caractérisation physico-chimique de la poudre (de la pulpe et des graines) de caroube..	35
2.1	Détermination de la teneur en matière sèche.....	35
2.2	Détermination du pH	35
2.3	Détermination de l'acidité titrable	36
3	Quantification de quelques composés principaux.....	36
3.1	Teneur en sucres totaux	36
3.2	Teneur en polyphénols totaux.....	37
3.3	Teneur en flavonoïdes totaux	38
3.4	Teneur en anthocyanes totaux	39
4	Analyse statistique par l'ACP	40
4.1	Matrice de corrélation.....	40
5	Classification hiérarchique ascendante	41
	Conclusion et perspectives.....	42
	Références bibliographiques	45
	Annexes.....	51

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis l'antiquité, l'agriculture joue un rôle fondamental dans la civilisation humaine et dans la révolution socio-économique dans tout le monde. Au Maroc, le secteur d'arboriculture est classé parmi les secteurs les plus importants de l'économie nationale. En outre, l'arboriculture fruitière est très diversifiée au Maroc et occupe une superficie de plus de 265.000 Ha et une production moyenne de l'ordre de 884.000 tonnes par an (MAPMDREF, 2011). Ce vaste pays, de par sa position géographique privilégiée et ses diverses conditions pédoclimatiques, a en effet le privilège de mettre en culture plusieurs espèces fruitières, constituée essentiellement, de l'olivier, agrumes, figuier, vigne, palmier dattier et caroubier qui sont les espèces les plus importantes sur le plan économique et social. Le présent travail porte sur l'une de ces espèces fruitières en l'occurrence le caroubier.

Le caroubier, dont le nom scientifique : *Cératonia siliqua*, appartenant à la famille des légumineuses, est une espèce agro-sylvo-pastorale. Cet arbre est largement cultivé dans les pays méditerranéens, en particulier au Maroc puisqu'il possède une grande capacité d'adaptation aux contraintes hydriques, tout en présentant un grand intérêt à la fois économique, écologique et ornemental.

Aujourd'hui, la caroube suscite un grand intérêt au Maroc, où les industriels se disputent le marché international, en vue de l'exporter sous forme de farine obtenue à partir la pulpe et des graines. Selon FAOSTAT 2019, le Maroc est considéré comme le premier pays producteur du caroubier.

Il est considéré comme l'un des arbres fruitiers et forestiers les plus performants du bassin méditerranéen puisque toutes ses composantes (feuilles, fleurs, fruits, bois, écorces et racines) sont utiles et ont une valeur dans plusieurs domaines. Ainsi, les gousses entières, les graines, la pulpe et la gomme font l'objet d'un commerce important en direction de l'Europe et sont largement utilisées dans l'industrie agro-alimentaire (Biner et *al.*, 2007).

Par ailleurs, la grande valeur de la caroube est connue grâce aux graines et aux pulpes.

La pulpe est l'élément principal de la gousse de caroube (90%), elle est très riche en sucre, plus que la canne à sucre et la betterave sucrière, ainsi qu'en fibres alimentaires, tanins et polyphénols ce qui confère à la caroube une activité antioxydante (Bengoechea et *al.*, 2008). Elle est utilisée dans la préparation de jus sucrés, du chocolat et comme substitut au cacao.

Les graines et la gomme des caroubes sont dotées de multiples usages industriels notamment dans l'industrie agro-alimentaire, cosmétique et pharmaceutique (Calixto et Canellas, 1982 ; Sandolo et *al.*, 2007). De plus le germe de caroube a un potentiel important dans les aliments

sans gluten à cause de sa nature viscoélastique et de son acceptation sans danger pour les patients souffrant de maladie cœliaque.

De ce fait, notre étude consiste à étudier d'une part la caractérisation pomologique des caroubes et d'autre part la composition chimique de la pulpe et des graines des caroubes. Le but étant d'établir une corrélation entre les paramètres pomologiques et chimiques. Cette connaissance permet de proposer les meilleures caractéristiques des cultivars qui peuvent être utiles pour le développement de nouveaux vergers avec la meilleure rentabilité agro-industriel.

Dans ce présent travail, nous aborderons en premier lieu des généralités sur le caroubier, et une partie expérimentale vient ensuite pour montrer les différentes méthodes pomologiques, physico-chimiques et biochimiques utilisées afin d'atteindre notre objectif.

En dernier lieu, nous présenterons les résultats qui montrent un polymorphisme phénotypique et une richesse des caroubes marocaines en sucres totaux et en composés phénoliques afin de les comparer à d'autres travaux cités dans la bibliographie.

***PARTIE 1 : REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE***

1 Terminologie et taxonomie

Le caroubier est appelé *Ceratonia siliqua* dérive du grec Keras qui signifie petite corne et du latin siliqua désignant une silique et faisant appel à la dureté et à la forme de ses gousses qui, une fois arrivées à maturité, ressemblent à des cornes. Il est connu aussi sous le nom de pain de St. Jean-Baptiste, carouge, figuier en Egypte, fève de Pythagore (Battle et Tous, 1997).

En outre, les graines du caroubier sont connues sous le nom de « carats », et a longtemps été utilisées par les bijoutiers comme unité de mesure dans le commerce des pierres précieuses (1 carat = 205,3 mg) (Rejeb, 1995). Il apparait donc que « el kilate » en Espagne ou « carat » (0,2 g) en France vient du nom arabe donné aux graines (Al-Karat ou girat), qui se caractérise par un poids relativement constant (Albanell,1990). Par ailleurs, la dénomination de l'espèce *C. siliqua* L. dans différents pays et langues dérive de la forme générale du nom arabe *Al kharroub* ou *kharroub*, comme algarrobo ou garrofero en espagnol (Albanell, 1990).

La systématique est résumée dans le tableau (1).

Tableau 1:Classification systématique de l'espèce *Ceratonia siliqua* L (Quezel et Santa, 1963)

Règne	Plantae
Embranchement	Tracheobionta
Sous-embranchement	Angiospermes
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Fabales
Famille	Fabaceae
Sous-famille	Césalpinoïdae
Genre	<i>Ceratonia</i>
Espèce	<i>Ceratonia siliqua</i> L.

2 Description botanique du caroubier

Visuellement, le caroubier est un arbre ou arbuste mesurant de sept à vingt mètres avec une circonférence de deux à trois mètres à la base du tronc. Il se caractérise par la présence d'une écorce lisse et grise lorsqu'il est jeune et une écorce brune et rugueuse lorsqu'il grandit. Son bois de couleur rougeâtre est très dur.

Sa croissance est lente et sa longévité est grande (dépassant souvent les 200 ans). (Rejeb *et al.*, 1991 ; Ait Chitt *et al.*, 2007). Cet arbre a un système racinaire rotatif pouvant atteindre une profondeur de 18 m (Aafi., 1996 ; Gharnit., 2001).



Figure 1 : L'arbre du caroubier (www.exoplantus.fr/.../28BC/4795/Caroubier.jpg).

2.1 Feuilles

Les feuilles persistantes sont de 10 à 20 cm de longueur. Elles sont composées d'un pétiole sillonné sur la face interne et un rachis portant 8 à 15 folioles, opposées, de trois à sept cm, elles sont paripennées, entières, ovales à elliptiques, coriaces, légèrement échancrées de couleur verte (Ait Chitt *et al.*, 2007).

De plus, le caroubier ne perd pas ces feuilles en automne mais il les renouvelle partiellement au printemps tous les deux ans. Tandis que les vieilles feuilles chutent en juillet (Diamantogulou et Mitrakos, 1981).



Figure 2: Feuilles du caroubier (<http://www.ginkgo.biloba.online.fr/caroubier/feuilles.jpg>)

2.2 Fleurs

Les fleurs (Figure 3) sont verdâtres, de petite taille (6 à 16 mm de longueur), constituées d'un calice pourpre sans corolle, sont réunies en grappes axillaires cylindriques. Elles apparaissent d'août à octobre. D'après Tucker (1992), les fleurs sont initialement bi-sexes et au cours de leur développement, l'une des fonctions sexuelles mâle ou femelle est supprimée.

Les fleurs femelles sont représentées par un pistil court et recourbé avec un petit ovaire (5 à 7 mm) bicarpellé. Les stigmates sont bilobés et couvertes par des papilles. À la base, le disque nectarifère est entouré de cinq à six sépales rudimentaires.

Cependant, la corolle est absente et les fleurs mâles sont constituées de cinq étamines (Aafi, 1996), mais il est souvent possible de trouver des anomalies de la symétrie pentamère (4, 6, 8 étamines) (Albanell, 1990).

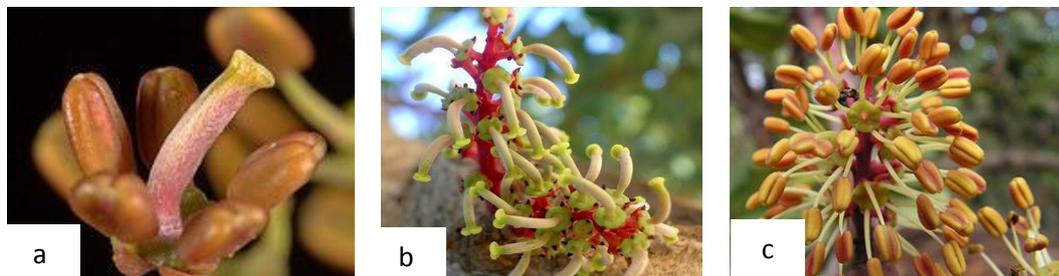


Figure 3: Inflorescence du caroubier (a : hermaphrodite ; b : femelle ; c : male).(
<https://dynamic.cirad.fr/...../fleur-ceratonia-siliqua-villefranche-sur-mer.jpg>)

2.3 Fruits

Le fruit du caroubier, appelé *caroube*, C'est une gousse indéhiscente de 10 à 20 cm de longueur, de 1,5 à 3 cm de largeur. D'abord vert puis brun, et, au moment de la maturité devient brun foncé à noir selon les variétés. Il est constitué principalement par la pulpe et les graines contenues dans les logettes de la gousse (Simon, 2010) (Figure 4).



Figure 4: Fruit du caroubier (a : la gousse ; b : les graines ; c : la pulpe).

2.4 Graines

Les graines du caroubier sont petites de forme ovoïde aplatie et biconvexe. Leurs téguments sont durs, lisses, de couleur brun rougeâtre et brillants (Albanell, 1990). Elles présentent des dimensions de 8 à 10 mm de longueur sur 6 à 8 mm de largeur avec 3 à 5 mm d'épaisseur. Les graines sont très dures possédant une grande résistance.

Elles sont composées de trois parties (Melgarejo et Salazar, 2003) :

- **Episperme ou tégument**, qui représente 30 à 33 % du poids total de la graine, recouvre la graine. Il est constitué de tanin, de lignine et de cellulose. Il est composé de deux enveloppes, l'une qui est à l'extérieure nommée testa, pigmenté et dure et l'autre qui est située à l'intérieur appelée tegmen dont elle est plus blanche et moue.
- **Endosperme ou albumen**, qui représente 42 à 46 % du poids de la graine. Il se situe sous l'épisperme et constitue le tissu de réserve pour la germination de l'embryon. Economiquement, c'est la partie la plus importante de la graine vu sa teneur élevée en galactomannane ou gomme de caroube.
- **Germe ou embryon**, représente 23 à 25 % de la graine.

3 Variétés

Le caroubier a été multiplié par semis puis a été propagé en culture par bouturage et greffage. En outre, les arbres qui sont choisis au hasard ont été à la base de la sélection des variétés (Batlle et al 1997). Par conséquent, le caroubier cultivé n'est pas trop différent de son ancêtre sauvage (Zohary, 1973). Toutefois, l'ensemble des cultivars identifiées actuellement dans le monde se distinguent entre eux par leurs formes, leurs graines, leur qualité de gousses, leur résistance aux maladies, et leur taux de production (Batlle et al, 1997).

Les cultivars recensés dans les vergers commerciaux sont principalement composés de femelles sélectionnées et quelques pieds mâle ou hermaphrodites éparpillés. Traditionnellement, la sélection a été basée sur la qualité du fruit en particulier la taille de la gousse, le poids de la pulpe et le taux de sucre. Or, elle est basée actuellement sur le critère de rendement des gousses en graines qui est plus rentable sur le plan commercial.

Les principaux cultivars du caroubier étudiés à travers les différents pays du monde ont été mentionnés dans le tableau 2 :

Tableau 2: Principaux cultivars de caroubier dans le monde (Batlle et Tous 1997).

Pays	Régions	Cultivars
Maroc	Fès, Marrakech, Agadir, Mokrisset, Bab Taza	Lanta, dkar
Palestine		Tylliria, Sandalawi, Habati, Aaronsohn nos
Espagne	Tarragona, Castellón Barcelone, Valence Alicante, Majorque Ibiza, Murcia, Malaga	Negra, Matalafera, Duraio, Rojal, Bugadera, Costella d'Ase, Mollar, Lindar, Melera, Sayalonga, Comuna, Boval, Del Pom, Banyeta, Borrera, Cacha, Banyà de Cabra, Casuda.
Italie	Sicile Apulia	Gibiliana, Racemosa, Saccharata, Amele d'Bari
Portugal	Algarve Alentejo	Mulata, Galhosa, Canela, AIDA
Turquie	Cote méditerranéenne Izmir	Type sauvage et charnu, type Sisam
Grèce	Crète	Hemere, Tylliria
Tunisie	Tabarka Beni-Khiar Sfax	Sfax
Chypre	Toute les îles	Tylliria
USA	Californie	Santa Fe, Clifford, Bolser, Grantham
Australie	Sud et Ouest Australian	Bath, Irlam, Maitllan, KP-1, Princess, Marshall no. 1

Les cultivars présents en Espagne sont caractérisés par une teneur en pulpe élevée avec un rendement moyen en graine de 8 à 10%. Cependant, les différents cultivars des îles Baléares se distinguent par une grande production en graines pouvant atteindre 16% tandis que le rendement en graines des écotypes spontanés d'Andalousi ne dépasse pas 8% (Batlle et Tous, 1997).

Au Maroc, il y a deux types de cultivars du caroubier, 'lanta' qui est le type greffé et 'dkar' le type sauvage. En effet, les populations spontanées permettent d'enregistrer un rendement très élevé en graines : 15% selon Ouchkif (1988b) et 12 à 25% selon Gharnit et al., (2001).

4 Biologie du caroubier

De nombreux aspects liés à la reproduction biologique du caroubier, notamment la floraison, la pollinisation, la compatibilité entre les différents sexes ou encore entre les cultivars, ainsi que la fructification, restent largement inconnus.

En Effet, le caroubier est dioïque, parfois hermaphrodite et rarement monoïque (Batlle et al, 1988). Il est considéré comme l'unique arbre méditerranéen dont la saison de floraison est en été d'août à octobre (Aafi 1996) ou en automne : de septembre à novembre. Cependant, le temps et la durée de la période de floraison dépendent des conditions climatiques, (Batlle et al, 1997). La pollinisation des fleurs du caroubier est assurée principalement par les insectes (Retana et *al.*, 1990 ; Rejeb et *al.*, 1991 ; Ortiz et *al.*, 1996). Par ailleurs, Retana et al (1990) ont pu observer que l'intervention du vent dans la pollinisation était pratiquement nulle. Et pourtant l'action du vent dans le transport du pollen depuis les fleurs mâles jusqu'aux fleurs femelles n'est pas exclue (Thomson, 1971 ; Tous, 1984 ; Batlle et *al.*, 1997).

Les fleurs femelles sécrètent des substances nectarifères dont la quantité et la contenance en sucre sont élevées par rapport aux fleurs mâles (Ortiz et *al.*, 1996).

Aafi (1996) considère que La fructification chez le caroubier, se situe entre juillet et décembre de l'année qui suit la floraison selon les régions et les cultivars. Elle se produit principalement sur des rameaux secondaires, occasionnellement sur des rameaux principaux et rarement sur le tronc (Figure 5).



Figure 5:Fructification du caroubier sur des rameaux secondaires (A), Rameau principal (B) et sur le tronc (C). (Yassine Moustafa Mahdad ;2017)

La croissance du fruit est lente, et il nécessite généralement 9 à 10 mois pour atteindre la maturité.

5 Exigences édaphoclimatiques

5.1 Le climat

Les zones convenables à la culture du caroubier sont 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). Cet arbre est largement distribué dans l'étage humide, subhumide et semi-aride (Hmamouchi, 1999).

Le caroubier est une espèce résistante à la sécheresse possédant des adaptations morphologiques et physiologiques vis-à-vis le manque d'eau (Rejeb 1995). Cependant, il est très sensible au froid d'hiver (Melgarejo et Salazar, 2003). Ainsi il est connu comme une des espèces méditerranéennes les plus altérables par les dommages causés par les basses températures, comme en confirment les importantes gelées de février 1956 et celles de janvier 1985, qui ont provoqué la mort de plusieurs arbres dans de nombreuses régions d'Espagne. Or, les arbres peuvent supporter en été des températures élevées allant de 40 à 45 ° C, voire jusqu'à 50° C et des vents chauds et secs, mais dans des conditions d'humidité suffisante (Albanell, 1990).

Le caroubier est une espèce xérophile qui peut s'adapter aux environnements où la pluviométrie annuelle moyenne est comprise entre 250 et 500 mm (Batlle et *al.*, 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). Pourtant, de nombreux auteurs estiment que des précipitations annuelles comprise entre 300 et 350 mm sont suffisantes pour une production acceptable (Albanell, 1990 ; Batlle et *al.*, 1997).

5.2 Le sol

Le caroubier, dont l'aire de répartition s'étend dans les secteurs des plateaux et en moyennes montagnes jusqu'à 1700 m d'altitude, s'adapte à plusieurs types de sols comme les sols pauvres, sableux, limoneux lourds, rocaillieux et argileux tout en préférant les substrats calcaires avec une texture équilibrée, accompagnée toujours d'un bon drainage. Mais il ne supporte ni les sols acides, ni les sols hydromorphes (Albanell, 1990 ; Sbay et Abourouh, 2006). A ce titre il contribue largement à la protection des sols contre la dégradation et l'érosion, ainsi il joue un rôle important dans la lutte contre la désertification (Zouhair, 1996).

6 Origine et distribution géographique

6.1 Origine

Le lieu d'origine du caroubier demeure ambigu puisqu'il existe plusieurs hypothèses qui montrent un désaccord entre plusieurs auteurs. Toutefois, De Candolle (1983) et Vavilov (1951) ont rapporté qu'il serait originaire de la région Est méditerranéenne (Turquie et Syrie).

Par contre, Schweinfurth (1894) a suggéré qu'il est originaire des pays montagneux du Sud d'Arabie (Yémen).

Par ailleurs, les caractéristiques physiologiques importantes propres à l'espèce notamment, l'existence d'une période de floraison tardive (Juillet-Octobre) et la présence des enzymes photosynthétiques de type « C4 » (caractéristique des plantes de climat chaud) durant les premières étapes de sa croissance qui s'inhibe à l'âge adulte, permet de confirmer l'origine tropical du caroubier (Catarino et Bento-Pereira, 1976).

6.2 Distribution géographique

Le caroubier est distribué à l'état sauvage en Turquie, Chypre, Syrie, Liban, Palestine, Sud de Jordanie, Egypte, Arabie saoudite, Tunisie et Libye avant d'atteindre l'Ouest de la méditerranéen (Hillcoat et al., 1980).

En effet on le rencontre à l'état naturel en association avec, l'oléastre, le thuya, le pin, le chêne vert, etc dans plusieurs pays de l'Afrique du Nord et de l'Europe (Batlle *et al.*, 1997).

Il a été cultivé par les grecs en Grèce et en Italie par les arabes le long de la côte Nord de l'Afrique, au Sud et à l'Est de l'Espagne, ce qui par la suite a permis sa distribution dans le Sud du Portugal et dans le Sud-Est de la France.

Il a été introduit avec succès dans d'autres pays ayant un climat méditerranéen, notamment aux États-Unis, au Mexique, en Australie et en Afrique du Sud (Estrada *et al.*, 2006).

Généralement, la distribution des espèces arborescentes, comme *C. siliqua* est limitée par des stress liés aux froids (Mitrakos, 1981). Dans les zones basses méditerranéennes (0-500m, rarement 900m d'altitude), le caroubier est considéré comme une essence dominante et caractéristique du maquis méditerranéen des arbres sclérophylles (Zohary et Orshan 1959 ; Folch i Guillen, 1981).

7 Production mondiale du caroubier

Selon le FAOSTAT (2019), la production mondiale totale des caroubes est estimée à 46604 Tonnes, produites dans une superficie d'environ 14366 ha. Cette production est concentrée principalement au Maroc, premier pays producteur avec 21501 t, ce qui représente 46,13% de la production mondiale suivi par la Turquie (34,88%) (Tableau 3).

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). Cette différence dépend de la récolte, de la région et des pratiques de culture (Makris et Kefalas, 2004).

Au cours des soixante dernières années, la production mondiale de caroube a fortement chuté, passant de 650 000 t en 1945 à 310 000 t en 1997 (Orphanos et Papaconstantinou 1969) et à 43 261 t en 2018 selon FAOSTAT. Cette diminution de 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. (Batlle, 1997).

Tableau 3: Estimation de la surface cultivée et la production de la caroube dans le monde, année 2019 (tableau établi à partir des données de la FAOSTAT)

Pays*	Surface cultivée (ha)
Maroc	10161
Palestine	1779
Turquie	795
Algérie	732
Tunisie	395
Liban	337
Ukraine	101
Mexique	66
Total	14366

*Les pays ont été classés par ordre décroissant selon la production (tonnes).

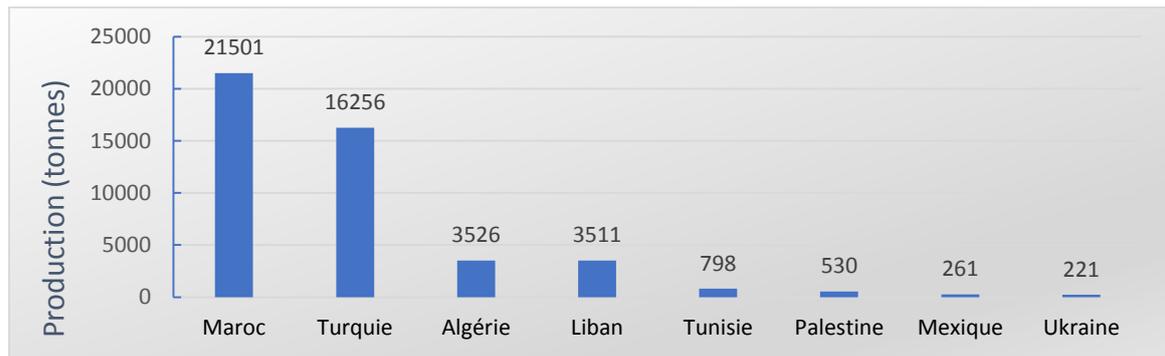


Figure 6: Production mondiale de la caroube, année 2019 (Histogramme établi à partir des données de la FAOSTAT).

8 Production du caroubier au Maroc

Au Maroc le caroubier occupe une superficie de 10161 ha en 2019 (FAOSTAT), localisé dans les plaines et les moyennes montagnes du Rif, du Moyen Atlas, du Haut Atlas et de l'Anti-Atlas, en association avec l'olivier, le lentisque, le thuya ou l'arganier (Zouhair, 1996). Son aire de répartition correspond aux bioclimats humide, subhumide, semi-aride et aride côtier à variantes chaude et tempérée.

Les principales populations spontanées du caroubier sont situées dans la région de Béni Mellal-Khénifra, essentiellement dans les régions de Tafechna et AitIshaq (province de Khénifra (Ouchkif, 1988a). Pourtant Les zones où les caroubes sont produites, se situent dans les régions de Fès, Marrakech, Agadir, Essaouira, Taza, El Hoceima, Béni Mellal, Khénifra, etc...

9 Composition chimique du caroubier

la caroube est principalement composée de la pulpe et des graines qui représentent respectivement 90% et 10% de son poids total .Selon plusieurs auteurs, la composition chimique de la pulpe dépend de plusieurs facteurs à savoir , son origine, l'environnement, les conditions de stockage et l'époque de la récolte (Orphanos et Papaconstantinou, 1969; Albanell et al., 1991; Avallone et al., 1997; Ayaz et al., 2007; Iipumbu, 2008).

9.1 Sucres

La pulpe des gousses de caroube possède une forte proportion de sucre (saccharose, fructose et glucose) environ 500 g/kg contrairement à celle présente dans la betterave ou dans la canne à sucre (environ 200g/kg) (Petit & Pinilla, 1995). Il est bien connu que le sucre le plus abondant dans les gousses c'est le saccharose (Calixto et al, 1982). De plus, elle contient environ 18% de cellulose et d'hémicellulose (Batlle et Tous, 1997) (Tableau 4).

Tableau 4: composition moyenne de la pulpe de caroube (Avallone *et al.*, 1997).

Composants	%
Sucres	40 – 60
Saccharose	27-40
Glucose	3-5
Fructose	3-8

9.2 Composés phénoliques

Les polyphénols sont présents dans toutes les plantes et pourtant leur nature et leur teneur diffèrent d'une espèce à l'autre (Grolier *et al.*, 2001). En effet, la teneur en polyphénols présent dans la caroube représente 16- 20% par rapport à l'ensemble des constituants biochimiques (Dewick, 1995).

En outre, les feuilles de caroubier contiennent des proportions élevées en composés polyphénoliques par rapport aux d'autres constituants biochimiques (El Hajaji *et al.*, 2010).

Plusieurs études ont décrit l'activité antioxydante de la caroube qui résulte de la présence de polyphénols.

Ils sont impliqués dans de nombreux processus physiologiques tels que la germination des graines, la croissance cellulaire ou la maturation des fruits (Lugasi *et al.*, 2003). Et ils jouent un rôle crucial car ils sont partiellement responsables des qualités sensorielles et alimentaires des aliments végétaux, et participent fortement aux critères de qualité (couleur, astringence, amertume...) qui orientent le choix de l'homme dans la consommation et l'utilisation des végétaux et des produits qui en dérivent par transformation (Macheix *et al.*, 2005).

A la fin du 20^{ème} siècle, des études épidémiologiques et les méta-analyses associées ont fortement suggéré que la consommation à long terme des aliments riches en polyphénols végétaux offrait une certaine protection contre le développement des cancers, du diabète, des maladies cardiovasculaires, de l'ostéoporose et des maladies neurodégénératives. En raison de leurs effets bénéfiques sur la santé humaine, les polyphénols font l'objet d'un intérêt scientifique croissant.

La caroube présente plusieurs classes d'antioxydants de nature phénolique (acides phénoliques, flavonoïdes, lignanes, anthocyanes et tanins) (Owen *et al.*, 2003).

9.2.1 Flavonoïdes

Sur le plan cellulaire, les flavonoïdes sont synthétisés dans les chloroplastes puis migrent vers les vacuoles (Piquemal, 2008). Ils sont présents dans différentes parties des végétaux supérieurs: graines, racines, tiges, feuilles, fruits, pollens, bois.

Selon les détails structuraux, les flavonoïdes se répartissent en plusieurs classes de molécules, dont les plus importantes sont les flavones, les flavanones, les flavonols, les dihydroflavonols, les isoflavones, les flavanols et les anthocyanidines (Pietta, 2000 ; Gramza et Korczak, 2005).

Ces pigments sont responsables des colorations jaune, orange et rouge des fleurs, des fruits et des feuilles et peuvent également assurer la protection des tissus contre les effets nocifs du rayonnement ultraviolet (Hadi, 2004).

Ils ont plusieurs activités biologiques : antivirales, anti-inflammatoires et anticancéreuses puisqu'ils possèdent la capacité de piéger les radicaux libres tels que les radicaux hydroxyles (OH•) et superoxydes selon la réaction suivante :



9.2.2 Tannins

Ils sont des substances d'origine végétale non azotées, de structure poly phénolique, ayant la propriété de « tanner » les peaux c'est-à-dire de les rendre dures et imputrescibles, en se fixant sur les protéines, d'où leur utilisation la plus importante dans le nettoyage du cuir et le rendre stable (Haslam, 1989). Ils sont caractérisés par leurs effets astringents (sensation de dessèchement en bouche), très utiles quand il y a trop de sécrétions (les bronchites, les diarrhées, les plaies saigneuses).

La caractéristique la plus importante des tannins est leur capacité à former des complexes (par précipitation) avec des polymères naturels tels que les protéines, les polysaccharides et les minéraux (Garro-Galvez *et al.*, 1997 ; Rubanza *et al.*, 2005).

Le rôle biologique des tanins dans la plante est lié à sa propre protection contre les infections, les insectes et les animaux herbivores, en plus de la protection contre les attaques fongiques et bactériennes.

9.2.3 Acides phénoliques et leurs dérivés

Les coumarines possèdent des activités : anti-agrégation plaquettaire, anti-inflammatoire, anticoagulante, anti tumorale, diurétique, antimicrobienne, antivirale et analgésique.

9.3 Fibres

Les fibres de caroube contiennent une quantité remarquable de tanins condensés et d'autres polyphénols (Owen et al., 2003).

La proportion de fibres en poudre de caroube se situe entre 24,13% et 49,47%, mais cette proportion peut varier en fonction du type de caroube (Albanell et al, 1991 ; Iipumbu et al, 2008).

9.4 Protéines et les lipides

La farine de germe de caroube obtenue à partir des graines a une teneur plus importante en protéines (48,8 %) avec une teneur élevée en lysine et arginine. Tandis que Marcone, Kakuda, et Yada (1998) ont déterminé une teneur en protéines pour les graines de pois (*Pisum sativum L.*) de 18,83% et de soja (*Glycine max. Merrill*) 34,35% nettement inférieur par rapport à celle trouvée dans les caroubes.

9.5 Teneur en cendre

La teneur en cendres existant dans la poudre de caroube varie entre 2% et 6% selon le type de caroube (Albanell et al., 1991).

9.6 Teneur en minéraux

La gousse est riche en potassium, calcium, sodium, phosphore, ainsi que les oligo-éléments comme le fer, la manganèse (Tableau 5).

Tableau 5:Composition de la caroube en minéraux (Ayaz et al., 2007).

Composant	Teneur (mg/100g MS)
Potassium	970
Phosphore	71
Calcium	300
Magnésium	60
Fer	1,88
Manganèse	1,29
Zinc	0,75
Cuivre	0,85

9.7 Teneur en Vitamines

Les données présentées dans le Tableau 6 représentent les valeurs moyennes de la teneur en vitamines de la poudre de caroube. Ces résultats montrent que la poudre de caroube est une bonne source en vitamines E, D, C, niacine, B6 et d'acide folique.

Tableau 6: Valeurs moyennes de la teneur en vitamines de la poudre de caroube (M. Kamal E. Youssef et *al.*, 2013).

Vitamines	Unités
Vitamine liposoluble	µg/100 g
A	1 407
E	5 377
D	4,9
Vitamine hydrosoluble	mg/100 g
C	830,08
B2	0,38
Niacin	185.68
B6	23,8
Acide folique	41,97
B12	1,3

10 Intérêts et utilisations du caroubier

Depuis longtemps, le caroubier est cultivé pour plusieurs usages vu son importance écologique, industrielle et ornementale indiscutable. Il est considéré comme l'un des arbres fruitiers et forestiers les plus performants, car toutes ses parties (feuilles, fleurs, fruits, bois, écorce et racines) sont utilisés dans différents secteurs (Aafi, 1996).

10.1 Arbre

Le caroubier est largement utilisé comme plante ornementale pour son ombre au bord des routes et pour la reforestation des zones côtières affectées par l'érosion ou la désertification, en raison de sa faible exigence en culture, sa grande tolérance vis-à-vis des sols pauvres, (Batlle et *al.*, 1997).

10.2 Fruit

Traditionnellement Les gousses ont été utilisées non seulement dans l'alimentation des ruminants (Louca et Papas, 1973) et des non ruminants (Sahle et *al.*, 1992), mais aussi pour la consommation humaine. Les gousses sont constituées par des graines entourées par la pulpe.

➤ Pulpe

La farine obtenue à partir de la pulpe (Figure 8) peut être utilisée comme ingrédient dans certains menus de pâtisseries tels que : les gâteaux, pain, bonbon, crème glacée, boisson (NAS, 1979 ; Vidal, 1985) ou utilisée comme substituant du cacao dans le chocolat, puisqu'elle est moins calorifique et ne contient ni caféine ni théobromine (Whiteside, 1981 ; Craig et Nguyen, 1984).



Figure 7: Farine de la pulpe de la caroube

(https://cdn.shopify.com/s/files/1/0011/4566/7684/products/ead946b0531b358a015364da7befca5b_1600x1200_crop_center@2x.jpg?v=1616585564)

En outre les sirops élaborés à partir de la caroube constituent une boisson populaire en Egypte (Batlle et Tous, 1997). Ce sirop peut remplacer le sucre ou le miel dans la préparation de gâteaux, les boissons chaudes et froides ou se tartiner sur du pain (Figure 8).



Figure 8: Sirop ou mélasse de caroube (<https://mk0darwinnutrit3vtub.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2020/01/sirop-caroube.jpeg>)

En pharmacopée traditionnelle, la pulpe est utilisée contre la diarrhée et pour le traitement de certaines maladies comme la gastrite, l'entérite, les angines, les rhumes, le cancer, etc. (Ait Chitt *et al.*, 2007). Selon les recherches de Rejeb (1995), la pulpe est recommandée contre la tuberculose pulmonaire et les affections des bronches.

Elle est considérée comme le premier produit d'horticulture utilisé en fermentation, dans plusieurs pays méditerranéens, pour la production d'alcool industriel (Batlle *et al.*, 1997).

De plus, elle joue un rôle important dans l'élimination des parasites intestinaux (Min et Hart, 2003).

➤ Graines

Les graines sont composées de trois parties : une enveloppe (cuticule marron, 30-33%), un endosperme (blanc et translucide, 42-46%) et un embryon ou un germe (23-25%) (Figure 9)

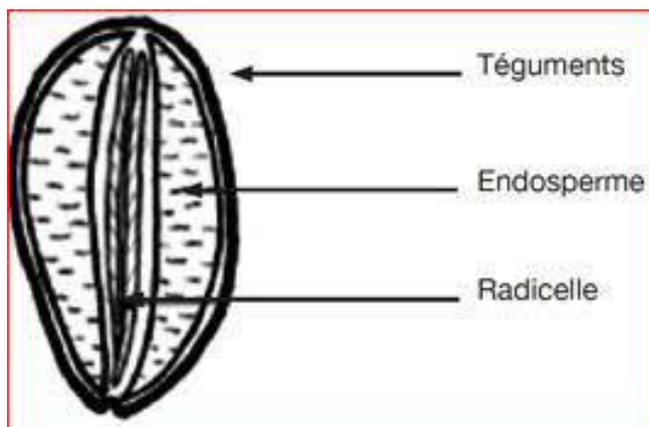


Figure 9 : Différents constituants de la graine (<https://popups.uliege.be/1780-4507/docannexe/image/10837/img-2.jpg>)

En effet, La gomme issue de l'endosperme constitue le 1/3 du poids total de graine et 100 kg de graines produisent en moyenne 20 kg de gomme pure et sèche (Jones, 1953).

Tous les constituants de la graine du caroubier (tégument, endosperme et cotylédon), jouent un rôle médical et industriel important, mais la gomme (endosperme) reste la plus importante (Biner *et al.*, 2007 ; Dakia *et al.*, 2007).

Cette gomme mucilagineuse est utilisée en cosmétique pour sa capacité à former une solution très visqueuse, à une faible concentration en raison de ses propriétés épaississantes, émulsifiantes et stabilisantes (Batlle *et al.*, 1997 ; Sandolo *et al.*, 2007).

De plus, elle est utilisée dans l'industrie alimentaire pour la production d'un grand nombre des aliments tels que : crème glacée, soupe, sauce, biscuit, tourte, confiserie, produits de boulangerie et nourriture des animaux. Et son utilisation dans les domaines techniques est large. Elle est utilisée en imprimerie, photographie, textile, matière plastique, encre, cirage, matière adhésive et pharmaceutique et cosmétique (Batlle *et al.*, 1990).

Parrado *et al.*, (2008) a démontré que la gomme de caroube permet d'exercer une action phyto-hormonale bénéfique et significative sur le développement de la plante, le nombre de fleurs et le nombre de fruits par plant, lorsqu'elle est utilisée comme biofertilisant après avoir été transformée en un extrait enzymatique hydrosoluble.

10.3 Feuilles

En Turquie, les extraits foliaires ont été utilisés dans la médecine traditionnelle contre la diarrhée et dans l'alimentation diététique vu sa richesse en tannins (Baytop, 1984). Et d'ailleurs Corsia *et al.* (2002) ont montrés la capacité extraordinaire des extraits de feuilles et de gousses contre la prolifération des cellules tumorales.

La valeur nutritive des feuilles du caroubier est de 0.25 UF/kg de matière sèche (Rejeb *et al.*, 1991).

10.4 Ecorce

L'écorce du caroubier a été toujours utilisée en tannerie, principalement dans l'achèvement et l'émaillage des peaux (Batlle, 1997). En Turquie, elle a été également utilisée en médecine traditionnelle pour traiter la diarrhée (Baytop, 1984).

Partie 2 : Matériel et méthodes

1 Présentation de l'établissement d'accueil

- **Centre Régional de la Recherche Agronomique de Meknès (10 Km,Route Haj Kaddour,BP 578 (VN) 50000 Meknes-Maroc).**

C'est une entité régionale opérant dans une zone incluant différents agrosystèmes, par des recherches, études et actions de recherche-développement visant la promotion d'une agriculture moderne dans la région.

Les orientations de recherche à moyen terme du CRRA Meknès sont :

- Gestion intégrée de l'arboriculture fruitière.
- Intensification durable des grandes cultures et diversification des systèmes de culture
- Gestion des ressources naturelles et dynamiques des espaces montagnards.
- Valorisation des acquis de la recherche par l'assistance technique, le renforcement des capacités et le transfert de technologies.

Il Existe différentes unités de recherche au sein du CRRA :

- Amélioration des Plantes et Conservation des Ressources Phytogénétiques.
- Agronomie et Physiologie Végétale.
- Gestion des Ressources Naturelles, Socio-Economique et Qualité.
- Protection des plantes.

- Unité de recherche « **Amélioration des Plantes et Conservation des Ressources Phytogénétiques** » :Les recherches conduites au sein de cette unité s'articulent autour de :

- Caractérisation des ressources génétiques locales et introduites et mise en collections conservatrices vivantes dans les domaines expérimentaux ou en chambres froides.
- Intégration des outils biotechnologiques en amélioration génétique des plantes pour la création de matériel végétal agronomique performant.
- Transfert des connaissances, du matériel végétal et autres produits de recherches auprès des utilisateurs.

Cette unité dispose de quatre laboratoires, le présent travail a été réalisé au sein du laboratoire de **pomologie et de biochimie** où se réalisent les différentes observations et mesures de fruits des arbres pris en charge dans les programmes d'amélioration au sein de l'UR (caroubier, olivier, figuier, amandier, etc.).

2 Préparation du matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude correspond à 22 échantillons de gousses mûres du caroubier (*Ceratonia siliqua*), qui ont été récoltés en mi-août 2020 de différentes régions du Maroc (Tableau 7). Ces gousses ont été choisies selon une approche orientée basée sur des enquêtes réalisées auprès des agriculteurs (qui possèdent des caroubiers à teneurs en graines élevées) afin de mesurer les différents paramètres pomologiques des gousses et des graines : longueur, largeur, épaisseur, poids, ainsi que le nombre de graines par gousse et le rapport de masses graines/gousse. Ensuite, les échantillons ont été concassés pour séparer la pulpe et les graines afin de déterminer la teneur en eau. Puis, ils sont broyés à l'aide d'un broyeur électrique, pour obtenir une poudre très fine puis conservée dans des bocaux en plastique et gardée dans un endroit sec.

Tableau 7: Origine des accessions du caroubier analysées dans cette étude

Echantillon	Origine	Latitude N	Longitude W
TGHB1	Tighboula (Nord d'El Ksiba)	-	-
TGHB2	Tighboula	32° 35.833'	006° 02.070'
TGHB3	Tighboula	32° 35.801'	006° 02.057'
TGHB4	Tighboula	32° 35.798'	006° 02.095'
TGHB5	Tighboula	32° 35.866'	006° 02.013'
TGHB6	Tighboula	32° 35.890'	006° 02.002'
TNHL2	Tala nhlou(Nord Est de Demnat)	31°45.742'	006° 47.316'
TNHL3	Tala nhlou	31° 45.725'	006° 41.323
TNHL4	Tala nhlou	31° 45.735	006° 47.316
TNHL5	Tala nhlou	31° 45.769	006° 47.311
ABWN	Abaawan	31° 34.914	006° 58.553
AOMG	Ait Oumghar	31° 43.538'	006° 59.071
TSKT	Tassoukt Tidili (Ouest de Demnat)	31° 43. 621'	007° 11 600
IGHB	Ighbar (Provine d'El Haouz)	31° 43.368'	006° 59.192'
DAT1	Meknès	-	-
DRKH1	Meknès	-	-
DRKH2	Meknès	-	-
DRKH3	Meknès	-	-
DRKH4	Meknès	-	-
DRKH5	Meknès	-	-
DRKH6	Meknès	-	-
DRKH7	Meknès	-	-

3 Caractérisation pomologique

3.1 Longueurs

Tout d'abord, la longueur de la gousse et des graines est déterminée à l'aide d'un fil, puis la longueur du fil est mesurée par une règle graduée.

3.2 Largeurs

À l'aide d'un pied à coulisse, différentes largeurs étaient mesurées et la moyenne de ces mesures a été considérée comme étant la largeur moyenne.

3.3 Epaisseurs

Les épaisseurs ont été évaluées avec pied à coulisse, où elles représentaient la moyenne de 30 épaisseurs de la gousse et de la graine.

3.4 Poids

Le poids des différentes gousses et graines est mesuré à l'aide d'une balance de précision. Après on fait la moyenne de l'ensemble des mesures.

4 Caractérisation physico-chimique

4.1 Détermination de la matière sèche

- Introduire dans des creusets bien séchées 2g (**P**) de l'échantillon frais (gousses et graines)
- Mettre les échantillons dans une étuve réglée à 105 °C pendant 24 heures afin d'obtenir un poids constant (**P1**).

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

$$\text{Teneur en eau (\%)} = ((\mathbf{P}-\mathbf{P1}) / \mathbf{P}) *100$$

P : masse en g de la prise d'essai avant séchage.

P1 : masse en g de la prise d'essai après séchage.

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

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

4.2 Analyse de l'acidité titrable et du pH

4.2.1 Préparation des échantillons pour l'analyse

Pour chaque échantillon, une masse de 1 g de la poudre (de la pulpe et des graines) fine a été diluée dans 20 ml d'eau distillé et agité pendant 2 à 3 min. Les aliquotes sont ensuite centrifugés (5000 tr/20min), et les surnageants sont ensuite conservé à -20 C jusqu'à l'analyse.

4.2.2 L'acidité titrable

L'acidité titrable (AT) représente l'ensemble des acides minéraux et organiques présents dans un produit.

On a procédé à la titration par une solution de 0,1 N NaOH, préparée par dissolution de 4g de NaOH dans 1000 ml d'eau distillée, quelques gouttes de phénolphtaléine sont ajoutées tout en agitant jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante pendant 30 secondes.

L'acidité titrable est exprimée en gramme d'acide citrique pour 100 g de Matière sèche. Elle est calculée selon la formule suivante :

$$AT (g/100g) = (V*0,1N*f*100) /m$$

V= le volume en millilitres, de la solution d'hydroxyde de sodium ;

N = la normalité de l'hydroxyde de sodium ;

f =le facteur de correction (0,064) ;

m = la masse de l'échantillon utilisé

4.3 Détermination du pH

Le pH de l'échantillon a été déterminé en trompant l'électrode du pH-mètre dans l'extrait aqueux des graines et de la pulpe. L'opération est répétée deux fois pour chaque échantillon.

5 Analyse des propriétés biochimiques

5.1 Protocole d'extraction

Cinq g de poudre de graines et de la pulpe est homogénéisé dans 10 ml de solvant constitué d'éthanol 80%. L'homogénat est ensuite centrifugé à 3000 tr pendant 10 min et le surnagent est récupéré à partir du résidu. Ce dernier est réextrait et homogénéisé et le surnagent est récupéré comme auparavant pour un total de trois extractions. Les surnageants sont ensuite conservés à l'obscurité à 4°C avant de procéder au dosage des polyphénols totaux, des sucres totaux, des anthocyanes totaux et des flavonoïdes totaux.

5.2 Dosage des sucres solubles totaux

Dans des tubes à essais, ont été mis successivement, 25 µl d'extrait, 500 µl de phénol à 5% (le phénol est dilué dans de l'eau distillée), 1,5 ml d'acide sulfurique concentré 96%. Le mélange est agité à l'aide d'un vortex et les tubes sont laissés reposer pendant 10 min à température ambiante et placés ensuite au bain-marie pendant 10 à 20 min à 100 pendant 5 min. Les mesures d'absorbances sont effectuées à une longueur d'ondes de 490 nm.

Afin de déterminer la concentration en sucre, il est nécessaire d'établir une gamme d'étalonnage. Celle-ci a été préparée par 6 concentrations connues du glucose (0-0,2-0,4-0,6-0,8-1 g/L). Les résultats sont exprimés en gramme d'équivalents de glucose par 100 g de la matière sèche. (Annexe 5)

5.3 Dosage des polyphénols totaux

Un volume de 40 µl d'extrait est pipeté dans des cuvettes séparées, auquel 3160 µl d'eau distillé et 200µl de réactif folin ciocalteu sont ajoutés. Après 30 s à 8 min, 600 µl de solution de carbonate de sodium (20%) est ajouté, puis le mélange et agité vigoureusement (vortex). Après 30 min d'incubation à 40 C à l'obscurité, l'absorbance est déterminée pour chaque solution à 765 nm contre un blanc. La concentration des polyphénols est calculée à partir de l'équation de régression de la gamme d'étalonnage, établie avec le standard étalon l'acide gallique, et exprimée en grammes d'équivalent d'acide gallique par 100 grammes de matière sèche (g EAG/100g) (Annexe 6).

5.4 Dosage des anthocyanes totaux

La concentration en anthocyanes totaux a été déterminée par la méthode du pH différentielle en utilisant deux tampons : une de chlorure de potassium et l'autre d'acétate de sodium.

- Tampon chlorure de potassium à pH 1,0 (25 mM)

On pèse 0,51 g de KCL dans un bécher et on ajoute de l'eau distillé jusqu'à environ 274 ml. On mesure le pH et on l'ajuste à 1,0 (+ ou - 0,05) avec HCL (environ 6,3 ml). On transfère dans une fiole jaugée de 1 litre et on dilue au volume avec de l'eau distillé.

- Tampon acétate de sodium à pH 4,5 (0.4 M)

On pèse 8,8 g d'acétate de sodium dans un bécher et on ajoute de l'eau distillé jusqu'à environ 274 ml. On mesure le pH et on l'ajuste à 4,5 (+ ou - 0,05) avec acide acétique (environ 20 ml). On transfère dans une fiole jaugée de 1 litre et on dilue au volume avec de l'eau distillé.

On met dans des tubes 0,4 ml de l'extrait est mélangé séparément avec 3,6 ml de chacun des deux tampons et on mesure l'absorbance à 510 nm et 700 nm.

L'absorbance est calculée comme suit :

$$\text{Abs} = (\text{Abs}_{510} - \text{Abs}_{700})_{\text{pH}1,0} - (\text{Abs}_{510} - \text{Abs}_{700})_{\text{pH}4,5}$$

Les anthocyanes totaux des échantillons, exprimées en mg de cyanidine-3- glucoside (coefficient d'extinction molaire de 28800 et poids moléculaire de 595,2) équivalents par 100 g de poids sec de fruits. Ils sont calculés selon l'équation suivante :

$$\text{Composition en Anthocyanes Totaux} = (\text{Abs} * \text{PM} * \text{FD} * 1000 * 2 / \text{CAM})$$

Abs : absorbance

PM : Poids moléculaire (595,2)

FD : Facteur de dilution (10)

CAM : Coefficient d'absorption molaire de Cyanidine-3- glucoside (28800).

5.5 Dosage des flavonoïdes

La méthode du trichlorure d'aluminium décrite par (Djeridane et *al.*, 2006) est utilisée pour quantifier les flavonoïdes.

Dans des tubes à essais ,1 ml de chaque extrait a été ajouté à un volume égal de chlorure d'aluminium (2 %). L'absorbance a été lue à 410 nm après 10min.

La concentration des flavonoïdes dans les extraits a été calculée à partir de la gamme d'étalonnage de la quercétine Les résultats sont exprimés en g équivalent quercétine par 100g de matière sèche à partir de la courbe d'étalonnage. (Annexe 7).

6 Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel statistique SPSS 21 et le tableur Excel 2016. Des analyses de variance à 1 facteur (ANOVA 1) ont été effectuées dans le but de tester l'effet de l'échantillon sur les caractères pomologiques, physicochimique et biochimiques mesurés. De plus, pour mieux cerner les résultats du test ANOVA 1, le test S-N-K a été réalisé. En effet ce test permet de classer les échantillons en sous-ensembles homogènes.

Une analyse en composante principale (ACP), bien adaptée à la nature des données obtenue, est utilisée pour la discrimination entre les échantillons analysés. Pour définir et mieux visualiser les regroupements possibles des échantillons, une classification ascendante hiérarchique (CHA) est utilisée moyennant le même logiciel.

Partie 3 : Résultats et discussion

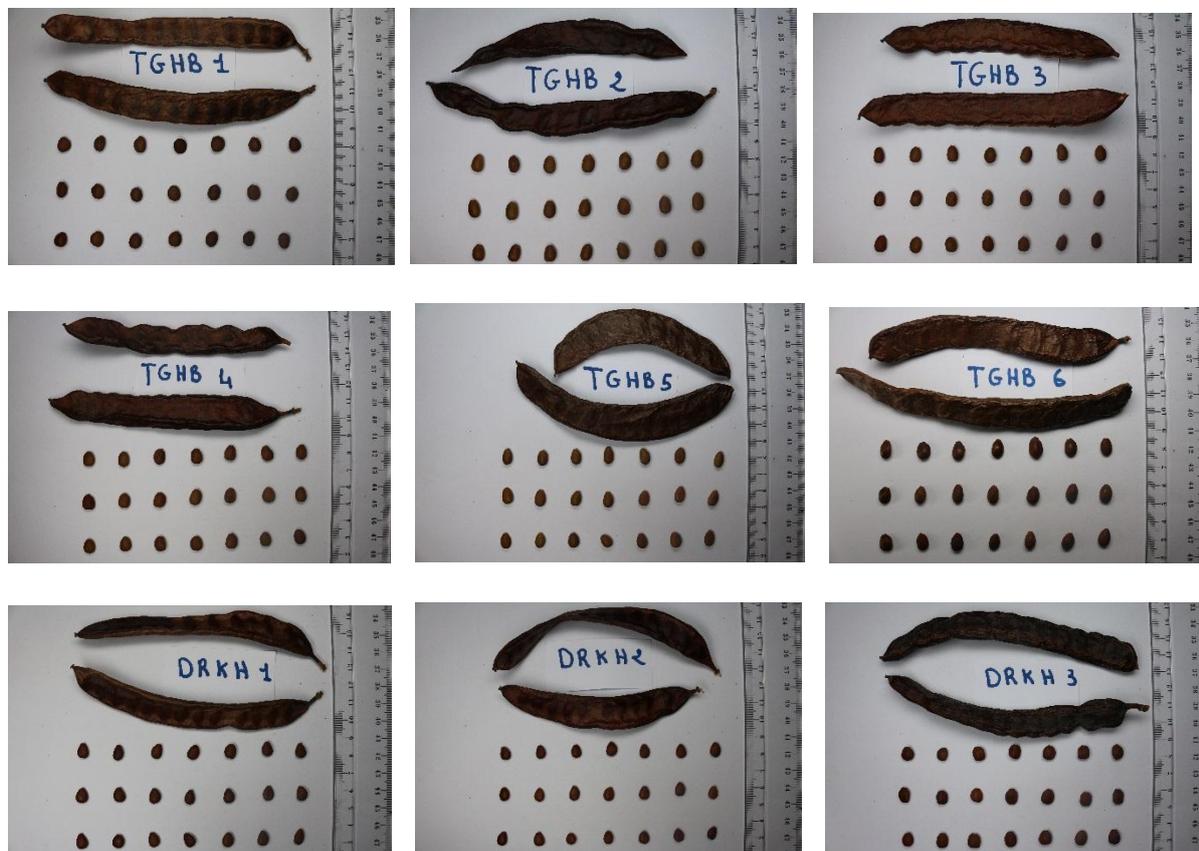
1 Etude pomologique

L'observation à l'œil nu de nos gousses et graines de caroube a permis de déceler un niveau très élevé du polymorphisme morphologique. En effet, un échantillon de vingt-deux gousses montre parfaitement l'existence de diverses formes : sinuose sur les bords, droite ou légèrement courbée et torsadée, présente une surface ridée, luisante (Figure 10).

La taille ou bien la forme des gousses du caroubier peut être considérée comme le critère agronomique caractérisant les cultivars, selon certains auteurs. Ainsi, en Espagne trois formes de gousses ont été rencontrées :

- Forme droite chez les cultivars Negra, Matalafera et Duraió
- Forme courbée chez les cultivars Rojal, Saylonga et Ramilleté
- Forme torsadée chez le cultivar Banya Cabra.

En effet, les gousses de caroube sont différentes morphologiquement dans leur taille, leur forme, leur qualité, leur couleur et dans leur rendement en graines. Ces variations peuvent être attribuées au génotype de la plante, l'origine géographique et les conditions climatiques (Batlle et Tous, 1997 ; Owen *et al.*, 2003 ; Biner *et al.*, 2007 ; Naghmouchi *et al.*, 2009 ; Sidina *et al.*, 2009).



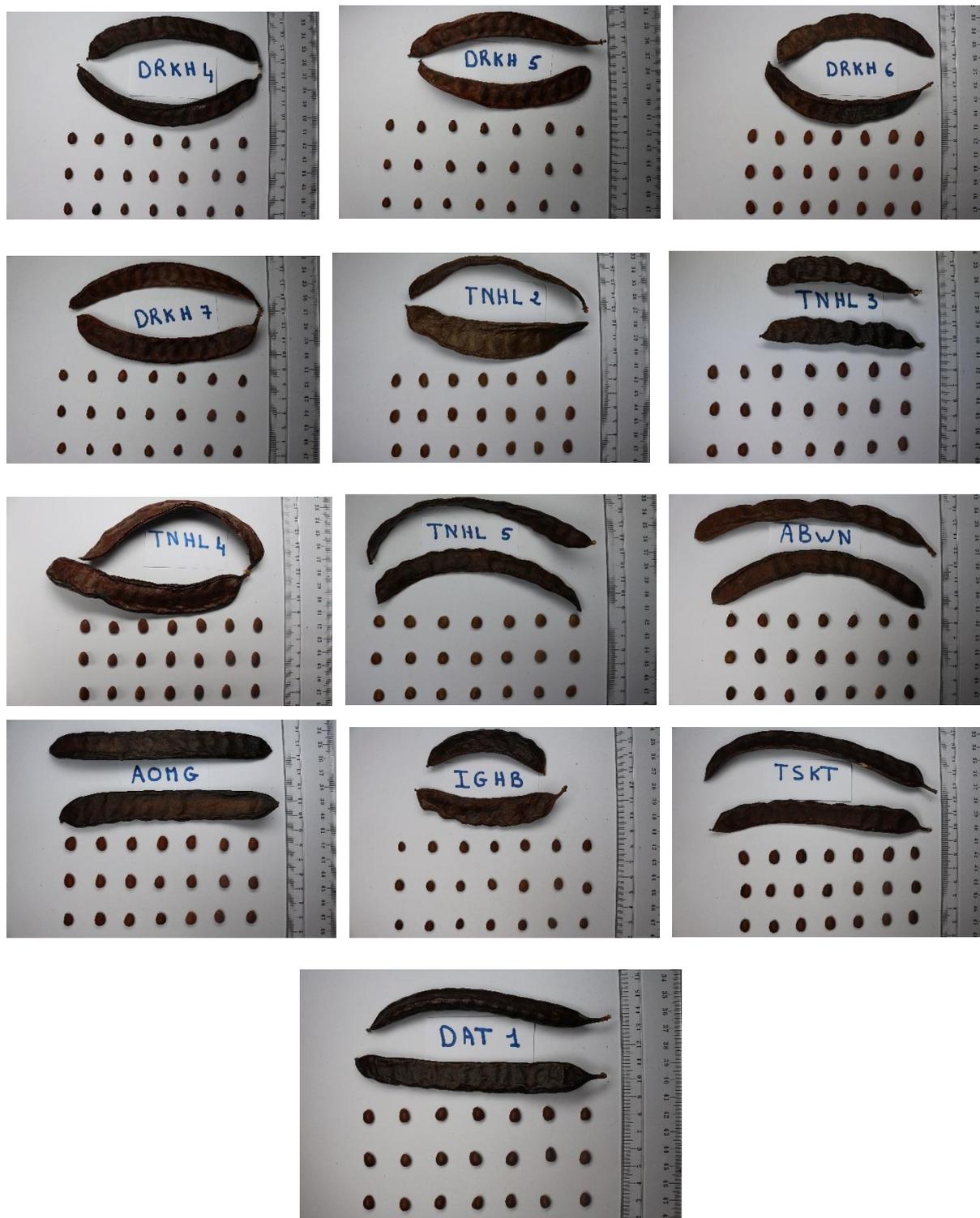


Figure 10: Variabilité dans la morphologie des gousses et des graines du caroubier. Les valeurs moyennes ainsi que l'erreur standard de la totalité des variables mesurés sont présentées dans l'annexe 1.

- **Longueur des gousses**

La taille des gousses est définie par la valeur moyenne de sa longueur.

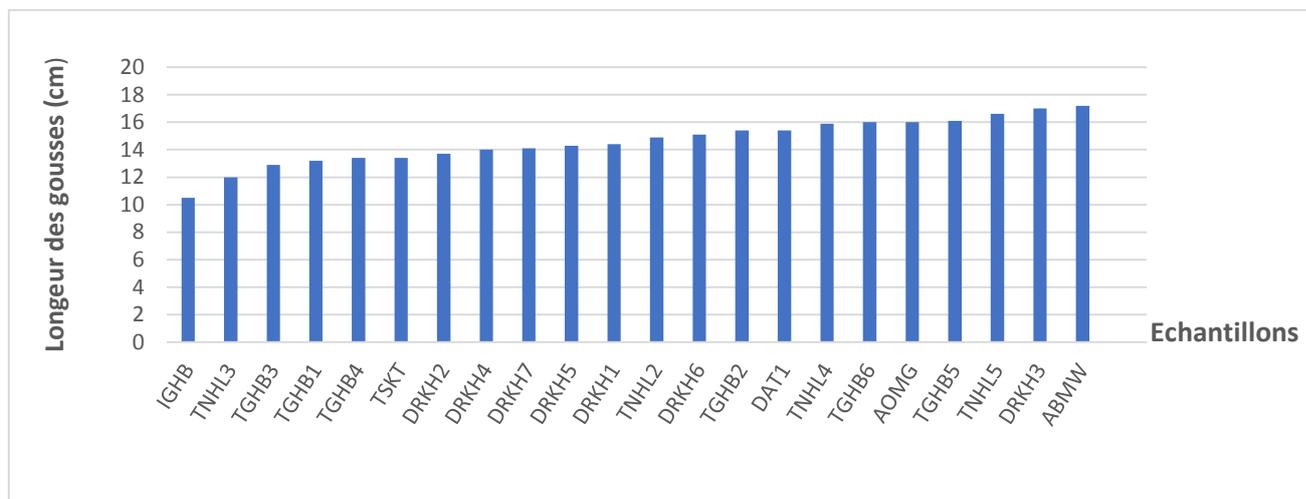


Figure 11 : Longueur des gousses (cm)

Dans le cas de nos échantillons, la taille la plus longue a été enregistrée chez l'échantillon ABMW (17.2 ± 0.53 cm) et DRKH3 (17.0 ± 0.3 cm) et la plus petite pour l'échantillon IGHB (10.5 ± 0.22 cm).

Ces résultats sont en accord avec ceux de Battle (1997) qui a montré que la longueur des gousses de caroube est de 10 à 20cm de longueur.

La longueur des gousses a donné lieu à la classification de nos échantillons en trois classes :

- Taille légèrement longue ($15 < L \leq 20$ cm)
- Taille moyenne avec ($14 \leq L \leq 15$)
- Taille légèrement courte avec ($10 \leq L < 14$).

Cette catégorisation de taille a été faite en référence aux travaux de Tutin et *al.*, (1993), de Tous et *al.*, (1996) et de Battle et Tous (1997).

Dans le cas de nos échantillons, la taille légèrement longue caractérise les populations de ABWN, AOMG, TGHB2, TGHB5, TGHB6, DRKH3, DRKH6, TNHL4, TNHL5 et DAT ; la taille moyenne caractérise les gousses de TNHL2, DRKH1, DRKH4, DRKH5, DRKH7. Tandis que les gousses des autres stations sont de taille courte.

- **Largeur des gousses**

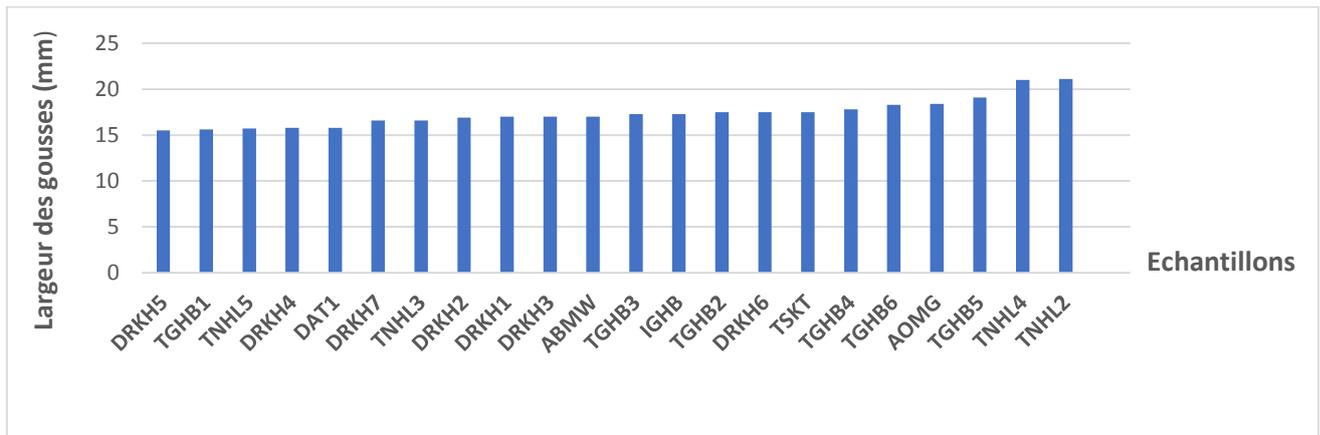
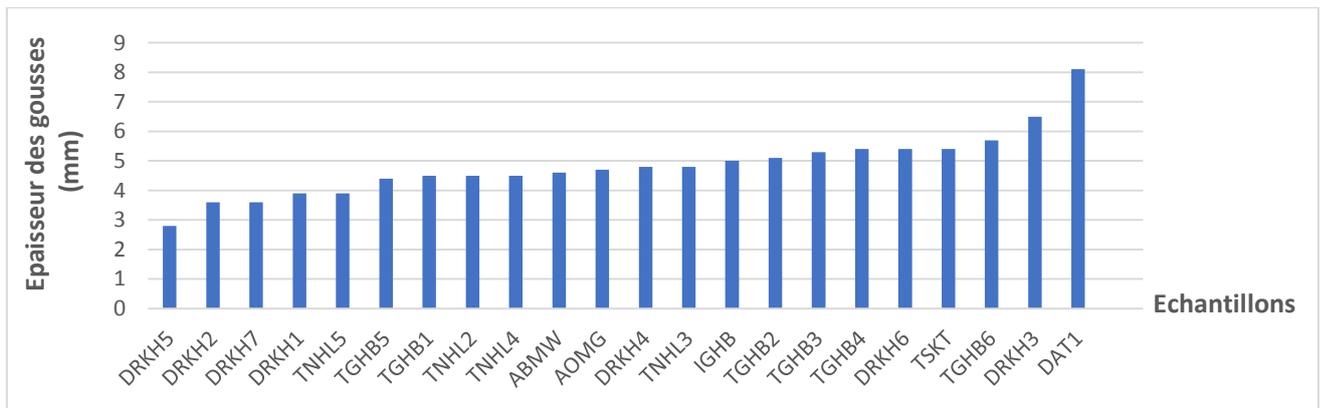


Figure 12: Largeur des gousses des différents échantillons.

Les gousses de TNHL2 sont les gousses les plus larges avec une valeur de 21.1 ± 0.05 mm, tandis que la plus faible largeur a été enregistrée chez les populations de TGHB1, DAT1, DRKH4, DRKH5, TNHL5. La largeur des gousses est comprise entre 1.5 et 2.5 cm Selon Tutin et al., (1993), et entre 1.5 et 3.5 selon Batlle et Tous (1997).

- **Épaisseur des gousses**



L'épaisseur de gousse la plus élevée est notée pour l'échantillon DAT1 (8.1 ± 0.14 mm) et la valeur la plus faible a été enregistrée pour l'échantillon DRKH5 (2.8 ± 0.04 mm).

Les résultats obtenus diffèrent significativement ($p < 0,05$) selon l'ANOVA 1, donc il existe un effet significatif du type d'échantillon sur l'épaisseur des gousses. Elle varie également d'un échantillon à l'autre et constitue un critère pour distinguer les gousses comprimées ou volumineuses. Elle peut atteindre un cm surtout chez les gousses charnues (Batlle et Tous, 1997).

- **Poids de la gousse**

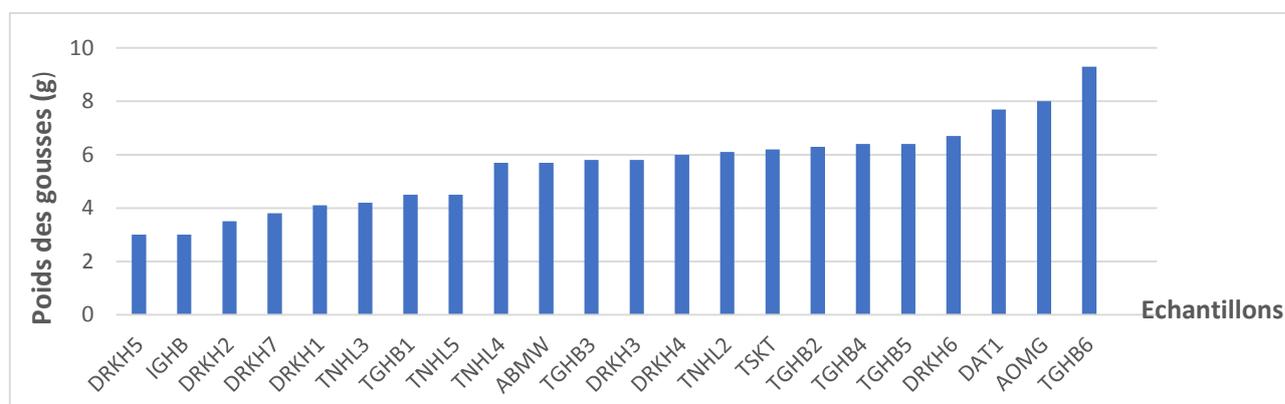


Figure 13: Poids des gousses en gramme.

L'échantillon TGHB6 a montré le plus grand poids des gousses parmi les vingt-deux échantillons étudiés avec une valeur de 9.3 ± 0.23 gramme.

D'après l'analyse de la variance à un seul facteur (ANOVA 1), les résultats obtenus diffèrent significativement ($p < 0,05$), ce qui indique qu'il existe une diversité phénotypique entre les gousses de la même région et entre les gousses des autres stations.

Or selon Melgarejo et Salazar (2003) les valeurs du poids de la gousse du caroubier demeurent pratiquement inchangées sous les mêmes conditions environnementales. En effet, la production du caroubier en qualité de fruits (gousses) est en fonction de plusieurs critères tels que la variété, les conditions environnementales, l'efficacité de la pollinisation et la conduite technique

Le poids total de la gousse est un critère distinctif sur le plan agro-morphologique, mais il est affecté par les variables de la taille (longueur, largeur et épaisseur).

En effet, nous avons observé qu'en général, les populations ayant un poids élevé de gousse sont celles qui ont des gousses longues, larges et épaisses.

- **Nombre et poids de graines par gousse**

Le nombre moyen des graines par gousse des différentes populations est très variable.

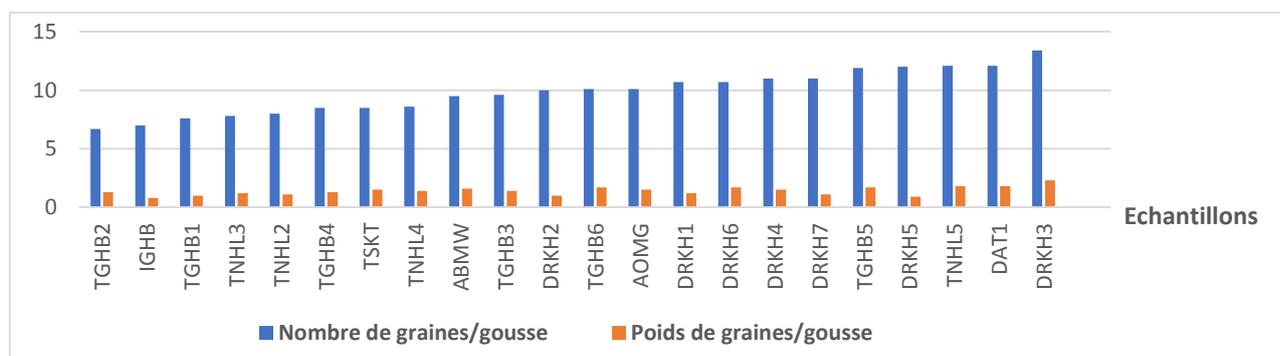


Figure 14: Résultats de la détermination du nombre et du poids de graines par gousses des différents échantillons.

En effet, les gousses qui contiennent le plus grand nombre de graines et qui ont un poids de graines par gousse important sont celles de DRKH3 (13.4 ± 0.32 graines). Cependant, les gousses qui contiennent le nombre de graines le plus faible sont celles de TGHB2 avec 6.7 ± 0.28 graines.

L'abondance des graines dans les gousses produites par le caroubier, est un caractère distinctif entre les types sauvages et celles cultivées. En effet, les types sauvages sont caractérisés par leur grande production de graines et qui sont généralement petites et non charnues (Marakis et al., 1988 ; Ouchkif, 1988 ; Di Lorenzo, 1991).

- **Taille des graines**

Nous avons remarqué que la taille des graines est très variable. Par ailleurs, la longueur des graines est comprise entre 9.81 mm enregistrée chez la population de TNHL4 et 7.09 mm chez DRKH5. Ainsi, les graines de DRKH5 ont la plus faible largeur (5.0 ± 0.05 mm) et épaisseur (2.9 ± 0.03 mm).

Les différentes variables quantitatives mesurées sont significatives avec P value < 0.001 ce qui indique qu'il y a une diversité phénotypique entre les graines.

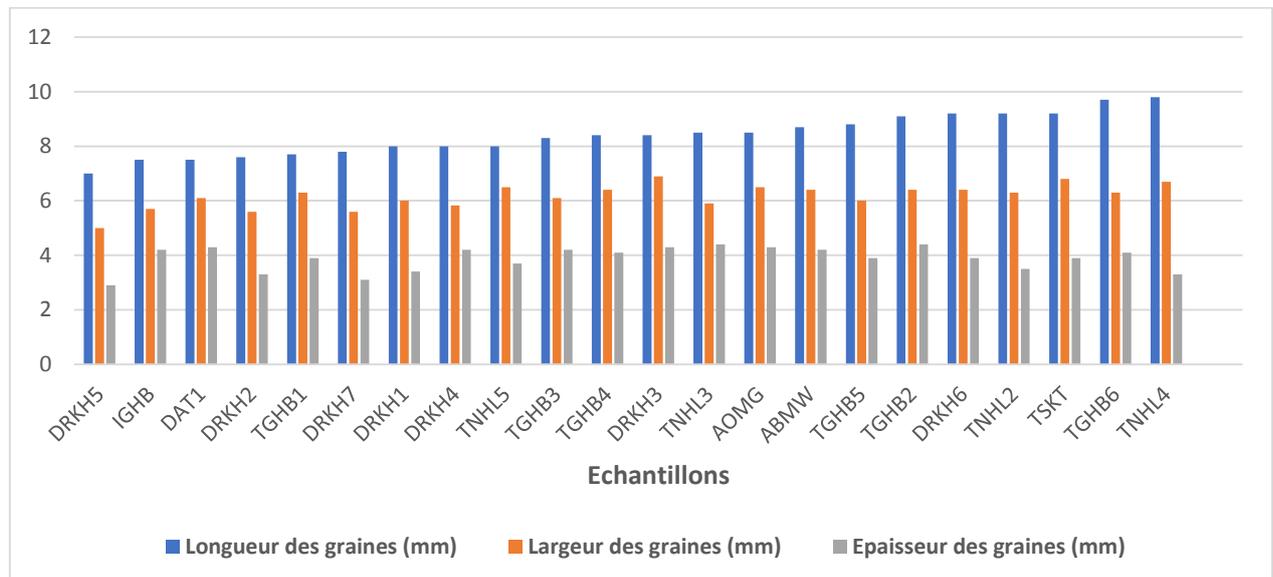


Figure 15:Caractérisation morphologique des graines.

2 Caractérisation physico-chimique de la poudre (de la pulpe et des graines) de caroube

2.1 Détermination de la teneur en matière sèche

La figure suivante représente le taux de matière sèche des différents échantillons étudiés.

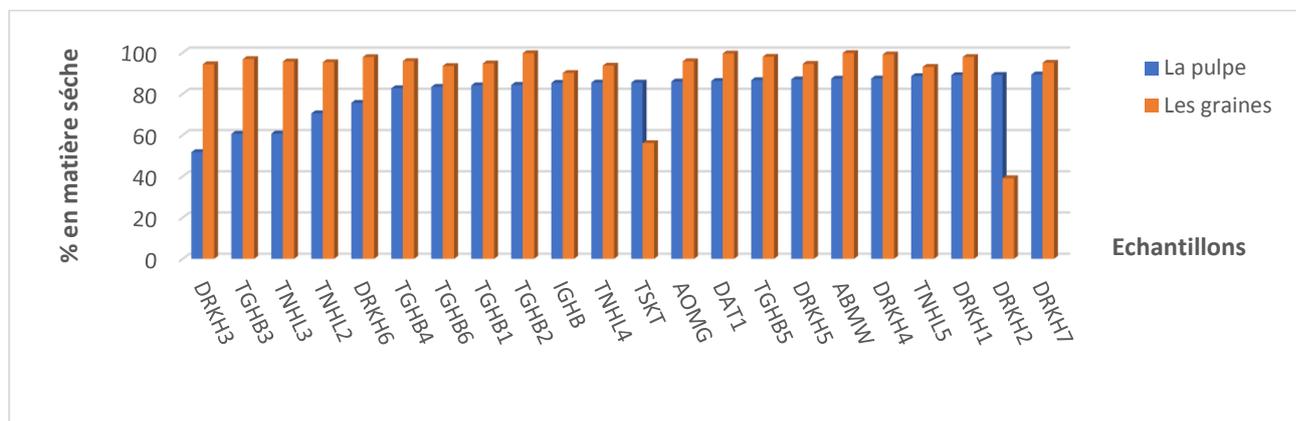


Figure 16 : Taux de la matière sèche exprimé en pourcentage (%) de pulpe et graine des caroubes étudiées.

L'appréciation de la matière sèche repose sur la détermination de la teneur en eau des échantillons à analyser. Le taux de la matière sèche dans les pulpes de caroube des différentes stations a été estimé entre 51,47 % et 89,38 % ; alors que dans les graines, il a été estimé entre 39,09 % et 99,94%.

Le taux de la matière sèche obtenue par Albanell *et al.* (1991) est de 87,31%.

2.2 Détermination du pH

Les résultats de la détermination du pH sont résumés dans la figure 17:

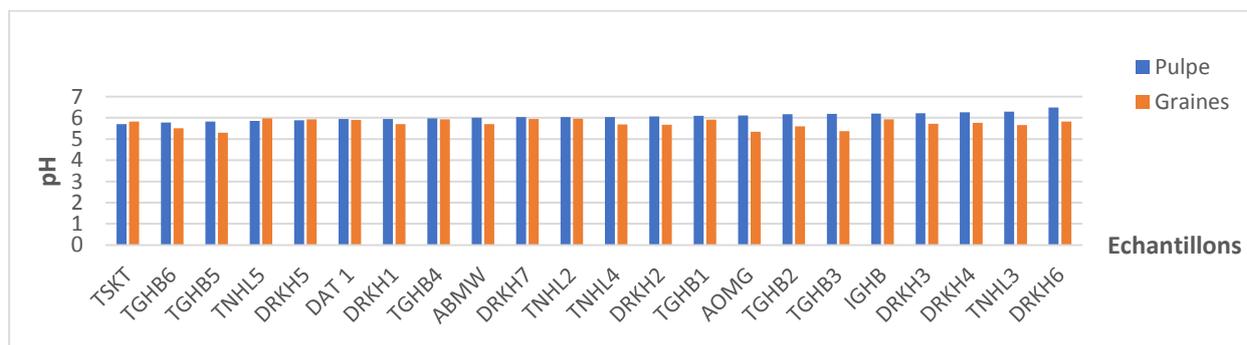


Figure 17 : pH des pulpes et des graines de caroubes.

Selon les résultats exprimés dans la figure 17, On remarque que pour nos échantillons, la pulpe présente une valeur de pH un peu plus élevé que celle de la graine et que nos échantillons soit la pulpe ou les graines ont un pH acide et très proche de celui trouvé par Abi Azar (2008) qui a signalé une valeur de 5.

2.3 Détermination de l'acidité titrable

L'acidité des différents échantillons présentés dans la figure 18 sont exprimées en g d'acide citrique/100g de MS.

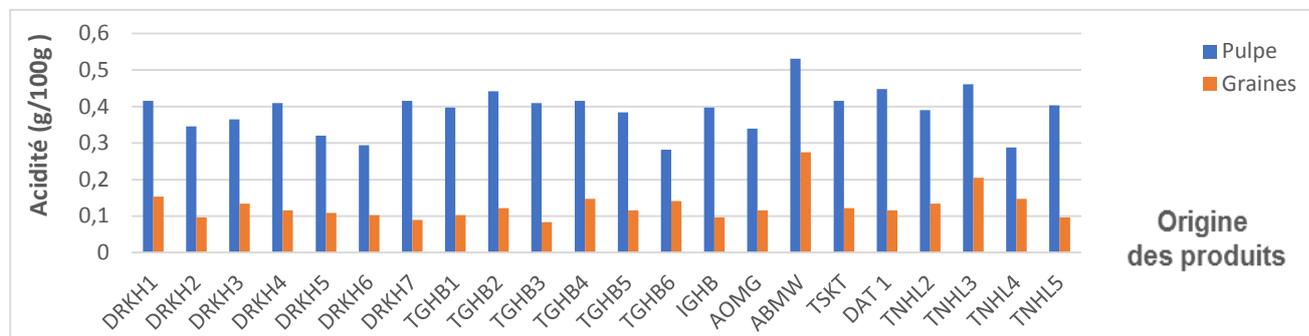


Figure 18 : Acidité titrable exprimé en g/100g des pulpes et des graines de caroube de différentes origines

Nous constatons qu'il existe une grande variation dans les teneurs en acidité entre les différents échantillons étudiés. Ainsi, l'acidité titrable de la pulpe des différentes stations est plus élevée que celle des graines. L'acidité des pulpes étudiée varie significativement d'une station à l'autre et qui est comprise entre (0.28 et 0.53 g/100 g), et entre (0.083 et 0.27 g/100g) pour les graines. Ces valeurs faibles peuvent être expliquées par le pourcentage faible d'acide présent dans les caroubes et justifier que nos échantillons sont de nature neutre.

3 Quantification de quelques composés principaux

3.1 Teneur en sucres totaux

La caroube est caractérisée par sa richesse en sucres, ce qui lui vaut sa saveur très sucrée et son utilisation comme aliment de bétail. Les résultats du dosage des sucres totaux au niveau des pulpes et des graines de caroube sont représentés dans la figure 19 :

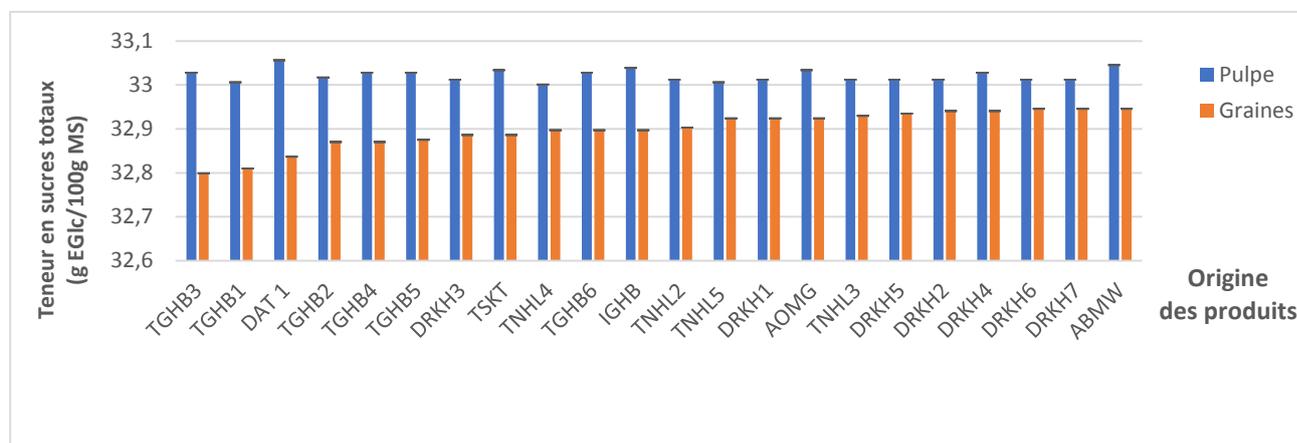


Figure 19: Concentrations en sucres totaux de l'ensemble des échantillons (Pulpes et graines).

D'après les résultats de notre étude, le taux de sucres totaux au niveau de la pulpe est compris entre $33,001 \pm 0.000$ (TNHL4) et $33,056 \pm 0.000$ (DAT1).

Cependant la teneur en sucres des graines est plus faible que celle des pulpes correspondantes et il varie entre $32,799 \pm 0.00$ pour les graines de TGHB3 et $32,963 \pm 0.000$ pour les graines de DRKH7 et de ABMW.

Nos résultats concernant la teneur de la caroube en sucre s'accordent parfaitement avec l'étude conduite par (Gaouar ; 2011) en indiquant que la teneur en sucres de la pulpe algérienne de Blida (45,3%), Jijel (44,9%) et Tlemcen (37,5%) est plus élevée que celles des graines correspondantes (36,3%, 14,4%, 16,1%) pour Jijel, Tlemcen et Blida respectivement.

Les sucres totaux des gousses de caroube obtenues à partir de différentes régions de Maroc ont été de 31,5 à 50,1 g/100 g, respectivement pour les régions d'Essaouira et d'Agadir (El batal *et al.*, 2011).

3.2 Teneur en polyphénols totaux

Le dosage des polyphénols totaux, en équivalent d'acide gallique, des extraits des pulpes et des graines de caroube a été estimé par la méthode de Folin-Ciocalteu.

Les résultats obtenus sont enregistrés dans la figure 20.

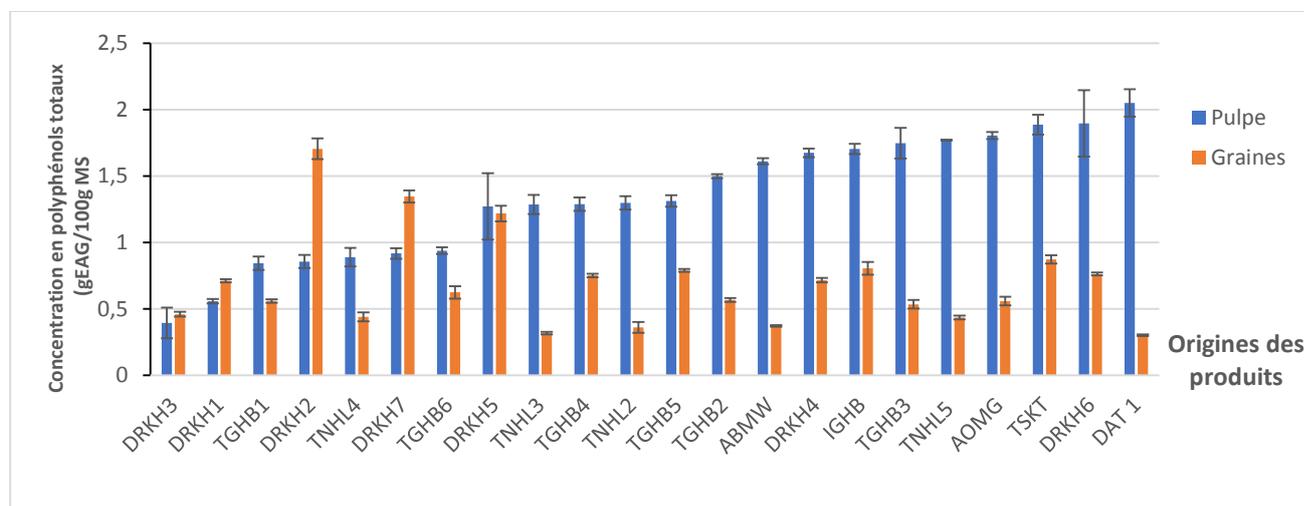


Figure 20: Composition en PPT des extraits éthanoliques des graines et des pulpes de caroube de différentes origines.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une différence significative avec P value <0.001. Ce qui indique qu'il y a une diversité entre les différents échantillons. D'après ces données, on peut déduire que l'extrait éthanolique des pulpes est généralement plus riche en PPT que l'extrait éthanolique des graines sauf pour les caroubes de DRKH1, DRKH2 ; DRKH3 et DRKH7 que nous avons l'inverse.

Pour la pulpe, la concentration en polyphénols totaux varie entre 2.051 ± 0.103 g EqAG/100 g et 0.393 ± 0.115 gEAG/100g.

La teneur des polyphénols la plus élevée au niveau des graines a été détecté pour l'échantillon de DRKH2 (1.705 ± 0.078 gEAG/100g MS).

Par ailleurs les travaux conduits par (Papagiannopoulos *et al* ; 2004), (Ayaz *et al* ; 2007) (Gaouar ; 2011) et (AbiAzar ;2007) sur les graines du caroubier confirment nos résultats en indiquant que l'extrait des pulpes est le plus riche en polyphénols totaux que les graines.

Les résultats que nous avons obtenus sont généralement supérieurs à ceux trouvés par Gaouar (2011) (pulpe : 0,56 g/100g et graine : 0,42 g/100g).En outre d'autres travaux ont mentionnés que la caroube pouvait contenir jusqu'à $1,35 \pm 0.00$ g/100g (Ayaz *et al.*, 2007) .Cette différence observée dans les différentes études peut s'expliquer par la provenance géographique, le cultivar et surtout le degré de maturité, ce qui a été prouvé par les travaux de Abi Azar (2007), réalisés sur des gousses de caroube vertes et qui ont montré que ces dernières contenaient 45,2 g/l de polyphénols totaux. Ainsi, Joslyn *et al.*, (1968) constatent que les gousses vertes contiennent une teneur importante en polyphénols totaux que les gousses mûres (67 mg/g de matière sèche pour les gousses mûres et 204,3 mg/g de matière sèche pour les gousses vertes).

3.3 Teneur en flavonoïdes totaux

Les teneurs en flavonoïdes des pulpes et des graines de caroube des différentes régions étudiées sont illustrées dans la figure 21.

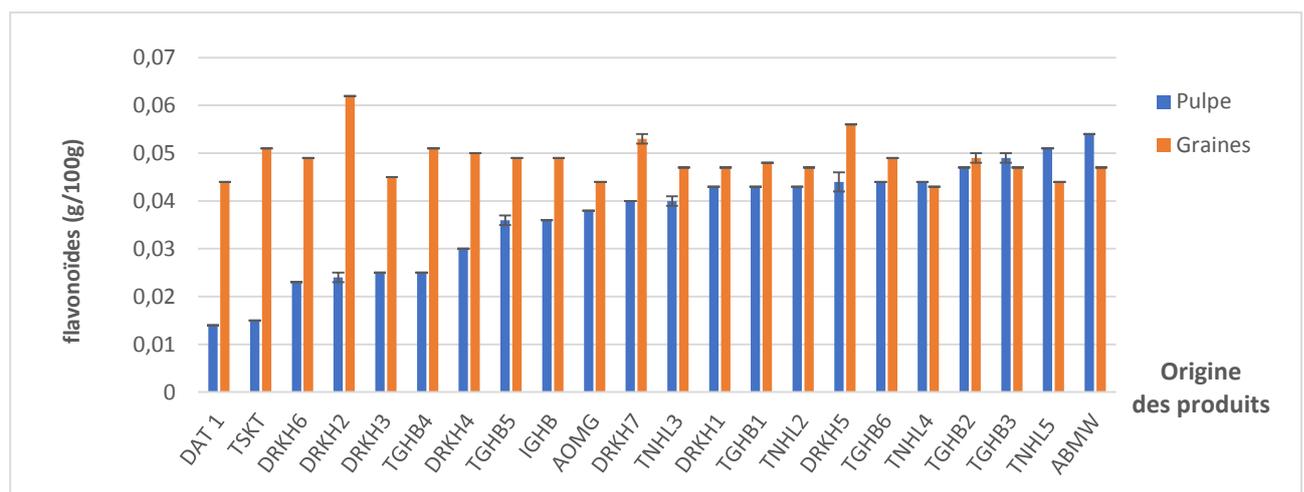


Figure 21:Concentrations en flavonoïdes totaux de l'ensemble des échantillons (Pulpes et graines).

La pulpe de ABMW détient la teneur la plus importante en flavonoïdes ($0,054 \pm 0,000$ g/100g) par rapport aux autres pulpes, avec une différence peu significative entre elle et la pulpe de TNHL5 qui a une teneur de $0,049 \pm 0,001$ g/100g de MS. La pulpe des caroubes de DAT1 et TSKT possède la plus petite concentration en flavonoïdes avec une valeur $0,014 \pm 0,000$ g/100 g et $0,015 \pm 0,000$ g/100 g respectivement.

Concernant les graines on remarque que celles de DRKH2 détiennent la teneur la plus élevée en flavonoïdes par rapport aux autres échantillons étudiés.

On remarque que généralement la teneur en flavonoïdes dans les graines est plus importante que celle présente dans la pulpe.

Selon Ayaz *et al.* (2007) la caroube présente une teneur en flavonoïdes comprises entre 0,04 et 0,05 g/100g, par contre Owen *et al.*, (2003) ainsi que Ortega *et al.*, (2011) ont démontré que le taux de flavonoïdes pouvait être plus élevé avec 0,10 g/100g MS et 0,33g/100g MS respectivement. Selon Makris *et al.* (2007), les teneurs en flavonoïdes sont de 0,92 g équivalent catéchine/100g.

3.4 Teneur en anthocyanes totaux

D'après la figure 22, il apparait clairement que la pulpe de l'échantillon (DRKH1) est le plus riche en anthocyanes avec $84,836 \pm 0,577$ mg/100 g tandis que les pulpes des échantillons (IGHB/TSKT/ DAT1) ont la plus faible teneur avec $2,951 \pm 0,387$; $7,613 \pm 0,736$; $4,857 \pm 0,488$ mg/100 g MS successivement. Cependant, la teneur de différents échantillons de graines de caroube en anthocyanes totaux varie de $62,071 \pm 0,294$ g/100g de MS à $129,124 \pm 0,347$ g/100g de MS. Ces dernières sont représentées successivement par l'échantillon (ABMW) ayant la plus faible valeur et l'échantillon (DRKH5) ayant la teneur la plus élevée. L'analyse de variance à un seul facteur (ANOVA 1) a révélé qu'il existe vraiment un effet significatif de l'échantillon sur le paramètre anthocyanes totaux.

Donc, la teneur en anthocyanes totaux des graines est plus importante que celle des pulpes pour tous les échantillons.

Malheureusement, l'absence des études effectuées sur l'évaluation des teneurs en anthocyanes dans les gousses(pulpe/graine), rend difficile la comparaison de nos résultats avec la littérature.

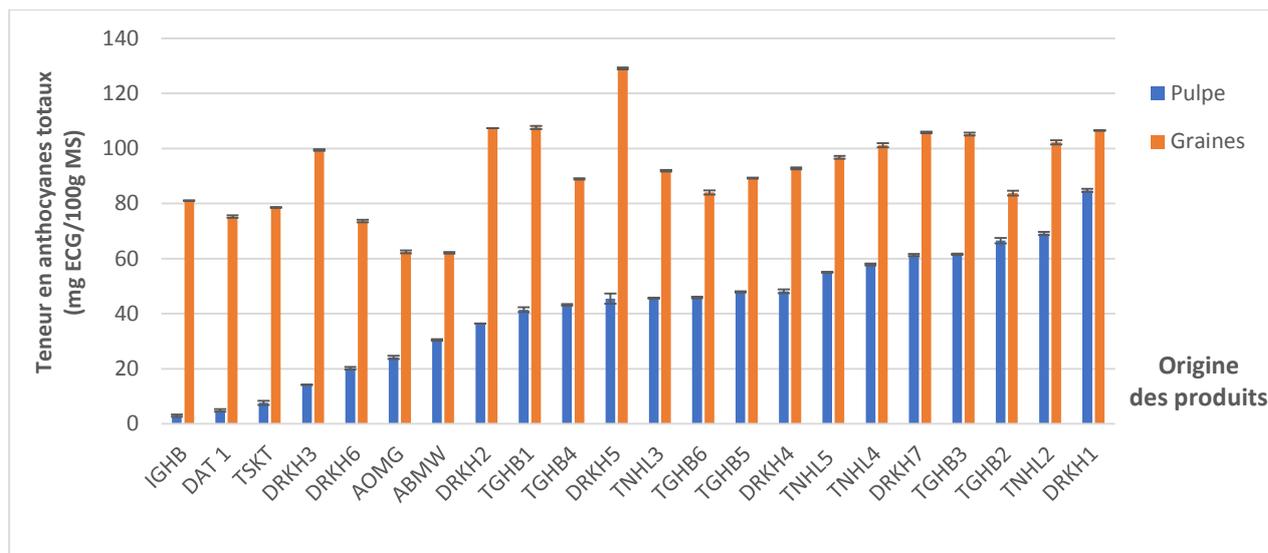


Figure 22 : Concentrations en anthocyanes totaux de l'ensemble des échantillons (Pulpes et graines)

Les conclusions de ces différentes analyses biochimiques sont consignées dans les tableaux en annexes 2 et 3.

4 Analyse statistique par l'ACP

L'analyse en composante principale est un moyen statistique qui permet d'extraire l'essentiel de l'information contenue dans la table des données. Le choix de l'application de l'ACP vient du fait que les résultats des tests obtenus avec les différents échantillons étudiés présentaient autant de différences entre eux qu'une distinction visuelle est impossible avec le nombre important de paramètres analysés pour chaque échantillon.

4.1 Matrice de corrélation

Quelques paramètres présentent des interactions positives entre eux, et d'autres interagissent négativement. Les résultats des corrélations obtenus sont représentés dans le tableau dans l'annexe 4.

Le poids de graines par gousse est corrélé positivement avec leurs dimensions (longueur et largeur, épaisseur des gousses et des graines). A partir de ces résultats, il apparaît donc qu'il est nécessaire de prendre en considération plusieurs paramètres pomologique de la gousse et des graines pour caractériser les caroubiers ayant une teneur en graines importante (demandées par l'industrie au niveau international).

Le poids des graines par gousse est corrélé positivement avec la teneur en sucres totaux et en polyphénols totaux existant dans la pulpe des caroubiers. Cependant, il est corrélé négativement avec les autres paramètres biochimiques.

5 Classification hiérarchique ascendante

La classification à l'aide du dendrogramme a la capacité d'identifier et de clarifier d'avantage les groupes de plus haut niveau de similarité. La C.H.A., basée sur les coordonnées des composantes principales, a montré des rapprochements assez élevés entre certains échantillons de caroubes étudiés. En effet CHA a permis de classer les échantillons en trois groupes distincts selon une stratégie d'agglomération qui se base sur la distance euclidienne (Figure 20).

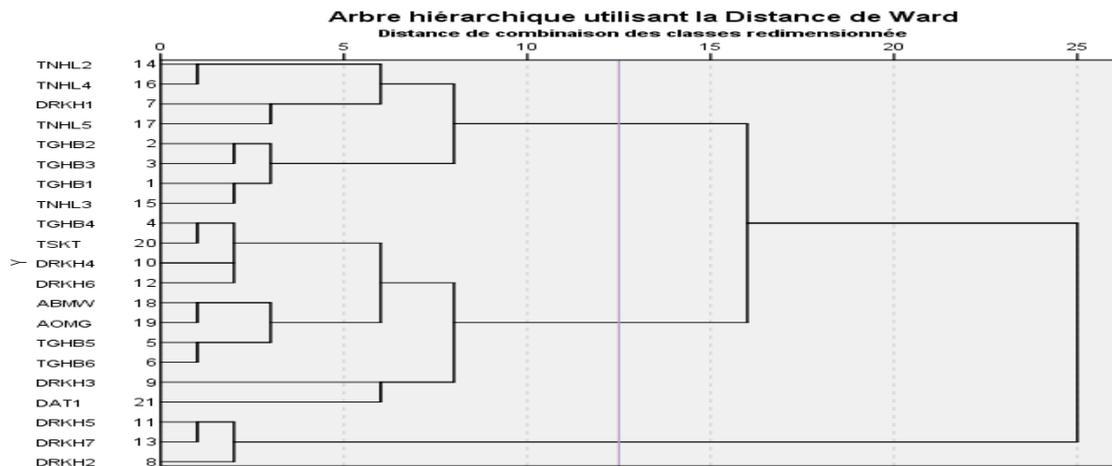


Figure 23: Regroupement des échantillons de caroube selon les caractéristiques pomologiques et biochimiques étudiées.

- Le premier groupe est formé à $d = 1$. Il est constitué par les échantillons de DRKH5, DRKH7 et DRKH 2 ayant des valeurs très proches en métabolites secondaires présents au niveau des graines de caroubes et des faibles valeurs concernant l'ensemble des paramètres morphologiques soit de la gousse ou des graines.
- Le deuxième groupe, formé à $d = 8$, est composé de trois sous-groupes. Le premier et le deuxième sous-groupe sont DAT1 et DRKH3 successivement, le troisième sous-groupe est subdivisé en deux sous-sous-groupes notamment (TGHB4, TSKT, DRKH4, DRKH6) et (ABMW, AOMG, TGHB5 et TGHB6) sont homogène pour la plupart des paramètres morphologiques des caroubes.
- Le troisième groupe, formé également à $d = 8$, est composé de deux sous-groupes. Le premier sous-groupe est formé de : (TNHL2, TNHL4, DRKH1, TNHL5) qui ont des valeurs proches concernant ANT et FVT présent dans les pulpes des caroubes et ont les plus petites concentrations en SST et PPT dans leurs pulpes, et (TGHB2, TGHB3, TGHB1, TNHL3) qui se distinguent des autres échantillons puisqu'ils sont homogènes pour la longueur, la largeur des gousses, la longueur des graines ainsi que les ANT et FVT présent dans la pulpe de ces échantillons.

Conclusion générale et perspectives

Le caroubier est originaire des pays méditerranéens. Il est très négligé et n'a pas encore eu la place qu'il mérite dans les programmes de reboisement et ce, malgré les différentes études et résultats qui ont témoigné que cette plante est très importante aussi bien du point de vue économique (production de fruits ; de bois, création d'emploi, etc.) qu'écologique (résistance à la sécheresse, rôle anti-érosif, conservation des sols.).

Ce travail est focalisé sur l'étude de la variabilité des paramètres pomologiques des graines et des gousses du caroubier, ainsi qu'une étude physico-chimique et biochimique de la pulpe et la graine de caroube collecté de différentes régions du Maroc.

L'analyse des caractères morfo-agronomiques a permis de révéler un polymorphisme inter et intra accessions. Ce qui permet de dire que tous les caractères morphologiques étudiés sont influencés à la fois par les conditions environnementales et par le génotype. En plus les accessions de DRKH3, DAT1, TGHB6, TGHB5, ABMW et AOMG sont ceux qui possèdent des caroubes performantes ayant le critère de la sélection du rendement en graines importantes demandés par les industries au niveau internationale.

La caractérisation physico-chimique de la pulpe et des graines de nos échantillons a aussi montré une diversité inter et entre populations. Les résultats obtenus montrent que le taux de la matière sèche des graines de la majorité des échantillons est plus élevé que celle des pulpes. Cependant, l'acidité titrable des pulpes de l'ensemble des échantillons est plus importante que celle des graines. De plus, nos échantillons ont un pH acide et très proche de celui signalé par plusieurs auteurs.

Les analyses biochimiques ont révélé une richesse des caroubes en sucres totaux avec la teneur présente dans la pulpe est plus importante que celle trouvée dans les graines de la totalité des échantillons. En ce qui concerne les métabolites secondaires, nous avons remarqué que les caroubes sont riches en polyphénol estimé entre (0,339 et 2,051 gEAG/100 g MS de pulpe) et entre (0,301 et 1,705 gEAG/100 g MS des graines), un taux de flavonoïdes estimé entre 0,014 et 0,054 gEQ/100 g MS pour les pulpes, et entre 0,043 et 0,063 gEQ/100 g MS pour les graines. La détermination de la teneur en anthocyanes montre des valeurs assez importantes en ce qui concerne les graines par rapport à celle des pulpes.

Nous remarquons que chaque critère analysé peut être considéré comme un moyen distinctif d'une population de caroubier à l'autre.

L'étude basée sur une analyse statistique de différentes variables pomologiques et biochimiques de la pulpe et des graines du caroubier en utilisant l'ACP et une classification ascendante hiérarchique, a montré comme résultat l'existence d'une diversité intra et entre populations et la classification de nos échantillons en trois groupes qui sont :

Le premier groupe a été formé à d=1. Il englobe les échantillons de DRKH5, DRKH7 et DRKH 2 ayant des valeurs très proches en métabolites secondaires présents au niveau des graines de caroubes et des faibles valeurs concernant l'ensemble des paramètres pomologique de la gousse et des graines.

Le deuxième groupe, formé à d =8, formé par des échantillons homogènes pour la plupart des paramètres morphologiques des caroubes DAT1, DRKH3, TGHB4, TSKT, DRKH4, DRKH6, ABMW, AOMG, TGHB5 et TGHB6.

Le troisième groupe, formé également à d = 8, est composé de TNHL2, TNHL4, DRKH1 et TNHL5 qui ont des valeurs proches concernant ANT et FVT présent dans les pulpes des caroubes et ont les plus petites concentrations en SST et PPT dans leurs pulpes, et les accessions TGHB2, TGHB3, TGHB1, TNHL3 qui se distinguent des autres échantillons puisqu'ils sont homogènes pour la longueur, la largeur des gousses, la longueur des graines ainsi que les ANT et FVT présent dans la pulpe de ces échantillons.

En termes de perspectives et dans le but de compléter ce travail dans l'avenir, il serait intéressant de :

- ✓ Enrichir les données de différentes collections ou accessions avec d'autres informations utiles telles que la nature de plantation (cultivée ou spontanée), âge, exposition les techniques de plantation et de récolte...
- ✓ Déterminer d'autres activités biologiques in vitro et in vivo : antioxydantes, antimicrobiennes et anti-inflammatoires.
- ✓ Élargir cette collection du caroubier en y apportant de nouvelles accessions provenant de toutes les régions du Maroc non étudiées.
- ✓ Evaluer la diversité génétique intra-accession et entre les types sauvages et cultivés au Maroc.

Références bibliographiques

- **Aafi. A. (1996).** Note technique sur le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.), Centre Nationale 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, Agro Paris Tech Ecole Doctorale Abies, Thèse de doctorat, Liban.1-196.
- **Ait Chitt. M. ; Belmir. M. ; Lazrak. A. (2007).** Production des plantes sélectionnées et greffées du caroubier. Transfert de technologie en Agriculture, N°153, IAV Rabat, pp.1-4.
- **Albanell. E. ; Caja. G. ; Plaixats. J. (1991).** Characteristics of Spanish carob pods and nutritive value of carob kibbles. *Options Méditerranéennes - Série Séminaires – n°16*: 135-136.
- **Avallone R, Plessi M., Baraldi M. and Monzani A. (1997),** Determination of Chemical
- **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(*CeratoniaSiliqua L.*):Sugars, Amino And Organic Acids, Minerals And PhenolicCompounds, Journal of food quality , vol. 30, No6, pp. 1040-1055.
- **Batlle I. and Tous J. (1988).** Lineas de investigación sobre el algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.) en el IRTA, Cataluña (España). In: Brito de Carvalho JH, ed. I Encorto Linhas de Investigaçao de Alfarroba. AIDA, Oeiras: AIDA, 92-104.
- **Batlle I. et Tous J. (1997).**Carob tree.*Ceratonia siliqua*L.Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops.17.institute of plant genetic and crops plant research. Gatersleben/international plant resourcesinstitute.Rome .Italy.
- **Baytop T. 1984.** Therapy with medicinal plant in Turkey (Past and Present). Publication of the Istanbul University. No: 3255. Istanbul.
- **Biner B, Gubbuk H., Karhan M., Aksu M. etPekmezci M., (2007),** Sugar profiles of the pods of cultivated and wild types of carob bean (*Ceratonia siliqua L.*) in Turkey, Food Chemistry N°100, pp.1453-1455.
- **Calixto, F.S., Canellas, J., (1982).** Components of nutritional interest in carob pods caroubier. Transfert de technologie en Agriculture, N°1533, IAV Rabat, pp. 1-4.

- **Catarino F.M. & Bento-Pereira F., 1976.** Ecological characteristics and CO₂ fixation in a xerophytic plant (*Ceratonia siliqua* L.). Vardar, Sheikh, Ozturk. Turquia. *Ceratoniasiliqua*. Journal of the Science of Food and Agriculture 33, 1319–1323.
- **Craig W.J. & Nguyen T.T., 1984.** Caffeine and theobromine level in cocoa and carob products. *J. Food Sci.* 49: 302-305.
- **Dakia. P.A. ; Wathelet. B. ; Paquot. M. (2007).** Isolation and chemical evaluation of carob (*Ceratonia siliqua* L.) seed germ Food Chemistry Vol. 102, N° 4, pp. 1368-1374.
- **De Candolle. A. (1983).** L'origine des plantes cultivées. Balière, Paris, France.
- **Dewick PM. (1995).** The biosynthesis of shikimate metabolites. Nat. Prod. Rep.
- **Di Lorenzo R. (1991).** Carrubo Frutticoltura speciale. Ed. REDA, Rome.
- **Diamantoglou and Mitrakos K. (1981).** Leaf longevity in Mediterranean
- **Djeridane A., Yousfi M., Nadjemi B., Boutassouna D., Stocker P. et Vidal N., (2006),** Antioxidant activity of some Algerian medicinal plants extracts containing phenolic compounds, Food Chemistry, N° 97, pp. 654-660.
- **Dubois, M., K. A. Gilles, et al. (1956).** "Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances". Analytical Chemistry 28: 350-356.
- **El Batal. H. ; Hasib. A. ; Ouatmane. A. ; Dehbi. F. ; Jaouad. A. ; Boulli. A. (2011).** Sugar composition and yield of syrup production from the pulp of Moroccan carob pods (*Ceratonia siliqua* L.). Arabian Journal of Chemistry
- **El Hajaji. H. ; Lachkar. N. ; Cherrah. Y. ; Alaoui. K. ; Farah. A. ; Ennabili. B. ; El Bali. B. ; Lachkar. M. (2010).** Antioxidant Properties and Total Phenolic Content of Three Varieties of Carob Tree Leaves from Morocco. *Rec. Nat. Prod.* 4:4 193-204.
- **Estrada C., Vázquez M., Melis B. & Vadell J.,(2006).** Fruticultura de secano. El evergreensclerophylls. In Components of Productivity of Mediterranean Climate Region.
- **Faostat:** The Statistics division of the Food and Agriculture Organization of the United
- **Folch i Guillen R., 1981.** La vegetació dels Països Catalans. Ed. Ketres, Barcelona.
- ganadería ecológica. Eumedia. España.germ proteins. Food Chemistry 107, 675–683.
- **Gaouar N., (2011) :** Etude de la valeur nutritive de la caroube de différentes variétés Algériennes. Mémoire de Magister en Agronomie .Université de Tlemcen.
- **Garro Galvez J.M., Riedl B. et Conner A. H. 1997.**Analytical Studies on Tara Tannins. *Holzforschung* .51 :235-243

- **Gharnit N., Et Mtili N., Ennabili A. T. and Ennabili A. (2001).** Social characterization and exploitation of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) from Mokrisset and Bab Taza (NW of Morocco). *Sci. Lett.* 3 n°2.
- **Gramza et Korczak J . 2005.** Tea constituents (*Camellia sinensis* L.) as antioxidants in lipid systems. *Trends in Food Science and Technology* .16 : 351–358.
- **Grolier. P. ; Borel. P. ; Scalbert. A. ; Remesy. C. (2001).** Les phytomicronutriments. In: *Traité de nutrition clinique de l'adulte, Médecine-Sciences*, Flammarion, 165-177.
- **Hadi. M. (2004).** La quercétine et ses dérivés : molécules à caractère prooxydant ou capteurs de radicaux libres : Etudes et applications thérapeutiques. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur.
- **Haslam. E. (1989).** Plant polyphenols. Vegetable tannins revised. *Cambridge University Press*. Cambridge. 230p.
- **Hillcoat D., Lewis G. & Verdcourt B., 1980.** A new species of *Ceratonia* (Leguminocea-Caesalpinioideae) from Arabia and the Somali Republic. *Kew bull.* 35: 261-271.
- **Hmamouchi M., Tantaoui El-Raki A.,(1999).**Mise en evidence des propriétés antimicrobiennes des tanins extraits d'Ericalyptus . Ed .alBiruniya. Vol. 6 ,(1):9-17.
- **Iipumbu, L., Sigge, G.O., & Britz, T.J. 2008.** Compositional analysis of locally cultivated carob (*Ceratonia Siliqua*) cultivars and development of nutritional food products for a range of market sectors. South Africa: Faculty of AgriSciences, department of Food Sciences, Stellenbosch University.
- **Jones D.K., 1953.** Carob culture in Cyprus, FAO 53/2/1225. FOA. Rome.
- **Joslyn. M.A. ; Nishira. H. ; Ito. S. (1968).** Leucoanthocyanins and related phenolic compounds of carob pods (*Ceratonia siliqua*). *J. Sci. Food Agric.*, N°19, pp.543-550.
- **Kumazawa S., M. Taniguchi, Y. Suzuki, M. Shimura, Mi-Sun Kwon, and T.Nakayama,(2002),** Antioxidant Activity of Polyphenols in Carob Pods. *J.Agric.Food Chem.*, Vol.50.N°2, pp. 373–377.
- **Louca A. & Papas A., 1973.** The effect of different proportions of carob pod meal in the diet on the performance of calves and goats. *Anim. Prod.* 17: 139-146.
- **Lugasi. A. ; Hovari. J. ; Sagi. K.V. ; Biro. L. (2003).** The role of antioxidant phytonutrients in the prevention of diseases. *Acta Biologica Szegediediensis.* 47: 119-124p.

- **Macheix. J.J. ; Fleuriet. A. ; Jaye-Allemand. C. (2005).** Les composées phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'une importance économique. Presses Polytechniques et Universitaires. Romandes. Lausanne. 185p.
- **Makris D.P. & Kefalas P., 2004.** Carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) as a source of polyphenolic antioxidant. Food Technol. Biotechnol. 42: 105-108.
- **MAPMDREF Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime., 2011.** Situation de l'agriculture marocaine. Royaume du Maroc, 9:30-31-32.
- **Marakis S., Kalaitzakis J. and Mitrakos K. (1988).** Criteria for recognizing carob tree varieties. Pp. 558-566 in Proceedings of the II International Carob Symposium (P. Fito and Mulet, eds.) Valencia, Spain.
- **Melgarejo P. & Salazar D.M., 2003.** Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas. Vol. II. Mundi-Prensa. España, pp. 19-162
- **Min B.R. & Hart S.P., 2003.** Tannins for suppression of intestinal parasites. *J. Anim. Sci.* 81: 102-109.
- **Mitrakos K., 1981.** Temperature germination responses in three mediterranean evergreen sclerophylls. In: Margaris N.S. & Mooney H.A., (Eds). Components of Productivity of Mediterranean-climate Regions - Basic and Applied Aspects. Dr.W. Junk Publishers, The Hague/Boston/London. pp. 277-279.
- **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.
- **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.
- **Ortega N., A. Macià, M.P. Romero, J. Reguant and M.J. Motilva (2011),** Matrix composition effect on the digestibility of carob flour phenols by an in- vitro digestion model, Food Chemistry Vol. 124, N°1, pp. 65-71.
- **Ortiz P. L., Arista M. and Talavera S. (1996).** Produccion de nectar y frecuencia de polinizadores en *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinaceae). Anales del Jardin Botanico de Madrid 54:540-546.

- **Ouchkif M. (1988a).** Etude sur le caroubier. Append number 8 of Project Ouest Srou. MARA (Morocco). GTZ (Germany), DPA of Khenefra (unpublished).
- **Ouchkif M. (1988b).** Effet de l'incorporation de proportions élevés de pulpe de caroube sur la digestibilité et l'utilisation de la ration par les Agneaux à l'engraissement. Mémoire de 3ème cycle. IAV Hassan II, Rabat (Maroc).
- **Owen R.W., Haubner R., Hull W.E., Erben G., Spiegelhalder B., Bartsch H., Haber B.,(2003).** Isolation and structure elucidation of the major individual polyphenols in carob fibre. *FoodChemToxicol.* 41, 1727–1738.
- **Papagiannopoulos M., H.R. Wollseifen, A. Mellenthin, B. Haber and R. Galensa (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.
- **Parrado J., J. Bautista, E.J. Romero, A.M. García-Martínez, V. Friaiza and M.**
- **Petit M. D. & Pinilla J. M., (1995).** Production and Purification of a Sugar Pods Syrup from Carob Pods *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 28, 145-152.
- **Pietta P. G. 2000.** Flavonoids as Antioxidants. *Journal of Natural Products.* 63 :1035-1042
- **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.
- **Retana J., Ramoneda J. and Garcia del Pino F. (1990).** Importancia de los insectos en la polinizacion del algarrobo. *Bol. San. Veg. Plagas,* 16:143-150.
- **Rubanza D.K., Shemb M.N., Otsyinac R., Bakengesac S.S., Ichinohed T.,Fujiharad T. 2005.** Polyphenolics and tannins effect on in vitro digestibility of selected Acacia species leaves. *Animal Feed Science and Technology .* 119 : 129– 142
- **Sahle M., Coleon J. & Haas C., 1992.** Carob pod (*Ceratonia siliqua*) meal in geese diets. *Brit. Poultry Sci.* 33: 531-541.
- **Sandolo, C., Coviello, T., Matricardi, P., Alhaique, F., 2007.** Characterization of polysaccharide hydrogels for modified drug delivery. *Eur. Biophys. J.* 36 (7), 693–700.
- **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.

- **Schweinfurth G. (1894).** Sammlung arabisch-aethiopischer Pflanzen, Ergebnisse von Reisen in dem Jahren 1881, 1888-89, 1891-92. Bull, Herb. *Boissier* 2:1-114.
- **Sidina M.M., El Hansali M., Wahid N., Ouatmane A., Boulli A., Haddioui A. (2009).** Fruit and seed diversity of domesticated carob. *Scientia Horticulturae*. 123: 110-116.
- **Thomson P., 1971.** The carob in California. California Rare Fruit Growers Yearbook III: 61-102.
- **Tucker. S.C. (1992).** The developmental basis for sexual expression in *Ceratonia siliqua* (Leguminosae: Ceasalpinoideae: Cassieae). *Am. J. Bot.* Vol.79, N°3, pp. 367-327.
- **Tutin T. G., Burges N. A., Chater A. O., Edmondson, Heywood V. H., Moore D. M., Valetine D. H., Waters S. M. and Webb D.A. (1990/93).** *Flora Europaea*. Cambridge University Press. UK.
- **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.
- **Vidal D. (1985).** El troceado como etapa previa al aprovechamiento industrial de la garrofa *In* Jornadan sobre la garrofa. Liria (Valencia) (unpublished).
- **Whiteside L. (1981).** The carob cookbook. Ed. Thorsons Publishers Limited, Wellingborough. Northamptonshire.
- **Zohary M. & Orshan G., 1959.** The maquis of *Ceratonia siliqua* in Israel. *Palest. J. Bot.* Jerusalem. 8: 385-397.
- **Zohary M., 1973.** Geobotanical Foundations of the Middle East, 2 vols. Stuttgart.
- **Zouhair. O. (1996).** Le caroubier: situation actuelle et perspectives d'avenir. Document interne, Eaux et forêts. Maroc.

Annexes

Annexe 1 :

Tableau 8:Caractéristiques morphologiques des gousses et des graines de caroubes.

Accession	Longueur des gousses (cm)	Largeur des gousses (mm)	Epaisseur des gousses (mm)	Poids des gousses (g)	Nombre de graines/gousse	Poids de graines/gousse	Longueur des graines (mm)	Largeur des graines (mm)	Epaisseur des graines (mm)
TGHB1	13.2±0.22 cd	15.6±0.19 a	4.5±0.05 de	4.5±0.14 d	7.6±0.4 abc	1.0±0.06 ab	7.7±0.08 bcd	6.3±0.04 fg	3.9±0.04 e
TGHB2	15.4±0.27 ghi	17.5±0.16 cd	5.1±0.07 hi	6.3±0.18 ef	6.7±0.28 a	1.3±0.05 cde	9.1±0.07 i	6.4±0.04 g	4.4±0.03 g
TGHB3	12.9±0.19 c	17.3±0.22 bcd	5.3±0.04 ij	5.8±0.19 e	9.6±0.35 de	1.4±0.05 efg	8.3±0.09 fg	6.1±0.05 ef	4.2±0.06 fg
TGHB4	13.4±0.21 cd	17.8±0.15 de	5.4±0.05 j	6.4±0.14 ef	8.5±0.25 bcd	1.3±0.03 def	8.4±0.06 g	6.4±0.05 g	4.1±0.05 efg
TGHB5	16.1±0.19 hij	19.1±0.15 f	4.4±0.04 d	6.4±0.14 ef	11.9±0.31 fg	1.7±0.05 ghi	8.8±0.09 h	6.0±0.05 de	3.9±0.05 d
TGHB6	16.0±0.25 hij	18.3±0.19 e	5.7±0.06 k	9.3±0.23 i	10.1±0.41 de	1.7±0.06 ghi	9.7±0.10 j	6.3±0.07 fg	4.1±0.05 ef
DRKH1	14.4±0.29 defg	17.0±0.12 bcd	3.9±0.04 c	4.1±0.13bcd	10.7±0.42 ef	1.2±0.04 bcde	8.0±0.06 ef	6.0±0.05 cde	3.4±0.03 c
DRKH2	13.7±0.37 cde	16.9±0.2 bc	3.6±0.03 b	3.5±0.13 ab	10.0±0.44 de	1.0±0.04 abc	7.6±0.11bc	5.6±0.07 b	3.3±0.06 c
DRKH3	17.0±0.3 ab	17.0±0.22 bcd	6.5±0.11 l	5.8±0.26 h	13.4±0.32 h	2.3±0.06 i	8.4±0.09 g	6.9±0.07 h	4.3±0.04 fg
DRKH4	14.0±0.32 cdef	15.8±0.11 g	4.8±0.05 fg	6.0±0.19 de	11.0±0.43 efg	1.5±0.05 efg	8.0±0.05 de	5.83±0.04bcd	4.2±0.03 fg
DRKH5	14.3±0.18 defg	15.5±0.14 a	2.8±0.04 a	3.0±0.07 a	12.0±0.28 fg	0.9±0.01 a	7.0±0.06 a	5.0±0.05 a	2.9±0.03 a
DRKH6	15.1±0.39 jk	17.5±0.27 cd	5.4±0.06 j	6.7±0.31 f	10.7±0.37 ef	1.7±0.07 hi	9.2±0.13 i	6.4±0.07 g	3.9±0.07 e
DRKH7	14.1±0.24 cdef	16.6±0.31 b	3.6±0.03 b	3.8±0.08 bc	11.0±0.37 efg	1.1±0.03 abc	7.8±0.07 cde	5.6±0.05 b	3.1±0.03 b
TNHL2	14.9±0.32 efg	21.1±0.05 g	4.5±0.33 d	6.1±0.26 ef	8.0±0.04 abc	1.1±0.04 bcd	9.2±0.05 i	6.3±0.04 fg	3.5±0.05 c
TNHL3	12.0±0.15 b	16.6±0.07 b	4.8±0.34 fg	4.2±0.21 cd	7.8±0.06 abc	1.2±0.06 bcd	8.5±0.11 g	5.9±0.06 cde	4.4±0.08 j
TNHL4	15.9±0.34 hij	21.0±0.26 a	4.5±0.07 de	5.7±0.24 e	8.6±0.53 cd	1.4±0.09 efg	9.8±0.07 j	6.7±0.07 h	3.3±0.02 c
TNHL5	16.6±0.18 ijk	15.7±0.14 a	3.9±0.04 c	4.5±0.07 d	12.1±0.27 g	1.8±0.04 i	8.0±0.09 ef	6.5±0.06 g	3.7±0.06 d
ABMW	17.2±0.53 k	17.0±0.24 bcd	4.6±0.09 def	5.7±0.18 e	9.5±0.54 de	1.6±0.08 fghi	8.7±0.09 gh	6.4±0.06 g	4.2±0.11 fg
AOMG	16±0.11 hij	18.4±0.07 e	4.7±0.07 efg	8.0±0.21 g	10.1±0.35 de	1.5±0.13 fgh	8.5±0.06 g	6.5±0.07 g	4.3±0.04 fg
IGHB	10.5±0.22 a	17.3±0.31 bcd	5.0±0.08 gh	3.0±0.09 a	7.0±0.28 ab	0.8±0.03 a	7.5±0.06 i	5.7±0.04 bc	4.2±0.04 fg
TSKT	13.4±0.58 cd	17.5±0.19 cd	5.4±0.09 j	6.2±0.30 ef	8.5±0.46 bcd	1.5±0.08 fgh	9.2±0.09 b	6.8±0.07 h	3.9±0.09 e
DAT1	15.4±0.24 a	15.8±0.19 g	8.1±0.14 m	7.7±0.19 g	12.1±0.44 fg	1.8±0.06 i	7.5±0.10 b	6.1±0.07 e	4.3±0.05 h

Annexe 2 :

Tableau 9:Caractérisation biochimique des pulpes de la caroube

Pulpe	Sucres totaux (g/100g)	Polyphénols totaux (g/100g)	Flavonoïdes (g/100g)	Anthocyanes (mg/100g)
DRKH1	33,012±0.00 abc	0.558 ±0.017 a	0,043±0,000 fgh	84,836±0,577 v
DRKH2	33,012±0.00 abc	0.856 ± 0.049 b	0,024±0,001 b	36,404 ±0,031 h
DRKH3	33,012±0.00 abc	0.393 ± 0.115 a	0,025±0,000 b	14,186±0,146 d
DRKH4	33,028±0.005 bcde	1.675 ±0.032 ef	0,030±0,000 c	48,195±0,702 l
DRKH5	33,012±0.00 abc	1.271 ± 0.250 cd	0,044±0,002 hi	45,497±1,846 k
DRKH6	33,012±0.00 abc	1.898±0.250 fg	0,023±0,000 b	20,217±0,446 e
DRKH7	33,012±0.00 abc	0.917±0.04 b	0,040±0,000 ef	61,293±0,379 o
TGHB1	33,006±0.005 ab	0.844±0.05 b	0,043±0,000 fgh	41,471±0,838 j
TGHB2	33,017±0.005	1.499±0.015 de	0,047±0,000 i	66,577±0,992 p
TGHB3	33,028±0.00 cdef	1.748±0.116 efg	0,049±0,001 j	61,6±0,231 o
TGHB4	33,028±0.005 bcde	1.289±0.051 cd	0,025±0,000 b	43,217 ±0,300 j
TGHB5	33,028±0.00 cdef	1.312±0.043 cd	0,036±0,001 c	47,88 ±0,239 i
TGHB6	33,028±0.00 cdef	0.938±0.025 bc	0,044±0,000 ghi	45,88 ±0,247 l
IGHB	33,039±0.005 ef	1.704±0.039 efg	0,036±0,000 d	2,951 ±0,387 a
AOMG	33,034±0.005 def	1.805±0.027 efg	0,038±0,000 de	24,12 ±0,599 f
ABMW	33,045±0.000 fg	1.611±0.023 def	0,054±0,000 k	30,426 ±0,287 g
TSKT	33,034±0.005 def	1.887±0.075 fg	0,015±0,000 a	7,613 ±0,736 c
DAT 1	33,056±0.005 g	2.051±0.103 g	0,014±0,000 a	4,857 ±0,488 b
TNHL2	33,012±0.009 abc	1.298±0.05 cd	0,043±0,000 ghi	69,164 ±0,568 u
TNHL3	33,012±0.00 abc	1.286±0.002 cd	0,040±0,001 efg	45,675 ±0,204 k
TNHL4	33,001±0.005 a	0.890±0.071 b	0,044±0,000 hi	57,88 ±0,354 n
TNHL 5	33,006±0.005 ab	1.771±0.004 efg	0,051±0,000 j	55,022 ±0,197m

Remarque : A l'intérieur d'une même colonne, les moyennes ayant au moins une lettre ou un groupe lettre en commun ne sont pas significativement différentes (SNK 5%).

Annexe 3 :

Tableau 10 : Caractérisation biochimique des graines de la caroube.

Graines	Sucres totaux (g/100g)	Polyphénols totaux (g/100g)	Flavonoïdes (g/100 g)	Anthocyanes (g/100g)
DRKH1	32,924±0.014 bc	0.711±0.013 de	0,047±0,000 bc	106,546±0,050 lm
DRKH2	32,941±0.021 bc	1.705±0.078 j	0,062±0,000 h	107,435±0,031 m
DRKH3	32,886±0.033 abc	0.459±0.018 bc	0,045±0,000 ab	99,444±0,297 j
DRKH4	32,941±0.045 bc	0.716±0.016 de	0,050±0,000 de	92,822±0,324 h
DRKH5	32,935±0.010 bc	1.218±0.059 h	0,056±0,000 g	129,124±0,347 n
DRKH6	32,946±0.009 bc	0.762±0.011 ef	0,049±0,000 cd	73,617±0,479 b
DRKH7	32,946±0.018 c	1.346±0.046 i	0,053±0,001 f	105,893±0,294 l
TGHB1	32,81±0.010 a	0.559±0.013 cd	0,048±0,000 cd	107,64±0,606 m
TGHB2	32,87±0.038 abc	0.567±0.014 cd	0,049±0,001 cd	83,822±0,844 f
TGHB3	32,799±0.00 a	0.534±0.033 cd	0,047±0,000 abc	105,293±0,546 lm
TGHB4	32,87±0.019 abc	0.751±0.014 ef	0,051±0,000 ef	89,004±0,243 i
TGHB5	32,875±0.023 abc	0.789±0.011 ef	0,049±0,000 cd	89,253±0,215 g
TGHB6	32,897±0.009 abc	0.624±0.047 d	0,049±0,000 cd	84,062±0,732 f
IGHB	32,897±0.018 abc	0.804±0.048 ef	0,049±0,000 cd	81,124±0,111 e
AOMG	32,924±0.010 bc	0.558±0.032 cd	0,044±0,000 a	62,475±0,549 a
ABMW	32,946±0.009 c	0.370±0.006 ab	0,047±0,000 abc	62,071±0,294 a
TSKT	32,886±0.027 abc	0.873±0.031 f	0,051±0,000 ef	78,583±0,074 d
DAT 1	32,837±0.019 ab	0.301±0.005 a	0,044±0,000 a	75,271±0,479 c
TNHL2	32,903±0.027 abc	0.360±0.040 ab	0,047±0,000 bcd	102,253±0,733 k
TNHL3	32,93±0.018 bc	0.317±0.010 ab	0,047±0,000 bc	91,942±0,300 h
TNHL4	32,897±0.025 abc	0.440±0.034 abc	0,043±0,000 a	101,208±0,790 k
TNHL5	32,924±0.010 bc	0.434±0.015 abc	0,044±0,000 a	96,76±0,537 i

Annexe 4 :

Tableau 11:Corrélations entre les différents paramètres morphologiques et biochimiques mesurés

	Log_Gs	Lar_Gs	E_Gs	P_Gs	N_Gr_Gs	P_Gr/Gs	Log_Gr	Lar_Gr	E_Gr	SST_P	ST_Gr	PPT_P	PPT_Gr	FVT_P	FVT_Gr	ANT_P	ANT_Gr
Log_Gs	1,000																
Lar_Gs	0,250	1,000															
E_Gs	0,169	0,003	1,000														
P_Gs	0,396	0,387	0,693	1,000													
Nmb_Gr_Gs	0,445	-0,334	0,090	-0,035	1,000												
P_Gr_Gs	0,656	0,019	0,653	0,564	0,534	1,000											
Log_Gr	0,297	0,767	0,229	0,592	-0,419	0,306	1,000										
Lar_Gr	0,413	0,397	0,515	0,538	-0,209	0,612	0,656	1,000									
E_Gr	0,095	-0,098	0,703	0,616	-0,167	0,544	0,265	0,501	1,000								
SST_P	0,159	-0,123	0,581	0,583	0,129	0,343	-0,023	0,086	0,535	1,000							
SST_Gr	0,196	-0,027	-0,493	-0,273	0,231	-0,086	-0,010	-0,281	-0,363	-0,206	1,000						
PPT_P	-0,003	-0,125	0,287	0,369	-0,048	0,176	0,050	0,088	0,383	0,577	-0,060	1,000					
PPT_Gr	-0,302	-0,213	-0,533	-0,467	0,176	-0,465	-0,393	-0,602	-0,625	-0,219	0,356	-0,250	1,000				
FVT_P	0,188	0,115	-0,531	-0,221	-0,228	-0,266	0,093	-0,117	-0,148	-0,317	0,051	-0,169	-0,241	1,000			
FVT_Gr	-0,423	-0,251	-0,469	-0,451	-0,016	-0,545	-0,369	-0,643	-0,472	-0,141	0,296	-0,190	0,913	-0,226	1,000		
ANT_P	-0,167	0,237	-0,574	-0,356	-0,276	-0,502	0,040	-0,300	-0,384	-0,509	0,050	-0,364	0,039	0,691	0,023	1,000	
ANT_Gr	-0,389	-0,144	-0,528	-0,713	0,116	-0,514	-0,458	-0,547	-0,680	-0,661	-0,072	-0,567	0,419	0,220	0,399	0,518	1,000

Annexe 5 :

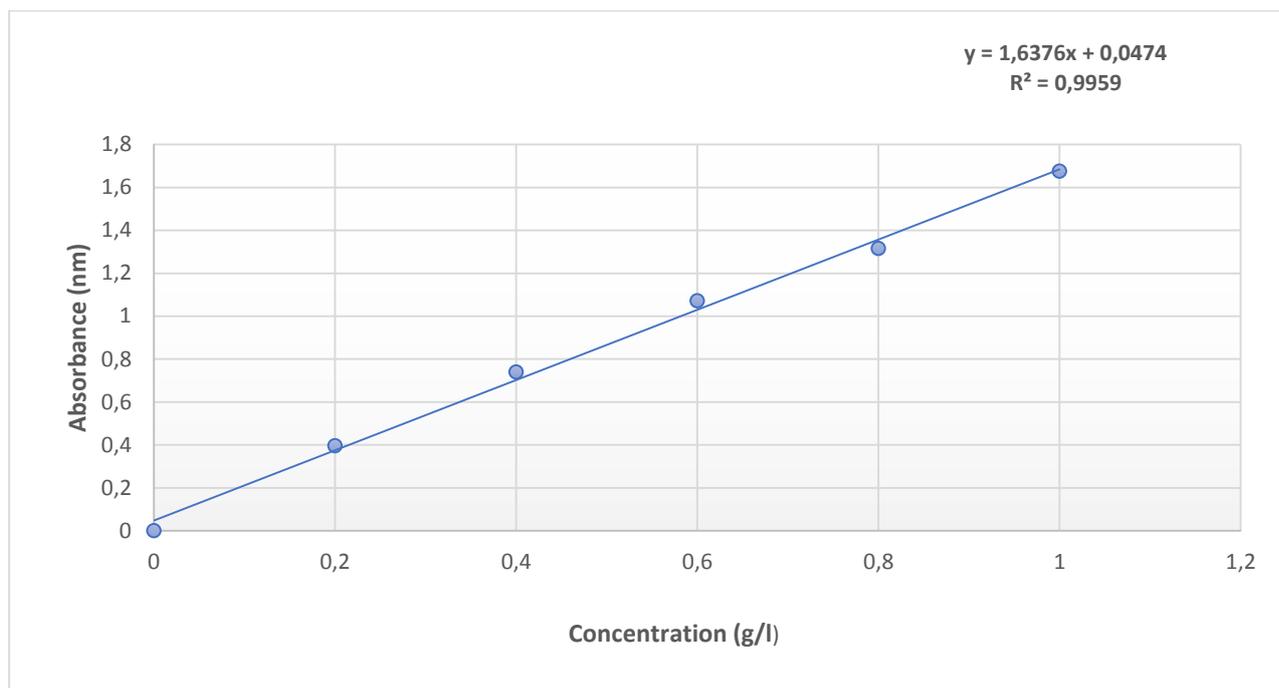


Figure 24: Droite d'étalonnage de l'acide gallique.

Annexe 6 :

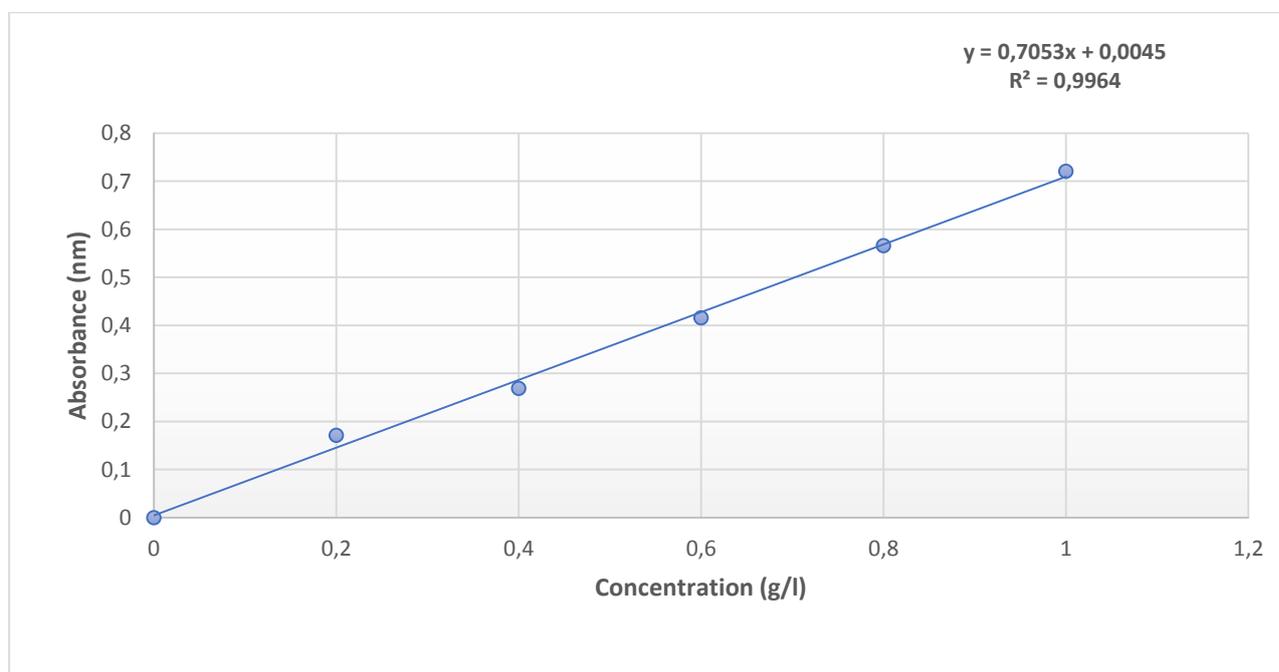


Figure 25: Droite d'étalonnage de glucose.

Annexe 7 :

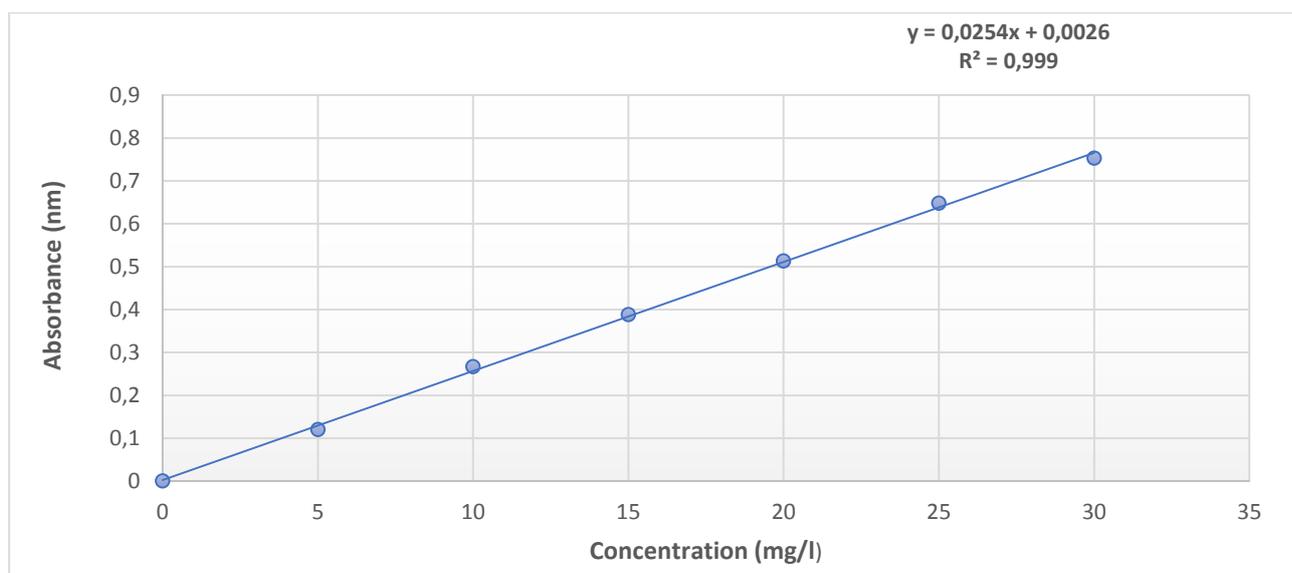


Figure 26: Droite d'étalonnage de la quercétine