



DEMOCRATIC AND POPULAR ALGERIAN REPUBLIC
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC
RESEARCH
جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف
CHADLI BENDJEDID EL TARF UNIVERSITY
كلية علوم الطبيعة والحياة
FACULTY OF NATURE AND LIFE SCIENCES
قسم البيولوجيا



Mémoire de Fin d'Études
Présenté en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en

«**Biologie végétale et environnement**»

Thème

**Modélisation de la répartition du caroubier (*Ceratonia
siliqua* L.) en Algérie : tendances actuelles et futures face au
changement climatique**

Présentées Par : **M^{elle}** Nouari Nourhane
M^{elle} Laouami Ahlem

Soutenue publiquement le : 14/06/2026

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Dr. ZAIDI Raouf	M.C.A	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Président
Dr. AOUADI Abdallah	M.C.B	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Directeur de thèse
Dr. AYAICHIA Fethi	M.C.B	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Co- Directeur de thèse
Dr. SIOUANE Nouredine	M.C.B	Université Chadli Bendjedid-El-Tarf	Examinateur

Année universitaire : 2025/2026

Remerciment

En premier lieu, je remercie Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour atteindre mes objectifs et de dépasser toutes les difficultés afin de réaliser ce travail.

Je remercie tout particulièrement **Dr Aouadi Abdallah**, mon encadreur, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, son encadrement rigoureux et ses encouragements tout au long de ce travail.

Je remercie sincèrement **Dr Ayaichia Fethi**, pour son accompagnement bienveillant, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous vifs remerciements vont également aux membres du jury : **Dr. Zaidi Raouf** et **Dr. Siouane Noureddine** pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail en acceptant de présider et d'examiner notre modeste travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nourhene & Ahlem

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à qui Dieu a dit:

(و اخفض لهما جناح الذل من الرحمة و قل رب ارحمهما كما ربياني صغيرا)

الاسراء/24

À mon père bien-aimé, **KAMAL**, modèle de droiture et de sagesse, à qui je dois tout. Tu m'as élevé avec amour, patience et exigence, m'inspirant chaque jour par ta force, ton intégrité et tes valeurs nobles, qui resteront à jamais gravées dans mon cœur et ma mémoire.

À ma chère mère **NAIMA**, source infinie de tendresse et de dévouement. Toi qui m'as donné la vie, soutenu sans relâche, et sacrifié tant de choses pour mon bonheur. Ton amour inconditionnel, ton courage et ta foi en moi ont été les piliers de ma réussite. Je te dois bien plus que des mots ne sauraient l'exprimer.

À ma sœur **KHOLOUD** et à mon frère **TAKI EDDINE** à qui je dois tout l'amour, avec tous mes vœux de réussite dans leurs vies.

Nourhene

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma chère famille, pour son amour, son soutien, sa patience et ses encouragements constants tout au long de mon parcours.

A mes parents, qui ont toujours cru en moi et m'ont donné la force d'avancer.

A tous les membres de ma famille, en témoignage de ma profonde gratitude et mon immense affection.

Je me dédie également ce travail, pour tous les efforts, la persévérance et la volonté qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici.

Ahlem

Résumé

Cette étude examine la distribution actuelle et future du caroubier (*Ceratoniasiliqua L.*) en Algérie face aux défis du changement climatique. L'objectif principal est de modéliser la niche écologique de l'espèce afin d'identifier les zones favorables et de quantifier l'impact des projections climatiques futures. La méthodologie repose sur l'utilisation de deux algorithmes d'apprentissage automatique, les arbres de régression boostés (BRT) et les forêts aléatoires (RF), calibrés à partir de données d'occurrence collectées via le GBIF et la littérature scientifique. Les modèles ont montré une performance prédictive exceptionnelle, avec une aire sous la courbe (AUC) d'environ 0,97. Les résultats démontrent que la distribution du caroubier est principalement concentrée dans la frange nord de l'Algérie, particulièrement dans les régions côtières et sublittorales de l'Atlas tellien. Les variables liées aux précipitations, notamment celles du mois le plus humide et la pluviométrie annuelle totale, apparaissent comme les déterminants environnementaux les plus influents, soulignant que la disponibilité en eau est le facteur limitant majeur de l'espèce. Sous le scénario climatique intermédiaire SSP2-4.5, les projections aux horizons 2050 et 2070 révèlent une vulnérabilité alarmante. Les habitats favorables devraient subir une contraction massive d'environ 49 %, passant de 93 980 km² actuellement à seulement 47 896 km² d'ici 2080. Cette régression est marquée par une diminution de la convenance climatique dans les zones de haute probabilité actuelle. En conclusion, ces résultats soulignent l'urgence de mettre en œuvre des stratégies de conservation et de valorisation durable, telles que l'identification de zones refuges et l'intégration du caroubier dans les programmes de reboisement pour contrer les effets du réchauffement climatique en Algérie.

Mots-clés : *Ceratoniasiliqua L.*, SDM, distribution spatiale, facteurs bioclimatiques, Algérie.

Abstract

This study investigates the current and future distribution of the carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Algeria within the context of climate change. The primary objective is to model the species' ecological niche to identify suitable areas and quantify the impact of future climate projections. The methodology employs two machine learning algorithms including Boosted Regression Trees (BRT) and Random Forests (RF) calibrated using occurrence data from the GBIF and scientific literature. The models demonstrated exceptional predictive performance, yielding an Area Under the Curve (AUC) of approximately 0.97. Results indicate that the carob tree's distribution is predominantly concentrated in northern Algeria, specifically within the coastal and sub-coastal regions of the Tell Atlas. Precipitation-related variables, particularly rainfall during the wettest month and total annual precipitation, emerged as the most influential environmental determinants. This underscores water availability as the primary limiting factor for the species' distribution and survival. Under the intermediate SSP2-4.5 climate scenario, projections for the 2050 and 2070 horizons reveal alarming vulnerability. Suitable habitats are expected to undergo a massive contraction of approximately 49%, decreasing from 93,980 km² currently to just 47,896 km² by 2080. This regression is characterized by a significant decline in climatic suitability across areas currently identified as highly favorable. In conclusion, these findings emphasize the urgent need for sustainable conservation and development strategies. This includes identifying climate refugia and integrating the carob tree into national reforestation programs to mitigate the impacts of global warming on Algeria's phytogenetic resources.

Keywords : *Ceratonia siliqua* L., SDM, spatial distribution, bioclimatic factors, Algeria

ملخص

تناول هذه الدراسة النمذجة المكانية للتوزيع الحالي والمستقبلي لشجرة الخروب (*Ceratonia siliqua* L.) في الجزائر في ظل سيناريوهات التغير المناخي. يهدف البحث بشكل رئيسي إلى تحليل تأثير المتغيرات المناخية والطبوغرافية على النطاق الجغرافي لهذا النوع المتوسطي، وتحديد المناطق المؤهلة بيئياً لتطوره على المستوى الوطني. اعتمدت المنهجية على خوارزميات التعلم الآلي، وتحديدًا أشجار الانحدار المعززة (BRT) والغابات العشوائية (RF)، حيث تم استخلاص بيانات التواجد من قاعدة بيانات (GBIF) والمراجع العلمية ذات الصلة. وقد أظهرت النماذج دقة تنبؤية عالية جداً، حيث بلغت قيمة المساحة تحت المنحنى (AUC) حوالي 0.97.

كشفت النتائج أن توزيع الخروب يتركز بشكل أساسي في المنطقة الشمالية للجزائر، لا سيما في المناطق الساحلية وما قبل الساحلية للأطلس التلي. وتُعد المتغيرات المتعلقة بالتساقط المطري، وخاصة الأمطار خلال الشهر الأكثر رطوبة وإجمالي الأمطار السنوية، هي المحددات البيئية الأكثر تأثيراً، مما يؤكد أن وفرة المياه تمثل القيد البيئي الأول لانتشار هذا النوع.

وفقاً لسيناريو المناخ المتوسطي (SSP2-4.5)، تشير التوقعات المستقبلية لآفاق 2050 و2070 إلى انكماش حاد في الموائل الملائمة بنسبة تصل إلى 49%، حيث ستتراجع المساحة من 93,980 كم² حالياً إلى 47,896 كم² بحلول عام 2080. هذا التراجع يبرز الحساسية العالية لشجرة الخروب تجاه التغيرات المناخية المتوقعة. وتخلص الدراسة إلى ضرورة وضع استراتيجيات عاجلة للحفاظ والتنميين المستدام، مع توجيه عمليات الغرس مستقبلاً نحو المناطق ذات الملاءمة المناخية الحيوية، لضمان استمرارية هذا النوع وحماية تنوعه الجيني في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: الخروب، نماذج توزيع الأنواع، التوزيع المجالي، العوامل المناخية الحيوية، الجزائر

Liste des figures

N° Figures	Titres	N° Pages
01	Distribution du caroubier dans le monde	05
02	Distribution du caroubier en Algérie	05
03	Arbre du caroubier (<i>Ceratonia.siliqua L.</i>)	06
04	Feuilles du caroubier (<i>Ceratonia.siliqua L.</i>)	07
05	Tronc du caroubier (<i>Ceratonia.siliqua L.</i>)	08
06	Racines du caroubier	09
07	Inflorescence mâle du caroubier	10
08	Inflorescence femelle du caroubier	10
09	Fleur hermaphrodite du caroubier	10
10	Fruits du caroubier	11
11	Graines du caroubier	11
12	Répartition spatiale des points d'occurrence de <i>Ceratoniasiliqua L.</i> en Algérie.	17
13	Résumé graphique de la méthodologie adoptée pour la modélisation de la distribution actuelle et future de <i>Ceratoniasiliqua L.</i> en Algérie sous le scénario climatique SSP2-4.5 (2041–2060 et 2061–2080).	20
14	Évaluation de la performance des modèles BRT et RF par les courbes ROC et les valeurs d'AUC	22
15	Carte de la distribution potentielle actuelle de l'habitat de <i>Ceratoniasiliqua L.</i> en Algérie issue du modèle d'ensemble.	23
16	Importance relative des variables bioclimatiques et topographiques retenues dans le modèle d'ensemble pour la modélisation de la distribution de <i>Ceratoniasiliqua L.</i>	24
17	Les courbes de réponse des variables bioclimatiques et topographiques issues du modèle d'ensemble illustrant la relation entre l'habitat et chaque prédicteur environnemental.	25

18	Représentation de la niche écologique de <i>Ceratoniasiliqua L.</i> dans l'espace environnemental bidimensionnel pour les principales paires de variables bioclimatiques et topographiques	26
19	Cartes de convenance (suitability) de l'habitat (A) et de distribution binaire (seuil ≥ 0.5) (B) de <i>Ceratoniasiliqua L.</i> en Algérie pour les conditions actuelles et les projections futures sous le scénario SSP2-4.5 (2041–2060 et 2061–2080).	27

Liste des tableaux

N° Tableaux	Titres	N° Pages
01	Classification classique et phylogénétique de <i>Ceratoniasiliqua L.</i> (Cronquist, 1981)	03
02	Évaluation des performances des modèles BRT et RF selon les indicateurs statistiques AUC, COR, TSS et Déviance pour la modélisation de la distribution de <i>Ceratoniasiliqua L.</i> en Algérie.	23

SOMMAIRE

Remerciment

Dédicace

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Table de matrice

Introduction01

Chapitre I : Généralités sur le caroubier

1. Terminologie et taxonomie	03
2. Origine et distribution géographique	03
2.1.Origine du caroubier	03
2.2.Distribution géographique	04
2.2.1. Dans le monde	04
2.2.2. En Algérie.....	05
3. Description botanique du caroubier	06
3.1.Arbre	06
3.2.Feuilles	07
3.3.Tronc	07
3.4.Système racinaire.....	08
3.5.Fleurs.....	09
3.6.Fruit.....	10
3.7.Graines	11
4. Reproduction biologique	12

SOMMAIRE

4.1.Floraison	12
4.2.Fructification	12
5. Caractère écologique du caroubier	12
6. Ecologie du caroubier	13
7. Exigences édapho-climatiques	13
7.1.Climat.....	13
7.2.Sol	14
7.3.Eau	14
8. Les conditions favorables de la croissance du caroubier	14
9. Types du caroubier.....	15
9.1.Le caroubier sauvage	15
9.2.Le caroubier cultivé	15

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. Description de la région d'étude.....	16
1.1.Localisation géographique	16
1.2.Caractéristiques climatiques	16
2. Acquisition des données d'occurrence	17
2.1.Obtention des données climatiques (actuellesetfutures)	18
2.2.Sélection des variables et analyse de la multicollinéarité	18
2.3.Modélisation de la distribution de l'espèce	19
2.4.Cartographie et quantification des habitats convenables	19

Résultats & Interprétations

Résultats	21
-----------------	----

Discussion

Discussion	28
------------------	----

SOMMAIRE

Conclusion	33
------------------	----

Références bibliographiques



INTRODUCTION



INTRODUCTION

INTRODUCTION

Introduction

Le caroubier (*Ceratonia siliqua*L.) appartient à la famille des Légumineuses (Fabacées) de l'ordre des Rosales. C'est une espèce sclérophylle, xérophile, thermophile, héliophile et calcicole, originaire des zones arides et semi-arides de la Méditerranée et de la péninsule arabique. Il s'agit de l'un des arbres les plus anciens au monde, cultivé depuis le Néolithique autour du bassin méditerranéen, et présent également dans les régions où le climat est similaire à celui de la Méditerranée **(Quezel, 1963 ; Batlle et al., 1997)**. À l'échelle mondiale, le caroubier est reconnu pour sa rusticité, sa longévité pouvant atteindre 200 ans, ainsi que pour la valeur économique élevée de ses graines et de ses produits dérivés, largement utilisés dans les domaines agroalimentaire, pharmaceutique et industriel **(Rejeb et al., 1991 ; Batlle et Tous, 1997 ; Ait Chitt et al., 2007)**.

La région méditerranéenne constitue un point chaud (hot spot) de biodiversité, caractérisé par des précipitations rares ou irrégulières et par de longues périodes estivales sèches, représentant environ 1,8 % des zones forestières mondiales et abritant plus de 22 500 espèces végétales, dont 52 % sont endémiques **(Scognamiglio et al., 2013)**. Dans ces conditions climatiques contraignantes, combinées à une forte pression anthropique, la dégradation du couvert végétal et l'érosion des sols sont fréquentes. Le caroubier joue alors un rôle écologique et socio-économique majeur, notamment dans les programmes de reboisement, de restauration des sols dégradés et de lutte contre la désertification, en raison de sa capacité à s'installer sur des terrains marginaux et à résister au déficit hydrique **(Ait Chitt et al., 2007)**. Cependant, il demeure l'une des espèces méditerranéennes les plus sensibles au froid, ce qui limite son aire de culture à des altitudes ne dépassant pas 500 m, comme l'ont montré les dommages observés en Espagne lors des hivers rigoureux de 1956 et 1985 **(Albanell, 1990)**.

En Algérie, le caroubier est présent depuis très longtemps et reste intrinsèquement lié aux écosystèmes naturels des zones littorales et des massifs montagneux. Le pays, considéré comme un hot spot de biodiversité, abrite une richesse floristique remarquable avec plus de 3 200 espèces végétales, dont un grand nombre sont rares, endémiques ou menacées par la déforestation, l'urbanisation, les incendies et la dégradation des habitats naturels. Malgré

INTRODUCTION

l'importance écologique, économique et culturelle du caroubier, sa situation demeure encore méconnue, notamment dans la région Nord-Ouest, et sa valorisation reste limitée et essentiellement traditionnelle (**Benmahioul et al., 2011**). Pourtant, cette espèce, largement répandue sous forme de peuplements spontanés dans les zones côtières et semi-arides, présente un fort potentiel agro-sylvo-pastoral, contribuant au développement rural, à la conservation des sols et à la lutte contre la désertification (**Naggar et Lahssini, 2015**). En dépit de cet intérêt croissant et des programmes récents de valorisation des produits forestiers non ligneux, le caroubier peine encore à trouver sa place dans les stratégies nationales de gestion durable des ressources phytogénétiques, rendant nécessaire l'intensification des travaux de recherche et de caractérisation de cette espèce à l'échelle méditerranéenne et algérienne

L'objectif de notre étude est de modéliser la répartition spatiale actuelle et future du caroubier (*Ceratonia siliqua*L.) en Algérie, en tenant compte des conditions bioclimatiques et des scénarios de changement climatique, tout en identifiant les principaux facteurs environnementaux influençant sa distribution. Cette recherche vise à analyser l'effet des variables climatiques, topographiques et écologiques sur l'aire de répartition de cette espèce méditerranéenne, afin de déterminer les zones écologiquement favorables à son développement à l'échelle nationale.

Ce manuscrit est composé d'une :

- ✚ Introduction générale ;
- ✚ Suivie du premier chapitre qui présente des généralités sur le caroubier ;
- ✚ Le deuxième chapitre est consacré au matériel et aux méthodes utilisés pour déterminer les zones de répartition de caroubier ;
- ✚ Ensuit, dans le troisième chapitre nous présenterons les résultats obtenus ainsi que leur interprétation ;
- ✚ Une discussion des résultats sera également abordée afin d'analyser et comparer les différentes observations obtenues ;
- ✚ Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale.



Chapitre I : Généralités sur le Caroubier



CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

Chapitre I : Généralités sur le caroubier

1. Terminologie et taxonomie

Le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) doit son nom à la forme de ses gousses qui, une fois arrivées à maturité, ressemblent à des cornes. Étymologiquement, le terme latin *Ceraton* provient du grec *keratia* qui signifie petite corne. Quant au nom d'espèce *siliqua*, il désigne en latin, une silique c'est-à-dire une gousse. (Batlle et Tous J., 1997).

Tableau 01: Classification classique et phylogénétique de *Ceratonia siliqua* L. (Cronquist, 1981)

Règne	<i>Plantae</i>
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>
Embranchement	<i>Spermaphytes</i>
Sous-embranchement	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Sous-classe	<i>Rosidae</i>
Ordre	<i>Fabales</i>
Famille	<i>Caesalpinaceae</i>
Sous-famille	<i>Caesalpinioideae</i>
Genre	<i>Ceraton</i>
Espèce	<i>Ceratonia siliqua</i> L.

2. Origine et distribution géographique

2.1. Origine du caroubier

L'origine du caroubier, *Ceratonia siliqua*, fait l'objet de plusieurs hypothèses notables qui divergent. Selon Vavilov (1951), cette espèce trouve ses racines dans la région orientale de la Méditerranée, en particulier en Turquie, en Syrie et en Palestine.

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

Des recherches archéobotaniques, fondées sur des restes carbonisés de bois et de fruits datant du néolithique (environ 4000 av. J.-C.), ont également confirmé sa présence dans la Méditerranée orientale à cette époque, signalant les premiers stades de la domestication des espèces ligneuses (**Estrada et al., 2006**). Une autre hypothèse suggère que le caroubier pourrait avoir pour origine le Sud de l'Arabie, en raison de son caractère thermophile et de sa présence sur les hauts plateaux du Yémen (**Liphschitz, 1987**). La découverte de *Ceratoniasiliqua* dans les montagnes d'Arabie (Oman) et de Somalie (**Hillcoat et al., 1980**) renforce cette hypothèse. De plus, **Zohary (1973)** considère le caroubier comme une relique de la flore Indo-Malaisienne, partageant ses origines avec des genres tels qu'*Olea*, *Laurus* et *Chamaerops*.

2.2. Distribution géographique

2.2.1. Dans le monde

Selon **Thillot et al. (1980)**, les caroubiers sont largement répandus dans l'ensemble du bassin méditerranéen, à l'état sauvage, notamment en Turquie, à Chypre, en Syrie, au Liban, en Palestine, au sud de la Jordanie, en Égypte, à Oman, en Tunisie et en Libye, avant d'atteindre la Méditerranée occidentale (**Konaté, 2007**). La culture du caroubier est très ancienne en Syrie et en Anatolie, étant l'une des premières plantes introduites en Égypte au troisième millénaire, aux côtés de la vigne et du figuier (**Chevalier, 1939**). Alphonse de Candolle et Naudin avancent que le caroubier est spontanément présent sur la Côte d'Azur espagnole et même en Afrique du Nord. Il est souvent considéré comme originaire de la Méditerranée orientale, probablement introduit par l'invasion arabe (**Chevalier, 1917**). En Algérie et au Maroc, les caroubiers se trouvent naturellement ou sont cultivés, atteignant des altitudes allant jusqu'à 1150 mètres, à l'exception des zones très sèches (**Khelifa et al., 2013**). Le caroubier est intégré soit naturellement, soit en tant qu'essence régénératrice des forêts.

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier



Figure N°01 : Distribution du caroubier dans le monde (Batlle et Tous, 1997).

2.2.2. En Algérie

Les caroubiers se déploient sur de vastes surfaces, s'étendant d'est en ouest (Kocherane et al., 2019). Ils sont fréquemment cultivés dans l'Atlas du désert du Sahara et se rencontrent couramment dans la région du tell (Quezel et Santa, 1963). Leur présence est particulièrement notable sur la côte de Kabylie et dans la vallée du Soummam, ainsi que le long des routes côtières de Mitidja et de Cherchell, sur les pentes de Mostaganem et dans la région de Traras, au nord de Tlemcen (Nedjahi, 2008 ; Boublenza, 2012).

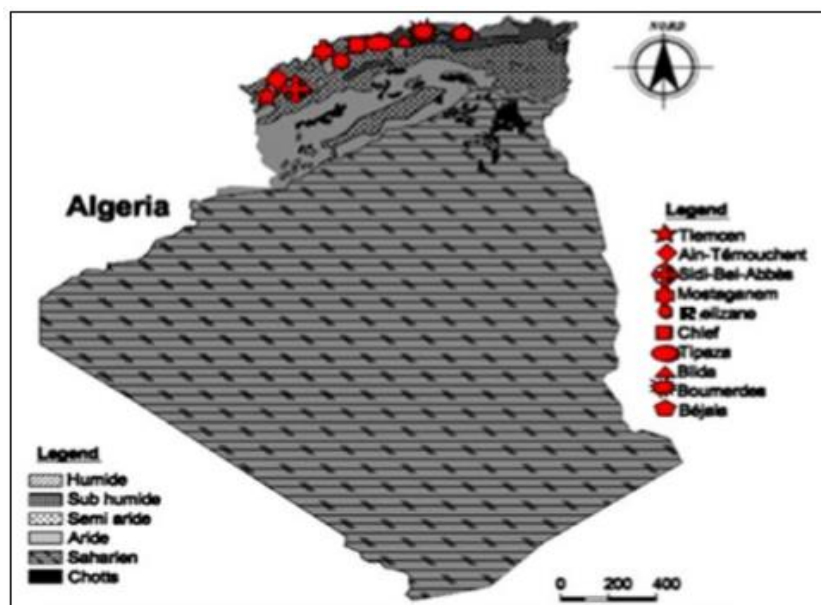


Figure N°02 : Distribution du caroubier en Algérie (Boublenza et al., 2012).

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

3. Description botanique du caroubier

3.1. Arbre

Le caroubier, appartenant à la famille des *Cesalpiniaceae* (ordre des Fabales ou Légumineuses), est un arbre qui regroupe près de 20 000 espèces, dont un grand nombre présentent un intérêt utilitaire, alimentaire, industriel ou médicinal (**Guillén et al., 2018**). Ce genre comprend notamment *Ceratonia siliqua*, ainsi que deux autres espèces : *Ceratonia oreoethauma*, originaire d'Oman, et *Ceratonia somalensis*, native du Nord de la Somalie (**Battle et Tous, 1997**).

Le caroubier est un arbre sclérophylle sempervirent, caractérisé par des feuilles persistantes (**Mahdad, 2013**). Contrairement à d'autres espèces, il ne perd pas ses feuilles en automne, sauf en juillet tous les deux ans, période à laquelle celles-ci sont renouvelées au printemps de la même année, en avril et mai (**Ait Chitt et al., 2007**). En termes de dimensions, cet arbre atteint généralement une hauteur comprise entre 7 et 20 mètres, avec une circonférence à la base du tronc variant de 2 à 3 mètres (**Rejeb et al., 1991 ; Battle et Tous, 1997 ; Ait Chitt et al., 2007**). Le diamètre moyen du tronc est d'environ 50 centimètres, en fonction de l'âge de l'arbre (**Albanell, 1990**). Le houppier est très étalé, bien développé et arrondi, tandis que le tronc est robuste, épais, creux et tortueux, ce qui est le résultat d'une croissance lente et d'une longévité importante. Les branches sont irrégulièrement ramifiées et se terminent par de jeunes rameaux pubescents (**Rabaa, 2007**). L'écorce est lisse et grise lorsqu'elle est jeune, puis devient brune et rugueuse à mesure que l'arbre vieillit. Le bois, initialement jaune-blanc,

se teinte progressivement de rose et de rouge foncé avec l'âge (**Benmahioul et al., 2011**). Ce bois, lourd et au grain homogène, est prisé en marqueterie, en ébénisterie et en armurerie, étant réservé pour des ouvrages délicats (**Rabaa, 2007**).



Figure N°03 : Arbre du caroubier (*Ceratonia.siliqua* L.)

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

3.2. Feuilles

Les feuilles persistantes, mesurant entre 10 et 20 cm de longueur, se distinguent par un pétiole sillonné sur sa face interne et un rachis portant de 8 à 15 folioles opposées, dont la taille varie de 3 à 7 cm.

Ces folioles présentent une texture coriace, sont entières, de forme ovale à elliptique, et sont disposées de manière paripennée. Elles se caractérisent par une légère échancrure au sommet, affichant une couleur vert sombre brillante sur la face supérieure et un vert pâle sur la face inférieure (Ait Chitt et *al.*, 2007).

Il convient de noter qu'occasionnellement, chez les arbres cultivés et plus fréquemment chez les caroubiers sauvages, certaines feuilles peuvent présenter un nombre impair de folioles (Albanell, 1990). Le caroubier conserve ses feuilles tout au long de l'automne, à l'exception d'une perte qui se produit en juillet tous les deux ans, avec un renouvellement au printemps de la même année, en avril et mai (Ait Chitt et *al.*, 2007).



Figure N°04 : Feuilles du caroubier (*Ceratonia.siliqua L.*)

3.3. Tronc

Le caroubier est un arbre qui se développe et se maintient sur un unique tronc, épais et robuste, présentant de clairs canaux de circulation de la sève associés aux racines les plus épaisses, ce qui confère à l'arbre un aspect tortueux, particulièrement accentué chez certaines variétés (Melgarejo et Salazar, 2003). L'écorce de l'arbre est lisse et grise durant sa

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

jeunesse, puis devient brune et rugueuse à l'âge adulte. Son bois, quant à lui, est de couleur rougeâtre et d'une grande dureté (Ait Chitt et al., 2007 ; Melgarejo et Salazar, 2003), prenant également une teinte brin-grisâtre selon Albanell (1990) et brin selon Batlle et Tous J. (1997). À maturité, le tronc présente une forme tortueuse et sinusoïdale (Melgarejo et Salazar, 2003). En fonction de l'âge de l'arbre, son diamètre moyen est d'environ 50 centimètres (Albanell, 1990), tandis que sa circonférence à la base varie entre 2 et 3 mètres (Ait Chitt et al., 2007).

À titre d'exemple, un spécimen mesurant 3,20 mètres de circonférence a été observé dans la station d'échantillonnage du village de Sahel à Bouzeguène.



Figure N°05 : Tronc du caroubier (*Ceratonia.siliqua L.*)

3.4. Système racinaire

Le caroubier développe un système racinaire pivotant, hautement ramifié, capable de s'enfoncer jusqu'à 18 mètres de profondeur (Aafi, 1996 ; Gharnit, 2003). La partie supérieure de ce système présente une structure épaisse. Les racines se caractérisent par une croissance lente, mais elles montrent un développement significatif au niveau terminal, ce qui fait que le volume des racines peut rapidement dépasser deux ou trois fois celui de la couronne (Melgarejo et Salazar, 2003).



Figure N°06 : Racines du caroubier (Photo prise à Aïn el Berd - Sidi Bel Abbès)

3.5. Fleurs

Le caroubier est principalement un arbre dioïque, bien qu'il puisse parfois être hermaphrodite et, plus rarement, monoïque (**Linskens et Scholten, 1980 ; Batlle et Tous, 1988**). Les individus mâles sont stériles et ne produisent pas de fruits (**Rejeb, 1995**). Les fleurs, qui se regroupent en grappes latérales, affichent une couleur pourpre, parfois teintée de rougeâtre (**Benmahioul et al., 2011**). La morphologie florale du caroubier est complexe, et cinq types d'inflorescences peuvent être identifiés :

- **Inflorescence polygame**, comprenant des fleurs mâles, femelles et hermaphrodites.
- **Inflorescence hermaphrodite** : fleurs dotées d'étamines et d'un pistil bien développé.
- **Inflorescence mâle** : fleurs avec des étamines courtes et un pistil non développé.
- **Inflorescence mâle** : fleurs à étamines longues et pistil non développé.
- **Inflorescence femelle**, présentant un pistil bien développé et des étamines rudimentaires.



Figure N°07 : Inflorescence mâle

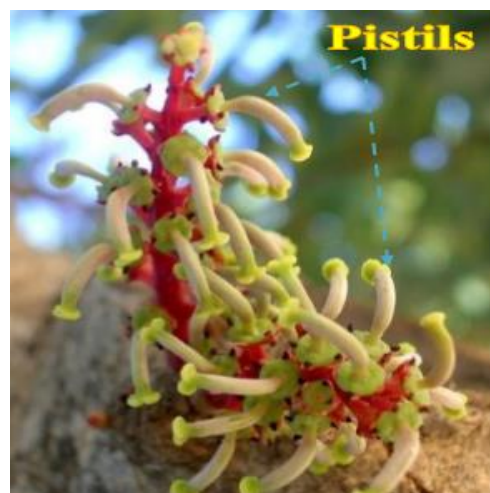


Figure N°08 : Inflorescence femelle



Figure N°09 : Fleur hermaphrodite du caroubier

3.6. Fruit

Les caroubes se présentent en grappes simples. Ce sont des gousses indéhiscentes de grande taille, mesurant entre 10 et 30 cm de longueur, 1,5 à 3 cm de largeur et 1 à 2 cm d'épaisseur. Chaque caroube pèse environ 15 à 30 grammes (**Battle et al., 1997**).

La gousse est constituée de trois parties : l'épicarpe, le mésocarpe et les graines, séparées par des cloisons pulpeuses transversales qui renferment de 4 à 16 graines, mesurant respectivement 8 à 10 mm de longueur et 7 à 8 mm de largeur. Initialement verte, la gousse devient brune, puis, à maturité, elle prend une teinte brun foncé à noire (**Ait Chitt, 2007**). Le fruit du caroubier passe par trois stades de développement :

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier



- Le premier stade se caractérise par une croissance lente durant l'automne et l'hiver.
- Le second stade correspond à un développement actif et à une croissance rapide des gousses au printemps.
- Au dernier stade, la gousse mûrit et se durcit entre juin et juillet (**Benmahioul et al., 2011**).

Figure N°10 : Fruits du caroubier

3.7. Graines

Les graines du caroubier sont très dures, petites et aplaties, présentant une forme presque ovoïde avec un pôle basal tronqué et une zone apicale écrasée. Leur tégument est généralement lisse, dur, de couleur brun rougeâtre et brillant (**Albanell, 1990**). Elles mesurent entre 8 et 10 mm de long, 6 à 8 mm de large et 3 à 5 mm d'épaisseur, représentant environ 10 % de la masse de la gousse de caroube (**Petit et al., 1995 ; Bouzouita et al., 2007**). La graine du caroubier se compose de trois parties (**Melgarejo et Salazar, 2003**) :

- L'épisperme ou tégument**, qui enveloppe la graine et est principalement constitué de cellulose, de lignine et de tanin. Il se compose de deux enveloppes distinctes : l'une externe, appelée testa, qui est colorée et dure, et l'autre interne, nommée tegmen, qui est plus claire et molle. Le tégument représente 30 à 33 % de la graine.
- L'endosperme ou albumen**, situé sous l'épisperme, constitue le tissu de réserve pour la germination de l'embryon. C'est la partie économiquement la plus intéressante de la graine en raison de sa haute teneur en galactomannane ou gomme de caroube. L'endosperme représente 42 à 46 % de la graine.
- Le germe ou embryon**, qui représente 23 à 25 % de la graine.



Figure N°11 : Graines du caroubier

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

4. Reproduction biologique

La reproduction biologique du caroubier soulève de nombreuses interrogations, notamment en ce qui concerne la floraison, la pollinisation, la compatibilité entre sexes et cultivars, ainsi que la fructification (**Battle et Tous, 1997**). Une caractéristique notable du caroubier réside dans son calendrier de floraison. En effet, il fleurit durant l'été, entre août et octobre (**Aafi, 1996**), ou en automne, de septembre à novembre (**Fournier, 1977**). Toutefois, les périodes et la durée de la floraison varient en fonction des conditions climatiques (**Battle et Tous, 1997**).

4.1. Floraison

La floraison se produit en automne, sur le bois âgé de deux ans et sur les branches plus anciennes. Les fleurs mâles apparaissent entre août et septembre, et la libération de pollen semble précéder la réceptivité des stigmates. Les anthères atteignent leur maturité entre juillet et décembre, bien que cette période soit fortement influencée par les conditions climatiques, débutant même dès juin dans certaines régions plus chaudes. Les fleurs femelles émergent à partir de juillet et sont adaptées à la pollinisation par des insectes (entomophile) tels que les abeilles, les mouches et les mites, ainsi que par le vent (anémophilie). Les arbres hermaphrodites pourraient également jouer un rôle en tant que pollinisateurs et producteurs (**Ait Chitt, 2007**).

4.2. Fructification

Les fruits du caroubier nécessitent généralement entre 9 et 10 mois pour atteindre leur maturité. La chute des fleurs et des jeunes fruits se produit en octobre, diminue en janvier et février, et devient pratiquement inexistante entre juin et août. Environ 60 à 90 % des gousses tombent durant la première phase de croissance au printemps (**Aafi, 1996**).

5. Caractère écologique du caroubier

Le caroubier (*Ceratonia siliqua*) se développe dans des environnements climatiques variés, notamment dans les zones arides côtières, semi-arides, sub-humides et humides, tant dans les variantes tempérées que chaudes. Toutefois, il atteint son optimum de développement dans les conditions sub-humides, tant tempérées que chaudes. Cet arbre préfère les sols superficiels, de type rouge, ainsi que les encroûtements, caractérisant une essence thermophile. Le caroubier est emblématique des pays méditerranéens, où il se rencontre à l'état naturel ou cultivé le long

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

des côtes de la Grèce, de la Turquie, de la Syrie, de la Palestine, de l'Afrique du Nord, ainsi que dans des régions d'Espagne, d'Italie et de France (**Ouchkif, 1988**).

6. Ecologie du caroubier

Le caroubier est une essence méditerranéenne qui se distingue par sa grande plasticité, son héliophilie, sa thermophilie et sa résistance notable à la sécheresse, nécessitant seulement 200 mm de précipitations annuelles, bien qu'il soit sensible aux températures froides (**Sbay, 2008**). Il s'adapte à une diversité de types de sols, y compris les sols sablonneux, limoneux lourds, pauvres, rocaillieux et calcaires, avec des pH variant de 6,2 à 8,6 (**Baum, 1998; Sbay, 2008**). On le retrouve généralement dans des régions humides, sub-humides et même semi-arides.

Le caroubier manifeste une préférence pour les sols calcaires, bien drainés et aérés, tout en évitant les sols trop argileux. Il craint les gelées printanières dans certaines localités, et sa croissance est d'autant plus lente lorsqu'il est exposé à des conditions défavorables. Cet arbre a la capacité de fixer l'azote de l'air et présente une bonne résistance aux maladies et aux incendies (**Albanell, 1990**).

7. Exigences édapho-climatiques

7.1. Climat

Le caroubier est une espèce thermophile qui prospère dans un climat méditerranéen (**Petit et al., 1995**). Il joue un rôle essentiel dans le développement des zones défavorisées (**Gharnit et al., 2006**). Cette espèce se rencontre dans des environnements arides, côtiers, semi-arides, ainsi que dans des zones humides et subhumides, s'épanouissant aussi bien dans des variantes tempérées que chaudes (**Aafi, 1996**). Les sites de plantation du caroubier doivent présenter un climat méditerranéen subtropical, caractérisé par des hivers doux, des printemps tempérés et des étés chauds et secs (**Battle et Tous, 1997**). En été, cette espèce peut tolérer des températures atteignant 40°C, même en présence de vents chauds et secs, sans subir de dommages visibles (**Zografakis et Dasenakis, 2002 ; Owen et al., 2003**). En revanche, les arbres adultes ne nécessitent pas de période de refroidissement hivernal ; ils peuvent être affectés par des températures inférieures ou égales à -4°C et ne survivent pas à des températures de -7°C (**Battle et Tous, 1997**). De plus, le caroubier est particulièrement

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

sensible aux gelées (**Guillén et al., 2018**), ce qui en fait l'une des espèces les plus vulnérables aux dommages causés par des températures basses (**Albanell, 1990**).

7.2. Sol

Le caroubier présente une bonne tolérance aux sols pauvres (**Battle, 1997**). Il s'adapte aisément à divers types de sols, y compris ceux qui sont caillouteux, sableux, limoneux lourds, calcaires, ainsi que les schistes et grès, avec un pH variant de 6,2 à 8,6. Il se développe également sur des pentes rocheuses, des falaises impraticables et des collines incultes (**Nabli, 1989**). Toutefois, il préfère les sols bien drainés et aérés, qui ne sont pas excessivement argileux (**Sbay, 2008**), tout en étant sensible aux sols acides et très humides (**Baum, 1989 ; Sbay et Abrouch, 2006 ; Zouhair, 1996**).

7.3. Eau

En tant qu'espèce xérophyte, le caroubier est particulièrement tolérant à la sécheresse, capable de résister à des périodes sèches pouvant s'étendre de 6 à 8 mois, voire jusqu'à 10 mois (**Aguilera, 2014**). Cette espèce est particulièrement adaptée aux environnements où la pluviométrie annuelle moyenne se situe entre 250 et 500 mm (**Battle et Tous, 1997**).

Le feuillage du caroubier présente des caractéristiques de xéromorphie, telles que la synthèse de cires qui réduisent la perméabilité de l'épiderme, protégeant ainsi la plante d'une transpiration excessive (**Baker et Procopiu, 1980**).

8. Les conditions favorables de la croissance du caroubier

Le caroubier, dont l'aire de répartition s'étend sur les plateaux et dans les moyennes montagnes jusqu'à une altitude de 1700 mètres, présente une indifférence notable à la nature du substrat. Il tolère une grande variété de sols, y compris les sols pauvres, sableux, limoneux lourds, rocailleux, calcaires, schisteux et gréseux, avec des pH variant de 6,2 à 8,6. En revanche, il montre une sensibilité accrue aux sols acides et très humides (**Baum, 1989 ; Sbay et Abrouch, 2006 ; Zouhair, 1996**). Ce végétal s'adapte à plusieurs types de sols, à l'exception des sols hydromorphes, salés et des croûtes schisteuses. On le trouve fréquemment sur des sols marneux, des sols pauvres superficiels et rocailleux calcaires, ainsi que sur des pentes rocheuses, des escarpements peu accessibles et des collines incultes (**Nabli, 1989**). Selon **Battle et Tous (1997)**, le climat méditerranéen subtropical, caractérisé par des hivers

CHAPITRE I : Généralités sur le caroubier

doux, des printemps agréables à chauds et des étés chauds et secs, constitue un environnement propice à la croissance du caroubier.

9. Types du caroubier

9.1. Le caroubier sauvage

Les variétés sauvages de caroubier se distinguent par leur forte production de graines et leur faible teneur en pulpe, qui est non charnue (**Marakis et al., 1988 ; Ouchkif, 1988 ; Di Lorenzo, 1991**). De plus, les graines de ces types sauvages sont caractérisées par des péricarpes non charnus (**Marakis et al., 1988 ; Di Lorenzo, 1991 ; Tous et al., 1995 ; Batlle et Tous, 1997 ; Gharnit et al., 2001**).

9.2. Le caroubier cultivé

Les gousses du caroubier cultivé se distinguent par leur chair plus abondante et leur richesse en sucre, ce qui les rend largement utilisées comme matière première pour la production de sirops (**Roseiro, Girio et Collaco, 1991**). La domestication de certains arbres sauvages non cultivés a été entreprise dans le but d'augmenter le rendement des graines ainsi que la qualité de la gomme pour des applications industrielles (**Batista et al., 1996 ; Makris et Kefalas, 2004 ; Abdelmoumene et Belkacem, 2023**).



Chapitre II : *Matériels & Méthodes*



CHAPITRE II : MATELES ET METHODES

MATELES ET METHODES

1. Description de la région d'étude

1.1. Localisation géographique

La région d'étude englobe le nord et le centre de l'Algérie, correspondant à l'aire de distribution naturelle du *Ceratonia siliqua* L. Elle couvre plusieurs zones écologiques, incluant des régions côtières et semi-arides, s'étendant des plaines littorales aux reliefs montagneux de l'Atlas tellien. Parmi les régions concernées figurent notamment Tlemcen, Tizi Ouzou, Bouira, Béjaïa, Skikda et El Tarf.

1.2. Caractéristiques climatiques

La zone d'étude se caractérise par un climat méditerranéen, marqué par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Elle présente une forte variabilité spatiale des précipitations et des températures, ainsi que des gradients altitudinaux importants. Cette hétérogénéité environnementale influence significativement la distribution et la dynamique des espèces végétales, notamment celle du caroubier (Quézel & Médail, 2003 ; Médail, 2017).

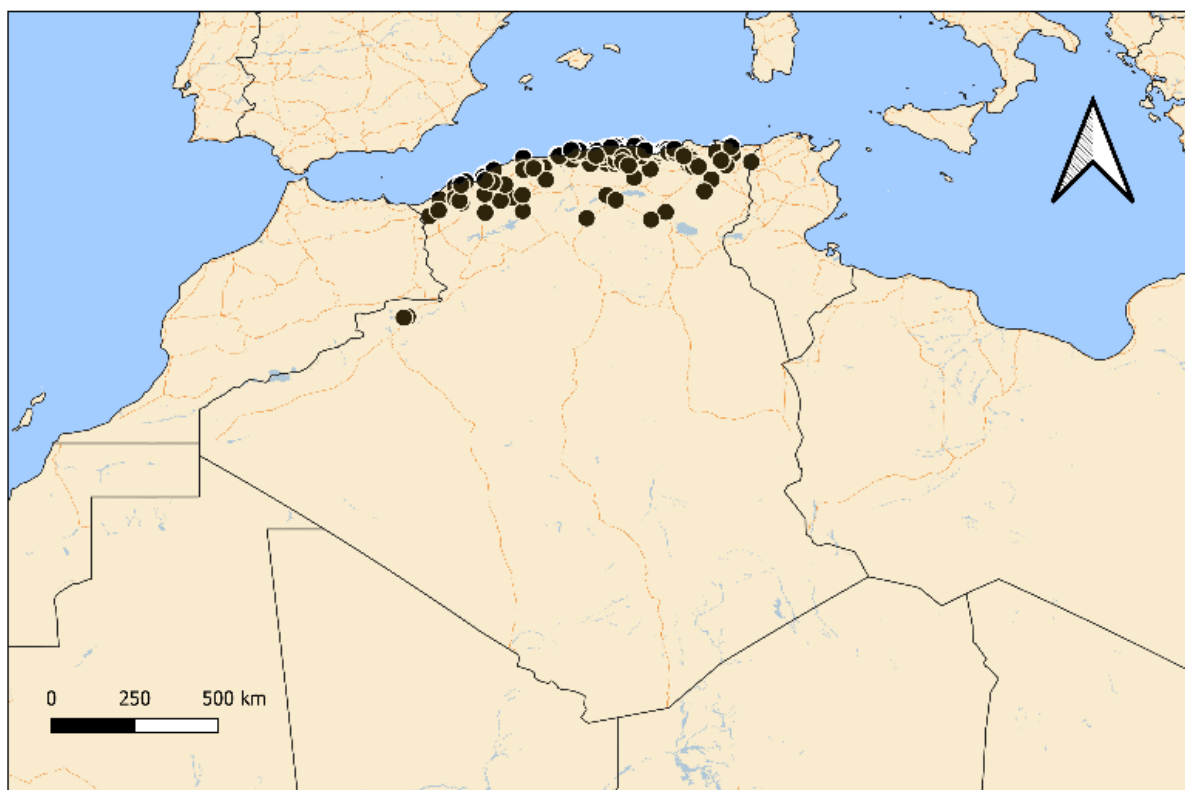


Figure N°12: Répartition spatiale des points d'occurrence de *Ceratonia siliqua* L. en Algérie.

2. Acquisition des données d'occurrence

La zone d'étude couvre le territoire algérien, qui constitue l'une des principales aires de répartition naturelle de *Ceratonia siliqua* L. en Afrique du Nord . L'Algérie présente en effet une diversité de conditions bioclimatiques allant de l'étage subhumide au semi-aride le long du gradient nord-sud qui en fait un terrain particulièrement pertinent pour l'étude de la niche écologique de cette espèce méditerranéenne (Mahdad et al., 2022 ; Smaili et al., 2024). Les données de présence ont été collectées à partir de deux sources complémentaires. La première source est la plateforme GBIF (*Global Biodiversity Information Facility* ; <https://www.gbif.org>), qui agrège des données mondiales sur la biodiversité issues d'herbiers, de musées d'histoire naturelle, de bases de données institutionnelles et d'observations citoyennes (GBIF, 2023). Les enregistrements ont été filtrés par espèce et par zone géographique, puis soumis à un contrôle qualité rigoureux permettant d'éliminer les doublons et les coordonnées géographiques imprécises ou aberrantes. La seconde source est constituée de données issues de la littérature scientifique, consultée via Google Scholar, ainsi que des thèses et mémoires accessibles sur des plateformes universitaires. Ces données ont permis de compléter et de renforcer la couverture géographique du jeu de données primaire (Haddaway

CHAPITRE II : MATELES ET METHODES

et al., 2015). Afin de réduire l'autocorrélation spatiale inhérente aux jeux de données issus de sources hétérogènes, un filtre de raréfaction spatiale a été appliqué à l'aide du package *tidysdm* dans R, via la fonction *thin_by_dist* (**Aiello-Lammens et al., 2015 ; Varela et al., 2014).** Un seuil minimal de 10 km entre points retenus a été fixé, garantissant une représentation équilibrée de l'étendue géographique sans sur-représenter les zones densément échantillonnées.

2.1. Obtention des données climatiques (actuelles et futures)

Les variables environnementales utilisées comme prédicteurs dans les modèles proviennent des couches bioclimatiques mondiales disponibles dans la base de données WorldClim. Ces couches couvrent des paramètres climatiques standards températures moyennes, amplitudes thermiques, régimes de précipitations ainsi que des variables topographiques, notamment l'altitude (**Fick et Hijmans, 2017**). Les rasters ont été recadrés et masqués à l'étendue de la zone d'étude en utilisant les fonctions *crop* et *mask* du package *raster* dans R (**Hijmans et al., 2015**). Les projections climatiques futures ont été téléchargées depuis WorldClim pour le scénario *Shared Socioeconomic Pathways* intermédiaire SSP2-4.5 aux horizons temporels 2041–2060 et 2061–2080. Ces projections reposent sur les sorties de modèles de circulation générale (GCM) (**IPCC, 2021**). Elles ont été traitées selon le même protocole que les données actuelles recadrage, masquage et alignement des résolutions spatiales afin d'assurer la cohérence entre les différentes couches climatiques utilisées dans la modélisation.

2.2. Sélection des variables et analyse de la multicollinéarité

Avant d'intégrer les variables dans les modèles, nous avons évalué la multicollinéarité à l'aide des tests de corrélation et les facteurs d'inflation de la variance (VIF), calculés avec le package *usdm* (**Naimi et Araújo, 2016**). Une analyse de corrélation basée sur le coefficient de Pearson a permis d'identifier et d'éliminer les variables fortement corrélées ($|r| > 0,7$), afin de limiter les effets de colinéarité et d'améliorer la robustesse du modèle (**Dormann et al., 2013**).

Les variables présentant des valeurs de VIF supérieur à 5 ont été exclues de l'analyse afin de ne retenir qu'un sous-ensemble de prédicteurs non redondants, dont l'influence sur la distribution modélisée peut être interprétée de manière indépendante (**Naimi et Araújo, 2016**).

CHAPITRE II : MATELES ET METHODES

2.3. Modélisation de la distribution de l'espèce

La modélisation de la niche écologique de *C. siliqua* a été réalisée avec le package *sdm* dans R (Naimi et Araújo, 2016). Deux algorithmes d'apprentissage automatique ont été mobilisés : les arbres de régression boostés (*BoostedRegressionTrees*, BRT) et les forêts aléatoires (*RandomForests*, RF). Ces deux approches ont été sélectionnées pour leur robustesse face à la non-linéarité des relations espèce environnement et leur capacité à traiter des jeux de données complexes (Elith et al., 2008; Liaw et Wiener, 2002). Les points de présence validés ont été utilisés conjointement avec un ensemble de 300 points de pseudo-absence, générés aléatoirement dans l'espace de fond à l'aide de la méthode *gRandom*. La stabilité et la robustesse des estimations ont été vérifiées par validation croisée, combinant des répliquats par sous-échantillonnage (*sub*) et par bootstrap (*boot*). Les modèles ont été calibrés en divisant les données en un ensemble d'entraînement (70 %) et un ensemble de validation (30 %). Une validation croisée a été appliquée afin de garantir la robustesse des résultats. Les paramètres du modèle ont été optimisés afin de limiter le surapprentissage (*overfitting*) et d'améliorer la capacité prédictive (Phillips & Dudík, 2008 ; Merow et al., 2013). Les prédictions finales ont été produites sous forme de modèle d'ensemble, construit par combinaison pondérée des sorties individuelles des deux algorithmes, conformément aux recommandations actuelles pour réduire l'incertitude liée au choix du modèle. La performance du modèle a été évaluée à l'aide de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) et de l'indice AUC (Area Under the Curve), qui mesure la capacité du modèle à discriminer les zones favorables et défavorables. En complément, l'indice TSS (TrueSkillStatistic), prenant en compte les faux positifs et les faux négatifs, a été utilisé pour fournir une évaluation plus robuste et fiable du modèle (Allouche et al., 2006 ; Fielding & Bell, 1997 ; Warren et al., 2020). Par la suite, Les simulations ont été effectuées pour les horizons 2050 (moyenne 2041–2060) et 2070 (moyenne 2061–2080), afin d'évaluer les impacts du changement climatique à moyen et long terme sur la distribution du caroubier (Hijmans et al., 2005 ; Fick et Hijmans, 2017).

2.4. Cartographie et quantification des habitats convenables

Les cartes de l'habitat ont été générées à partir des prédictions du modèle d'ensemble, pour les conditions climatiques actuelles et pour chacun des deux périodes 2041–2060 et 2061–2080. Une classification des probabilités de présence a permis d'identifier les zones hautement

CHAPITRE II : MATELES ET METHODES

favorables, modérément favorables et défavorables à l'espèce (Elith et Leathwick, 2009 ; Franklin, 2010). Un seuil de convenance de 0,4 (thresholding) a été appliqué pour délimiter les zones jugées favorables à l'espèce.

La superficie de ces habitats a été quantifiée en km², en multipliant le nombre de cellules raster dépassant ce seuil par la résolution spatiale du raster. Cette même démarche a été appliquée aux projections futures afin d'estimer les gains, pertes et déplacements potentiels d'habitat sous l'effet du changement climatique, selon les deux périodes temporels considérées. La démarche méthodologique adoptée dans cette étude est synthétisée dans le graphique ci-dessous (Fig.13).

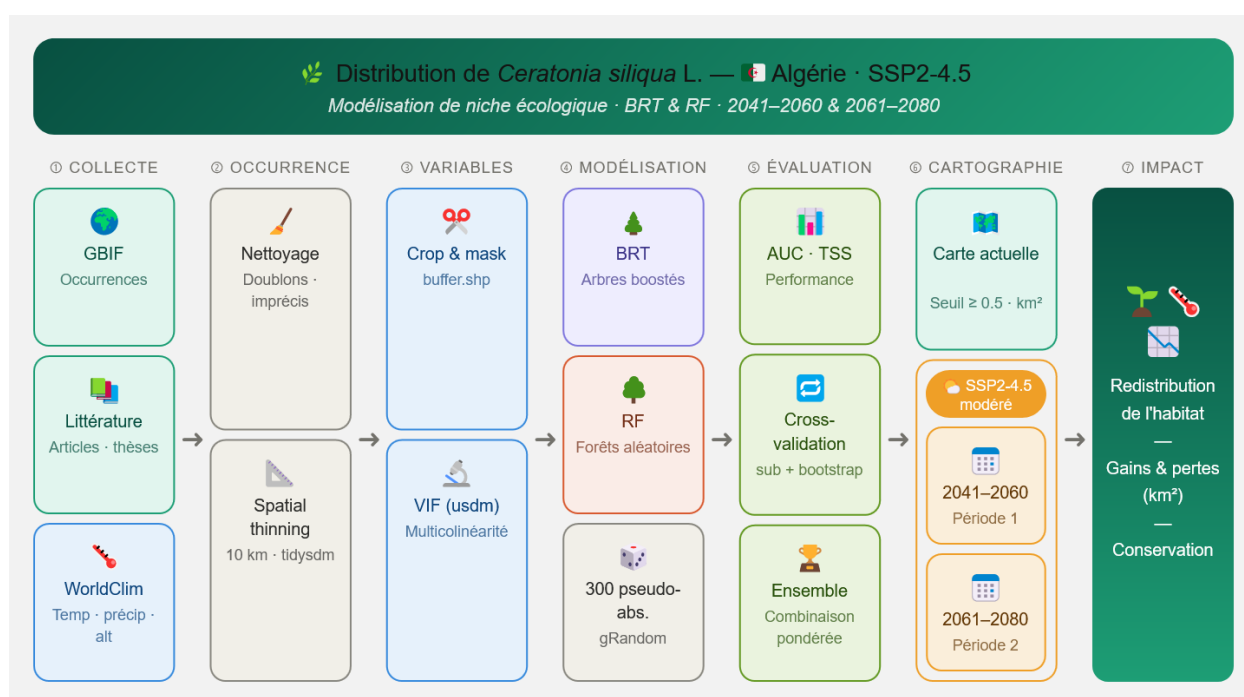


Figure N°13 : Résumé graphique de la méthodologie adoptée pour la modélisation de la distribution actuelle et future de *Ceratonia siliqua* L. en Algérie sous le scénario climatique SSP2-4.5 (2041–2060 et 2061–2080).



Résultats & Interprétations



RESULTATS & INTERPRETATION

RESULTATS

Résultats

Les courbes ROC illustrent la performance des modèles de régression par arbres boostés (BRT) et des forêts aléatoires (RF), en utilisant des méthodes de sous-échantillonnage et de bootstrap (**Fig.14**). Ces courbes comparent la sensibilité (taux de vrais positifs) et la spécificité (taux de faux positifs), avec des courbes bleues représentant les performances sur les données d'entraînement et des courbes rouges sur celles de test. Des courbes plus proches du coin supérieur gauche indiquent une meilleure performance du modèle. Les modèles BRT montrent une excellente généralisation aux données de test, avec des valeurs d'AUC supérieures à 0,95, tandis que les modèles RF présentent un léger sur-apprentissage dans la version sous-échantillonnée. Dans l'ensemble, le BRT avec échantillonnage par bootstrap affiche la meilleure performance, avec l'AUC la plus élevée et la plus stable, ce qui suggère une robustesse supérieure du modèle.

RESULTATS & INTERPRETATION

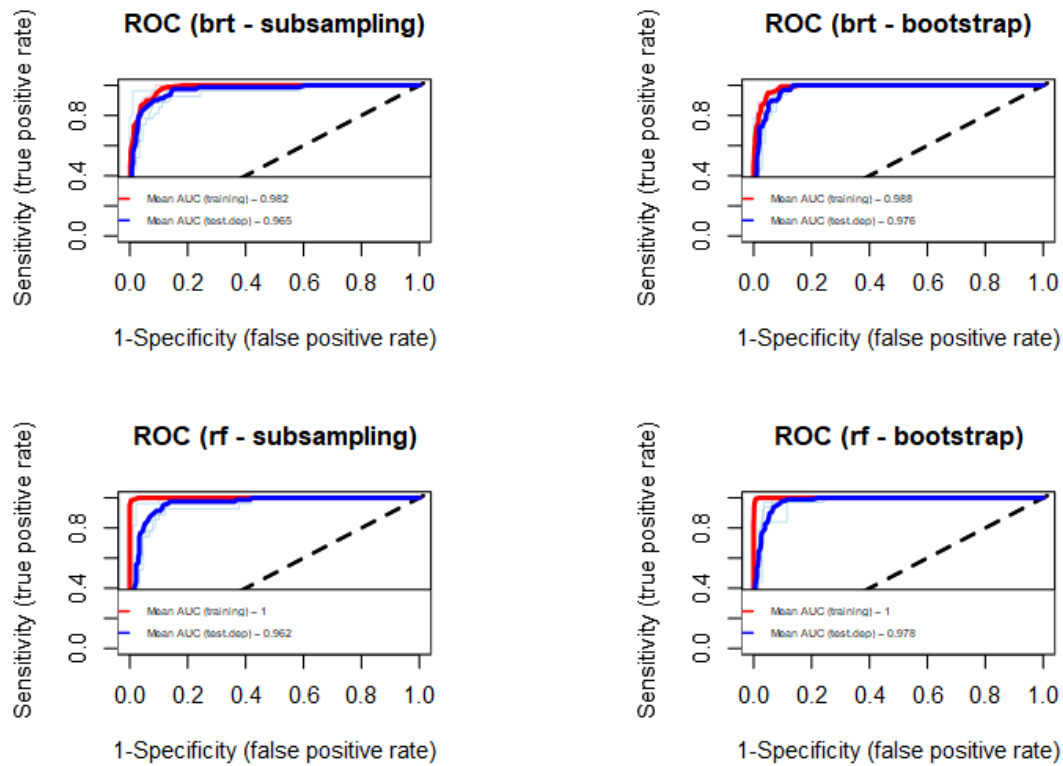


Figure N°14 : Évaluation de la performance des modèles BRT et RF par les courbes ROC et les valeurs d'AUC.

Les deux modèles, BRT et RF, montrent des performances similaires en termes d'AUC, avec une valeur de 0.97, indiquant une excellente capacité de discrimination. Cependant, le modèle RF présente une légère meilleure corrélation (COR) et un TSS légèrement supérieur, ce qui suggère une meilleure aptitude à détecter les classes positives. En revanche, le modèle BRT a une déviance plus élevée (0.54) comparée à RF (0.38), ce qui pourrait indiquer une meilleure ajustabilité du modèle RF aux données (**Tab.02**).

RESULTATS & INTERPRETATION

Tableau N°02 : Évaluation des performances des modèles BRT et RF selon les indicateurs statistiques AUC, COR, TSS et Déviance pour la modélisation de la distribution de *Ceratoniasiliqua L.* en Algérie.

Méthodes	AUC	COR	TSS	Deviance
BRT	0.97	0.82	0.88	0.54
RF	0.97	0.83	0.89	0.38

La distribution spatiale potentielle de l'habitat modélisée révèle une concentration des zones favorables à *Ceratoniasiliqua L.* (**Fig.15**). dans la frange nord du territoire algérien, particulièrement dans les régions côtières et sublittorales, où les valeurs de convenance atteignent leur maximum (> 0.7), confirmant l'affinité méditerranéenne marquée de l'espèce. Ce gradient latitudinal de convenance, décroissant du nord vers le sud, témoigne de la sensibilité de l'espèce aux contraintes hydriques et thermiques croissantes caractérisant les étages bioclimatiques semi-aride, aride et saharien qui dominent la majeure partie du territoire algérien.

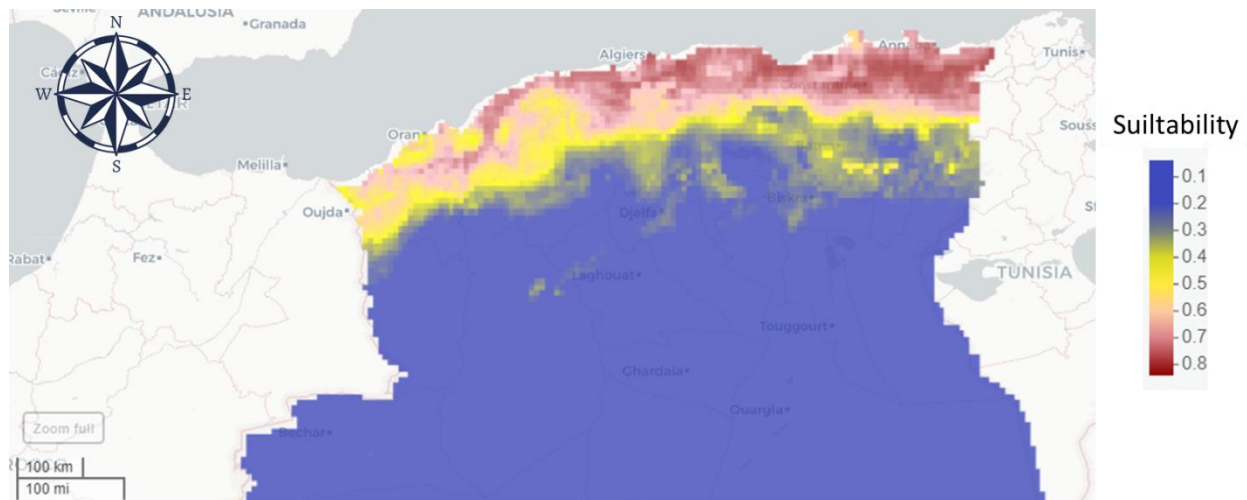


Figure N°15 : Carte de la distribution potentielle actuelle de l'habitat de *Ceratoniasiliqua L.* en Algérie issue du modèle d'ensemble.

RESULTATS & INTERPRETATION

Les résultats de l'importance relative des variables révèlent que les précipitations constituent les déterminants environnementaux les plus influents dans la modélisation de la distribution de *Ceratoniasiliqua L.* (**Fig.16**), avec la précipitation du mois le plus humide(bio_13) et la précipitation annuelle totale (bio_12) se distinguant nettement comme les variables les plus contributives, soulignant le rôle primordial de la disponibilité en eau dans la définition de la niche écologique de l'espèce. La saisonnalité thermique (bio_7) apparaît comme le troisième prédicteur le plus important, bien que son intervalle de confiance élevé témoigne d'une certaine variabilité entre les répliquats de modélisation, suggérant une relation plus complexe entre l'amplitude thermique annuelle et la convenance de l'habitat. En revanche, les variables telles que l'altitude (elev), la température moyenne de la période la plus froide (bio_3), la saisonnalité des précipitations (bio_15) et la précipitation du mois le plus sec (bio_14) présentent une importance relative faible et des intervalles de confiance étroits, indiquant leur contribution marginale à la discrimination des habitats favorables à l'espèce dans le contexte algérien.

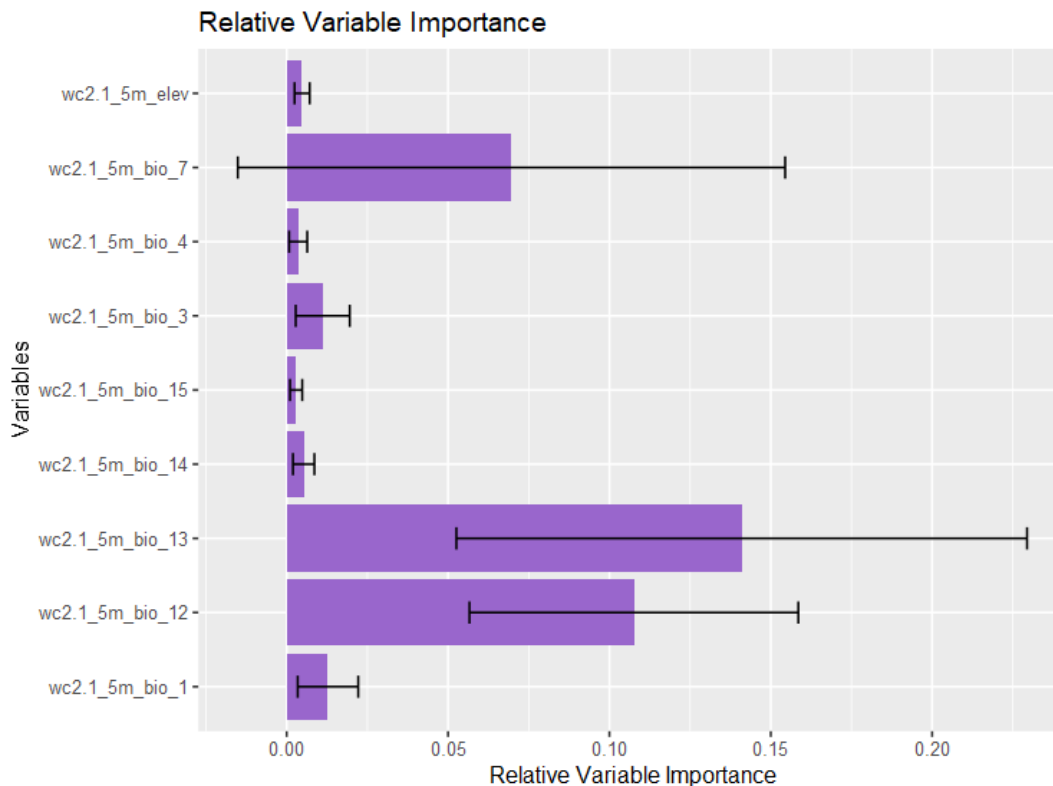


Figure N°16 : Importance relative des variables bioclimatiques et topographiques retenues dans le modèle d'ensemble pour la modélisation de la distribution de *Ceratoniasiliqua L.*

RESULTATS & INTERPRETATION

Les courbes de réponse (**Fig.17**) révèlent que *Ceratoniasilqua* L. présente une affinité marquée pour les régimes de précipitations élevées, notamment pour la précipitation du mois le plus humide (bio 13), avec une réponse atteignant son maximum autour de 100–150 mm, suggérant que la disponibilité en eau constitue le facteur limitant le plus déterminant pour l'espèce. La température annuelle moyenne (bio 1) montre une relation décroissante avec la convenance de l'habitat, indiquant une préférence de l'espèce pour des températures modérées, tandis que la saisonnalité thermique (bio 7) révèle une réponse optimale pour des amplitudes thermiques annuelles intermédiaires (25–30°C), au-delà desquelles la convenance décline significativement. L'altitude (elev) présente une réponse unimodale avec un optimum aux étages de basse et moyenne altitude, confirmant la distribution préférentielle de l'espèce dans les zones côtières et sublittorales de l'Atlas tellien, là où les conditions topographiques et microclimatiques lui sont les plus favorables.

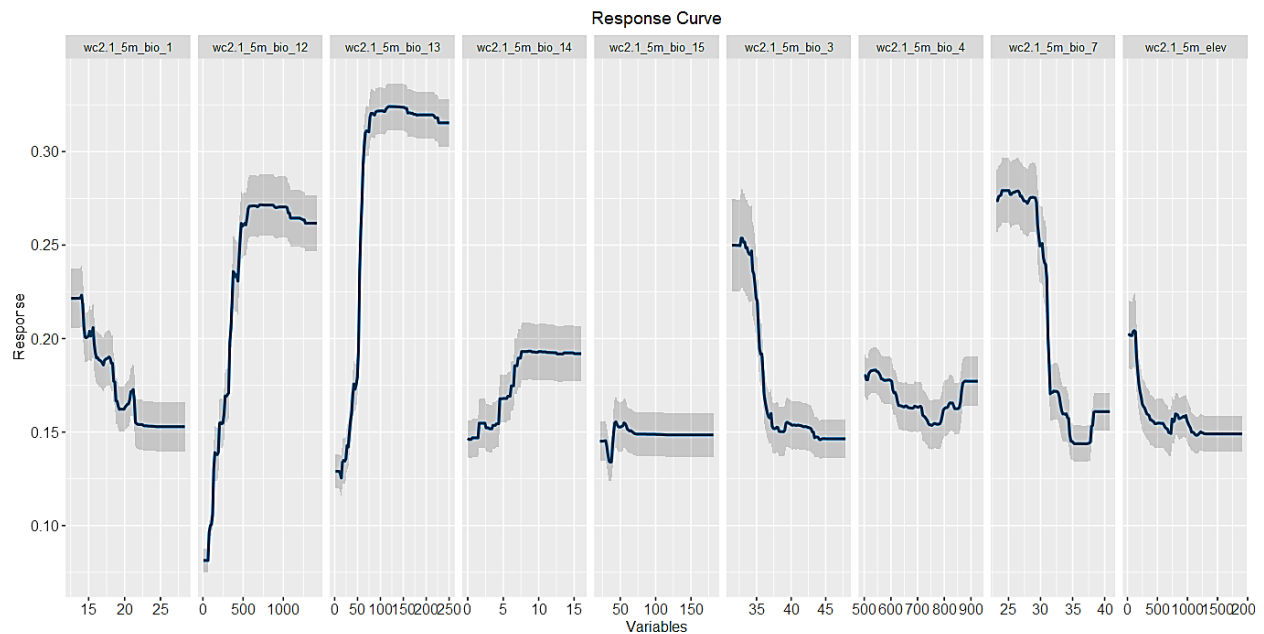


Figure N°17 : Les courbes de réponse des variables bioclimatiques et topographiques issues du modèle d'ensemble illustrant la relation entre l'habitat et chaque prédicteur environnemental.

RESULTATS & INTERPRETATION

La visualisation de la niche écologique dans l'espace environnemental (**Fig.18**) révèle que *Ceratoniasiliqua L.* occupe préférentiellement des conditions de températures annuelles moyennes modérées (bio_1 : 13–21°C) associées à une faible saisonnalité thermique (bio_3), tandis que la combinaison entre une amplitude thermique annuelle intermédiaire (bio_4 : 550–750) et une saisonnalité thermique modérée (bio_7 : 25–35°C) définit le cœur de la niche thermique de l'espèce. Les graphiques impliquant les variables de précipitations confirment que la convenance maximale est associée à des valeurs élevées de précipitations annuelles (bio_12 > 400 mm) et du mois le plus humide (bio_13 > 50 mm), avec une faible saisonnalité pluviométrique (bio_15), traduisant une préférence pour les régimes méditerranéens à hivers pluvieux et étés secs. La relation entre la précipitation du mois le plus sec (bio_14) et la précipitation annuelle totale (bio_12) met en évidence que les habitats les plus convenables correspondent à des milieux recevant des précipitations minimales non négligeables même en saison sèche, soulignant la sensibilité de l'espèce au stress hydrique estival prolongé.

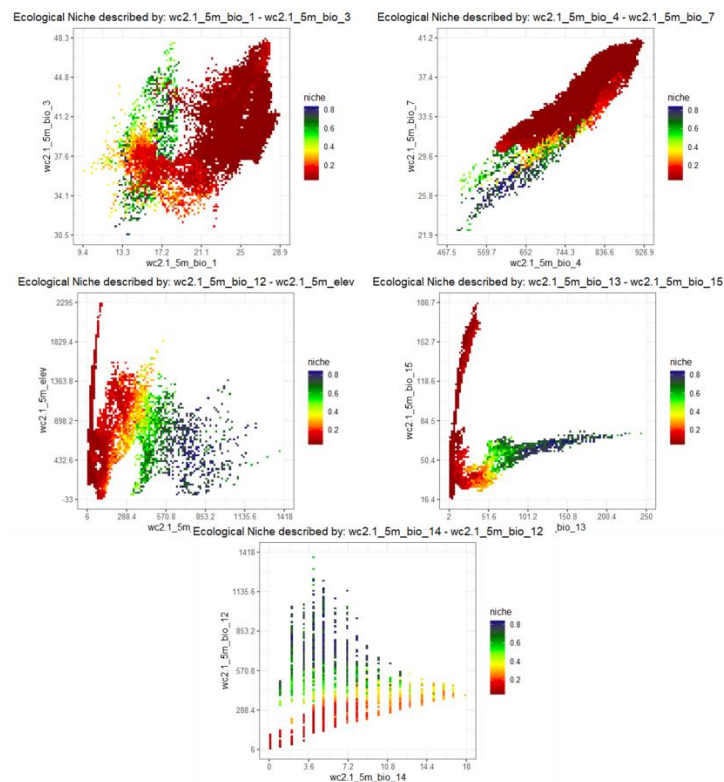


Figure N°18 : Représentation de la niche écologique de *Ceratoniasiliqua L.* dans l'espace environnemental bidimensionnel pour les principales paires de variables bioclimatiques et topographiques

RESULTATS & INTERPRETATION

La comparaison des cartes de la distribution actuelle et futures sous le scénario SSP2-4.5 (**Fig.19 A**) révèle une réduction progressive de l'intensité de la convenance dans la bande nord de l'Algérie, avec une diminution notable des valeurs maximales passant de 0.8 (actuel) à 0.7 (2041–2060 et 2061–2080). Cette contraction de la zone de haute convenance suggère un appauvrissement graduel des conditions bioclimatiques favorables à *Ceratoniasiliqua* L., particulièrement marqué à l'horizon 2041–2060 avant une légère stabilisation en 2061–2080. La superficie des habitats convenables de *Ceratoniasiliqua* L. en Algérie diminue de 93 980.71 km² (actuel) à 53 109.68 km² en 2041–2060 et 47 896.92 km² en 2061–2080, soit une contraction totale de près de 49 % sous le scénario SSP2-4.5 (**Fig.19 B**).

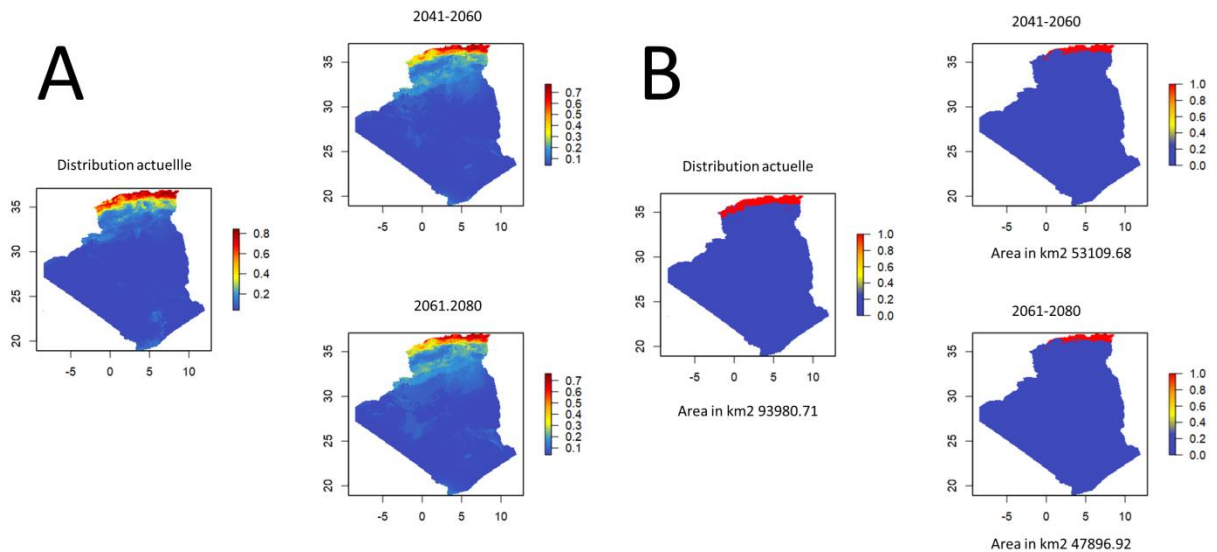


Figure N°19 : Cartes de convenance (suitability) de l'habitat (A) et de distribution binaire (seuil ≥ 0.5) (B) de *Ceratoniasiliqua* L. en Algérie pour les conditions actuelles et les projections futures sous le scénario SSP2-4.5 (2041–2060 et 2061–2080).



Discussion



DISCUSSION

Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude mettent en évidence une forte capacité d'adaptation écologique du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) aux conditions climatiques du nord de l'Algérie, en particulier dans les zones à climat méditerranéen. Cette plasticité écologique est corroborée par plusieurs travaux récents menés au Maroc voisin. Ainsi, **Kassout et al. (2024)** ont démontré que le caroubier marocain, bien que thermophile et hautement résistant à la sécheresse, présente une résistance limitée au froid extrême, ce qui conditionne fortement sa répartition géographique. La distribution spatiale observée dans notre étude, caractérisée par une concentration des habitats favorables dans les régions côtières et sublittorales, s'explique principalement par l'influence des facteurs climatiques, notamment la disponibilité en eau. La distribution spatiale observée, caractérisée par une concentration des habitats favorables dans les régions côtières et sublittoral, s'explique principalement par l'influence des facteurs climatiques, notamment la disponibilité en eau. En effet, les précipitations apparaissent comme le principal déterminant de la répartition de cette espèce, ce qui concorde avec les connaissances écologiques rapportées dans la littérature pour les espèces méditerranéennes.

Performance des modèles et fiabilité des prédictions

Par ailleurs, les modèles de distribution utilisés dans notre étude (BRT et RF) ont montré une performance élevée, attestée par des valeurs importantes de l'AUC, traduisant une excellente capacité prédictive. Cette concordance entre les modèles renforce la fiabilité des résultats obtenus et leur pertinence dans l'évaluation de la distribution actuelle et future de l'espèce. Ces performances sont en accord avec celles rapportées par les études marocaines utilisant l'algorithme MaxEnt : **Kassout et al. (2024)** ont obtenu des valeurs d'AUC de $0,987 \pm 0,001$ pour les données d'entraînement et $0,978 \pm 0,004$ pour les données de test, tandis que **Labaoui et Elbakkali (2025)** ont rapporté un AUC de 0,981, et **Lahssini et al. (2015)** un AUC de 0,926. Ces valeurs, toutes supérieures à 0,90, attestent d'une excellente capacité discriminante des modèles et valident l'approche de modélisation par entropie maximale pour cette espèce.

DISCUSSION

Déterminants climatiques de la distribution

En effet, les précipitations apparaissent comme le principal déterminant de la répartition de cette espèce, ce qui concorde avec les connaissances écologiques rapportées dans la littérature pour les espèces méditerranéennes. Cette prédominance des facteurs hydriques est confirmée de manière éclatante par les études de modélisation MaxEnt réalisées au Maroc. **Labaioui et Elbakkali (2025)** ont identifié la précipitation du trimestre le plus froid (Bio19) comme la variable la plus influente, contribuant à 72 % du modèle (AUC = 0,981), suivie de l'altitude (9,8 %) et de la température moyenne du trimestre le plus froid (Bio11, 5,4 %).

De manière similaire, **Kassoutet al. (2024)** ont rapporté que Bio19 contribuait à 45,7 % de leur modèle (AUC = 0,987), suivi de la saisonnalité thermique (Bio4, 14,7 %) et de la température annuelle moyenne (Bio1, 12,1 %), l'ensemble des variables liées aux précipitations représentant 56,5 % de la contribution totale contre 43,8 % pour les variables thermiques. Ces résultats convergents soulignent que la disponibilité hydrique, particulièrement durant la période hivernale, constitue le facteur limitant majeur pour cette espèce, notamment dans les zones semi-arides. Sur le plan écologique, les courbes de réponse montrent que le caroubier présente une préférence pour des conditions caractérisées par des précipitations relativement élevées et des températures modérées, ce qui correspond à son aire de distribution naturelle. **Labaioui et Elbakkali (2025)** ont précisé que la probabilité de présence du caroubier est optimale pour des valeurs de Bio19 comprises entre 250 et 350 mm, et pour des altitudes allant de 700 à 1200 m (jusqu'à 1400 m avec une exposition favorable). Par ailleurs, **Lahssini et al. (2015)** ont montré en province d'Azilal que les zones favorables se caractérisent par des températures minimales élevées et de faibles pluies durant la saison chaude, l'absence de gel étant considérée comme le principal facteur permettant l'établissement du caroubier. Ces auteurs ont également souligné que le caroubier est qualifié d'arbre de mi-pente, avec une température minimale absolue seuil supérieure à 3°C et une altitude maximale d'environ 1150 m (exceptionnellement 1600 m).

Variabilité morphologique et génétique

L'analyse met également en évidence une variabilité importante liée aux conditions environnementales, ce qui rejoint les conclusions de **Kocheraneet al. (2019)** qui ont démontré l'existence d'une diversité morphologique et génétique significative du caroubier en Algérie, en lien avec les gradients bioclimatiques et géographiques. Cette variabilité reflète l'influence directe des facteurs environnementaux, notamment les précipitations et la température, sur les

DISCUSSION

caractéristiques de l'espèce. Ces observations sont en accord avec plusieurs travaux antérieurs soulignant l'importance des caractères morphologiques dans l'évaluation de la diversité génétique des espèces végétales. Des paramètres tels que la forme, la taille et le poids des fruits et des graines constituent des indicateurs pertinents pour distinguer les génotypes et différencier les formes sauvages des cultivars (**Battle et Tous, 1997 ; Gharnitet al. 2001**). De plus, ces caractères présentent l'avantage d'être facilement observables et mesurables, ce qui en fait des outils efficaces pour les études de terrain (**Bhatet al. 2010**). **Kassoutet al. (2024)** ont également mis en évidence des corrélations notables entre les traits morphologiques du caroubier et les conditions environnementales de son aire de répartition actuelle au Maroc, soulignant que la plasticité phénotypique de l'espèce constitue une forme d'adaptation aux stress abiotiques. Cette intraspecificvariability, façonnée par les gradients d'aridité, confère au caroubier une capacité d'adaptation aux conditions méditerranéennes contrastées.

Agronomie et systèmes agroforestiers

Ces résultats corroborent ceux de **Maliki (2013)**, qui a montré que l'adoption du système agroforestier dans les exploitations privées, associant le caroubier aux cultures céréalières et maraîchères, contribue à améliorer la fertilité des sols et à favoriser la croissance des arbres. Cela permet d'expliquer en partie les performances observées dans les milieux bénéficiant d'une gestion agricole durable, comparativement aux zones moins valorisées. **Labaoui et Elbakkali (2025)** ont souligné que l'aire potentielle du caroubier au Maroc (5 816 858 ha) est largement supérieure à son aire actuelle (80 000 ha, soit seulement 1,5 % de l'habitat potentiel), suggérant un potentiel d'expansion considérable pour cette espèce multipurpose. Cette sous-utilisation de l'aire favorable pourrait s'expliquer, comme le notent ces auteurs, par des facteurs anthropiques (allocation des terres à d'autres activités agricoles) et par le statut historique du caroubier comme espèce forestière jusqu'en 2008, date à laquelle il a été reconnu comme espèce fruitière prioritaire.

Changement climatique et perspectives de conservation

Dans un contexte de changement climatique, les projections indiquent une diminution progressive des superficies favorables à l'espèce, en lien avec l'augmentation des températures et la réduction des précipitations. Cette tendance met en évidence la vulnérabilité du caroubier face aux modifications climatiques futures et souligne la nécessité d'intégrer des stratégies de conservation et de gestion durable pour assurer sa pérennité. **Kassoutet al. (2024)** ont projeté une réduction de l'aire favorable au Maroc de 78 233 km² (11,46 %) actuellement à 68 746

DISCUSSION

km² (10,07 %) sous le scénario RCP4.5 d'ici 2070, et à 71 457 km² (10,47 %) sous RCP8.5. Cette contraction touche particulièrement les habitats optimaux (probabilité $\geq 0,6$) dans le nord-ouest et le sud-ouest du pays, bien qu'une légère expansion soit observée dans le centre du pays sous certaines projections.

Cependant, **Kassoutet *al.* (2024)** soulignent que le gain d'habitats favorables sous changement climatique reste significativement limité pour le caroubier, espèce à longévité élevée et à capacité de dispersion restreinte. Ils mettent également en garde contre les limites intrinsèques des modèles de distribution d'espèces (SDMs) qui ne intègrent pas les processus biologiques et écologiques sous-jacents (diversité génétique, taux de dispersion, interactions interspécifiques). **Labaoui et Elbakkali (2025)** considèrent néanmoins le caroubier comme une « espèce alternative résiliente » dans le contexte des changements climatiques, en raison de sa xérophilie et de sa thermophilie, qualités qui en font un candidat privilégié pour les programmes de reboisement et de restauration des terres dégradées.

Limites de l'étude

Malgré la robustesse des résultats obtenus, cette présente étude présente certaines limites qu'il convient de mentionner. Tout d'abord, l'utilisation de modèles de distribution d'espèces (SDMs) de type corrélatif, tels que ceux employés dans cette étude (BRT et RF), ne permet pas d'intégrer les processus biologiques et écologiques sous-jacents. **Kassoutet *al.* (2024)** soulignent à juste titre que la réponse du caroubier au changement climatique dépend également de facteurs tels que la diversité génétique, la plasticité phénotypique, la capacité de dispersion et les interactions interspécifiques variables absentes de nos modèles. Par ailleurs, la résolution spatiale des données bioclimatiques utilisées (WorldClim, ~ 1 km²) masque la hétérogénéité microclimatique locale, pourtant déterminante pour une espèce de mi-pente comme le caroubier (**Lahssini et *al.* 2015**).

De même, l'absence de variables édaphiques (pH, texture du sol, profondeur) constitue une lacune majeure, d'autant que Lahssini et al. (2015) ont montré que l'indice d'humidité topographique (TWI), proxy de la fertilité, présentait une contribution négligeable, suggérant une certaine indifférence du caroubier à la composition pédologique.

La taille relativement restreinte de notre échantillon d'occurrence, comparée aux 303 points de Kassout et al. (2024) ou aux 229 points de **Labaoui et Elbakkali (2025)**, pourrait limiter la

DISCUSSION

représentativité spatiale du modèle, notamment dans les zones sous-échantillonnées de l'Est algérien.

Enfin, les projections futures sous scénarios climatiques RCP ne prennent pas en compte les pressions anthropiques (défrichement, surpâturage, urbanisation) ni les stratégies d'adaptation agroforestière potentielles, pourtant identifiées par **Labaoui et Elbakkali (2025)** comme des leviers clés pour l'expansion de l'espèce. L'intégration de ces facteurs dans des modèles mécanistiques ou hybrides constitue une perspective méthodologique essentielle pour affiner la prédictibilité de la distribution future du caroubier en Algérie.



Conclusion



CONCLUSION

CONCLUSION

Conclusion générale

Cette étude montre que la distribution du caroubier en Algérie, modélisée avec précision ($AUC \approx 0,97$) à l'aide des modèles SDM (BRT et RF), est principalement concentrée dans le nord du pays, en lien avec les conditions méditerranéennes. Les précipitations apparaissent comme le facteur déterminant de sa répartition, faisant de la disponibilité en eau la principale contrainte, malgré une certaine capacité d'adaptation de l'espèce. Les projections futures (SSP2-4.5) indiquent toutefois une forte régression des habitats favorables ($\approx 49\%$), soulignant sa vulnérabilité face au changement climatique. En définitive, cette étude confirme que la distribution et la croissance du caroubier sont étroitement dépendantes des facteurs climatiques, en particulier de la disponibilité en eau, ainsi que des pratiques de gestion agroforestière. La variabilité morphologique et génétique observée traduit une adaptation aux conditions environnementales locales, tandis que les changements climatiques représentent une contrainte majeure susceptible d'affecter sa répartition future. Ces résultats soulignent l'importance de mettre en œuvre des stratégies adaptées pour la conservation et la valorisation durable de cette espèce en Algérie, en s'inspirant des programmes marocains tels que le « Morocco Forest 2020-2030 » et la stratégie « Green Generation » qui visent à planter 125 000 ha de caroubiers d'ici 2030 (**Labaoui et Elbakkali, 2025**). La cartographie de l'aire potentielle, combinée à l'identification des variables environnementales clés, offre un outil décisionnel précieux pour orienter les futures plantations vers les zones bioclimatiquement favorables, tout en préservant la diversité génétique des populations naturelles.



Références Bibliographiques



Références bibliographiques

A

- **Ait Chitt M., Belmir H. et Lazrak A., 2007.** Production de plants sélectionnés et greffés de caroubier. Transfert de technologie en agriculture. Maroc. N° 153: 1-4 pp.
- **Albanell E., 1990.** Caracterización morfológica, composición química y valor nutritivo de distintas variedades de garrofa (*Ceratonia siliqua* L.) cultivadas en España. Tesis doctoral. Barcelona. España. 209p.
- **Aafi A. (1996).** « Note technique sur la caroubier (*Ceratonia siliqua* L.). Centre Nationale de la recherche Forestière. Rabat (Maroc). 10p.
- **Aguilera P.R., 2014.** Algarrobo tropical (*Prosopis pallida*) recurso biológico estratégico para la sostenibilidad del bosque tropical seco caso: comunas provincia de Santa Elena – Ecuador. Mém Ing. Univ Ecuador. 192 p
- **Abdelmoumene et Belkacem, 2023.** Etude dendrométrique et état d'un arbre sylvo-pastoral et état de conservation (*Ceratonia siliqua* L.). 8p

B

- **Battle 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 Resources Institute. Rome. Italy. 97 p.
- **Boublenza I., 2012.** Contribution à l'étude de multiplication du caroubier : *Ceratonia siliqua*. Mém mag en Agronomie option : Amélioration de la production végétale et biodiversité. Univ de Tlemcen. 98p.
- **Benmahioul B., Kaïd-Harche M. et Daguin F., 2011.** Le caroubier, une espèce méditerranéenne à usages multiples. Forêt méditerranéenne. T. XXXII, n°1, 2011, 51-58 pp.
- **Baum N., 1989.** « Arbres et arbustes de l'Egypte ancienne », pp. 354.
- **Baker E.A. et Procopiou J., 1980.** « Effect of soil moisture status on leaf surface wax yield of some drought-resistant species ». Research Note. J. Hort. Sci. 55(1):85-87 pp.

E

- **Estrada, A., Yll, R., & Marlasca, R. (2006).** Palaeoethnobotany in southwestern Europe. *Advances in archaeological method and theory*, 11, 127-205.
- **Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009).** Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677-697.

F

- **Franklin, J. (1995).** Predictive vegetation mapping: geographic modeling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, 19, 474-499.
- **Franklin, J. (2010).** Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press.

G

- **Guillén A., Ferrer-Gallego P., Serena V. et Peris J.B., 2018.** « El Algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.), importancia paisajística, económica y perspectivas de futuro ». *Chronica naturae*, 7: 45-54 pp.
- **Gharnit N., El Mtili N., Ennabili A. et Sayah F., 2006.** Pomological characterization of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) from the province of Chefchaouen (NW of Morocco). *Moroccan J. Bio.*, Vol. 2-3, 1-11 pp.
- **Guisan, A., & Thuiller, W. (2005).** Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993-1009.
- **Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2006).** Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.

H

- **Hillcoat, D., Lewis, G., & Verde, F. (1980).** The morphology of *Ceratonia oreoethauma* Hillc., Lewis et Verde, a new legume from the Arabian Peninsula. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 80(2), 135-149.

K

- **Kocherane R., Krouchi F. et Derridj A., 2019.** « Genetic Resources of Carob Tree (*Ceratonia Siliqua* L.) in Algeria: Insight from pod and seed morphology ». *Revue Agrobiologia* (2019) 9(2): 1581-1600 pp.
- **Komori, O., Eguchi, S., Saigusa, Y., Kusumoto, B., & Kubota, Y. (2020).** Sampling bias correction in species distribution models by quasi-linear Poisson point process. *Ecological Informatics*, 55, 1-11.
- **Kassout, J., Chakkour, S., El Ouahrani, A., Hmimsa, Y., El Fatehi, S., Yang, Y., Hadria, R., & Ater, M. (2024).** Potential geographical distribution of Carob tree (*Ceratonia siliqua* L., Leguminosae) in Morocco under climate change. *African & Mediterranean Agricultural Journal Al Awamia*, (145), 73-86.
- **Kassout, J., Chakkour, S., El Ouahrani, A., Hmimsa, Y., El Fatehi, S., Yang, Y., Ariza-Mateos, D., Palacios-Rodríguez, G., Navarro-Cerrillo, R., & Ater, M. (2024).** Effects of climate change on the distribution of the native Carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco. *ResearchSquare* Preprint. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3912387/v1>

L

- **Liphschitz, N. (1987).** The carob tree in Israel: history and perspectives. *Economic Botany*, 41(2), 146-155.
- **Linskens H. et Scholten W., 1980.** The flower of carob. *Potug. Acta. Bilo. (A)* XVI: 95-102 pp.
- **Leta, S., DeClerq, E. M., & Madder, M. (2013).** High-resolution predictive mapping for *Rhipicephalus appendiculatus* (Acari: Ixodidae) in the Horn of Africa. *Experimental and Applied Acarology*, 60, 531-542.
- **Labaioui, A., & Elbakkali, A. (2025).** Identifying Key Environmental Factors and Modelling of the Potential Distribution of Carob Tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Morocco Using Maximum Entropy Principle. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 90(4), 297-307.

- **Lahssini, S., Hajib, S., Lahlaoui, H., Mharzi Alaoui, H., &Khattabi, A. (2015).** Modelling Spatial Distribution of the Carob Tree (*Ceratonia siliqua* L.) in Azilal Province, Morocco. *Journal of Geography and Geology*, 7(4), 33-44. <https://doi.org/10.5539/jgg.v7n4p33>

M

- **Mahdad Y.M., 2013.** « Situation et perspectives d'amélioration du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) dans le Nord-ouest de l'Algérie ». 07-60 pp.
- **Melgarejo P. & Salazar D.M., 2003.** Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas. Vol. II. Mundi-Prensa. España, pp. 19-162.
- **Makris D.P. & Kefalas P.,2004.** Carobpods (*Ceratonia siliqua* L.) as a source of polyphenolic antioxidant. *Food Technol. Biotechnol.*42:105-108

N

- **Nabli A., 1989.** Essai de synthèse sur la végétation et la phyto-écologie tunisienne, 1. Éléments de botanique et de phyto-écologie, MAB-FST-Laboratoire de botanique fondamentale et appliquée. 247p.

O

- **Owen R.W., Haubner R., Hull W.E., Erben G., Spiegelhalder B., Bartsch H. et Haber B., 2003.** Isolation and structure elucidation of the major individual polyphenols in carob fibre. *Food and Chemical Toxicology* Vol. 41, N°12, 1727–1738 pp.

P

- **Petit M. et Pinilla J., 1995.** Production and purification of a sugar syrup from carob pods. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 28, 145-152 pp.
- **Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008).** Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161-175.

- **Peterson, A. T., Papes, M., & Kluza, D. A. (2003).** Predicting the potential invasive distributions of four alien plant species in North America. *Weed Science*, 51(6), 863-868

Q

- **Quezel P. et Santa S., 1962-1963 .** « nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales ». C.n.r.s., paris, 2 vol. 1170p.

R

- **Rejeb M.N., Laffray D. et Louguet P., 1991.** Physiologie du caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) en Tunisie. Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides, Group d'Etude de l'Arbre, Paris, France. 417-426 pp.
- **Rabaa C., 2007.** Le Nom de l'arbre (Le Grenadier, Le Caroubier, Le Jujubier, Le Pistachier Et l'arbousier). Ed Actes Sud.93p.
- **Rejeb M.N., 1995.** « Le caroubier en Tunisie : Situations et perspectives d'amélioration, in Quel avenir pour l'amélioration des plantes ». Edit. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris : 79-85 pp.

S

- **Sbay,H.,2008.**Le Caroubier au Maroc: un arbre d'avenir. La collection Maroc Nature est éditée par le Centre de Recherche Forestière,47p.

V

- **Vavilov, N. I. (1951).** The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. *Chronica Botanica*, 13(1-6), 1-366.

Z

- **Zohary, M. (1973).** Geobotanical foundations of the Middle East (Vol. 2). Gustav Fischer Verlag.

- **Zografakis N., et Dasenakis D., 2002** .Studies on the exploitation of carob for bioéthanol production. Biomass in Mediterranean, ALTENER Programme. 9 p.
- **Zouhair O., 1996.** Le caroubier : situation actuelle et perspectives d'avenir, Document interne, Eaux et forêts, Maroc. 22 p.