

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



جامعة غليزان
RELIZANE UNIVERSITY

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique



جامعة غليزان
RELIZANE UNIVERSITY

Université Ahmed Zabana – Relizane
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Ecologie et Environnement

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

ECOLOGIE

Intitulé

*l'effet de prétraitement sur germination des
graine (.ceratonia siliqua L)*

Présenté par :

ADDABOUCHEK Bakhta

Devant les membres de jury

Président	Dr. BACHIR BOUIADJRA Mohammed Amine	Maitre de Conférence (B)
Examineur	Dr. HOUARI Hadj Habib	Maitre de Conférence (B)
Encadrant	Dr. ALLAM Ayoub	Maitre de Conférence (A)

Année universitaire : 2024 – 2025



REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je ressens le besoin profond d'exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont marqué ce parcours, de près ou de loin.

Je tiens à remercier tout d'abord mon encadrant(e) Allam Ayoub pour sa bienveillance, sa rigueur scientifique et ses conseils éclairés qui ont guidé chacune de mes étapes.

Un grand merci également aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail et pour l'honneur de leur présence aujourd'hui.

Merci à tous mes enseignants, pour leur savoir, leur exigence et leur inspiration.

À mes camarades, pour leur esprit de partage et ces moments d'entraide qui ont adouci les défis.

Et surtout... à ma famille. Merci pour l'amour sans mesure, pour les encouragements discrets, pour la patience infinie.

Si j'ai tenu debout, c'est parce que vous étiez là.

A decorative border of pink watercolor-style flowers and leaves frames the text. The flowers are in various shades of pink, from light to deep magenta, and the leaves are simple, elongated shapes. The background is a light, textured pink.

DEDICACE

*À ceux qui m'ont portée dans le silence,
soutenue dans l'ombre,
et crue en moi lorsque moi-même j'en doutais.*

*À mes parents, mes piliers indéfectibles,
source d'amour et de courage.*

À ma famille, mon refuge dans les tempêtes.

*Et à moi-même...
pour avoir tenu bon, pour ne jamais avoir renoncé.*

SOMMAIRE

TABLE DES MATIERES

Remerciements/	
Dédicace/	
Liste des tableaux...../	
Liste des figures...../	
Liste des abréviations...../	
Résumé...../	
mots clé...../	
Introduction Générale	1
Chapitre 01 PRESENTATION DU CAROUBIER (<i>Ceratonia Siliqua L</i>)	
1. Origine du caroubier.....	5
2. Terminologie et taxonomie du caroubier	5
3. Distribution géographique.....	6
3.1 Dans le monde	6
3.2 En Algérie	7
4. Description botanique du caroubier	8
4.1 L'arbre	8
4.2 Le TRONC.....	9
4.3 La racine.....	10
4.4 Les feuilles	11
4.5 Les fleurs.....	12
4.6 Les fruits	12
4.7 Les graines.....	13
5. Production du caroubier	15
5.1 Dans le monde	15
5.2 En Algérie	16
6. Reproduction biologique de <i>Ceratonia siliqua</i>	16
6.1 Floraison.....	16
6.2 Fécondation	17
6.3 Pollinisateurs	17
6.4 Fructification	17
7. Multiplication Par semis	18

8. Écologie de <i>Ceratonia siliqua</i>	18
9. Exigences écologiques	19
Exigences édapho-climatiques.....	19
10. Importance écologique et socio-économique.....	20
10.1 Importance écologique	20
10.2 Importance socio-économique.....	20
10.3 RESUME :.....	21
11. Intérêts et utilisations	22
11.1 Intérêts agroécologiques	22
11.2. Usages alimentaires :.....	22
11.3 Usages médicaux et pharmaceutiques	22
11.4 Usages vétérinaires	23
11.5 Usages industriels.....	23
Résumé du Chapitre 1 : Présentation du caroubier (<i>Ceratonia siliqua</i> L.)	23

Chapitre 02 Effet des prétraitements sur la germination des graines de caroubier

1. Introduction	23
2. Définition de la germination	23
3. Phases et étapes de la germination.....	24
3.1 Phase d'imbibition.....	24
3.2 Phase de germination	24
3.3 Phase de croissance (post-germination).....	25
4. Conditions de la germination.....	26
4.1 Conditions externes.....	26
4.2 Conditions internes.....	27
5. Dormance des graines.....	27
5.1 Types de dormance.....	28
5.2 Levée de la dormance	28
5.3 Dormance chez <i>Ceratonia siliqua</i>	29
5.4 Rôle écologique de la dormance.....	30
6. Traitements prégerminatifs des semences	30
6.1 Définition du priming.....	30
6.2 Objectifs des prétraitements	30
6.3 Exemples d'application.....	31
7. Les stress abiotique influençant la germination de <i>ceratonia siliqua</i>	31
7.1 Définition du stress	31
7.2 l'effet de stress.....	31
8. Conclusion du chapitre II.....	35

Chapitre 03 Matériel et Méthodes

1. INTRODUCTION.....	36
2. Objectif de l'étude	36
3. Zone de l'étude	36
4. Matériel végétal.....	37
5. Observation visuelle de la germination en fonction des durées de prétraitement à l'acide sulfurique concentré(98%).....	38
matériel utiliser pour l'étude du stress salin :	41
6. Effet du stress salin sur la germination.....	42
7. Effet du stress thermique sur la germination	46
8. Conditions de germination des graines.....	48
1. Substrat utilisé	48
2. Humidité.....	48
9. Paramètres de germination mesurés	49
1- Pourcentage de germination (PG)	49
2- Temps moyen de germination (TMG)	50
3- Vigueur de germination (VG)	50
4- Longueur moyenne des plantules (LP)	50
5- Masse fraîche et masse sèche (MF et MS)	50
Traitement des données et obtention des résultats	50

Chapitre 04 résultat et discusion

1. Résultats de la germination après traitement à l'acide sulfurique	50
observation morphologique	51
2. Effet du stress salin sur la germination.....	53
3. Effet du stress thermique sur la germination	57
4. Résultats des paramètres de croissance	61
mase fraîche et la mase secs	62
Teneur en eaux	63
Impact du strsse thermique sur la biomasse et la teneur en eau des plantules de caroubie.....	66
5. Discussion	69
Interprétation des résultats de germination.....	69
Analyse comparative des effets du stress salin et thermique	69
Discussion sur l'efficacité du prétraitement.....	70
Références à des études antérieures	71
Limites expérimentales et perspectives.....	71
Conclusion Générale	74

<i>Bibliographiques</i>	74
<i>Résumé</i>	76

LIST DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification taxonomique de <i>Ceratonia siliqua</i> L. (caroubier) (P. & Santa, 1963).....	6
Tableau 2: Répartition de <i>Ceratonia Siliqua</i> en Algérie. (Azzouz, 2023).....	7
Tableau 3: Caractéristiques morphologiques principales de <i>Ceratonia siliqua</i> (Santa, 1963).....	8
Tableau 4: Comparaison de la production du caroubier (monde vs Algérie) (A, Rapport sur <i>Ceratonia siliqua</i> en Algérie, 2023)	16
Tableau 5: Plage climatique optimale pour <i>Ceratonia siliqua</i> (Brousse, 1978)	20
Tableau 6: Rôle écologique et économique du caroubier (Rôle des espèces forestières méditerranéennes dans la durabilité écologique, 2019)	21
Tableau 7 : Usages traditionnels et modernes de <i>Ceratonia siliqua</i> (Produits forestiers non ligneux en Méditerranée, 2018).....	23
Tableau 8: Les trois phases principales de la germination d'une graine (M, 1994)	25
Tableau 9 : Comparaison entre les conditions externes et internes influençant la germination (P, 1982).	27
Tableau 10: exemples de traitements prégerminatifs appliqués à différentes espèces, dont <i>Ceratonia siliqua</i> . (al, 2021)	31
Tableau 11 : Tableau des concentrations de NaCl et des masses correspondantes pour 200 ml de solution.....	42
Tableau 12 : Évolution du taux, de la durée et de la vitesse de germination des graines de <i>Ceratonia siliqua</i> en fonction des différents traitements.a l'acide sulfurique concentrées(98%)	50
Tableau 13 : Effet de différentes concentrations de chlorure de sodium (NaCl) sur le taux, la durée et la vitesse de germination des graines de <i>Ceratonia siliqua</i>	54

Tableau 14 : <i>Tableau récapitulatif de la germination sous stress thermique.....</i>	58
Tableau 15 : <i>Longueur moyenne des plantules selon la température</i>	66

LIST DES FIGURES

Figure 1: Répartition du caroubier dans le monde (Loussert, 1972)	6
Figure 2 : Répartition du caroubier en Algérie (A.N.R.H, 2012)	7
Figure 3: Caroubier adulte (l'Alimentation et l'Environnement).....	9
Figure 4: Le Tronc de Caroube (utile pour les cartes de répartition et données écologiques).....	10
Figure 5: La Racine de Caroube (riche en photos et fiches descriptives)	11
Figure 6: Les Feuilles de Caroube (Fiche plante : Ceratonia siliqua)	11
Figure 7: Les Fleurs de Caroube (Ceratonia siliqua, 2018)	12
Figure 8 : Les Fruits de Caroube (Flore sauvage d'Espagne)	13
Figure 9: Coupe longitudinale d'une gousse de caroube (flora silvestre)	14
Figure 10 : Composants de la graine du caroubier (flora silvestre).....	15
Figure 11: Les phase de germination (Black, 1994).....	25
Figure 12 : les graines de caroubier collectées dans la région de maascar photooriginal 2025	38
Figure 13 : Acide sulfurique (H_2SO_4) concentré utilisé dans tous les protocoles de prétraitement	39
Figure 14 : Préparation de milieux aprit le traitement des graines a l'acide sulfurique concentré 98%.....	40
Figure 15 : Dispotition des Graines de Caroubier apries le Traitement à l'acide sulfurique dans des boit de béttrie.....	40
Figure 16 : Exposition des boîtes de pétri dans l'étuve après le semis.....	40
Figure 17 : Germination des graines de Ceratonia siliqua après différents traitements à l'acide sulfurique concentré (98 %)	41
Figure 18 : préparation des solutios de Nacl pour traitement des graines	43
Figure 19 : Désinfection des graines avec l'hypochlorite de sodium (l'eau d'javal)avant les stress salin et thermique.....	44
Figure 20 : Disposition des graines de Ceratonia siliqua dans des boit de pétri	45
Figure 21 : préparation de milieu exprémentaux pour l'étude de la germination des graines de Ceratonia siliqua	45

Figure 22 : Germination des graines de <i>Ceratonia siliqua</i> sous un stress salin de 25Mm	45
Figure 23 : Germination des graines <i>Ceratonia siliqua</i> sous un stress salin de 0Mm..	45
Figure 24 : Germination des graines <i>Ceratonia siliqua</i> sous un stress salin de 50Mm	46
Figure 25 : Germination des graines de <i>Ceratonia siliqua</i> sous un stress salin de 100Mm	46
Figure 26 : Germination des graines de <i>Ceratonia siliqua</i> sous un stress salin de 150Mm	46
Figure 27 : Germination des graines de <i>Ceratonia siliqua</i> sous un stress salin de 200Mm	46
Figure 28 : Disposition des graines de <i>Ceratonia siliqua</i> dans les boîtes de Pétri avant l'application du stress thermique (0c° 20c° 40c°).....	47
Figure 29 : Germination des graines de caroubier à 40c°	47
Figure 30 : Germination des graines de caroubier à 20c°	47
Figure 31 : Germination des graines de caroubier à 4c°	48
Figure 32 : Étuve de laboratoire utilisée pour l'incubation des graines dans tous les protocoles expérimentaux.	48
Figure 33 : Graine contaminée par des moisissures	51
Figure 34 : Germination réussie après traitement acide.....	52
Figure 35 : Absence de germination et début de contamination	53
Figure 36 : L'effet de la salinité sur le taux de germination des graines <i>Ceratonia siliqua</i>	54
Figure 37 : L'effet de la salinité sur le duree de germination des graines <i>Ceratonia siliqua</i>	55
Figure 38 : L'effet de la salinité sur le vitesse de germination des graines <i>Ceratonia siliqua</i>	56
Figure 39 : L'effet de la tempirateur sur le taux de germinationdes graines <i>C.siliqua</i> .	58
Figure 40 : L'effet de la tempirateur sur le vitesse de germinationdes graines <i>C.siliqua</i>	59
Figure 41 : L'effet de la tempirateur sur le Durée de germinationdes graines <i>C.siliqua</i>	60
Figure 42 : l'effet de concentration de Nacl sur l'angeur moyen des planteul	61

Figure 43 : Variation des poids frais et secs en fonction des niveaux de traitement thermique (0Mmà200Mm).....	63
Figure 44 : Impact du NaCl sur la biomasse et la teneur en eau des plantules de caroubie	64
Figure 45 : Effet du stress salin sur les paramètres de germination de Ceratonia siliqua	65
Figure 46 : l'effet de la tempirateur sur langedeur moyen des planteul	66
Figure 47 : Variation des poid s frais et secs en fonction des niveaux de stress thermique	67
Figure 48 : mpact du stress thermique sur la biomasse et la teneur en eau des plantules de caroubie	68

LISTE DES ABRÉVIATIONS

C° : Degré Celsius (unité de température)

% : Pourcentage (rapport exprimé en cent pour cent)

2n : Nombre chromosomique diploïde (exemple pour *Ceratonia siliqua* L. : 2n = 24)

cm : Centimètre (unité de longueur)

E410 : Gomme de caroube (additif alimentaire naturel épaississant)

g : Gramme (unité de masse)

H₂SO₄ : Acide sulfurique (utilisé pour le prétraitement des graines)

HSPs : Heat Shock Proteins (protéines de choc thermique)

IVG : Indice de vitesse de germination

K⁺ / Na⁺ / Cl⁻ : Ions potassium, sodium et chlore

L : Litre (unité de volume)

LP : Longueur moyenne des plantules

MF : Masse fraîche

MG : Masse germée

ML : Millilitre (unité de volume)

mm : Millimètre (unité de longueur)

mM : Millimolaire (unité de concentration en sels)

MS : Masse sèche

NaCl : Chlorure de sodium

Ng : Nombre de graines germées

Nt : Nombre total de graines

PG : Pourcentage de germination

RH : Humidité relative (Relative Humidity)

TMG : Temps moyen de germination

VG : Vigueur de germination

W : Weight (poids mesuré – masse fraîche ou sèche)

Mots-clés :

- *Ceratonia siliqua*
- *Caroubier*
- *Germination*
- *Dormance des graines*
- *Prétraitements*
- *Acide sulfurique*
- *Tégument imperméable*
- *Levée de dormance*
- *Espèce méditerranéenne*
- *Multiplication végétative*
- *Conservation des espèces*
- *Production de plants*
- *Facteurs physiologiques*
- *Dureté du tégument*
- *Écophysiologie des graines*
- *Stress salin*
- *Stress thermique*
- *Nacl*
- *Tolérance*

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans un contexte mondial marqué par les changements climatiques, la dégradation des sols et l'augmentation de la salinité, la régénération naturelle des espèces végétales représente un défi majeur, en particulier dans les régions arides et semi-arides (FAO, 2021). La réussite de cette régénération dépend fortement de la phase de germination, étape clé du cycle de vie des plantes.

*La famille des Fabaceae, également connue sous le nom de légumineuses, constitue l'une des plus vastes familles botaniques, regroupant environ 19 500 espèces réparties en plus de 750 genres (Lewis et al., 2005). Elle se distingue par sa capacité à fixer l'azote atmosphérique via une symbiose avec les bactéries du genre *Rhizobium*, et par ses multiples rôles écologiques et économiques. Elle contribue à la fertilité des sols, à la sécurité alimentaire et à la lutte contre la désertification.*

La germination constitue une étape essentielle dans le cycle de développement des végétaux, car elle détermine en grande partie le succès de l'installation et de la régénération naturelle des espèces. Cependant, certaines graines présentent une dormance qui limite ou retarde ce processus, notamment en raison de la dureté et de l'imperméabilité de leur tégument. (Bewley et al., 2013; Baskin & Baskin, 2014).

*C'est le cas des graines de *Ceratonia siliqua* L., ou caroubier, une espèce méditerranéenne appartenant à la famille des Fabaceae. Cette espèce ligneuse est très résistante à la sécheresse et joue un rôle écologique important dans la stabilisation des sols et la lutte contre la désertification. Elle possède également une grande valeur économique grâce à ses gousses utilisées dans l'industrie alimentaire, pharmaceutique et fourragère. (Batista et al., 2020; Dakia et al., 2007; Boublenza et al., 2021).*

*Malgré ces atouts, la germination naturelle du caroubier reste souvent faible et irrégulière, principalement à cause de la **dormance physique** imposée par son tégument très dur et imperméable à l'eau. Pour surmonter cette barrière, différentes techniques de scarification sont utilisées afin de faciliter l'imbibition et d'activer le processus germinatif. (Azadi et al., 2010; Baskin & Baskin, 2014).*

*Parmi ces méthodes, le **prétraitement à l'acide sulfurique (H_2SO_4)** est l'une des plus efficaces. Ce traitement chimique permet d'amincir ou de fragiliser le tégument, améliorant ainsi la vitesse et le taux de germination.*

Il présente également l'avantage d'être simple à appliquer et adapté aux graines à dormance dure comme celles du caroubier. (Hameed et al., 2014; El Boullani et al., 2021).

Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer l'effet du prétraitement à l'acide sulfurique sur la germination des graines de Ceratonia siliqua. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre l'impact de ce traitement sur la levée de dormance et de proposer une méthode efficace pour améliorer la multiplication de cette espèce à fort potentiel écologique et économique. IPCC. (2021). Climate Change 2021

Problématique

Malgré l'importance écologique et économique du caroubier, sa régénération naturelle Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014) demeure limitée par la dormance des graines et les conditions environnementales défavorables. Quels prétraitements permettent de lever efficacement la dormance de Ceratonia Lewis, G., Schrire, B., Mackinder, B., & Lock, M. (2005). siliqua et d'améliorer sa germination sous stress salin et thermique ?

Objectif de l'étude

Ce travail vise à évaluer l'effet de différents types de prétraitements sur la germination des graines de Ceratonia siliqua, en présence de stress abiotiques, afin d'identifier les conditions optimales favorisant leur levée de dormance et leur développement précoce.

Hypothèses de l'étude

*Compte tenu de la difficulté de germination naturelle des graines de *Ceratonia siliqua* et des conditions abiotiques contraignantes, nous émettons les hypothèses suivantes :*

- ❖ *Le prétraitement par l'acide sulfurique concentré permet une levée efficace de la dormance tégumentaire et améliore la germination.*
- ❖ *Sous stress salin ou thermique, la germination reste possible mais à des degrés variables selon l'intensité du stress. Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., & Nonogaki, H. (2013).*
- ❖ *Une concentration modérée en NaCl pourrait avoir un effet hormétique en stimulant la germination chez certaines graines.*

Partie Théorique

CHAPITRE 01
PRESENTATION DU CAROUBIER
(Ceratonia Siliqua L)

1. ORIGINE DU CAROUBIER

Le caroubier (Ceratonia siliqua L.) est une espèce méditerranéenne anciennement domestiquée. Selon (Vavilov, 1951), ses origines se situent dans la région orientale du bassin méditerranéen : Turquie, Syrie et Palestine. Cette hypothèse est appuyée par des découvertes archéobotaniques de restes de bois et de fruits datant de plus de 4000 ans. D'autres auteurs, comme (Liphschitz, 1987) suggèrent une origine sud-arabique, notamment au Yémen et en Oman, où l'espèce subsiste encore à l'état spontané. (Zohary, 1976) quant à lui, considère le caroubier comme une relique de la flore indo-malaise (Amani, 2023).

2. TERMINOLOGIE ET TAXONOMIE DU CAROUBIER

Le terme « caroubier » trouve son origine dans le mot arabe kharroub, lui-même issu de l'hébreu kharuv, qui signifie « corne ». Cette racine se retrouve également dans la dénomination scientifique Ceratonia siliqua, où keras en grec fait référence à la corne, et siliqua en latin désigne une gousse. Cette espèce appartient à la famille des Fabaceae, plus précisément à la sous-famille des Caesalpinioideae, et fait partie de la tribu des Cassieae. Il s'agit d'un genre monospécifique, ce qui signifie que le genre Ceratonia ne contient qu'une seule espèce identifiée à ce jour : Ceratonia siliqua L. (Battle, 1997).

Sur le plan cytologique, cette espèce présente un nombre chromosomique de $2n = 24$, ce qui la distingue d'autres genres proches au sein de la même tribu, dont le nombre est souvent de $2n = 28$.

Tableau 1: Classification taxonomique de *Ceratonia siliqua L.* (caroubier) (P. & Santa, 1963)

<i>Rang taxonomique</i>	<i>Classification</i>
<i>Règne</i>	<i>Plantae (plantes)</i>
<i>Sous-règne</i>	<i>Tracheobionta (plantes vasculaires)</i>
<i>Division</i>	<i>Magnoliophyta (plantes à fleurs)</i>
<i>Classe</i>	<i>Magnoliopsida (dicotylédones)</i>
<i>Ordre</i>	<i>Fabales</i>
<i>Famille</i>	<i>Fabaceae (Légumineuses)</i>
<i>Sous-famille</i>	<i>Caesalpinioideae</i>
<i>Genre</i>	<i>Ceratonia</i>
<i>Espèce</i>	<i>Ceratonia siliqua L.</i>
<i>Nombre chromosomique</i>	<i>2n = 24</i>

3. DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE

3.1 DANS LE MONDE

Le caroubier est une espèce largement présente dans les pays du bassin méditerranéen, notamment en Espagne, en Italie, en Grèce, en Turquie, au Maroc, en Tunisie, en Libye, en Syrie, au Liban ainsi qu'à Chypre. Il a également été introduit avec succès dans d'autres régions du monde partageant un climat similaire, comme la Californie, le Chili, le Mexique, l'Australie ou encore l'Afrique du Sud. Dans ces zones, sa culture est principalement orientée vers la production de fourrage, mais aussi utilisée comme moyen efficace de lutte contre l'érosion des sols. (Lisan, 2018).



Figure 1: Répartition du caroubier dans le monde (Loussert, 1972)

3.2 EN ALGERIE

En Algérie, le caroubier est présent essentiellement dans les régions du nord du pays, comme Tlemcen, Tipaza, Bejaïa, Skikda, Bouira, Annaba et Blida, où il pousse soit à l'état spontané, soit sous forme cultivée. L'espèce s'adapte à divers étages bioclimatiques, allant des zones subhumides aux zones semi-arides. Toutefois, on note un recul significatif de sa culture au fil des décennies : la superficie cultivée est passée d'environ 11 000 hectares en 1961 à seulement 1 000 hectares en 2011. (Amine, 2021)

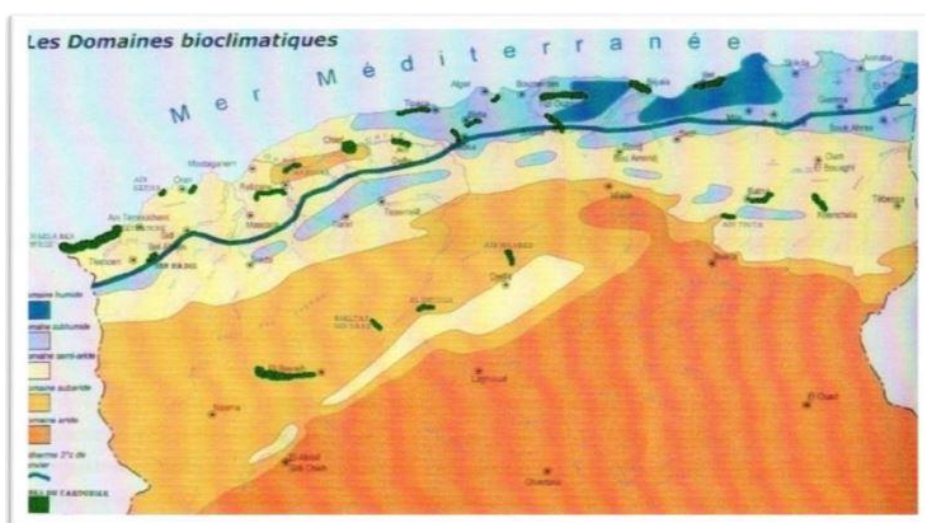


Figure 2 : Répartition du caroubier en Algérie (A.N.R.H, 2012)

Tableau 2: Répartition de *Ceratonia Siliqua* en Algérie. (Benmahiou, Carob tree (*Ceratonia siliqua L.*) biometry in the North West of Algeria, 2021)

<i>Région / Wilaya</i>	<i>Statut</i>	<i>Remarques</i>
<i>Tlemcen</i>	<i>Spontané / Planté</i>	<i>Zones Subhumides</i>
<i>Bejaia</i>	<i>Spontané</i>	<i>Forte Densité</i>
<i>Tipaza</i>	<i>Planté</i>	<i>En Bordure de Routes</i>
<i>Blida</i>	<i>Spontané</i>	<i>Zones Forestières</i>
<i>Sétif</i>	<i>Limité</i>	<i>Régression observée depuis 1961</i>

4. DESCRIPTION BOTANIQUE DU CAROUBIER

Le caroubier (Ceratonia siliqua L.) est un arbre à feuillage persistant, reconnaissable à sa silhouette large et arrondie. Sa hauteur varie généralement entre 5 et 10 mètres, bien qu'il puisse, dans certains cas, atteindre jusqu'à 15 mètres. Doté d'une structure solide, il supporte aisément des conditions climatiques difficiles. Ses différentes parties tronc, racines, feuillage, fleurs et fruits montrent une parfaite adaptation aux environnements xériques, ce qui témoigne de sa remarquable résilience face aux milieux arides. (Aafi, Le Caroubier, 1996)

Tableau 3: Caractéristiques morphologiques principales de *Ceratonia siliqua* (Santa, 1963)

Partie de la plante	Description morphologique
L'arbre	<i>Arbre à feuillage dense, port étalé, persistant, à croissance lente.</i>
Tronc	<i>Tronc épais, souvent tordu, à écorce rugueuse et brun-grisâtre.</i>
Racine	<i>Racine pivotante profonde (> 10 m), accompagnée de racines latérales étendues.</i>
Écorce	<i>Rugueuse, crevassée, de couleur gris foncé à brun, riche en tanins.</i>
Branches	<i>Massives et épaisses, s'étalent en largeur ; bois dur.</i>
Bois	<i>Lourd, dense, brun rougeâtre, utilisé en menuiserie.</i>
Feuilles	<i>Paripennées, alternes, 2 à 5 paires de folioles ovales, coriaces, vert foncé.</i>
Fleurs	<i>Petites, sessiles, sans corolle, groupées en grappes ; arbre dioïque.</i>
Fruits	<i>Gousses (caroubes) aplaties, brunes, 10–25 cm, riches en sucres.</i>
Graines	<i>Petites, dures, brunes, isodiamétriques, 0,2 g environ chacune.</i>

4.1 L'ARBRE

Le caroubier est un arbre à feuillage persistant, au port étalé et arrondi, capable de développer une couronne dense pouvant atteindre jusqu'à 12 mètres de diamètre. Sa hauteur varie généralement entre 5 et 10 mètres, mais dans des conditions particulièrement favorables climat subhumide et sols profonds il peut exceptionnellement dépasser les 15 mètres. Il se distingue par une croissance lente, une longévité

remarquable pouvant dépasser le siècle, ainsi qu'une grande capacité d'adaptation à différents milieux.

Grâce à son feuillage dense, le caroubier procure une ombre appréciable durant la saison estivale, ce qui s'avère bénéfique tant pour les pâturages que pour les cultures associées. Sa remarquable adaptation aux zones arides en fait une espèce clé dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux, où il joue un rôle structurant et multifonctionnel. (Aafi, Le Caroubier, 1996)



Figure 3: Caroubier adulte (*l'Alimentation et l'Environnement*)

4.2 LE TRONC

Le tronc du caroubier se distingue par sa forme courte, épaisse et souvent irrégulière. Il peut atteindre un diamètre d'un mètre, signe évident de sa solidité et de sa résistance. Chez les sujets les plus âgés, notamment ceux issus de cultures traditionnelles, le tronc prend souvent un aspect sinueux caractéristique.

Cette configuration donne au caroubier une excellente résistance mécanique, en particulier face aux vents forts, et lui permet de s'implanter même sur des terrains en pente. Chez les arbres âgés, le tronc tend à se ramifier très bas en plusieurs grosses branches, ce qui contribue à façonner la couronne en forme de dôme caractéristique. (Lisan, 2018)



Figure 4: Le Tronc de Caroube (utile pour les cartes de répartition et données écologiques)

4.3 LA RACINE

Le caroubier développe un système racinaire de type pivotant, à la fois profond et largement étendu. Dans des conditions favorables, sa racine principale peut descendre jusqu'à 18 mètres de profondeur, tandis que les racines latérales peuvent s'étendre horizontalement sur plus de 10 mètres.

Cette architecture racinaire lui permet de :

- *Puise l'eau des couches profondes du sol.*
- *Résister à la sécheresse prolongée.*
- *Fixer le sol et prévenir l'érosion, même sur des terrains instables.*

Les jeunes arbres développent d'abord la racine pivot avant de former les ramifications latérales. Ce développement lent mais profond est un atout majeur pour sa survie dans les zones semi-arides.



Figure 5: *La Racine de Caroube (riche en photos et fiches descriptives)*

4.4 LES FEUILLES

Le caroubier possède un feuillage persistant composé de feuilles paripennées, regroupant de 2 à 5 paires de folioles ovales et épaisses. Chaque foliole mesure généralement entre 3 et 6 centimètres. Leur face supérieure est d'un vert foncé brillant, tandis que la face inférieure présente une teinte plus claire et un aspect mat.

Elles jouent un rôle important dans : (Lisan, 2018)

- *La photosynthèse efficace même sous forte luminosité*
- *La limitation de la transpiration (cuticule épaisse)*
- *Le fourrage occasionnel pour les animaux en période de sécheresse.*



Figure 6: *Les Feuilles de Caroube (Fiche plante : Ceratonia siliqua)*

4.5 LES FLEURS

Les fleurs sont :

- *Petites, de 3 à 4 mm*
- *Rouge foncé à brunâtres*
- *Dépourvues de corolle*
- *Regroupées en grappes axillaires ou en épis*

L'espèce est dioïque, avec des arbres mâles et femelles, mais on trouve aussi des formes hermaphrodites (rarement fertiles). La floraison a lieu d'août à octobre.

Les fleurs mâles dégagent une odeur sucrée attirant les insectes pollinisateurs.



Figure 7: Les Fleurs de Caroube (*Ceratonia siliqua*, 2018)

4.6 LES FRUITS

Le fruit du caroubier, communément appelé caroube, se présente sous forme d'une gousse aplatie et allongée. Sa longueur varie entre 10 et 25 centimètres, pour une largeur de 2 à 3 centimètres et une épaisseur d'environ 1 centimètre.

À maturité :

- Elle devient **BRUNE FONCE**
- Contient 10 à 16 graines
- Très riche en sucres (jusqu'à 50 %)

Les caroubes sont indéhiscentes (ne s'ouvrent pas à maturité) et restent souvent sur l'arbre plusieurs semaines.



Figure 8 : *Les Fruits de Caroube (Flore sauvage d'Espagne)*

4.7 LES GRAINES

4.7.1 Anatomie du fruit et de la graine :

La gousse de caroube est structurée intérieurement par des cloisons pulpeuses et renferme entre 5 et 16 graines. Elle se compose de trois éléments principaux : (Figure 9)

- *L'épicarpe, qui constitue la peau externe du fruit. Il est de nature fibreuse et présente une coloration caractéristique.*
- *Le mésocarpe, représentant la pulpe charnue, particulièrement riche en sucres. Cette partie constitue entre 70 % et 95 % de la masse totale du fruit.*
- *L'endocarpe, de texture fibreuse, tapisse l'intérieur du fruit. Il forme des compartiments appelés loges carpellaires, dans lesquels les graines sont logées. (Biner, 2007)*

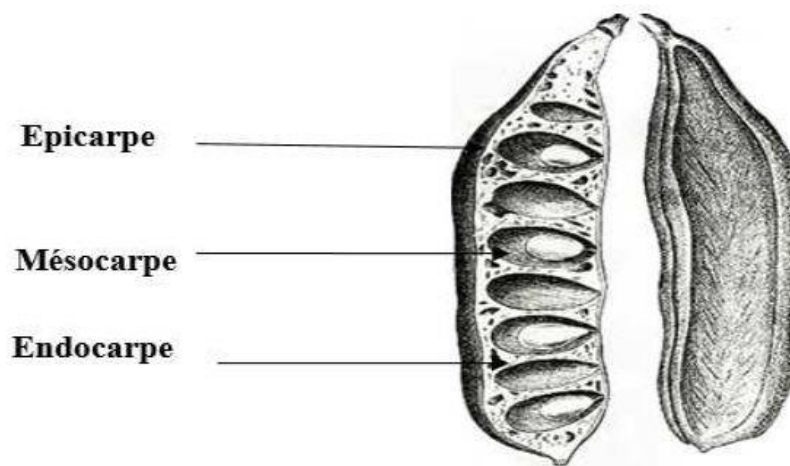


Figure 9: Coupe longitudinale d'une gousse de caroube (flora silvestre)

Les graines du caroubier sont petites, de forme ovale, légèrement aplatie et convexe. Elles possèdent une enveloppe externe lisse, dure et brillante, de couleur brun rougeâtre. En général, leur longueur se situe entre 8 et 10 mm, leur largeur entre 6 et 8 mm, et leur épaisseur varie de 3 à 5 mM. Très résistantes sur le plan mécanique, ces graines sont logées à l'intérieur de la gousse, séparées les unes des autres par des membranes pulpeuses. Chaque gousse contient habituellement entre quinze et vingt graines.

Chaque graine est constituée de trois parties distinctes :

- Les téguments, de couleur brune, forment une enveloppe solide représentant environ 30 à 35 % du poids sec de la graine.
- La radicelle, qui correspond à la future plante, représente entre 15 et 30 % du poids sec (Neukom, 1988). Elle est riche en énergie, notamment grâce à sa forte teneur en protéines solubles et en lipides majoritairement insaturés.
- L'endosperme, situé entre les téguments et la radicelle, constitue environ 40 à 50 % de la masse totale de la graine. Il est surtout connu pour être la source principale de la gomme de caroube, largement utilisée dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique.

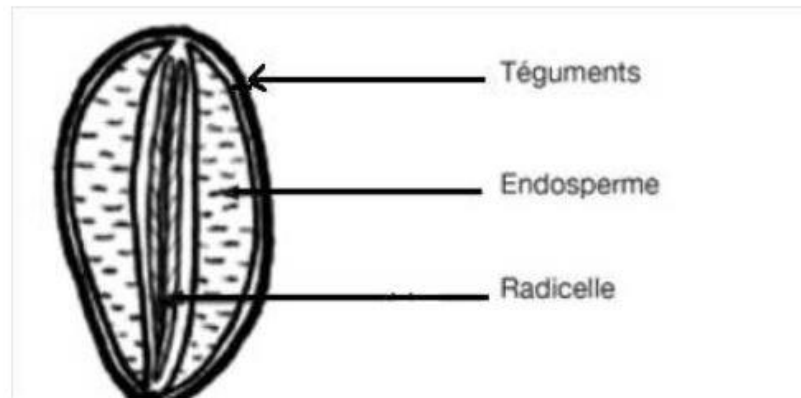


Figure 10 : Composants de la graine du caroubier (*flora silvetre*)

4.7.2 Utilisation de la graine :

Les graines de caroube sont bien appréciées et recherchées pour leurs qualités et multiples usages industriels. L'utilisation possible, dans l'industrie alimentaire, de polyphénol antioxydant contenu naturellement dans l'enveloppe tégumentaire a soulevé d'énormes intérêts au même titre que la production industrielle de gomme de caroube. (Kafalas, 2004) La gomme extraite de l'endosperme représente environ un tiers du poids total de la graine de caroube. Cette substance mucilagineuse est très prisée pour ses propriétés fonctionnelles, notamment comme agent stabilisant, épaississant, liant ou encore gélifiant. Elle entre dans la composition de nombreux produits alimentaires, parmi lesquels on retrouve la crème glacée, les soupes, les sauces, les biscuits, les tourtes, les confiseries, les produits de boulangerie, ainsi que certaines formules destinées à l'alimentation animale.

Au-delà de l'agroalimentaire, ses applications industrielles sont tout aussi variées. Elle est utilisée dans des domaines techniques tels que l'imprimerie, la photographie, le textile, les matières plastiques, les encres, les cires, les adhésifs, ainsi que dans les secteurs pharmaceutiques et cosmétique.

5. PRODUCTION DU CAROUBIER

5.1 DANS LE MONDE

Le caroubier est majoritairement cultivé dans les régions méditerranéennes, principalement pour ses gousses naturellement sucrées et ses graines riches en fibres,

très prisées dans l'industrie agroalimentaire. À l'échelle mondiale, le Maroc occupe la première place en matière de production, suivi par l'Espagne, l'Italie et le Portugal. Ces pays ont mis en place des systèmes de culture durables, adaptés aux conditions climatiques locales et respectueux de l'environnement. (Belfetni, 2021)

5.2 EN ALGERIE

En dépit de la présence spontanée du caroubier dans plusieurs régions du pays, sa culture demeure largement marginalisée et en net recul. La superficie cultivée est passée d'environ 11 000 hectares en 1961 à seulement 1 000 hectares en 2011. La production nationale reste faible, peu organisée, et provient essentiellement d'arbres sauvages non exploités de manière structurée. (Lisan, 2018)

Tableau 4: Comparaison de la production du caroubier (monde vs Algérie) (Aafi, 1996)

<i>Pays/ Région</i>	<i>Superficie cultivée (ha)</i>	<i>Production annuelle estimée (tonnes)</i>	<i>Utilisation principale</i>
<i>Maroc</i>	<i>55 000</i>	<i>120 000</i>	<i>Export, alimentation, reforestation</i>
<i>Espagne</i>	<i>45 000</i>	<i>100 000</i>	<i>Agroalimentaire, fourrage</i>
<i>Portugal</i>	<i>20 000</i>	<i>60 000</i>	<i>Transformation industrielle</i>
<i>Algérie</i>	<i>~1 000</i>	<i>Données non disponibles</i>	<i>Usage local, faible valorisation</i>

6. REPRODUCTION BIOLOGIQUE DE CERATONIA SILIQUA

Le caroubier se reproduit principalement par voie sexuée, bien que la multiplication végétative soit également utilisée dans certains cas. En tant qu'espèce dioïque, il présente des individus distincts portant soit des fleurs mâles, soit des fleurs femelles. Il arrive toutefois que certaines formes hermaphrodites apparaissent, bien qu'elles soient relativement rares.

6.1 FLORAISON

La floraison du caroubier commence en général entre les mois d'août et d'octobre, coïncidant avec la fin de l'été dans les zones méditerranéennes. Les fleurs apparaissent

sous forme de grappes axillaires, regroupées en inflorescences. Elles sont petites, dépourvues de pétales (apétales), sessiles, et leur teinte varie du rougeâtre au brun.

Chez le caroubier, la floraison des individus mâles et femelles n'est pas toujours synchronisée. Cette asynchronie peut avoir un impact direct sur le taux de fructification, surtout lorsque la période de floraison des deux sexes ne coïncide pas suffisamment pour permettre une pollinisation efficace. (A A. , Le caroubier, Ministère de l'Agriculture, 1996)

6.2 FECONDATION

La reproduction du caroubier repose sur une fécondation allogame, impliquant le transfert de pollen d'un arbre mâle vers un arbre femelle. Étant une espèce dioïque, la réussite de la pollinisation dépend fortement de la proximité entre les individus des deux sexes. Bien qu'il existe certains sujets hermaphrodites capables d'autofécondation, ce mécanisme demeure exceptionnel et son efficacité reste limitée. (Aafi, 1996)

6.3 POLLINISATEURS

La pollinisation du caroubier est essentiellement entomophile, assurée par les insectes pollinisateurs tels que : (Amine, 2021)

- ❖ *Les abeilles (*Apis mellifère*)*
- ❖ *Les mouches*
- ❖ *Certains coléoptères*

Le parfum sucré des fleurs mâles attire les insectes, même en l'absence de nectar. Le vent (pollinisation anémophile) peut intervenir à un degré secondaire.

6.4 FRUCTIFICATION

Une fois la pollinisation et la fécondation accomplies, les fruits c'est-à-dire les gousses mettent en moyenne entre 10 et 11 mois pour arriver à maturité. La fructification intervient l'année suivante, avec une période de récolte qui s'étend généralement de juillet à septembre. Les arbres issus de semis commencent à produire des fruits au bout de 6 à 8 ans, tandis que les sujets greffés peuvent entrer en production dès la 3^e ou 4^e année.

7. MULTIPLICATION PAR SEMIS

La multiplication du caroubier par semis demeure la méthode la plus couramment utilisée, en particulier dans les systèmes de culture traditionnels ou à des fins expérimentales. Elle consiste à planter les graines extraites des gousses après leur récolte. Cependant, ces graines présentent une dormance importante liée à la dureté de leur enveloppe extérieure, qui limite fortement la pénétration de l'eau et de l'oxygène, rendant ainsi la germination naturellement difficile.

Pour lever cette dormance et favoriser la germination, il est nécessaire de recourir à des traitements pré-germinatifs, parmi lesquels :

- *Scarification mécanique (égrenage léger, incision ou ponçage du tégument).*
- *Trempe dans l'eau chaude (60 à 80 °C pendant 12 à 24 heures).*
- *Traitement chimique à l'acide sulfurique concentré (98 %) pendant quelques minutes, suivi d'un rinçage abondant.*

Bien que le semis soit une méthode simple et économique, il génère des plants présentant une grande variabilité génétique, du fait de la fécondation croisée. Cette diversité peut s'avérer précieuse pour maintenir la richesse génétique des populations de caroubiers, mais elle constitue un inconvénient lorsqu'on recherche une homogénéité au niveau des rendements ou des caractéristiques des fruits.

8. ÉCOLOGIE DE CERATONIA SILIQUA

Ceratonia siliqua L. est une espèce xérophile et thermophile, particulièrement bien adaptée aux régions à climat méditerranéen. Elle prospère dans des milieux marqués par des étés chauds et secs, ainsi que des hivers doux. Cette plante tolère des températures élevées, dépassant les 40 °C, et peut survivre avec des précipitations limitées, généralement comprises entre 250 et 550 mm par an, essentiellement concentrées en automne et en hiver.

Grâce à son système racinaire pivotant et très profond, le caroubier peut puiser l'eau dans les couches souterraines, ce qui lui confère une excellente tolérance à la sécheresse. Il se développe de préférence sur des sols calcaires bien drainés, avec un pH

situé entre 7 et 8,5. Il est également capable de s'adapter à des terrains pauvres et pierreux, bien qu'il redoute les sols compacts, lourds ou mal aérés. (A A. , Le caroubier, Ministère de l'Agriculture, 1996)

La présence du caroubier joue un rôle important dans la stabilisation des sols, en limitant les phénomènes d'érosion et en favorisant la régénération des milieux dégradés. Ces qualités font de cette espèce un excellent candidat pour les programmes de reboisement, notamment dans les régions arides et semi-arides où la couverture végétale est fragile.

9. EXIGENCES ECOLOGIQUES

*Le caroubier (*Ceratonia siliqua L.*) est une espèce à la fois xérophile et thermophile, parfaitement adaptée aux conditions climatiques méditerranéennes. Grâce à sa grande résilience, il constitue un choix pertinent pour les initiatives de reboisement dans les zones dégradées ou soumises à un stress hydrique, comme les régions semi-arides. Ses besoins écologiques se concentrent principalement autour de trois éléments clés : le climat, la nature du sol et la disponibilité en eau.*

EXIGENCES EDAPHO-CLIMATIQUES

a) CLIMAT

Le caroubier préfère les régions à climat chaud et sec, avec des températures moyennes annuelles de 18 à 22 °C. Il tolère des températures estivales élevées (> 40 °C), mais peut être sensible aux gelées hivernales intenses (< -5 °C). La floraison tardive lui permet d'éviter les risques de gel printanier. Il pousse naturellement dans des zones où les précipitations annuelles varient entre 250 et 550 mm, principalement en automne et en hiver. (Aafi, Le Caroubier, 1996)

b) SOL

L'espèce pousse bien sur des sols légers, calcaires, pauvres, et bien drainés. Le pH optimal se situe entre 7 et 8.5. Elle supporte des terrains caillouteux et légèrement salins, mais redoute les sols mal aérés ou argileux qui favorisent l'asphyxie racinaire. (Lisan, 2018)

c) *EAU*

Grâce à son système racinaire profond, le caroubier est capable de puiser l'eau dans les couches inférieures du sol, ce qui le rend hautement tolérant à la sécheresse. Toutefois, un apport d'eau pendant les premières années de croissance peut améliorer son établissement. (Amine, 2021)

Tableau 5: Plage climatique optimale pour *Ceratonia siliqua* (Brousse, 1978)

<i>Facteur</i>	<i>Exigence ou tolérance</i>
<i>Température</i>	18–22 °C ; tolère jusqu'à 45 °C
<i>Précipitations</i>	250–550 mm/an
<i>Gel</i>	Jusqu'à -5 °C, au-delà : dégâts floraux
<i>Sol</i>	Léger, calcaire, pH 7–8.5, bien drainé
<i>Eau</i>	Bonne tolérance à la sécheresse

10. IMPORTANCE ECOLOGIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE

10.1 IMPORTANCE ECOLOGIQUE

Le caroubier joue un rôle majeur dans la protection de l'environnement et la lutte contre la désertification, notamment dans les régions arides et semi-arides. Grâce à son système racinaire profond et son feuillage dense, il : (Benmahioul, 2011)

- Stabilise les sols et limite l'érosion hydrique et éolienne.
- Améliore la fertilité du sol via l'apport de matière organique.
- Favorise la biodiversité locale en offrant refuge et nourriture à plusieurs espèces (insectes, oiseaux, petits mammifères).
- S'adapte sans irrigation, ce qui le rend idéal pour les programmes de reboisement dans les zones dégradées.

10.2 IMPORTANCE SOCIO-ECONOMIQUE

Au-delà de ses bienfaits environnementaux, le caroubier possède une valeur économique importante, particulièrement dans les régions rurales où il est :

- Une source de revenus complémentaire pour les agriculteurs (vente des gousses, graines, pulpe).
- Utilisé dans la fabrication de produits agroalimentaires, cosmétiques, et pharmaceutiques.
- Peu exigeant en entretien, ce qui réduit les coûts de production.
- Un élément du patrimoine culturel et alimentaire local.

La valorisation industrielle des produits issus du caroubier, en particulier la gomme de caroube (E410) extraite des graines, suscite un fort intérêt à l'échelle mondiale. Très recherchée dans l'industrie agroalimentaire, elle est largement utilisée comme agent épaississant, gélifiant ou stabilisant dans la fabrication de divers produits tels que les glaces, les sauces ou encore les yaourts (*Ceratonia siliqua*, 2018).

10.3 RESUME :

Le caroubier occupe une place importante dans la préservation des sols, la protection de la biodiversité et la lutte contre l'avancée de la désertification, en particulier dans les zones arides. Sur le plan socio-économique, il représente une ressource précieuse pour les communautés rurales, notamment grâce à la valorisation de ses gousses, de sa pulpe et de ses graines. Ces dernières permettent d'extraire la gomme de caroube, un produit très prisé dans les secteurs de l'agroalimentaire, de la cosmétique et de la pharmacie à l'échelle internationale.

Tableau 6: Rôle écologique et économique du caroubier (Gharnit, 2006)

ÉCOLOGIE	ÉCONOMIE
Lutte contre l'érosion	Revenus pour les populations rurales
Préservation de la biodiversité	Produits agroalimentaires (sirop, farine...)
Reboisement et stabilisation des sols	Usages cosmétiques et pharmaceutiques
Résistance à la sécheresse	Transformation industrielle (gomme, pulpe)

11. INTERETS ET UTILISATIONS

*Le caroubier (*Ceratonia siliqua L.*) est une espèce polyvalente, dont l'ensemble des parties du tronc aux graines présente des intérêts fonctionnels, écologiques, économiques, alimentaires et médicaux. Sa remarquable résilience face aux conditions difficiles, combinée à sa richesse en composés bioactifs, en fait un acteur essentiel des stratégies de développement durable, en particulier dans les zones arides et semi-arides.*

11.1 INTERETS AGROECOLOGIQUES

Le caroubier s'adapte très bien aux zones arides et aux terres appauvries, où il joue un rôle environnemental de premier plan. Il aide à maintenir la stabilité des sols, limite les phénomènes d'érosion, favorise la biodiversité, tout en contribuant à la fixation du carbone et à l'amélioration de la structure du sol.

11.2. USAGES ALIMENTAIRES :

*La gousse du caroubier (*Ceratonia siliqua*) se distingue par sa teneur élevée en sucres naturels, pouvant représenter jusqu'à 50 % de son poids sec. Elle est transformée pour produire différents produits comme le sirop, la poudre de caroube souvent utilisée comme alternative au cacao ou encore des farines diététiques, appréciées pour leur richesse en fibres.*

La pulpe, quant à elle, entre dans la composition de nombreux produits alimentaires tels que les pains, les barres énergétiques ou les aliments destinés aux enfants. Elle est valorisée pour sa bonne digestibilité, ainsi que pour sa teneur en fibres solubles et en antioxydants d'origine naturelle.

11.3 USAGES MEDICINAUX ET PHARMACEUTIQUES

Les extraits issus de la caroube sont reconnus pour leurs multiples vertus médicinales. Ils sont notamment utilisés pour leurs effets antidiarrhéiques, antioxydants, hypocholestérolémiants, ainsi que comme agents anti-reflux chez les nourrissons. Ces bienfaits sont principalement attribués à la composition de la pulpe, particulièrement riche en polyphénols, en tanins condensés et en fibres alimentaires. (Aboura, 2018)

11.4 USAGES VETERINAIRES

En milieu rural, le caroubier trouve également sa place dans l'alimentation animale. Ses feuilles sont utilisées comme fourrage d'appoint, tandis que les gousses, une fois broyées, sont intégrées aux rations des ruminants pour leur apport en énergie, en fibres, en protéines et en minéraux.

11.5 USAGES INDUSTRIELS

La gomme de caroube , obtenue à partir des graines, est largement utilisée comme agent gélifiant dans l'industrie agroalimentaire. Elle trouve également des applications dans les domaines cosmétique et pharmaceutique. Par ailleurs, le bois du caroubier, connu pour sa densité et sa solidité, est apprécié en menuiserie artisanale et sert également à la fabrication de charbon de bois. (Belfetni, 2021)

Tableau 7 : Usages traditionnels et modernes de *Ceratonia siliqua* (Produits forestiers non ligneux en Méditerranée, 2018)

<i>Partie du caroubier</i>	<i>Utilisations principales</i>
<i>Arbre</i>	<i>Ombrage, reboisement, lutte contre la désertification</i>
<i>Gousse</i>	<i>Sirop, farine, fourrage, substitut de cacao</i>
<i>Pulpe</i>	<i>Fibres alimentaires, antioxydants, nutrition diététique</i>
<i>Feuilles</i>	<i>Fourrage, remèdes traditionnels</i>
<i>Graines</i>	<i>Gomme de caroube (E410), usage pharmaceutique et cosmétique</i>
<i>Bois</i>	<i>Menuiserie, artisanat, combustible</i>

RESUME DU CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU CAROUBIER (CERATONIA SILIQUA L.)

*Le caroubier (*Ceratonia siliqua L.*) est un arbre fruitier à feuillage persistant, originaire du bassin méditerranéen. Il est reconnu pour sa résistance aux conditions climatiques extrêmes et sa remarquable capacité à s'adapter à des sols pauvres et secs.*

Sur le plan taxonomique, il appartient à la famille des Fabacées, sous-famille des Caesalpinioideae, et constitue un genre monospécifique. Cytologiquement, il est diploïde ($2n = 24$).

Sa répartition géographique concerne principalement les pays méditerranéens comme le Maroc, l'Espagne, l'Italie ou encore la Grèce. En Algérie, il est localisé surtout dans les régions du nord telles que Tlemcen, Tipaza, Bejaïa et Skikda.

La plante présente des caractéristiques morphologiques adaptées aux environnements secs : un tronc robuste, un système racinaire profond, des feuilles coriaces, ainsi que des gousses riches en sucres.

À l'échelle mondiale, la production est dominée par le Maroc et l'Espagne, tandis que l'Algérie connaît une forte diminution des surfaces cultivées.

Le caroubier se reproduit par voie sexuée, avec une majorité d'individus dioïques, une floraison tardive et une phase de fructification relativement longue. La pollinisation est assurée par les insectes (entomophile).

Les techniques de multiplication comprennent le semis, la culture in vitro et le greffage, chacune présentant des avantages selon les objectifs visés.

Sur le plan écologique, cette espèce supporte bien les températures élevées, les sols calcaires, et les faibles précipitations, ce qui en fait une option idéale pour les zones arides.

Du point de vue socio-économique, le caroubier fournit des produits à haute valeur ajoutée : sirop, gomme alimentaire (E410), farine, fourrage, bois, ainsi que des extraits aux propriétés antioxydantes.

Enfin, son rôle dans la préservation des sols, la lutte contre la désertification, et l'amélioration des revenus ruraux, lui confère une importance stratégique dans les politiques de développement durable en région méditerranéenne.

CHAPITRE 02
EFFET DES PRETRAITEMENTS SUR LA
GERMINATION DES GRAINES
DE CAROUBIER

1. INTRODUCTION

*La germination représente une phase clé dans le cycle de développement des plantes, en particulier pour les espèces ligneuses telles que le caroubier (*Ceratonia siliqua* L.). Toutefois, les graines de cette espèce sont connues pour leur forte dormance tégumentaire, principalement due à la dureté de leur enveloppe externe, ce qui freine leur germination naturelle.*

Pour surmonter cette contrainte, différentes méthodes de prétraitement (ou pré-germination) sont mises en œuvre par les chercheurs et les agriculteurs. Ces techniques ont pour objectif de lever la dormance et de favoriser à la fois un taux de germination plus élevé et une levée plus rapide. Elles revêtent une importance particulière dans les programmes de reboisement, la réhabilitation des écosystèmes dégradés, ainsi que dans la production de jeunes plants destinés à l'agriculture.

2. DEFINITION DE LA GERMINATION

*La germination fait référence à l'ensemble des processus biologiques et biochimiques qui transforment une graine en une jeune pousse viable lorsque les conditions environnementales sont propices. Cela marque la transition de l'état de dormance ou de repos métabolique vers une phase active de croissance où l'embryon se développe progressivement. D'un point de vue physiologique le processus de germination démarre dès que la graine a absorbé une quantité d'eau suffisante (imbibition), ce qui active les processus métaboliques cellulaires tels que la synthèse des protéines, la respiration et l'activation enzymatique. Ces actions facilitent la libération des réserves nutritives stockées dans l'endosperme ou les cotylédons, essentielles à la croissance de l'embryon. La phase de germination prend fin avec l'apparition de la radicule qui est le premier signal visible que la graine s'est métamorphosée en un jeune plant. Certaines espèces telles que *Ceratonia Siliqua* rencontrent naturellement des obstacles à la germination en raison d'une dormance tégumentaire sévère qui entrave le processus de croissance des plantules. Des mesures spécifiques (prétraitements) sont nécessaires pour surmonter cette dormance et favoriser le redémarrage du cycle végétatif. (Gunes, 2021)*

3. PHASES ET ETAPES DE LA GERMINATION

Chez Ceratonia siliqua, comme chez la plupart des espèces végétales, la germination suit un processus structuré composé de trois phases majeures, qui se succèdent de façon progressive et interdépendante. Ces étapes reflètent la réactivation physiologique de l'embryon et son évolution vers une jeune plantule capable de croître de manière autonome.

3.1 PHASE D'IMBIBITION

La première étape de la germination est l'imbibition, qui correspond à l'absorption d'eau par la graine. Cette absorption est généralement rapide et passive, régie par des mécanismes de diffusion osmotique à travers le tégument.

Chez le caroubier, cette phase est fortement limitée par la dureté du tégument, d'où la nécessité de prétraitements pour en faciliter la perméabilité.

L'imbibition entraîne : (Belfetni, 2021)

- 3. Le gonflement des tissus*
- 4. Le relâchement des structures membranaires*
- 5. L'amorçage des premières activités enzymatiques*

3.2 PHASE DE GERMINATION

Une fois imbibée, la graine entre dans la phase de germination métabolique. C'est à ce stade que :

- Les réserves nutritives (glucides, lipides, protéines) sont mobilisées*
- L'embryon s'active*
- Les enzymes hydrolytiques (amylases, protéases) dégradent les réserves stockées dans l'endosperme ou le cotylédon*

L'organe visible qui indique le début réel de la germination est la radicule, qui perce le tégument et amorce la croissance vers le bas. (Aboura, 2018)

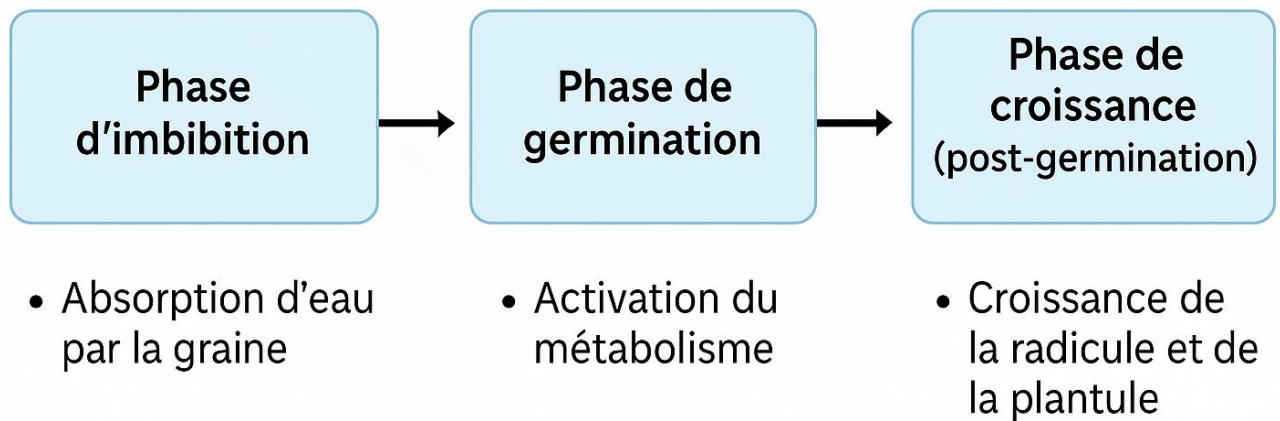


Figure 11: Les phase de germination (Black B. , 1994)

3.3 PHASE DE CROISSANCE (POST-GERMINATION)

Dans cette dernière phase, la jeune plantule entre dans un cycle de croissance active, avec : (Gunes, 2021)

- L'allongement de la racicule (formation de racines secondaires),
- Le développement de la tigelle (hypocotyle),
- L'apparition des premières feuilles fonctionnelles (cotylédons ou feuilles primaires),
- L'établissement progressif de la photosynthèse autonome.

Cette phase est décisive pour la survie de la plantule, car elle dépend fortement de la qualité du substrat, de la disponibilité en lumière, en eau et en nutriments.

Tableau 8: Les trois phases principales de la germination d'une graine (Bewley, 1994)

Phase	Description	Marqueur biologique
<i>Imbibition</i>	<i>Absorption d'eau → activation cellulaire</i>	<i>Gonflement des tissus</i>
<i>Germination active</i>	<i>Mobilisation des réserves → croissance de l'embryon</i>	<i>Émergence de la racicule</i>
<i>Croissance post-germinale</i>	<i>Développement de la plantule autonome (racines, feuilles)</i>	<i>Feuilles + enracinement actif</i>

4. CONDITIONS DE LA GERMINATION

La germination est grandement affectée par une combinaison de facteurs provenant de l'environnement (externes) et du corps (internes). Ces éléments doivent être réunis afin d'assurer une activation totale de l'embryon et une croissance efficace de la jeune plante.

4.1 CONDITIONS EXTERNES

*Les conditions extérieures agissent comme des déclencheurs ou des limitants pour la germination. Chez *Ceratonia siliqua*, leur maîtrise est cruciale en raison de la sensibilité des graines à certains paramètres.*

a. Lumière :

La graine du caroubier est considérée comme photoblaste neutre, c'est-à-dire qu'elle n'est pas directement influencée par la présence ou l'absence de lumière pour enclencher sa germination. Toutefois, une exposition modérée à la lumière peut avoir un effet bénéfique sur la vigueur des jeunes plantules. À l'inverse, une obscurité excessive peut freiner le développement post-germination et nuire à la croissance initiale. (Anzala, 2006)

b. Température :

La température optimale de germination du caroubier se situe entre 20 et 30 °C. En dessous de 15 °C, la germination devient très lente. Les températures trop élevées (> 35 °C) peuvent provoquer des stress thermiques inhibiteurs. (Mazliak, 1982)

c. Eau (humidité) :

L'humidité du substrat est un facteur décisif. L'imbibition dépend directement de la disponibilité en eau, mais un excès peut entraîner l'asphyxie du germe ou la prolifération fongique. Un taux d'humidité modéré et stable est donc recommandé. (Lendeunff, 1975)

d. Oxygène :

Une faible quantité d'oxygène est suffisante pour démarrer la respiration embryonnaire, mais le tégument peut limiter sa diffusion. (Meyer, 2004)

4.2 CONDITIONS INTERNES

a. Maturité des graines :

Une graine est dite mature lorsque ses structures sont totalement différenciées et prêtes à fonctionner.

b. Longévité des graines :

Les graines de caroubier peuvent rester viables jusqu'à 5 ans si stockées dans de bonnes conditions.

Tableau 9 : Comparaison entre les conditions externes et internes influençant la germination (Mazliak, 1982).

Type de condition	Facteurs	Effets sur la germination
Externes	Lumière	Influence variable selon les espèces. Chez <i>C. siliqua</i> , faible impact mais utile post-germination.
	Température	Optimale entre 20–30 °C. Accélère ou ralentit les réactions enzymatiques.
	Humidité (eau)	Essentielle à l'imbibition. L'excès peut causer l'asphyxie ou les moisissures.
	Oxygène	Nécessaire à la respiration. Sa diffusion peut être limitée par le tégument.
Internes	Maturité	Une graine immature ne germe pas malgré des conditions favorables.
	Longévité	Déclin du pouvoir germinatif au fil du temps. Viabilité jusqu'à 5 ans en conservation adéquate.

5. DORMANCE DES GRAINES

La dormance est un état physiologique actif où une graine viable ne peut pas germer malgré des conditions environnementales favorables telles que l'eau la température l'oxygène et la lumière. Ce processus joue un rôle crucial dans la stratégie d'adaptation de nombreuses espèces végétales particulièrement celles qui sont originaires des régions méditerranéennes comme *Ceratonia Siliqua* où les conditions climatiques sont instables et souvent difficiles (comme la sécheresse la chaleur et l'érosion).

Ce phénomène permet de retarder la germination jusqu'à ce que le milieu devienne optimal, réduisant ainsi les risques de mortalité précoce chez la plantule. (Lendeunff, 1975)

5.1 TYPES DE DORMANCE

On distingue plusieurs types de dormance, selon leur origine physiologique :

a. Dormance exogène :

*Cette forme de dormance est liée à des facteurs externes à l'embryon, en particulier au niveau du tégument. Chez *Ceratonia siliqua*, elle se traduit par une enveloppe externe rigide, lignifiée et imperméable à l'eau ainsi qu'à l'oxygène. Cette barrière physique empêche l'imbibition de la graine et bloque ainsi l'émission de la radicule, entravant le déclenchement du processus de germination.*

b. Dormance endogène :

liée à des blocages internes au niveau de l'embryon ou des régulations hormonales (notamment un excès d'acide abscissique – ABA – ou un déficit en gibbérellines – GA). (Mazliak, 1982)

c. Dormance morphologique :

elle résulte d'un embryon immature au moment de la dispersion de la graine. Ce type est peu fréquent chez les espèces ligneuses comme le caroubier

d. Dormance secondaire :

elle s'installe chez une graine initialement non dormante, suite à des conditions environnementales défavorables après la maturation (chaleur extrême, sécheresse). Elle est réversible. (Meyer, 2004)

5.2 LEVEE DE LA DORMANCE

*La levée de la dormance correspond à l'ensemble des interventions permettant à une graine en état de repos de retrouver son pouvoir germinatif. Chez *Ceratonia siliqua*, cette levée est indispensable en raison de la nature tégumentaire de la dormance, qui empêche l'imbibition et bloque l'initiation des processus métaboliques internes.*

Parmi les méthodes les plus courantes, on distingue d'abord les techniques physiques, telles que la scarification mécanique, qui consiste à user manuellement ou à inciser légèrement le tégument de la graine à l'aide de papier abrasif ou d'un instrument métallique. Cette méthode simple mais efficace permet de créer des microfissures qui facilitent l'entrée de l'eau et de l'oxygène dans les tissus internes de la graine. (Gunes, 2021)

Une autre méthode physique largement utilisée est le trempage dans l'eau chaude, généralement à une température d'environ 80 °C pendant une durée de 10 à 30 minutes, suivi d'un refroidissement et d'un trempage prolongé à température ambiante. Cette technique ramollit le tégument dur et active les enzymes de germination.

À côté des méthodes physiques, des traitements chimiques sont également employés, notamment l'utilisation d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 à 98 %). Ce procédé consiste à plonger les graines pendant 15 à 30 minutes dans l'acide, suivi d'un rinçage soigneux à l'eau distillée. Cette méthode agit efficacement sur les couches externes du tégument, qu'elle désintègre partiellement, tout en préservant l'intégrité de l'embryon. (Black, 1994)

Certaines études recommandent le recours à des méthodes combinées, par exemple l'association de la scarification mécanique avec un trempage à l'eau chaude ou un traitement acide, afin d'obtenir une levée de dormance plus rapide et plus homogène.

Les effets de ces traitements sont notables : ils permettent de réduire considérablement le temps de germination, de doubler voire tripler le taux de levée, et de synchroniser l'émergence des plantules, ce qui est particulièrement utile dans les programmes de reboisement ou de culture intensive.

5.3 DORMANCE CHEZ CERATONIA SILIQUA

Les graines de caroubier présentent une dormance tégumentaire très marquée, c'est-à-dire que la barrière physique du tégument empêche l'absorption de l'eau, le passage de l'oxygène et parfois même l'action des hormones de germination. Cette forme de dormance est un obstacle majeur à la régénération naturelle de l'espèce et nécessite l'application de traitements pré germinatifs pour la lever.

Les graines peuvent rester viables jusqu'à 5 ans si elles sont conservées dans des conditions adéquates, mais sans traitement, leur germination est faible, lente, et non homogène. (Aafi, 1996)

5.4 ROLE ECOLOGIQUE DE LA DORMANCE

Au-delà de sa complexité physiologique, la dormance offre des avantages écologiques majeurs. Elle permet à l'espèce : (Vallad, 2002)

- *de survivre dans des écosystèmes arides ou perturbés.*
- *d'échelonner la germination dans le temps pour limiter les pertes.*
- *de protéger le matériel génétique face aux fluctuations climatiques.*
- *d'améliorer la compétitivité à long terme dans des milieux instables.*

6. TRAITEMENTS PREGERMINATIFS DES SEMENCES

6.1 DEFINITION DU PRIMING

Le priming désigne l'ensemble des techniques utilisées pour pré-activer les graines avant leur semis, sans les faire germer complètement. Cela inclut des immersions contrôlées dans l'eau, des solutions chimiques, ou des régulateurs de croissance.

6.2 OBJECTIFS DES PRETRAITEMENTS

Les prétraitements visent à : (Black B. , 1994)

- *Briser la dormance.*
- *Synchroniser la germination.*
- *Améliorer la vigueur des plantules.*
- *Renforcer la tolérance aux stress abiotiques (sécheresse, salinité...).*

6.3 EXEMPLES D'APPLICATION

Tableau 10: exemples de traitements prégerminatifs appliqués à différentes espèces, dont *Ceratonia siliqua*. (Gunes, 2021)

<i>Espèce</i>	<i>Type de traitement</i>	<i>Effets observés</i>
<i>Ceratonia siliqua</i>	Eau chaude 80 °C – 24 h	Accélération de la germination
<i>Ceratonia siliqua</i>	Scarification mécanique	Taux de levée doublé
<i>Trigonella foenum-graecum</i>	Silicium (Na ₂ SiO ₃)	Résistance accrue au stress hydrique
<i>Acacia tortilis</i>	Acide sulfurique 98 % – 15 min	Levée rapide de la dormance

7. LES STRESS ABIOTIQUE INFLUENÇANT LA GERMINATION DE CERTONIA SILIQUA

7.1 DEFINITION DU STRESS

Le stress est défini comme toute contrainte externe qui perturbe l'équilibre physiologique normal d'un organisme. Chez les plantes, on parle de stress abiotique lorsqu'il s'agit de facteurs non vivants, tels que la sécheresse, la salinité, les températures extrêmes ou les carences minérales.

Le stress entraîne une réduction de la croissance, de la photosynthèse, de l'absorption d'eau ou de nutriments, voire la mort cellulaire dans les cas extrêmes. Contrairement aux animaux, les plantes étant sessiles (fixes), elles doivent activer des mécanismes d'adaptation ou de tolérance internes pour survivre.

7.2 L'EFFET DE STRESS

a) Stress salin

Le stress salin est l'un des principaux facteurs abiotiques limitant la germination, la croissance et le rendement des plantes, en particulier dans les régions arides et semi-arides où l'accumulation de sels dans le sol est fréquente. Il est causé principalement par la présence excessive de sels solubles, notamment le chlorure de sodium (NaCl), dans la solution du sol. (Black B. , 1994)

La salinité affecte les plantes par deux mécanismes principaux :

- *Stress osmotique : la concentration élevée en sels dans le sol abaisse le potentiel hydrique, rendant l'eau moins disponible pour les graines. Cela entrave l'imbibition, première étape de la germination.*
- *Stress ionique : l'accumulation d'ions toxiques (Na^+ et Cl^-) dans les tissus perturbe l'équilibre ionique, inhibe l'activité enzymatique et interfère avec l'absorption de nutriments essentiels comme le K^+ et le Ca^{2+} .*

Chez les graines, le stress salin peut : (Benmahiou, Carob tree (Ceratonia siliqua L.) biometry in the North West of Algeria, 2021)

- *Retarder la levée de dormance*
- *Diminuer le taux et la vitesse de germination*
- *Affecter le développement embryonnaire*
- *Réduire la viabilité et la vigueur des plantules*

Certaines espèces montrent une tolérance partielle au stress salin grâce à plusieurs adaptations physiologiques, comme :

- *La synthèse d'osmoprotecteurs (proline, glycine bêtaïne)*
- *Le stockage des ions dans les vacuoles*
- *L'expression de gènes de détoxification*

La recherche agronomique s'intéresse de plus en plus à l'utilisation de traitements prégerminatifs (priming) comme moyen de préconditionner les graines et d'améliorer leur résistance à la salinité. Ces techniques (osmopriming, hormopriming, etc.) permettent d'initier les processus métaboliques avant le semis, facilitant ainsi l'adaptation de la graine aux milieux salins.

b) Stress thermique

Le stress thermique désigne l'ensemble des perturbations physiologiques subies par les plantes lorsque les températures ambiantes dépassent les seuils tolérables,

qu'elles soient trop basses ou trop élevées. Ce phénomène est particulièrement problématique durant la germination, une étape très sensible aux fluctuations thermiques. Chaque espèce végétale dispose d'une plage de température optimale favorisant une germination efficace généralement située entre 20 et 30 °C. Lorsque les conditions thermiques s'écartent de cette zone, on constate une baisse marquée du taux de germination ainsi que de la rapidité d'émergence des plantules. (Mazliak, 1982)

Lorsque la température dépasse le seuil de tolérance, on parle de stress thermique positif (chaleur). Il peut provoquer :

- La dénaturation des protéines enzymatiques*
- Une perturbation de la synthèse des acides nucléiques*
- Une inhibition de la croissance embryonnaire*

Un vieillissement accéléré des cellules (Taiz, 2010)

À l'inverse, des températures trop basses (stress thermique négatif) ralentissent l'activation métabolique, inhibent l'imbibition et peuvent provoquer la formation de cristaux de glace intracellulaires chez certaines espèces, entraînant des lésions irréversibles.

Chez Ceratonia siliqua, espèce méditerranéenne, la tolérance au froid reste limitée. Une température inférieure à 5 °C peut bloquer la germination, tandis qu'une température supérieure à 35–40 °C ralentit la division cellulaire et altère la viabilité des graines.

Pour faire face à ce type de stress, les plantes mobilisent des mécanismes de défense tels que :

- L'accumulation de protéines de choc thermique (HSPs)*
- L'activation d'antioxydants enzymatiques (catalase, peroxydase)*
- La réorganisation membranaire pour maintenir l'intégrité cellulaire*

Dans le cadre de la recherche agronomique, des traitements prégerminatifs thermiques contrôlés sont parfois utilisés pour améliorer la tolérance thermique des graines, en induisant une mémoire de stress.

c) Stress hydrique

Le manque d'eau est l'un des problèmes environnementaux les plus courants et les plus contraignants pour la croissance et le développement des plantules dans des régions arides et semi-arides comme autour de la Méditerranée. Ce phénomène se produit lorsque la quantité d'eau disponible dans le sol n'est pas suffisante pour répondre aux besoins essentiels des plantules, perturbant ainsi de nombreuses fonctions vitales dès le début de leur croissance. Au stade de la germination des graines, l'absence d'eau empêche l'imprégnation qui est une étape cruciale pour déclencher le commencement du métabolisme enzymatique et la croissance de l'embryon. Lorsque l'eau fait défaut les enzymes demeurent inactives, les réserves ne sont pas utilisées et la poussée de la racine est retardée voir stopée. Cette tension entraîne également une accumulation de radicaux libres et ralentit le processus respiratoire des cellules.. (Taiz, 2010)

Chez Ceratonia siliqua, espèce typique des milieux secs, la germination est fortement réduite en condition de déficit hydrique. Les graines peuvent survivre longtemps en état de quiescence, mais leur activation nécessite un seuil minimal d'humidité. Une humidité trop faible entraîne une levée de dormance incomplète, une faible vigueur des plantules, et un taux de germination très bas.

Pour faire face au stress hydrique, les plantes adoptent plusieurs mécanismes d'adaptation : (Benmahiou, Carob tree (Ceratonia siliqua L.) biometry in the North West of Algeria, 2021)

- Accumulation de solutés comprotecteurs (proline, sucres solubles) pour maintenir la turgescence*
- Renforcement des parois cellulaires*
- Réduction de la surface foliaire ou fermeture des stomates pour limiter la transpiration*
- Production d'enzymes antioxydantes pour lutter contre le stress oxydatif*

Sur le plan agronomique, les prétraitements pré germinatifs tels que l'hydro priming ou le silicium sont étudiés comme solutions pour améliorer la tolérance des graines à la

sécheresse. Ces méthodes permettent de "préconditionner" la graine en simulant un stress contrôlé avant le semis, augmentant ainsi ses chances de survie dans un environnement déficitaire en eau.

8. CONCLUSION DU CHAPITRE II

La croissance des plantules est une étape cruciale dans le développement des plantes et dépend d'une série précise d'événements biologiques (hydratation des grainées activation métabolique et croissance), tout en étant grandement influencée par des facteurs à la fois internes et externes. Dans certaines espèces telles que Ceratonia Siliqua la présence d'une dormance marquée du tégument rend cette phase particulièrement délicate sans interventions spécifiques.

Les prétraitements de priming se présentent comme des solutions efficaces pour rompre la dormance des grainées, d'accélérer leur germination et pour améliorer la robustesse des jeunes plants, en particulier dans les contextes de reforestation, d'agroforesterie ou de préservation d'espèces méditerranéennes. Qu'ils soient mécaniques, Thermiques ou chimiques, Ces traitements aident à optimiser la régénération des populations végétales et à renforcer leur capacité à faire face aux stress abiotiques.

Ce chapitre pose les fondements théoriques nécessaires pour saisir l'importance de tester divers processus de prétraitement sur les grainées de Ceratonia Siliqua afin d'améliorer leur capacité germinative et de favoriser leur valorisation écologique et économique.

Parti Pratique

CHAPITRE 03
MATERIEL ET METHODES

1. INTRODUCTION

*Ce chapitre présente la démarche expérimentale adoptée pour étudier l'effet des stress abiotiques, notamment le stress salin et le stress thermique, sur la germination des graines de *Ceratonia siliqua* L. L'objectif de cette méthodologie est de reproduire des conditions environnementales contraignantes en milieu contrôlé afin d'évaluer la capacité germinative de l'espèce après des traitements visant à lever la dormance. La précision et la rigueur dans le choix du matériel végétal, des conditions expérimentales et des paramètres mesurés permettent de garantir la validité scientifique des résultats obtenus.*

L'expérimentation s'est déroulée au sein d'un laboratoire équipé, où des tests ont été réalisés selon un protocole standardisé. Le matériel végétal utilisé a été soigneusement sélectionné à partir d'arbres spontanés localisés dans des régions méditerranéennes semi-arides d'Algérie. Des prétraitements chimiques à base d'acide sulfurique ont été appliqués pour améliorer l'aptitude germinative des semences. Par la suite, différentes conditions de stress ont été simulées afin de mesurer des indicateurs biologiques précis (taux de germination, vitesse, vigueur, etc.) permettant une évaluation fine de la réponse physiologique des graines soumises à ces contraintes.

2. OBJECTIF DE L'ETUDE

*L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de deux stress abiotiques majeurs le stress salin et le stress thermique sur la germination des graines de *Ceratonia siliqua* L., après un prétraitement chimique à l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) destiné à lever la dormance tégumentaire.*

3. ZONE DE L'ETUDE

*L'étude a été réalisée au Laboratoire de Biologie Végétale de l'Université Ahmed Zabana de Relizane, équipé pour les essais de germination en conditions contrôlées (température, humidité, obscurité). Ce site a été choisi pour sa proximité avec les zones naturelles du caroubier (Un État stable heureux dans l'ouest de l'Algérie) et son climat semi-aride à hiver doux, favorable à l'étude des effets de stress abiotiques sur *Ceratonia siliqua*.*

4. MATÉRIEL VÉGÉTAL

*Le matériel végétal utilisé pour cette étude est constitué de graines matures de *Ceratonia siliqua* L., récoltées à l'état spontané dans la région de Un État stable heureux dans science biologique faculté science de la nature et de lavie université relizane). La récolte a été réalisée au cours du mois de mars 2025, à partir d'arbres adultes sains, non greffés et poussant en milieu naturel.*

Après récolte, les gousses ont été ouvertes manuellement pour extraire les graines. Ces dernières ont ensuite été triées selon leur intégrité, homogénéité de taille et couleur, puis nettoyées à sec pour éliminer toute matière résiduelle (pulpe, poussière).

Les graines sélectionnées ont été stockées dans des sachets en papier dans un environnement sec, à température ambiante (environ 22 °C), à l'abri de la lumière et de l'humidité, afin de préserver leur viabilité jusqu'à leur utilisation en laboratoire.

Les graines de caroubier sont caractérisées par :

- *Un tégument très dur, imperméable et lisse, de couleur brun foncé .*
- *Une taille relativement homogène (longueur moyenne ~9–10 mm) .*
- *Une masse moyenne d'environ 0,2 g par graine. (Benmahiou, Carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) biometry in the North West of Algeria, 2021)*

Ce matériel végétal présente une dormance tégumentaire marquée, ce qui justifie l'usage de prétraitements chimiques avant la mise en germination.



Figure 12 : les graines de caroubier collectées dans la région de *Forêt domaniale Doui Thabet à Saïda (Ouest de l'Algérie)*

photooriginal 2025

5. OBSERVATION VISUELLE DE LA GERMINATION EN FONCTION DES DUREES DE PRETRAITEMENT A L'ACIDE SULFURIQUE CONCENTRE(98%)

Dans le cadre de cette étude, un total de 20 graines de Ceratonia siliqua ont été soumises à un prétraitement chimique à l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 à 98 %) dans le but de lever la dormance tégumentaire. Quatre durées d'exposition ont été testées : 3, 5, 10 et 30 minutes.

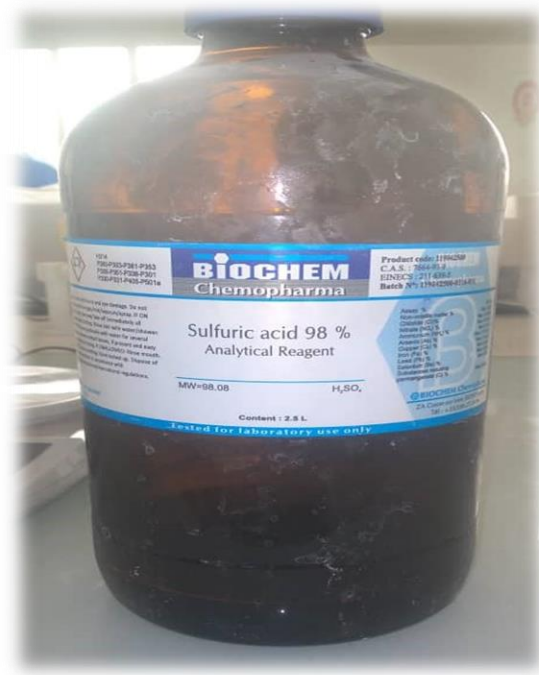


Figure 13 : *Acide sulfurique (H_2SO_4) concentré utilisé dans tous les protocoles de prétraitement*

Après chaque traitement, les graines ont été soigneusement rincées à l'eau distillée pendant 10 minutes afin de neutraliser toute trace résiduelle d'acide, puis séchées à température ambiante à l'aide de papier absorbant.

Les graines ainsi préparées ont été placées dans des boîtes de Pétri contenant deux couches de papier filtre humidifié à l'eau distillée. Chaque boîte (biot) contenait 5 graines, soit un total de 20 graines réparties sur les quatre durées de traitement.

Les essais de germination ont débuté à deux dates distinctes selon la durée de traitement, Les graines trempées pendant 3, 5 et 10 minutes ont été mises en incubation le 8 avril 2025, Tandis que celles traitées pendant 30 minutes ont été incubées le 14 avril 2025.

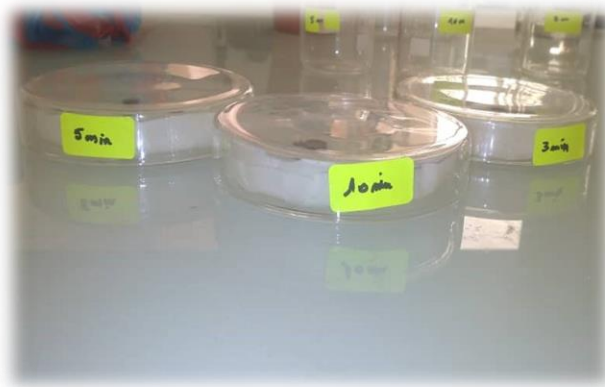


Figure 14 : Préparation de milieux aprit le traitement des graines a l'acide sulfurique concentré 98%



Figure 15 : Disposition des Graines de Caroubier apries le Traitement à l'acide sulfurique dans des boit de béttrie

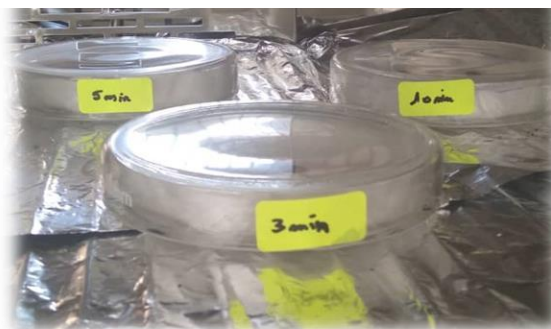


Figure 16 : Exposition des boites de pétri dans l'étuve après le semis

Les essais de germination ont débuté à deux dates distinctes selon la durée de traitement : les graines trempées pendant 3, 5 et 10 minutes ont été mises en incubation le 8 avril 2025, tandis que celles traitées pendant 30 minutes ont été incubées le 13 avril 2025. La germination finale a été observée après 18 jours d'incubation pour les durées de 3, 5 et 10 minutes, avec un taux de germination élevé, tandis que les graines traitées pendant 30 minutes ont toutes germé après seulement 6 jours d'incubation.

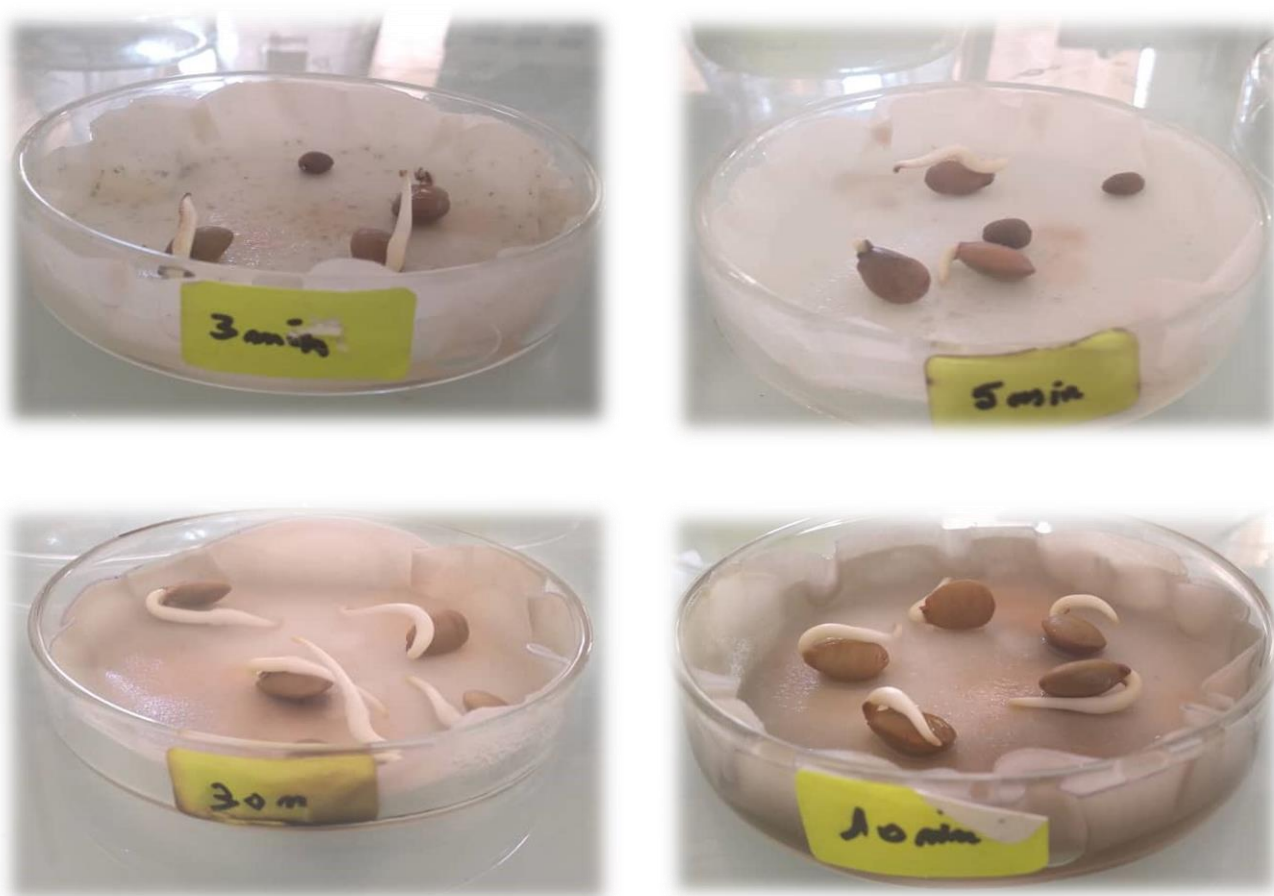


Figure 17 : Germination des graines de *Ceratonia siliqua* après différents traitements à l'acide sulfurique concentré (98 %)

MATÉRIEL UTILISER POUR L'ÉTUDE DU STRESS SALIN :

- 6 flacons de 200 ml étiquetés.
- 18 boîtes de Pétri stériles de 10 cm de diamètre.
- 6 seringues étiquetées.

- 36 papiers filtre.
- Une balance électronique.
- Des éprouvettes graduées.
- Des béchers de 200 ml.
- Du NaCl (chlorure de sodium).
- De l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) à 98 %.
- De l'eau de Javel à 3,5 %.
- Du papier aluminium.
- Une spatule.
- Une étuve (pour le contrôle de la température pendant la germination).

6. EFFET DU STRESS SALIN SUR LA GERMINATION

Dans cette étude, cinq concentrations différentes de chlorure de sodium (NaCl) ont été préparées pour simuler un stress salin osmotique : 25 mM, 50 mM, 100 mM, 150 mM et 200 mM. Le NaCl utilisé était de qualité analytique.

La préparation de chaque solution a été effectuée le 7 mai 2025, en pesant avec précision les masses correspondantes de NaCl à l'aide d'une balance électronique, selon le tableau suivant :

Tableau 11 : Tableau des concentrations de NaCl et des masses correspondantes pour 200 ml de solution

CONCENTRATION (mM)	MASSE DE NaCl (g) pour 200ml
0 mM	l'eau déstili
25 mM	0.30 g
50 mM	0.58 g
100 mM	1.17 g
150 mM	1.75 g
200 mM	2.34 g



Figure 18 : préparation des solutions de NaCl pour traitement des graines

Chaque masse a été dissoute dans 200 ml d'eau distillée, mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée, puis agitée manuellement jusqu'à dissolution complète. L'eau distillée seule a été utilisée comme témoin (0 mM). Les solutions ont été placées dans des flacons séparés, étiquetés individuellement, accompagnés de seringues identifiées pour chaque concentration.

Après la préparation des solutions, un total de 180 graines de caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) ont été soumises à un traitement préliminaire pour lever la dormance tégumentaire. Les graines ont été immergées dans de l'acide sulfurique concentré (98%) pendant une durée maximale de 30 minutes.

Ensuite, les graines ont été soigneusement rincées quatre fois avec de l'eau distillée pour éliminer toute trace d'acide. Une solution diluée d'hypochlorite de sodium (NaOCl) à 2 % a été ensuite préparée à partir d'une solution commerciale à 3,5 %, en utilisant la

formule $C1V1 = C2V2$, soit 28,5 ml de la solution mère complétés à 50 ml avec de l'eau distillée.



Figure 19 : Désinfection des graines avec l'hypochlorite de sodium (l'eau d'Javel) avant les stress salins et thermique

Les graines ont été désinfectées en les trempant dans cette solution pendant 2 minutes, puis séchées soigneusement à l'aide de papier absorbant stérile avant d'être utilisées pour les tests de germination.

Par la suite, 18 boîtes de Pétri stériles ont été préparées, chacune contenant deux couches de papier filtre. Chaque boîte a été étiquetée selon la solution utilisée (témoin, 25, 50, 100, 150, 200 mM). Pour chaque concentration, trois boîtes ont été préparées (triplicata), avec 10 graines placées dans chaque boîte, soit 30 graines par concentration cela représente un total de 180 graines réparties sur 18 boîtes de pétre (6 concentrations x 3 répétitions x 10 graines).

Chaque solution a été testée en triplicata, soit 3 boîtes de Pétri par concentration, pour un total de 18 boîtes et 36 papiers filtre. Chaque boîte a été arrosée avec la solution correspondante, puis les boîtes ont été placées dans une étuve à 20°C le 8 mai 2025.

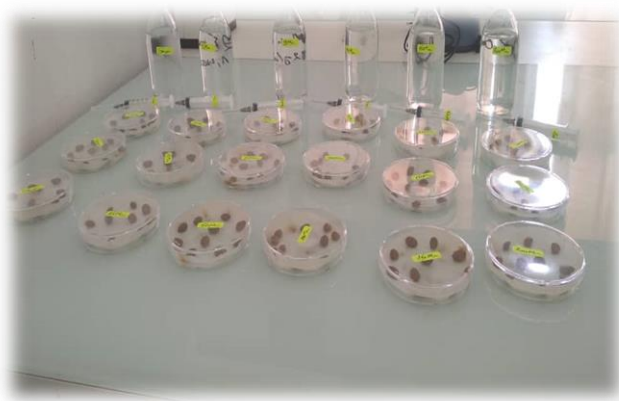


Figure 20 : Disposition des graines de *Ceratonia siliqua* dans des boîtes de pétri

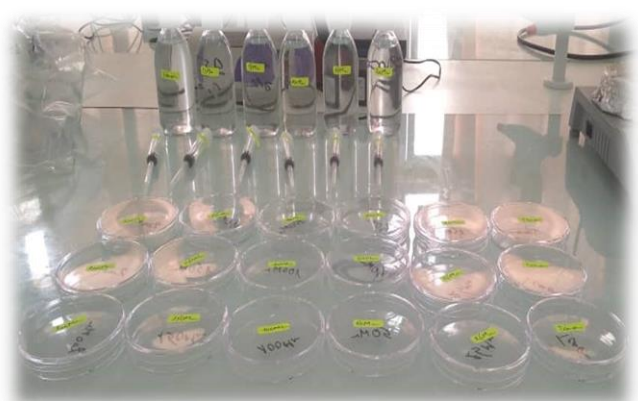


Figure 21 : préparation de milieu expérimentaux pour l'étude de la germination des graines de *Ceratonia siliqua*

La germination finale a été évaluée le 18 mai 2025. Les résultats ont montré que toutes les graines ont germé pour le témoin (0 mM) et pour la concentration de 25 mM. À 50 mM, 28 graines sur 30 ont germé. En revanche, la germination a fortement diminué à 100 mM (2 graines germées), et aucune germination n'a été observée à 150 et 200 mM.

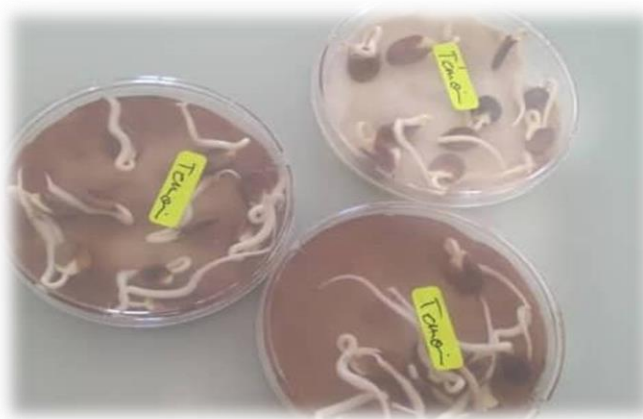


Figure 23 : Germination des graines *Ceratonia siliqua* sous un stress salin de 0Mm



Figure 22 : Germination des graines de *Ceratonia siliqua* sous un stress salin de 25Mm

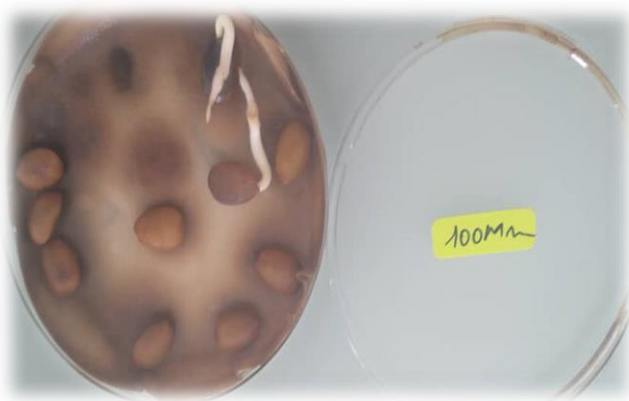


Figure 25 : Germination des graines de *Ceratonia siliqua* sous un stress salin de 100Mm

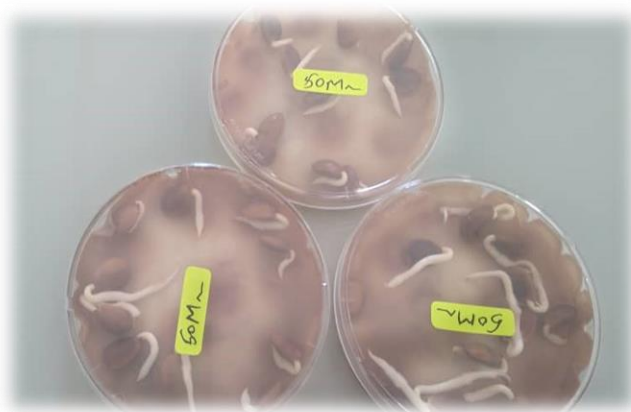


Figure 24 : Germination des graines *Ceratonia siliqua* sous un stress salin de 50Mm



Figure 26 : Germination des graines de *Ceratonia siliqua* sous un stress salin de 150Mm

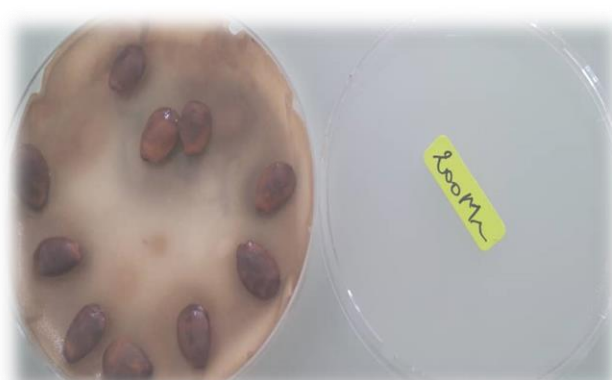


Figure 27 : Germination des graines de *Ceratonia siliqua* sous un stress salin de 200Mm

Pour évaluer l'effet de températures constantes sur la germination de *Ceratonia siliqua*, trois conditions thermiques ont été testées : 4 °C, 20 °C et 40 °C. Un total de 90 graines prétraitées à l'acide sulfurique concentré (98 %, 30 minutes), rincées et désinfectées, ont été réparties dans 9 boîtes de Pétri (3 répétitions par température, 10 graines par boîte). Les boîtes ont été humidifiées à l'eau distillée et placées à l'obscurité dans des dispositifs thermiques appropriés : un réfrigérateur pour 4 °C, une étuve à température ambiante pour 20 °C, et une étuve chauffante pour 40 °C.

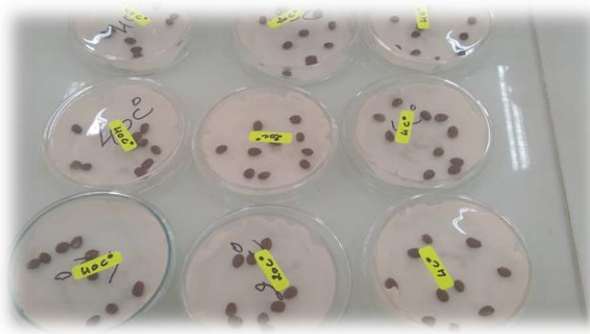


Figure 28 : Disposition des graines de *Ceratonia siliqua* dans les boîtes de Pétri avant l'application du stress thermique (0c° 20c° 40c°)

Le semis a été effectué le 14 mai 2025.

Les résultats de la germination finale sont les suivants :

- *À 20 C° : germination complète observée le 20 mai 2025 (30/30 graines).*
- *À 40 C° : germination partielle, avec seulement 3 graines germées le 28 mai 2025 (2/30).*
- *À 4 C° : aucune germination observée durant toute la période expérimentale.*

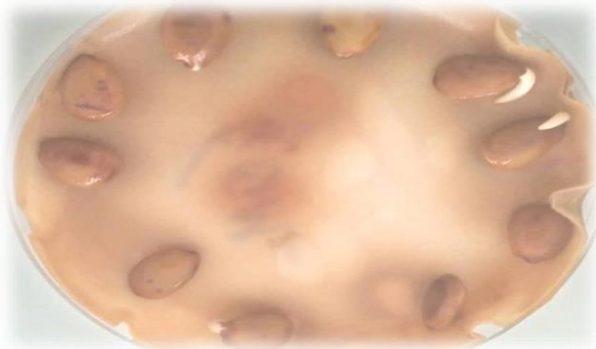


Figure 29 : Germination des graines de caroubier à 40c°



Figure 30 : Germination des graines de caroubier à 20c°



Figure 31 : Germination des graines de caroubier à 4c°



Figure 32 : Étuve de laboratoire utilisée pour l'incubation des graines dans tous les protocoles expérimentaux.

8.CONDITIONS DE GERMINATION DES GRAINES

Les conditions de germination ont été rigoureusement contrôlées tout au long de l'expérimentation afin d'assurer la fiabilité des résultats et de limiter l'influence de facteurs non étudiés. Ces conditions ont été standardisées pour tous les traitements (prétraitement, stress salin, stress thermique), à l'exception de la variable spécifique testée.

1.SUBSTRAT UTILISE

Les graines ont été disposées dans des boîtes de Pétri de 9 cm de diamètre, contenant deux couches de papier filtre stérile humidifié soit avec :

de l'eau distillée (témoin), soit avec la solution saline correspondante.

Le papier a été humidifié de façon à rester en contact permanent avec les graines, sans immersion excessive.

2.HUMIDITE

L'humidité du substrat a été maintenue constante pendant toute la durée de l'essai par ajout régulier de solution (eau ou NaCl), afin d'éviter toute dessiccation.

Lumière :

Les boîtes ont été placées dans une obscurité totale, à l'intérieur d'un incubateur ou d'une armoire fermée, pour éviter l'effet de la lumière sur la germination, sauf pour la prise de mesures journalières.

Température :

Température contrôlée selon le traitement :

4 °C (froid), 20 °C (témoin), 40 °C (chaud).

Température stable durant toute la période d'essai (± 2 °C).

Durée :

1. La germination a été suivie pendant 15 jours.

Une observation quotidienne a été effectuée pour enregistrer :

- le nombre de graines germées.*
- la longueur des plantules.*
- le développement racinaire.*

9. PARAMÈTRES DE GERMINATION MESURES

*L'évaluation de la germination des graines de *Ceratonia siliqua* a été réalisée à travers plusieurs paramètres biologiques permettant de quantifier la performance germinative et la vigueur des semences.*

1- POURCENTAGE DE GERMINATION (PG)

Le pourcentage de germination représente le rapport entre le nombre de graines germées et le nombre total de graines semées.

$$PG = (Ng / Nt) \times 100$$

Ou :

- Ng = nombre de graines germées.*
- Nt = nombre total de graines testées. (Bewley et al., 2013 ; AOSA, 1990).*

2- TEMPS MOYEN DE GERMINATION (TMG)

C'est le temps moyen nécessaire pour que les graines commencent à germer.

$$TMG = \sum(n_i \times t_i) / \sum n_i$$

Ou :

- n_i = nombre de graines germées au temps t_i .
- t_i = temps en jours. (Ellis & Roberts, 1981 ; Ranal & Santana, 2006).

3- VIGUEUR DE GERMINATION (VG)

Elle est mesurée par l'uniformité et la vitesse de germination, ainsi que la croissance des plantules (longueur, masse fraîche et sèche) (ISTA, 2020 ; Abdul-Baki & Anderson, 1973).

4- LONGUEUR MOYENNE DES PLANTULES (LP)

C'est la moyenne des longueurs des parties aériennes ou racinaires des plantules ayant germé.

(Ruas et al., 2010 ; ISTA, 2020).

5- MASSE FRAICHE ET MASSE SECHE (MF ET MS)

La masse fraîche est mesurée immédiatement après la récolte des plantules, tandis que la masse sèche est obtenue après séchage au four à 70°C pendant 48 heures (Ruas et al., 2010 ; ISTA, 2020).

Formules de calcul :

- MF (g) = masse des plantules fraîches pesée immédiatement après récolte.
- MS (g) = masse des plantules après séchage complet à 70°C pendant 48 h.
- Teneur en eau (%) = $[(MF - MS) / MF] \times 100$ (Ruas et al., 2010 ; ISTA, 2020).

TRAITEMENT DES DONNEES ET OBTENTION DES RESULTATS

Pour obtenir des résultats fiables et scientifiquement exploitables sur la germination des graines de Ceratonia siliqua, les données issues des différents paramètres mesurés ont été soumises à une analyse statistique rigoureuse. Les valeurs moyennes, les écarts-types ainsi que les comparaisons de moyennes entre les traitements

ont été calculés. Une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée suivie, si nécessaire, par un test de Tukey ($p < 0.05$) à l'aide du logiciel Excel.

Cette approche méthodologique a permis d'évaluer l'effet des différentes conditions expérimentales sur la performance germinative et la vigueur des plantules, afin d'identifier les traitements les plus efficaces pour optimiser la levée des graines de caroubier.

Chapitre 04

Résultat et Discussions

1. RESULTATS DE LA GERMINATION APRES TRAITEMENT A L'ACIDE SULFURIQUE

Afin de lever la dormance des graines de *Ceratonia siliqua*, un prétraitement chimique à l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4 à 98 %) a été appliqué selon différentes durées d'exposition. Ce protocole vise à ramollir le tégument dur et imperméable des graines, principal obstacle à la germination naturelle. Les résultats présentés ci-dessous permettent d'évaluer l'efficacité de chaque traitement en analysant plusieurs paramètres : le taux de germination, la durée moyenne de germination, ainsi que la vitesse de germination. Ces données offrent une première lecture quantitative sur la réponse des graines aux conditions expérimentales et permettent de déterminer le temps de trempage optimal favorisant une levée de dormance rapide et efficace.

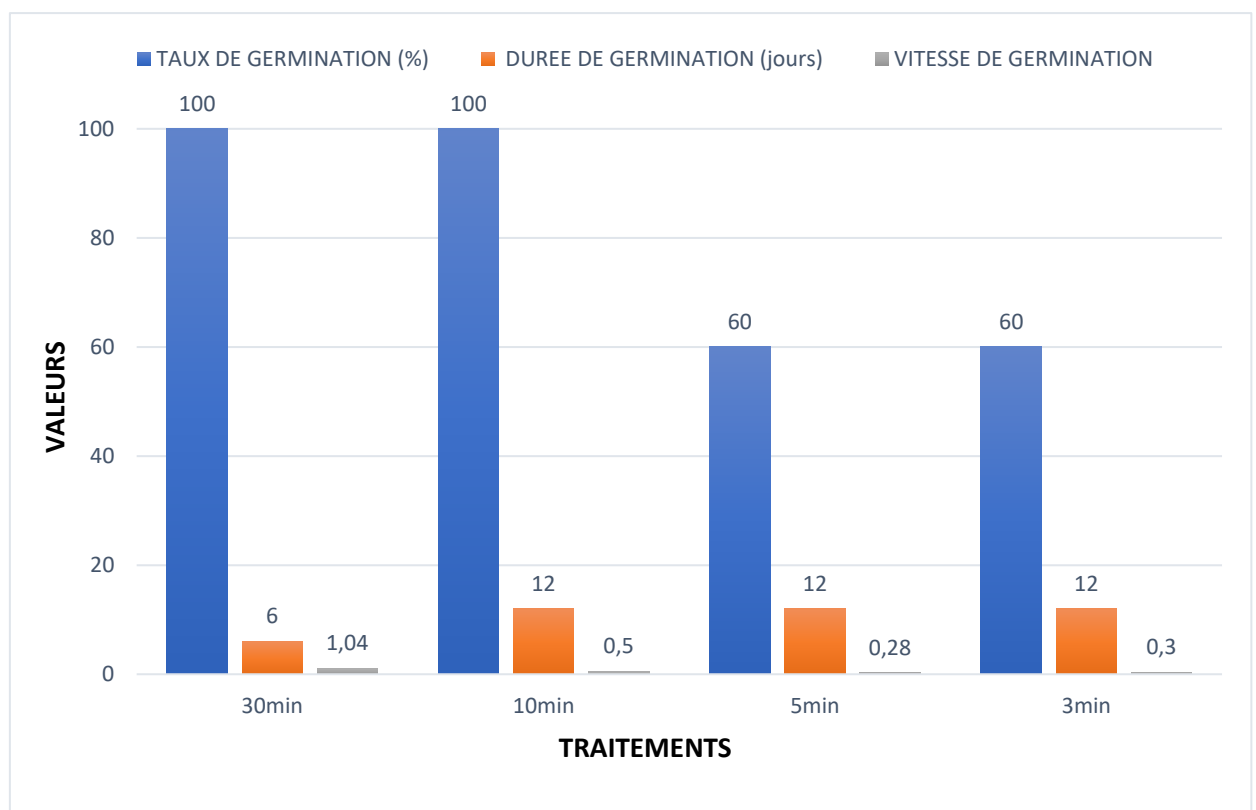


Tableau 12 : Évolution du taux, de la durée et de la vitesse de germination des graines de *Ceratonia siliqua* en fonction des différents traitements.a l'acide sulfurique concentrées(98%)

Analyse du graphique :

L'analyse du graphique comparant les effets des durées d'exposition à l'acide sulfurique sur la germination des graines de *Ceratonia siliqua* révèle une variation

significative des performances germinatives. Le traitement de 30 minutes se distingue par des résultats optimaux, avec un taux de germination de 100 %, une durée moyenne de germination de 6 jours et une vitesse de germination maximale (1,04).

Ce traitement semble ainsi offrir une scarification chimique suffisante pour lever efficacement la dormance des graines. Le traitement de 10 minutes permet également un taux de germination de 100 %, mais la durée est plus longue (12 jours) et la vitesse de germination diminue à 0,5, traduisant un effet partiellement retardé. En revanche, les traitements de 5 et 3 minutes montrent une efficacité réduite, avec un taux de germination limité à 60 %, une durée inchangée de 12 jours et des vitesses très faibles (0,28 et 0,3 respectivement).

Ces observations suggèrent que des durées plus courtes d'exposition à l'acide sulfurique ne suffisent pas à altérer suffisamment le tégument dur de la graine, entraînant une germination lente ou incomplète. Ainsi, le traitement de 30 minutes s'impose comme la condition optimale pour maximiser le potentiel germinatif du caroubier.

OBSERVATION MORPHOLOGIQUE

Analyse des images de germination :



Figure 33 : Graine contaminée par des moisissures

*L'image présente une graine de *Ceratonia siliqua* entièrement recouverte de moisissures verdâtres à bleutées, avec des taches brunâtres caractéristiques. Cette contamination fongique, probablement due à des genres comme *Aspergillus* ou*

Penicillium, résulte souvent d'un excès d'humidité ou d'une désinfection insuffisante des graines avant l'expérimentation. Aucune émergence de la radicule n'est observée, traduisant une inhibition totale de la germination. Ce cas illustre l'importance du contrôle sanitaire préalable et des conditions aseptiques pour assurer le succès de la germination.



Figure 34 : Germination réussie après traitement acide

Cette photo montre plusieurs graines ayant bien germé après traitement à l'acide sulfurique concentré (98 %). On observe l'émergence nette de la radicule chez la majorité des graines, témoignant de l'efficacité du traitement pour lever la dormance tégumentaire. Les différences dans la longueur des radicules indiquent une variabilité interindividuelle dans la vitesse de germination, potentiellement liée à la profondeur de scarification ou à la vitalité intrinsèque des graines. Ces résultats confirment que le traitement acide constitue une méthode pertinente pour stimuler la germination chez *Ceratonia siliqua*.



Figure 35 : *début de contamination Forêt domaniale Doui Thabet à Saïda (Ouest de l'Algérie)*

Sur cette image, aucune germination n'est observée. Le papier filtre présente des taches foncées et verdâtres suggérant un début de contamination fongique. Cette situation peut être liée à des conditions de germination inadéquates (humidité excessive, température défavorable) ou à un mauvais état physiologique des graines avant semis. Ce résultat met en évidence la sensibilité du milieu de culture aux agents pathogènes et l'importance de conditions rigoureusement contrôlées.

2. EFFET DU STRESS SALIN SUR LA GERMINATION

*Pour lever la dormance des graines de *Ceratonia siliqua*, un prétraitement chimique à l'acide sulfurique concentré (98 %) a été appliqué selon différentes concentrations. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :*

Tableau 13 : Effet de différentes concentrations de chlorure de sodium (NaCl) sur le taux, la durée et la vitesse de germination des graines de *Ceratonia siliqua*

	NOMBRE DES GRAINES	NOMBRE DES GRAINES GERMIS	TAUX DE GERMINATION	DUREE	VITESSE
0mM	30	30	100%	5	4
25mM	30	30	100%	5	5
50mM	30	28	93.33%	3	7
10mM	30	2	6.67%	0	2
150mM	30	0	0	0	0
200mM	30	0	0	0	0

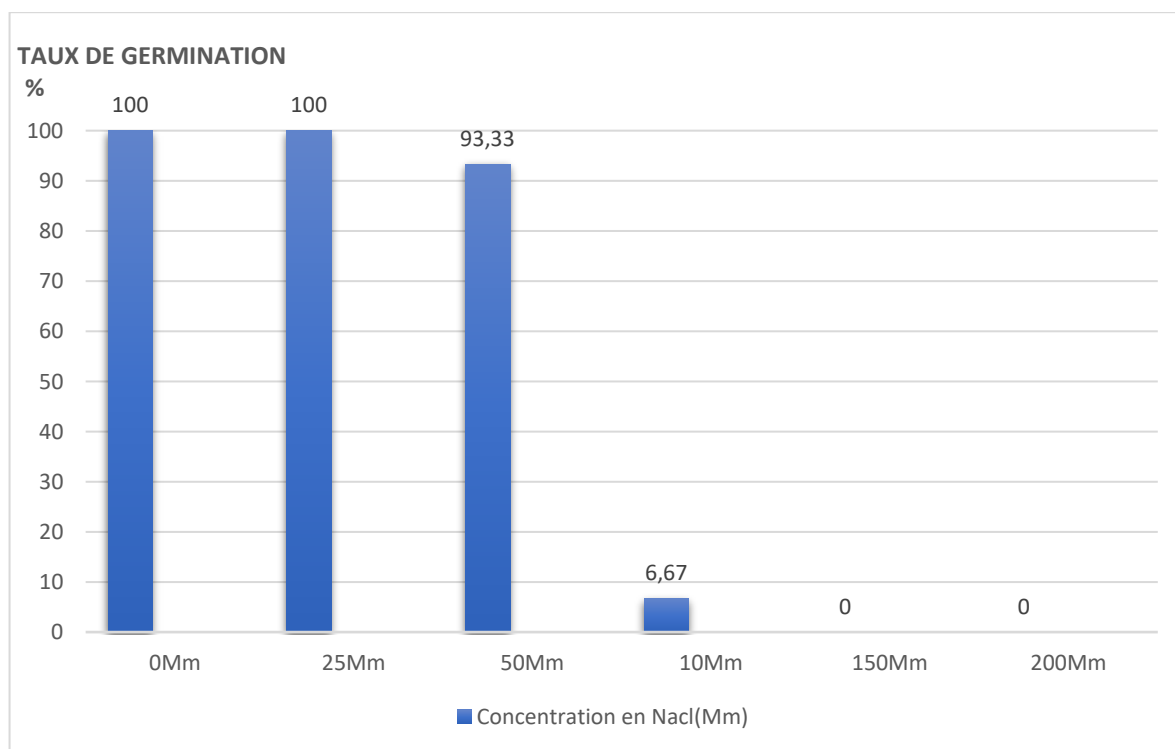


Figure 36 : L'effet de la salinité sur le taux de germination des graines *Ceratonia siliqua*

*L'effet du stress salin sur la germination des graines de *Ceratonia siliqua* se manifeste clairement à travers la baisse progressive du taux de germination en fonction de l'augmentation de la concentration en chlorure de sodium (NaCl). À faible concentration (0 mM et 25 mM), la germination reste optimale, avec un taux de 100 %, indiquant une tolérance initiale du caroubier à un stress osmotique modéré. Toutefois, à 50 mM, une légère diminution est observée (93,33 %), traduisant le début d'un effet inhibiteur du sel sur les processus physiologiques de la germination. À partir de 100 mM, l'impact devient beaucoup plus marqué, le taux de germination chutant drastiquement à 6,67 %, tandis qu'à 150 mM et 200 mM, aucune graine n'a germé, indiquant une inhibition totale. Cette diminution rapide de la germination suggère que les concentrations élevées en sel perturbent fortement l'absorption d'eau (imbibition) et les mécanismes métaboliques nécessaires à l'activation de l'embryon, soulignant ainsi la sensibilité du caroubier à un stress salin intense.*

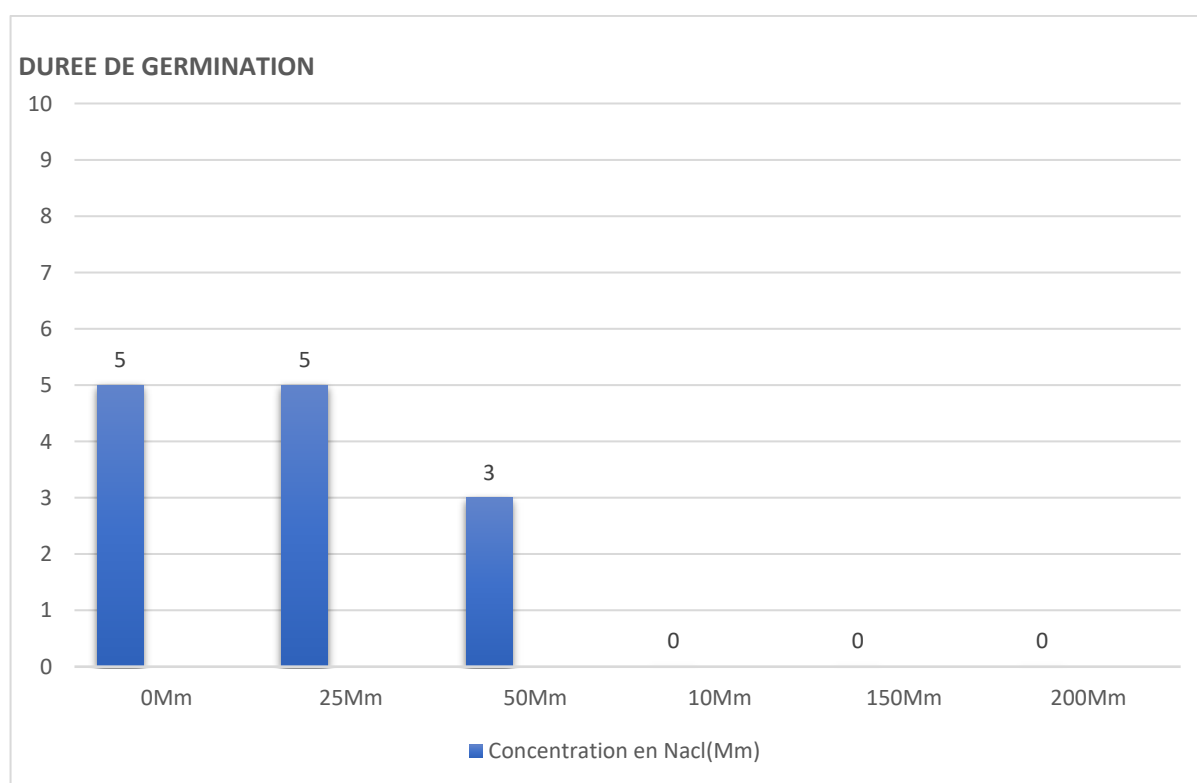


Figure 37 : *L'effet de la salinité sur le duree de germination des graines *Ceratonia siliqua**

La durée de germination des graines de Ceratonia siliqua varie significativement selon le niveau de salinité. Aux concentrations de 0 mM et 25 mM, la durée moyenne observée est de 5 jours, indiquant un développement germinatif normal dans un environnement sans stress ou faiblement salin. Cependant, à 50 mM, cette durée diminue à 3 jours. Cette réduction, bien qu'apparemment positive, pourrait résulter du fait que seules les graines les plus vigoureuses ont pu germer rapidement, tandis que les autres ont été inhibées. Au-delà de cette concentration (≥ 100 mM), la germination est totalement inhibée, ce qui se traduit par une durée de germination nulle, confirmant l'effet inhibiteur intense du sel à ces niveaux. Cette tendance suggère que la salinité perturbe non seulement le taux de germination, mais également le rythme de développement des embryons.

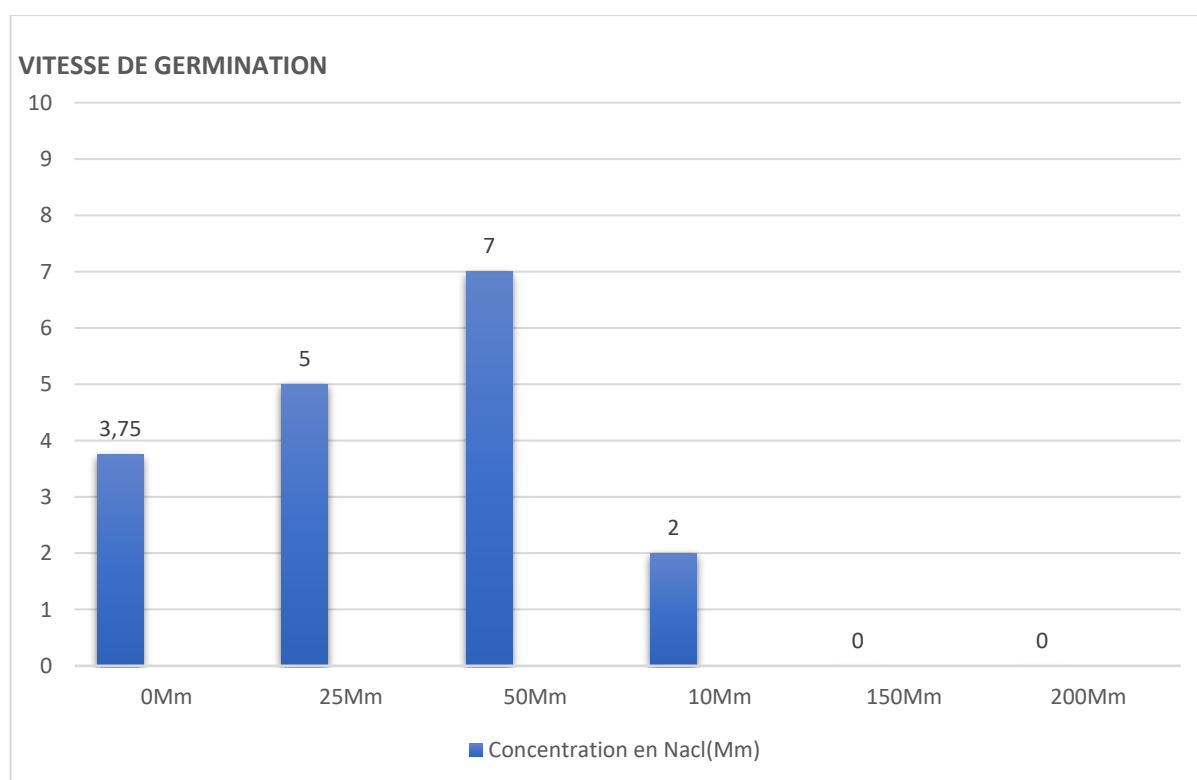


Figure 38 : L'effet de la salinité sur le vitesse de germination des graines Ceratonia siliqua

La vitesse de germination présente une variation marquée en fonction des concentrations en NaCl. À 0 mM (absence de sel), la vitesse est de 3,75, indiquant une germination fluide. Cette vitesse augmente légèrement à 25 mM (5), puis atteint un pic remarquable à 50 mM (7), ce qui peut sembler paradoxal. Cette accélération apparente pourrait être due à une

sélection naturelle où seules les graines les plus vigoureuses réussissent à germer rapidement sous stress modéré, tandis que les plus faibles sont inhibées.

Cependant, à partir de 100 mM, aucune germination n'est enregistrée, la vitesse devient nulle, ce qui traduit une inhibition complète du processus germinatif. Cela confirme que des concentrations élevées de sel affectent gravement les mécanismes métaboliques nécessaires à la germination. Ainsi, bien que de faibles doses de NaCl puissent être tolérées, une augmentation progressive de la salinité réduit drastiquement les performances germinatives.

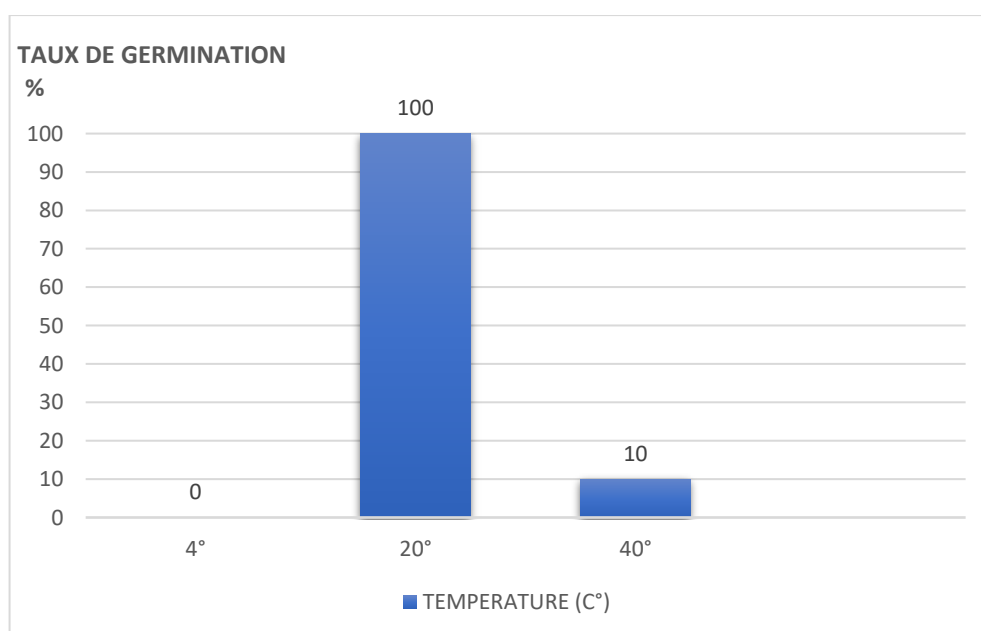
3. EFFET DU STRESS THERMIQUE SUR LA GERMINATION

*L'étude du stress thermique revêt une importance cruciale pour comprendre l'adaptabilité des graines de *Ceratonia siliqua* face aux variations climatiques extrêmes. La température influence directement les processus métaboliques liés à la germination, notamment l'activité enzymatique, la perméabilité membranaire et la vitesse de croissance embryonnaire. Dans cette section, nous avons exposé les graines à trois températures contrastées : une température basse (4 °C), une température ambiante optimale (20 °C), et une température élevée (40 °C) afin d'évaluer l'impact thermique sur le taux de germination, la vitesse ainsi que la durée moyenne de germination.*

Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant, révélant des réponses contrastées des graines selon les conditions thermiques, ce qui permet d'identifier la plage thermique optimale pour la germination et de déceler les effets inhibiteurs des températures extrêmes.

Tableau 14 : Tableau récapitulatif de la germination sous stress thermique

TEMPERATURE (C°)	NOMBRE DES GRAINES	TAUX DE GERMINATION (%)	VITESSE DE GERMINATION	DUREE DE GERMINATION (jours)
4°	30	0	0.00	-
20°	30	100	7.50	4
40°	30	10	0.33	9

**Figure 39** : L'effet de la température sur le taux de germination des graines *Ceratonia siliqua*

Le graphique met en évidence l'effet de la température sur le taux de germination des graines de *Ceratonia siliqua*. Trois conditions thermiques ont été testées : 4 °C, 20 °C et 40 °C.

- À 20 °C, température ambiante considérée comme optimale, le taux de germination atteint 100 %, indiquant une condition idéale pour le démarrage du processus germinatif.
- En revanche, à 4 °C, aucune graine n'a germé (0 %), ce qui suggère que le froid intense inhibe totalement l'activité enzymatique nécessaire à la germination.
- À 40 °C, une température élevée, le taux de germination chute fortement à 10 %, traduisant un stress thermique inhibiteur. Une température aussi élevée pourrait

avoir endommagé les structures cellulaires ou perturbé l'équilibre hydrique des graines.

La température optimale pour la germination des graines de Ceratonia siliqua est de 20 °C. Des écarts importants (vers le froid ou la chaleur extrême) réduisent fortement, voire annulent, le pouvoir germinatif. Cela met en évidence la sensibilité thermique de cette espèce méditerranéenne.

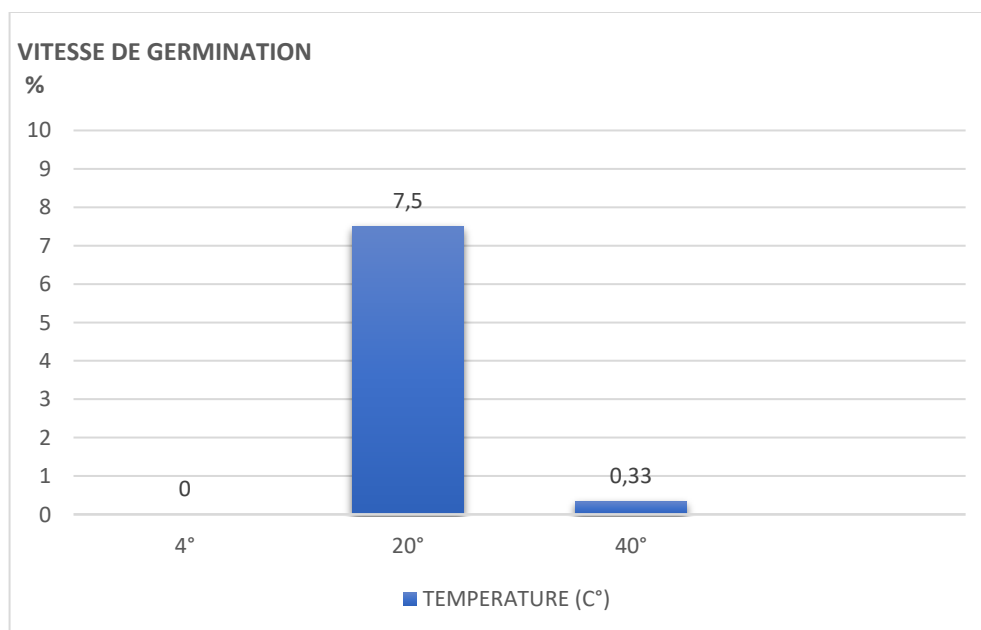


Figure 40 : *L'effet de la température sur la vitesse de germination des graines Ceratonia siliqua*

Ce graphique illustre la vitesse de germination des graines de Ceratonia siliqua en fonction de trois températures expérimentales : 4 °C, 20 °C et 40 °C.

- *À 20 °C, la vitesse de germination atteint son maximum (7,5), ce qui confirme que cette température est idéale pour activer les processus physiologiques liés à la germination, notamment l'absorption d'eau et l'activité enzymatique.*
- *À 40 °C, la vitesse chute considérablement à 0,33, ce qui montre que la chaleur excessive ralentit sévèrement la dynamique de germination, probablement à cause d'un stress thermique perturbant les fonctions cellulaires.*
- *À 4 °C, la vitesse est nulle (0), ce qui confirme que les basses températures inhibent complètement l'initiation de la germination.*

Ce graphique montre clairement que 20 °C représente la température optimale non seulement pour le taux, mais aussi pour la vitesse de germination. Les températures extrêmes, aussi bien froides qu'élevées, ralentissent ou empêchent totalement la germination, soulignant ainsi la sensibilité thermique des graines de *Ceratonia siliqua*.

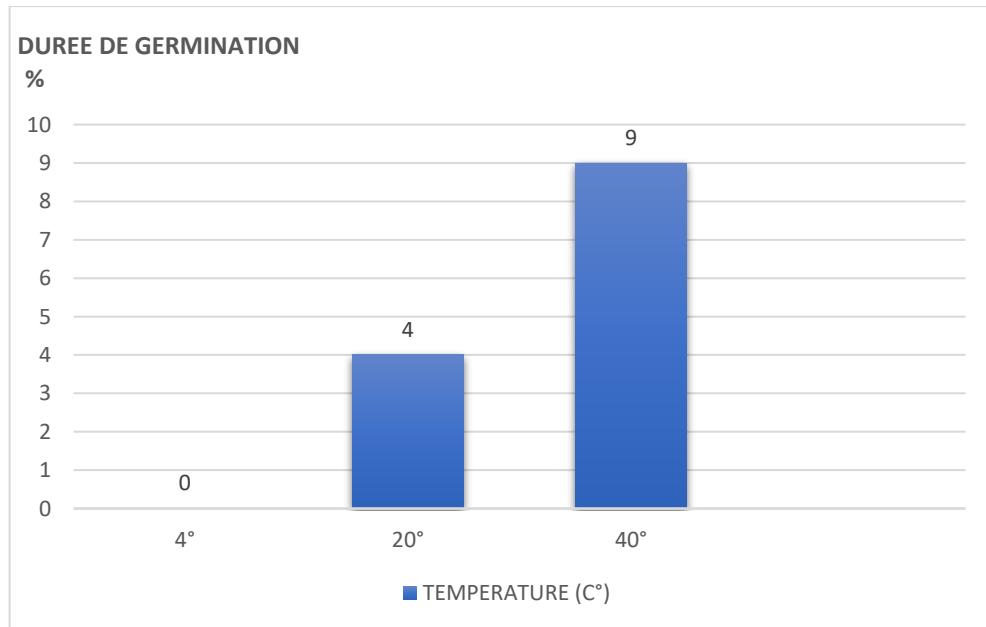


Figure 41 : L'effet de la température sur la durée de germination des graines *Ceratonia siliqua*

Ce graphique présente la durée moyenne de germination des graines de *Ceratonia siliqua* soumises à trois températures distinctes : 4 °C, 20 °C et 40 °C.

- À 4 °C, aucune germination n'a été observée, ce qui est confirmé par une durée de germination nulle (0). Cela reflète une inhibition totale de l'activité métabolique due à la température trop basse.
- À 20 °C, la durée de germination est relativement courte (4 jours), ce qui suggère que cette température favorise une activation rapide des processus physiologiques nécessaires à la germination.
- À 40 °C, la durée moyenne atteint 9 jours, indiquant une germination ralentie malgré une faible activité. Cette lenteur est probablement due au stress thermique, qui affecte négativement l'efficacité des enzymes impliquées dans la germination.

Le graphique démontre que 20 °C est la température optimale pour une germination rapide, tandis que les températures extrêmes (4 °C et 40 °C) prolongent ou bloquent complètement le processus.

Cela confirme l'importance cruciale de la température dans la réussite de la germination chez *Ceratonia siliqua*.

4. RESULTATS DES PARAMETRES DE CROISSANCE

La germination ne constitue que la première phase du développement d'une plante. Pour évaluer la vitalité des plantules de *Ceratonia siliqua*, il est essentiel d'analyser certains paramètres de croissance, notamment la longueur moyenne des plantules et le nombre de graines germées par condition. Ces paramètres permettent de juger non seulement du succès de la germination, mais également de la qualité du développement post-germination, souvent affecté par les conditions environnementales comme la salinité, la température ou encore le traitement chimique préalable.

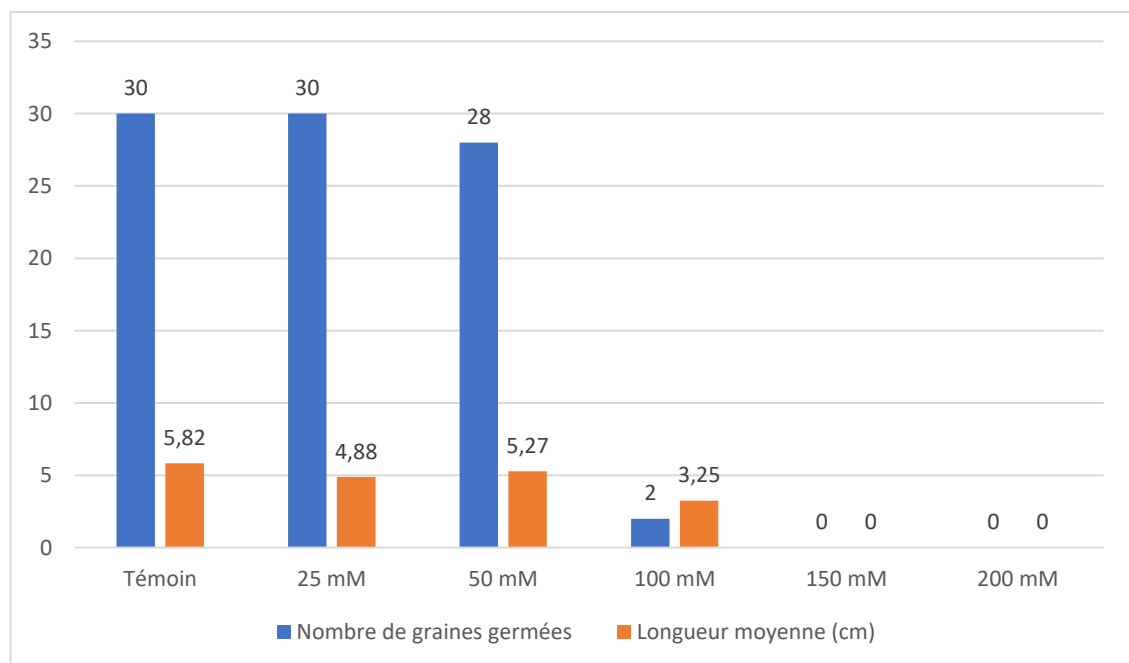


Figure 42 : l'effet de concentration de NaCl sur l'impact de concentration de NaCl sur la longueur moyenne des plantules

Le graphique présente l'impact de différentes concentrations en chlorure de sodium (NaCl) sur le nombre de graines germées et la longueur moyenne des plantules de *Ceratonia siliqua*. En condition témoin (0 mM), on observe une germination complète (30 graines) avec une longueur maximale de 5,82 cm, indiquant un développement

optimal. À 25 mM, bien que la germination reste totale (30 graines), une diminution de la croissance est notée (4,88 cm), traduisant un effet modérément inhibiteur de la salinité. À 50 mM, la germination baisse légèrement (28 graines), mais la longueur des plantules augmente à 5,27 cm, ce qui suggère une certaine tolérance à cette concentration. En revanche, à 100 mM, seulement deux graines ont germé, et leur croissance est nettement limitée (3,25 cm), illustrant une forte inhibition. Enfin, aux concentrations les plus élevées (150 et 200 mM), aucune germination n'est enregistrée, confirmant l'effet toxique du sel sur les processus de germination et de croissance. Ces résultats montrent clairement que la salinité exerce un effet dose-dépendant sur la croissance des plantules, entravant significativement leur développement au-delà de 50 mM.

MASE FRAICHE ET LA MASE SECS

*La masse fraîche et la masse sèche constituent des indicateurs fondamentaux de la croissance et du développement des plantules, reflétant leur capacité à absorber l'eau, à accumuler de la biomasse et à maintenir une activité métabolique efficace. Dans le cadre de cette étude, ces deux paramètres ont été évalués chez *Ceratonia siliqua* après exposition à différentes concentrations de chlorure de sodium (NaCl), afin de déterminer l'impact du stress salin sur la performance physiologique des plantules. Le graphique ci-dessous illustre les variations du poids frais total et moyen, ainsi que du poids sec total et moyen, en fonction des niveaux de salinité appliqués.*

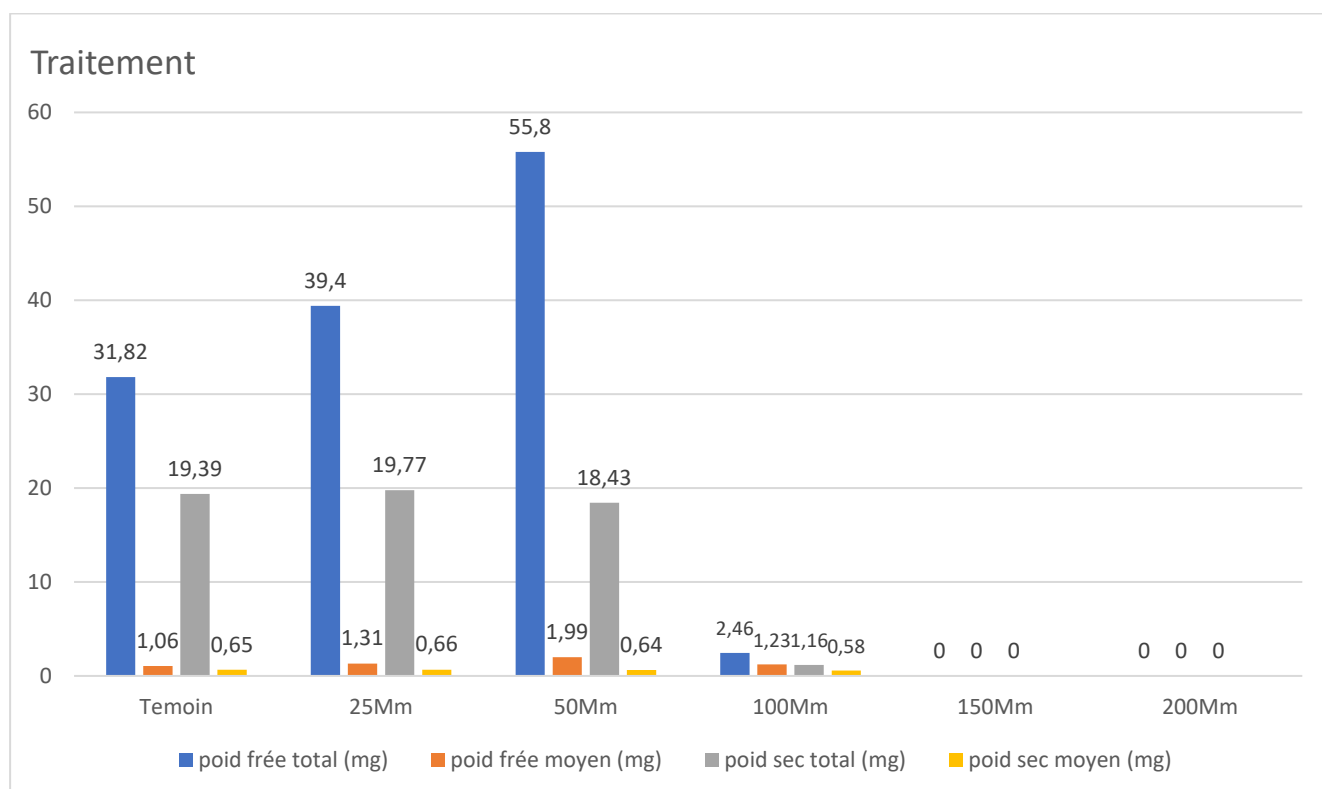


Figure 43 : Variation des poids frais et secs en fonction des niveaux de traitement thermique (0Mmà200Mm)

La masse fraîche et la masse sèche constituent des indicateurs fondamentaux de la croissance et du développement des plantules, reflétant leur capacité à absorber l'eau, à accumuler de la biomasse et à maintenir une activité métabolique efficace. Dans le cadre de cette étude, ces deux paramètres ont été évalués chez *Ceratonia siliqua* après exposition à différentes concentrations de chlorure de sodium (NaCl), afin de déterminer l'impact du stress salin sur la performance physiologique des plantules. Le graphique ci-dessous illustre les variations du poids frais total et moyen, ainsi que du poids sec total et moyen, en fonction des niveaux de salinité appliqués.

TENEUR EN EAUX

La teneur en eau des plantules est un indicateur clé de leur état hydrique et de leur capacité à faire face aux conditions de stress. Elle permet d'évaluer l'efficacité de l'absorption et de la rétention d'eau par les tissus végétaux. Dans ce travail, ce paramètre a été analysé chez *Ceratonia siliqua* soumise à différents niveaux de salinité, afin de mieux comprendre l'impact du stress salin sur l'équilibre hydrique des plantules.

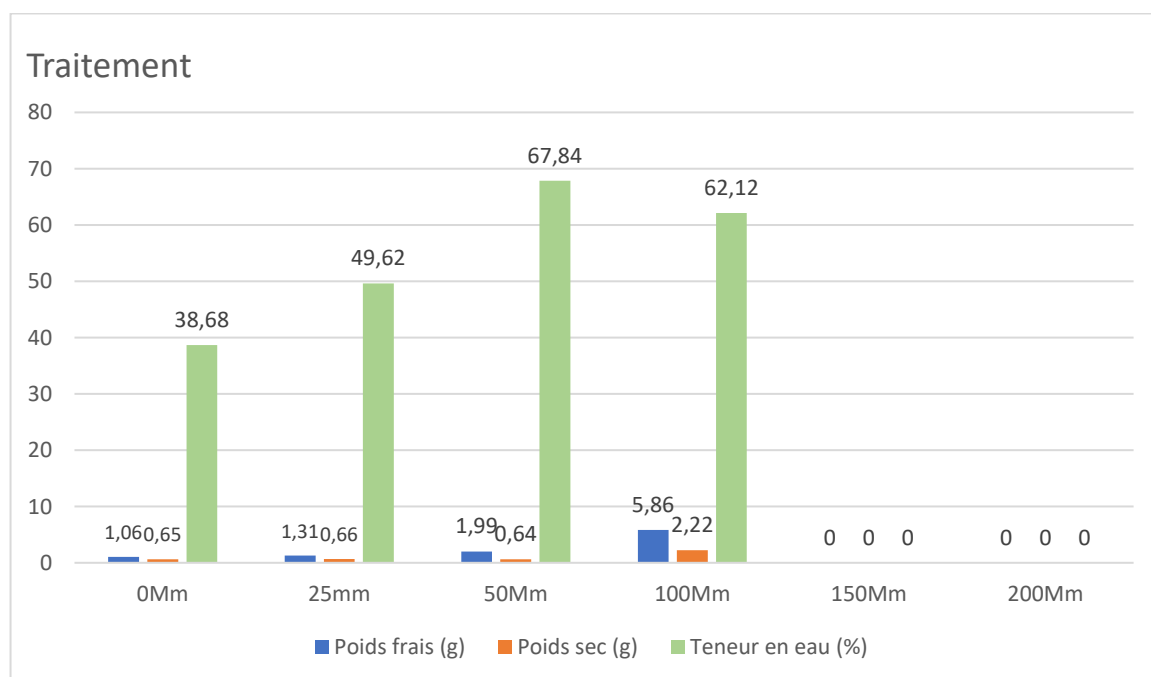


Figure 44 : Impact du NaCl sur la biomasse et la teneur en eau des plantules de caroubie

L'analyse du graphique révèle une variation significative de la teneur en eau des plantules de *Ceratonia siliqua* en fonction des concentrations en NaCl. Les témoins (0 mM) présentent une teneur en eau de 38,68 %, représentant la valeur de base sans stress. À 25 mM, une amélioration notable est observée (49,62 %), tandis qu'un pic est atteint à 50 mM avec 67,84 %, indiquant une rétention d'eau optimale probablement liée à une réponse physiologique adaptative modérée au stress.

Cependant, au-delà de cette concentration, à 100 mM, la teneur en eau diminue à 62,12 %, traduisant les premiers signes d'un stress salin important. Aux concentrations les plus élevées (150 mM et 200 mM), aucune teneur en eau n'a été mesurée, en raison de l'absence de germination, ce qui confirme un effet toxique de la salinité sur le métabolisme hydrique des graines. Ce résultat suggère qu'un stress salin modéré peut stimuler certains mécanismes de rétention d'eau, tandis qu'un stress intense inhibe totalement la germination et la croissance.

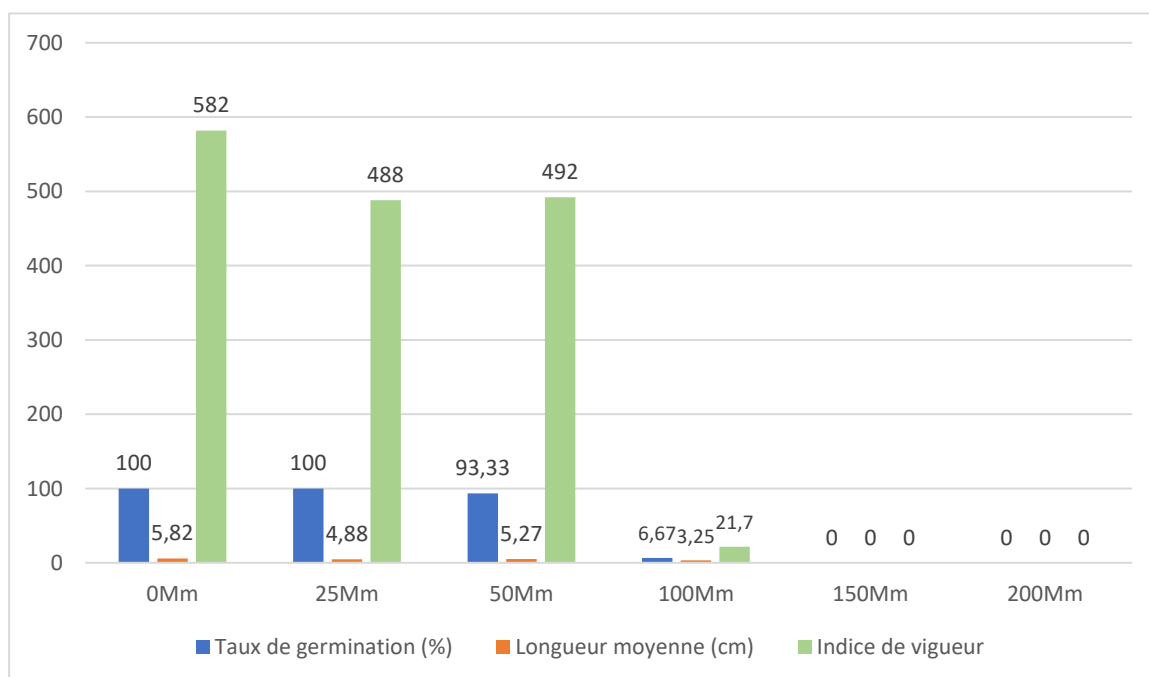


Figure 45 : Effet du stress salin sur les paramètres de germination de *Ceratonia siliqua*

L'analyse du graphique relatif à l'effet du stress salin sur les paramètres de germination de *Ceratonia siliqua* révèle une influence marquée de la concentration en NaCl. Aux faibles concentrations (0, 25 et 50 mM), le taux de germination reste élevé, atteignant 100 % pour les témoins et les graines exposées à 25 mM, et 93,33 % à 50 mM. De même, la longueur moyenne des plantules varie peu (entre 4,88 et 5,82 cm), et l'indice de vigueur demeure élevé, dépassant 480 dans ces trois conditions. Toutefois, à 100 mM, une forte inhibition est observée : le taux de germination chute à 6,67 %, la longueur moyenne tombe à 3,25 cm, et l'indice de vigueur est réduit à seulement 21,7. Enfin, aux concentrations de 150 et 200 mM, aucun germe n'est observé, indiquant une inhibition totale de la germination. Ces résultats montrent clairement que *Ceratonia siliqua* tolère relativement bien une salinité modérée (jusqu'à 50 mM), mais subit une inhibition drastique de sa germination et de sa croissance au-delà de ce seuil.

IMPACT DU STRSSE THERMIQUE SUR LA BIOMASSE ET LA TENEUR EN EAU DES PLANTULES DE CAROUBIE

Ce tableau présente les longueurs moyennes des plantules de Ceratonia siliqua soumises à deux températures différentes (20°C et 40°C), dans le cadre de l'étude de l'effet du stress thermique sur la croissance après germination.

Tableau 15 : Longueur moyenne des plantules selon la température

<i>Température</i>	<i>Nombre de plantules mesurées</i>	<i>Longueur moyenne (cm)</i>
20°	30	5.28
40°	3	1.50
4°	0	0

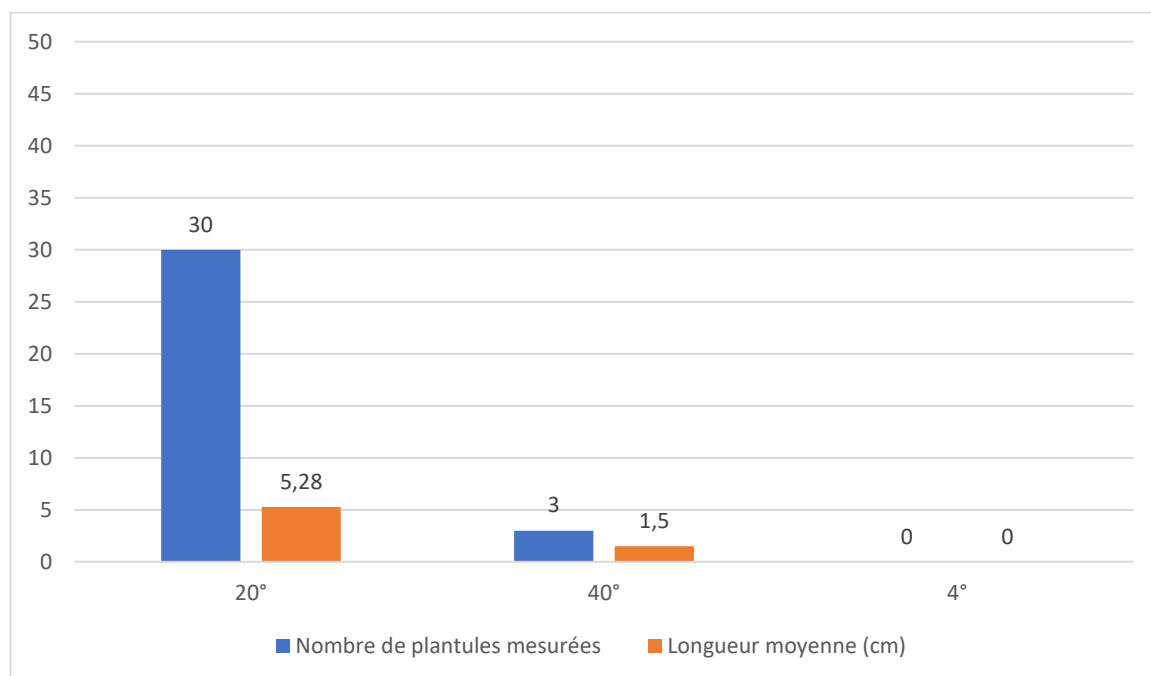


Figure 46 : l'effet de la tempirateur sur langedeur moyen des planteul

Ce graphique montre l'effet de trois températures (20 °C, 40 °C et 4 °C) sur le nombre de plantules mesurées et leur longueur moyenne. À 20 °C, température considérée optimale, la germination est maximale avec 30 plantules atteignant une longueur moyenne de

5,28 cm. Lorsque la température augmente à 40 °C, le nombre de plantules chute à 3, avec une longueur réduite à 1,5 cm, ce qui indique un impact négatif du stress thermique élevé sur la croissance. Enfin, à 4 °C, aucun développement n'a été observé, suggérant une inhibition complète de la germination et de la croissance à basse température. Ce résultat met en évidence la sensibilité thermique des graines, avec une zone optimale autour de 20 °C.

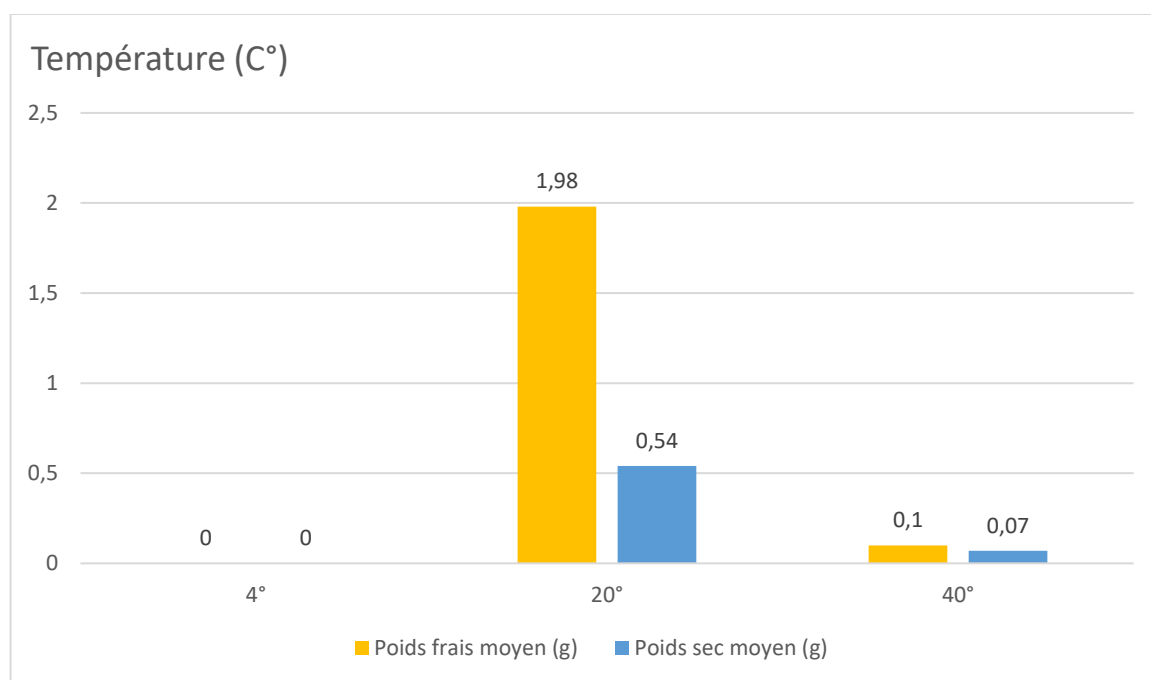


Figure 47 : Variation des poids frais et secs en fonction des niveaux de stress thermique

Ce graphique illustre clairement l'influence de la température sur la masse moyenne (fraîche et sèche) des plantules de *Ceratonia siliqua*. À 20 °C, les valeurs maximales sont observées, avec une masse fraîche moyenne de 1,98 g et une masse sèche moyenne de 0,54 g, indiquant des conditions optimales pour la croissance et l'accumulation de biomasse.

En revanche, à 40 °C, une chute drastique est enregistrée avec des valeurs très faibles (0,10 g pour la masse fraîche et 0,07 g pour la masse sèche), traduisant un stress thermique sévère inhibant la croissance. À 4 °C, aucune croissance n'est observée, ce qui est confirmé par des valeurs nulles.

Cette tendance montre que la température modérée (20 °C) favorise une germination et un développement normal, tandis que les températures extrêmes perturbent fortement les processus physiologiques, réduisant drastiquement la biomasse accumulée.

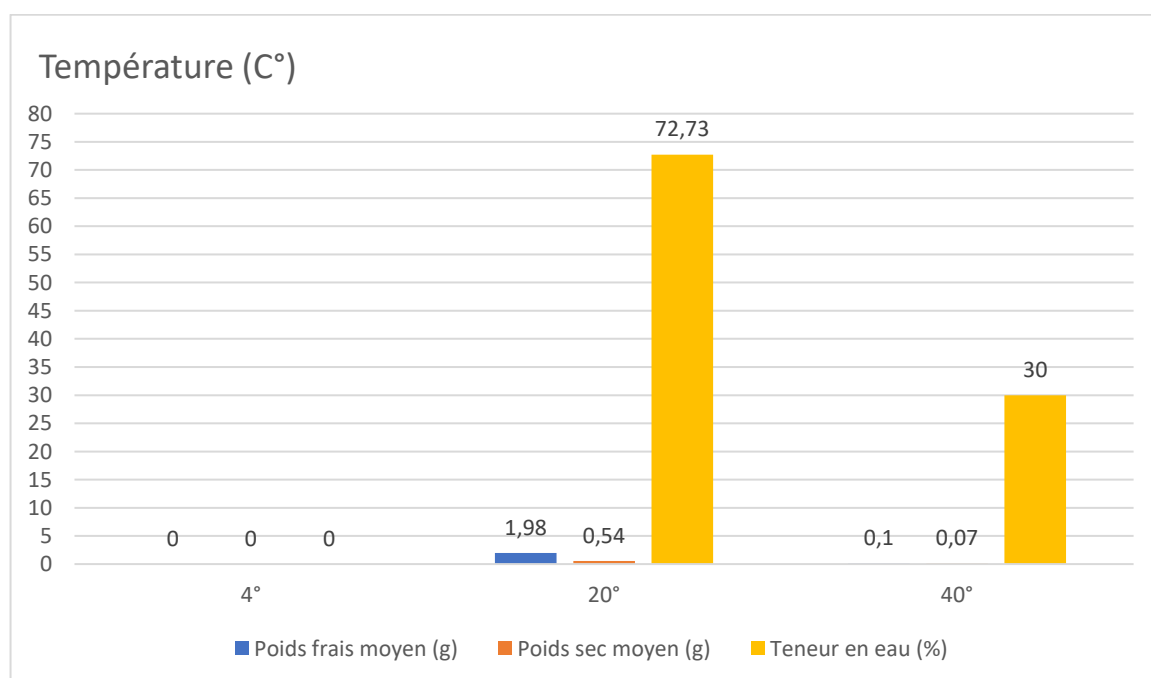


Figure 48 : mpact du stress thermique sur la biomasse et la teneur en eau des plantules de caroubie

*Ce graphique met en évidence l'influence de la température sur trois paramètres clés des plantules de *Ceratonia siliqua* : la masse fraîche moyenne, la masse sèche moyenne et la teneur en eau (%).*

À 20 °C, on observe les valeurs optimales :

- Poids frais moyen : 1,98 g
- Poids sec moyen : 0,54 g
- Teneur en eau : 72,73 %

Ces résultats indiquent que 20 °C représente une condition favorable au développement des plantules, permettant une bonne absorption d'eau et une croissance équilibrée.

En revanche, à 40 °C, les trois paramètres chutent fortement :

- Poids frais moyen : 0,10 g
- Poids sec moyen : 0,07 g

- *Teneur en eau : 30 %*

Cela traduit un stress thermique important, affectant à la fois la croissance et la rétention d'eau.

À 4 °C, tous les paramètres sont nuls, ce qui confirme l'absence totale de germination ou de croissance à cette température.

*La température optimale pour la germination et la croissance de *Ceratonia siliqua* est de 20 °C. Les températures extrêmes (4 °C et 40 °C) perturbent gravement les processus physiologiques, en particulier la capacité à retenir l'eau, essentielle pour une croissance efficace.*

5. DISCUSSION

INTERPRETATION DES RESULTATS DE GERMINATION

*Les résultats obtenus montrent que les graines de *Ceratonia siliqua* conservent une capacité de germination élevée jusqu'à 50 mM de NaCl, avec un taux supérieur à 90 %. Cela indique une certaine tolérance au stress salin faible à modéré.*

Cependant, à partir de 100 mM, une chute brutale du taux de germination est observée (6,67 %), atteignant 0 % à 150 et 200 mM. Cette inhibition s'explique probablement par une toxicité ionique accrue (présence excessive de Na⁺ et Cl⁻), un stress osmotique sévère, et une perturbation de l'absorption de l'eau.

L'indice de vigueur, qui combine taux de germination et croissance des plantules, suit cette même tendance, avec une valeur maximale à 50 mM (492), puis une chute brutale. Cela confirme que le seuil critique de tolérance au sel pour cette espèce est proche de 100 mM.

ANALYSE COMPARATIVE DES EFFETS DU STRESS SALIN ET THERMIQUE

*Le traitement à 50 mM de NaCl a donné lieu à un taux de germination élevé (93,3 %), proche de celui du témoin (100 %). Ce résultat suggère que, contrairement aux concentrations plus élevées, ce niveau de salinité n'a pas d'effet inhibiteur marqué sur la germination des graines de *Ceratonia siliqua*. Au contraire, il est possible que cette*

concentration modérée ait provoqué une stimulation légère du processus de germination chez certaines graines.

Ce phénomène est souvent interprété comme un effet hormétique, où un stress léger induit une réponse adaptative bénéfique de la plante. Dans le cas présent, l'exposition à 50 mM pourrait avoir activé certains mécanismes physiologiques ou biochimiques permettant aux graines de mieux mobiliser leurs réserves et de déclencher plus rapidement le processus de germination.

Toutefois, bien que la vitesse moyenne de germination reste comparable à celle des témoins (7 graines/jour contre 7,5 pour le témoin), on observe une légère baisse du nombre total de graines germées, ce qui indique que certaines graines plus sensibles n'ont pas pu supporter même ce niveau modéré de stress.

*En somme, la concentration de 50 mM marque une limite de tolérance relative chez *Ceratonia siliqua* : elle n'inhibe pas la germination de façon significative, mais elle commence à révéler des effets sélectifs sur les graines en fonction de leur viabilité ou sensibilité individuelle.*

DISCUSSION SUR L'EFFICACITE DU PRETRAITEMENT

*Le traitement chimique à l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) a montré une efficacité remarquable pour lever la dormance tégumentaire des graines de *Ceratonia siliqua*. En comparaison avec les graines témoins non traitées, les graines soumises à ce prétraitement ont présenté un taux de germination nettement supérieur, atteignant 100 % dans les conditions optimales. Cela confirme les observations antérieures selon lesquelles la dormance physique des graines du caroubier est due à l'imperméabilité du tégument, empêchant l'imbibition.*

L'action de l'acide sulfurique consiste à fragiliser ou fissurer le tégument sans altérer l'embryon, permettant ainsi une absorption rapide de l'eau et le déclenchement du processus métabolique de germination. Toutefois, il est essentiel de maîtriser la durée et la concentration de ce traitement, car un excès peut entraîner la dénaturation des tissus embryonnaires, comme observé dans certains traitements prolongés.

Ce prétraitement, bien que très efficace en laboratoire, doit être adapté aux conditions réelles de terrain. Il constitue néanmoins une méthode fiable et reproductible, particulièrement utile pour les programmes de reboisement ou de valorisation de cette espèce en zones arides et semi-arides.

REFERENCES A DES ETUDES ANTERIEURES

Les résultats de cette étude s'accordent avec plusieurs travaux antérieurs ayant évalué l'effet de différents stress abiotiques sur la germination des légumineuses méditerranéennes.

- *Benmahioul et al. (2011) ont montré que la levée de dormance chez les graines de caroubier nécessite une scarification chimique ou mécanique pour activer la germination.*
- *Khayatnezhad et al. (2010) ont démontré que l'augmentation de la concentration saline réduit significativement la germination chez plusieurs espèces en raison d'un déficit hydrique et d'une toxicité ionique.*
- *D'autres auteurs comme Baskin & Baskin (2004) ont également insisté sur le rôle des températures extrêmes dans la perturbation des mécanismes physiologiques de germination.*

*Ces résultats confirment que *Ceratonia siliqua* est une espèce particulièrement sensible aux conditions environnementales, mais qu'un traitement préalable adéquat permet d'améliorer significativement ses performances germinatives.*

LIMITES EXPERIMENTALES ET PERSPECTIVES

Comme toute étude expérimentale, ce travail présente certaines limites :

- *Le nombre de répétitions est relativement réduit pour permettre une généralisation robuste des résultats statistiques.*
- *L'expérimentation s'est déroulée dans des conditions contrôlées qui ne reflètent pas nécessairement les variations environnementales du terrain.*

- *L'effet combiné de plusieurs stress abiotiques (salinité + température, par exemple) n'a pas été exploré.*

Pour approfondir cette recherche, il serait pertinent de :

- *Étudier la réponse germinative sur un plus grand nombre d'échantillons issus de différentes zones écologiques.*
- *Évaluer la croissance des plantules après germination dans des conditions de stress prolongé.*
- *Tester des alternatives au traitement chimique, comme les traitements mécaniques ou thermiques, plus écologiques.*

Perspectives de valorisation

Les résultats de cette étude peuvent être exploités dans des programmes de :

- ❖ *Régénération et reboisement** dans les zones arides et semi-arides à salinité modérée.*
- ❖ *Optimisation des pépinières forestières** pour améliorer la levée et la croissance des plantules.*
- ❖ *Recherches agronomiques futures**, notamment pour tester des prétraitements alternatifs (eau chaude, abrasion mécanique, hormones végétales) ou d'autres espèces sensibles.*

Conclusion critique sur les limites

Bien que les résultats soient globalement cohérents, certaines limites méthodologiques doivent être mentionnées :

- ❖ *Le nombre d'échantillons utilisés reste limité, ce qui peut restreindre la portée statistique des conclusions.*
- ❖ *Les conditions d'incubation en laboratoire ne reflètent pas complètement les réalités du terrain (fluctuations de température, humidité, biotique).*
- ❖ *Aucune interaction combinée entre les stress n'a été testée (ex. : salinité + température).*

Malgré cela, l'étude constitue une base solide pour des applications concrètes et pour orienter des recherches plus poussées sur la physiologie de germination en milieux contraints.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

*La présente étude visait à évaluer l'effet de différents stress abiotiques, notamment le stress salin et thermique, sur la germination des graines de *Ceratonia siliqua* L., une espèce méditerranéenne d'intérêt écologique et économique. Afin de surmonter la dormance tégumentaire, un prétraitement chimique à l'acide sulfurique a été appliqué, facilitant une levée rapide et efficace de la dormance, et permettant d'évaluer avec plus de précision les effets des contraintes environnementales simulées.*

Les résultats obtenus ont révélé que la germination du caroubier est fortement influencée par la salinité et la température. Une concentration modérée en sel a pu être tolérée, mais les concentrations élevées ont entraîné une inhibition totale de la germination. De même, une température optimale a permis une germination efficace, tandis que les températures extrêmes, notamment le froid et la chaleur élevée, ont réduit significativement les performances germinatives.

Les paramètres de croissance mesurés (vitesse, durée, longueur, poids, vigueur) ont confirmé la sensibilité de cette espèce aux conditions abiotiques extrêmes. L'analyse statistique a consolidé ces constats en mettant en évidence des différences significatives entre les différents traitements.

*Ces résultats suggèrent que pour réussir l'implantation du *Ceratonia siliqua* en zones soumises à des contraintes abiotiques, il est crucial d'adapter les protocoles de prétraitement et de sélectionner des environnements plus favorables à la germination et au développement initial. Cette étude ouvre ainsi la voie à des recherches plus approfondies sur les mécanismes de tolérance au stress chez cette espèce, et encourage l'application de techniques culturales durables en zones arides et semi-arides.*

Recommandations et Perspectives

Au vu des résultats obtenus, nous proposons les recommandations suivantes :

- 1. Sélection des sites de plantation : privilégier des zones à faible salinité du sol, avec des températures modérées, pour maximiser le taux de germination et l'établissement des jeunes plants.*

2. *Optimisation du prétraitement chimique* : bien que l'acide sulfurique ait montré une grande efficacité, il serait pertinent d'explorer des alternatives moins corrosives (ex. : trempage à chaud ou traitement mécanique) pour une application à grande échelle.
3. *Suivi à long terme* : étendre les observations au stade de croissance post-germinative afin d'évaluer la résilience des plantules face aux stress abiotiques prolongés.
4. *Études moléculaires et physiologiques* : intégrer des analyses biochimiques ou transcriptomiques pour comprendre les mécanismes de tolérance au stress salin et thermique chez *Ceratonia siliqua*.
5. *Développement de techniques agroécologiques* : comme l'amélioration de la structure du sol, l'irrigation contrôlée ou l'amendement organique, pour atténuer l'impact des stress abiotiques en conditions naturelles.

*En conclusion, cette étude pose les bases pour une meilleure compréhension de la régénération de *Ceratonia siliqua* L. en conditions contraintes. Elle constitue un point de départ pour des actions de reforestation, de lutte contre la désertification, et d'agroforesterie durable dans les régions méditerranéennes.*

BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIQUES

1. Aftis, F., Djellouli, A., & Yahia, A. (2021). Influence du stress salin sur la germination et la croissance des jeunes plants de caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) en Algérie. *Revue Agriculture et Développement Durable*, 13(2).
2. Ait-Ahmed, A. (2008). Usages traditionnels du caroubier au Maghreb. *Études ethnobotaniques*, IREMAM.
3. Ajouri, A., Asch, F., & Mücklich, M. (2004). Interaction of salinity and boron toxicity in wheat. *Plant and Soil*, 267(1).
4. Almansouri, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2001). Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat. *Plant and Soil*.
5. Ammari, Y. & Brinis, L. (2021). Le caroubier : arbre de résilience et de valorisation des terres marginales. *Revue Agriculture et Développement Durable*.
6. Arous, M. & Kheloufi, A. (2020). Amélioration de la germination de *Ceratonia siliqua* L. par traitements chimiques. *Revue Nature & Technologie*, 21.
7. Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2005). Pre-sowing seed treatment a shot-gun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. *Advances in Agronomy*, 88.
8. Baskin, C.C., & Baskin, J.M. (2018). *Biologie de la dormance et de la germination des graines*. Éditions Lavoisier.
9. Ben Khaled, L., & Khemira, H. (2018). Improvement of carob seed germination through mechanical and chemical scarification. *Tunisian Journal of Plant Sciences*, 5(2).
10. Benmahioul, B. (2010). Multiplication du caroubier par semis et greffage : limites et perspectives. *Revue des Techniques Agricoles*, 14(2).
11. Bewley, J. D., & Black, M. (1994). *Seeds: Physiology of development and germination*. Springer.

12. Charef, L. (2016). *Effets du traitement à l'acide sulfurique sur les graines de caroubier. Mémoire Master, Université d'Oran.*
13. Chaves, M. M., & Oliveira, M. M. (2004). *Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: Prospects for water-saving agriculture. Journal of Experimental Botany.*
14. Come, D. (1970). *Les obstacles à la germination. Masson, Paris.*
15. Dadach, M., Bhatt, A., Gairola, S., & El-Keblawy, A. (2024). *Germination responses of carob (Ceratonis siliqua L.) seeds to salinity and water stresses: implications for the restoration of Mediterranean marginal lands. Canadian Journal of Botany.*
16. Dadach, M., et al. (2023). *Effects of different chloride salts on seed germination and early seedling performance of Ceratonis siliqua. Scientia Horticulturae, 320.*
17. Dahmane, A. (2020). *Influence de la température et de la salinité sur la germination du caroubier. Mémoire Master, Université de Mostaganem.*
18. Del Monte, J.P. (2007). *Dormance et levée de dormance chez les espèces à graines du bassin méditerranéen. CIHEAM – Série A.*
19. Delouche, J. C., & Baskin, C. C. (1973). *Seed dormancy and germination. In Seed Biology, Vol. II. Academic Press.*
20. Demir, I., & Mavi, K. (2004). *The effect of priming on seedling emergence of differentially matured watermelon (Citrullus lanatus) seed lots. Seed Science and Technology, 32(1).*
21. Djebbar, M. R. & Hacini, S. (2019). *Étude comparative de la germination de graines de Ceratonis siliqua traitées par scarification chimique et mécanique. Revue Sciences de la Vie, 16(1).*
22. Djekoun, A., & Planchon, C. (1991). *Water status and leaf growth of field soybean subjected to drought. Field Crops Research, 26(1).*

23. Elhawary, E. A., El-Sayed, M., Abdelgawad, H. (2025). *Impact of seed storage and drought on germination and seedling vigor of Ceratonia siliqua*. *Scientific Reports*.
24. Etegheri, L., et al. (2016). *Effects of temperature and salinity on the germination of carob seeds (Ceratonia siliqua L.)*. *African Journal of Agricultural Research*.
25. FAO. (2008). *Salinity management*. Land and Water Division, Rome.
26. Ghezlaoui, S. (2021). *Comparaison entre immersion à chaud et scarification sur l'efficacité germinative de graines de Ceratonia siliqua*. *Revue Algérienne des Sciences Végétales*, 5(1).
27. Guerrouche, F. (2020). *Caractérisation de la réponse germinative de graines traitées à différentes concentrations de NaCl*. *Revue INRF*, 19(4).
28. Guerroudj, M. (2018). *Réponse physiologique de Ceratonia siliqua aux traitements pré-germinatifs et au stress salin*. *Actes du séminaire national sur les semences*, INRF.
29. Gunes, A., et al. (2019). *Salinity and temperature interactions on seed germination and seedling growth in legumes*. *Plant Stress Physiology Journal*, 25(3).
30. Hegarty, T. W. (1977). *Seed activation and seed germination under moisture stress*. *New Phytologist*, 78(2).
31. Hernández, J. A., et al. (2001). *Antioxidant systems and O₂/• production in the apoplast of pea leaves*. *Plant Physiology*, 127(3).
32. ISTAT. (2021). *Statistiques agricoles et données climatiques sur la région de Relizane*. *Rapport technique*.
33. Kaya, M. D., et al. (2006). *Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower*. *European Journal of Agronomy*, 24(4).
34. Khemira, H., & Lababidi, S. (2007). *Dormance et germination des graines de caroubier (Ceratonia siliqua L.)*. *Revue des Régions Arides*.
35. Lambe, M. (2002). *Physiologie de la germination chez les Fabacées*. *Revue Forestière Française*, 54(4).

36. López, J. A., & Fernández, R. (2019). Seed dormancy and germination under Mediterranean stress conditions: Case study of *Ceratonia siliqua*. *Mediterranean Botany*, 40(1).
37. Lounis, A. & Bendif, H. (2018). Approche expérimentale sur la levée de dormance chez *Ceratonia siliqua*. *Revue Bioinfo Algérie*, 6(3).
38. Mayer, A.M. & Poljakoff-Mayber, A. (1975). *Germination des graines : régulation et mécanismes*. Masson.
39. Messaoudène, M. (2015). *Biologie et écologie du caroubier en Algérie. Mémoire de Magistère, Université de Bejaïa*.
40. Meziani, S. (2014). Le caroubier comme espèce agroécologique en zones semi-arides. *Revue Maghrébine de l'Environnement*, 12.
41. Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51(5).
42. Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59.
43. Mutava, R. N., et al. (2011). Characterization of drought-tolerant soybean genotypes in reproductive stages. *Field Crops Research*.
44. Othman, K. B., Guesmi, A., Mhadhbi, H., et al. (2024). Enhancements in carob seed germination, phytochemical profile and biological activities via cold plasma treatment. *Journal of Plant Physiology*.
45. Rollet, B. (1980). *La levée de dormance chez les graines des espèces méditerranéennes*. INRA, Paris.
46. Rubio-Cabetas, M. J., et al. (2006). Salinity and water stress tolerance in *Prunus* rootstocks. *Acta Horticulturae*, 701.
47. Saidi, S. (2022). *Analyse statistique de la germination de graines de caroubier selon différents prétraitements. Mémoire Master, Université de Jijel*.

48. Siddique, M. R. B., Hamid, A., & Islam, M. S. (2000). Drought stress effects on water relations of wheat. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 25(3).
49. Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5e éd.). Sinauer Associates.
50. Thomas, P. A. (2024). *International Biological Flora: Ceratonia siliqua*. *Journal of Ecology*, 112(5).
51. Université Ahmed Zabana Relizane – Rapports internes du laboratoire de biologie végétale (2025).
52. Willenborg, C. J., et al. (2004). Seed coat permeability and imbibition in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Seed Science and Technology*, 32(1).
53. www.florasilvestre.es – Plantes sauvages d'Espagne : fiches botaniques sur *Ceratonia siliqua*.
54. Yahiaoui, A. (2023). Effet de la scarification acide sur la vigueur germinative chez le caroubier dans le contexte du stress hydrique. *Revue Forestière Algérienne*.
55. Yatim, M., El-Askri, T., Es-Sbata, I., & ElOirdi, S. (2020). Effects of Pre-sowing Treatments and Abiotic Stress on the Germination of *Ceratonia siliqua* Seeds of Four Moroccan Biomes. *Annual Research & Review in Biology*, 35(12), 11-31.
56. Yemm, E. W., & Willis, A. J. (1954). The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochemical Journal*, 57(3).
57. Zeraia, L. & Benabdeli, K. (2011). Rôle du caroubier dans la lutte contre la désertification. *Séminaire sur les écosystèmes arides*. Université de Tlemcen.
58. Azadi, P., et al. (2010). Effect of mechanical and chemical scarification on seed germination of *Albizia julibrissin*. *African Journal of Agricultural Research*, 5(8), 944–947.
59. Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination*. Academic Press.

60. Batista, C., et al. (2020). *Ceratonia siliqua L.: A sustainable source of bioactive compounds with potential food applications*. *Food Research International*, 137, 109555.
61. Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., & Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*. Springer.
62. Boublenza, I., et al. (2021). *Chemical composition and biological activities of Ceratonia siliqua L. from Algeria*. *Industrial Crops and Products*, 170, 113748.
63. Dakia, P. A., Wathelet, B., & Paquot, M. (2007). *Isolation and chemical evaluation of carob (Ceratonia siliqua L.) seed germ flour*. *Food Chemistry*, 102(4), 1368–1374.
64. De Faria, S. M., et al. (2022). *Nitrogen-fixing legume symbioses in the 21st century: diversity, evolution and applications*. *Microbial Biotechnology*, 15(6), 1500–1521.
65. El Boullani, R., et al. (2021). *Effect of sulfuric acid scarification on seed germination of Ceratonia siliqua L. from different provenances in Morocco*. *South African Journal of Botany*, 137, 240–247.
66. FAO. (2021). *State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
67. Hameed, A., et al. (2014). *Effect of different pre-sowing treatments on germination of hard-coated seeds of Acacia nilotica*. *Pakistan Journal of Botany*, 46(5), 1871–1877.
68. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
69. Lal, R. (2020). *Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition*. *Food Security*, 12(5), 855–864.

70. Lewis, G., Schrire, B., Mackinder, B., & Lock, M. (2005). *Legumes of the World*. Royal Botanic Gardens, Kew.
71. Sprent, J. I., Ardley, J., & James, E. K. (2017). Legume evolution: where do nodules and mycorrhizas fit in? *Plant Physiology*, 174(2), 590–599.

RESUME

*Ce travail de recherche a été consacré à l'étude de l'effet de certains stress abiotiques, en particulier le stress salin et le stress thermique, sur la germination des graines de *Ceratonia siliqua* L., une espèce méditerranéenne d'importance écologique et économique. Dans un contexte marqué par les changements climatiques et la dégradation des sols, comprendre les réponses germinatives de cette espèce face à des conditions environnementales défavorables s'avère essentiel pour sa préservation et sa valorisation.*

L'expérimentation a été conduite au niveau du biologie faculté science de la nature et de la vie de l'Université Ahmed Zabana de Relizane. Les graines, prélevées de populations locales, ont subi un prétraitement chimique à l'acide sulfurique concentré afin de lever leur dormance. Par la suite, elles ont été soumises à différents niveaux de salinité (NaCl) et à des températures variables afin d'évaluer l'impact de ces facteurs sur plusieurs paramètres de germination.

Les résultats obtenus ont montré que le prétraitement à l'acide sulfurique a amélioré significativement la capacité germinative des graines. En revanche, des concentrations élevées de sel (≥ 100 mM) ont provoqué une inhibition quasi-totale de la germination. De même, une température optimale de 20 °C a favorisé la germination, tandis que les extrêmes thermiques (4 °C et 40 °C) ont eu un effet négatif.

*Les observations morphologiques, les mesures des paramètres de croissance (longueur des plantules, poids frais et sec), ainsi que les analyses statistiques ont permis de confirmer la sensibilité de *Ceratonia siliqua* à ces deux types de stress. Ces données soulignent l'importance de maîtriser les conditions environnementales lors des programmes de reboisement ou de culture de cette espèce.*

*Cette étude ouvre la voie à des recherches complémentaires sur la tolérance au stress de *Ceratonia siliqua*, et propose des pistes pratiques pour améliorer sa germination et son implantation en milieu méditerranéen soumis à des contraintes abiotiques croissantes.*

Summary

This research focused on studying the effect of certain abiotic stresses—specifically salinity and thermal stress on the germination of Ceratonia siliqua L. seeds, a Mediterranean species of ecological and economic significance. In the context of climate change and soil degradation, understanding the germination responses of this species to adverse environmental conditions is essential for its conservation and sustainable use.

The experiment was carried out at the Faculty of Natural and Life Sciences, University of Ahmed Zabana, Relizane. Seeds collected from local populations underwent a chemical pre-treatment with concentrated sulfuric acid to break dormancy. Subsequently, they were subjected to different levels of salinity (NaCl) and varying temperatures in order to evaluate the impact of these factors on several germination parameters.

Results showed that sulfuric acid pretreatment significantly enhanced seed germination capacity. However, high salt concentrations (≥ 100 mM) led to an almost complete inhibition of germination. An optimal temperature of 20 °C was found to favor germination, while extreme temperatures (4 °C and 40 °C) had a negative effect.

Morphological observations, growth parameter measurements (seedling length, fresh and dry weight), and statistical analyses confirmed the sensitivity of Ceratonia siliqua to both types of stress. These findings emphasize the importance of controlling environmental conditions during reforestation or cultivation programs involving this species.

This study paves the way for further research on stress tolerance in Ceratonia siliqua and suggests practical approaches to improve its germination and establishment in Mediterranean regions facing increasing abiotic constraints.

الملخص

خُصص هذا العمل البحثي لدراسة تأثير بعض أنواع الإجهادات غير الحيوية، خاصة الإجهاد الملحي والإجهاد الحراري، على إنبات بذور الخروب (*Ceratonia siliqua* L.) ، وهي نوع نباتي متوسطي ذو أهمية بيئية واقتصادية كبيرة. في ظل التغيرات المناخية وتدهور التربة، أصبح من الضروري فهم استجابات هذا النوع لظروف بيئية غير ملائمة لضمان حمايته واستثماره.

أُجريت التجربة على مستوى كلية علوم الطبيعة والحياة بجامعة أحمد زبانة بـغليزان، خضعت البذور المستخلصة من تجمعات محلية لمعاملة أولية بحمض الكبريتيك المركز لكسر السكون، ثم تعرّضت لمستويات مختلفة من الملوحة (NaCl) ودرجات حرارة متنوعة لتقييم تأثير هذه العوامل على عدة مؤشرات إنباتية.

أظهرت النتائج أن المعالجة الحمضية حسّنت بشكل ملحوظ من قدرة الإنبات، بينما أدت التركيزات العالية من الملح ($\geq 100 \text{ mM}$) إلى تثبيط شبه كامل للإنبات. كما أن درجة حرارة 20°C كانت مثالية، في حين أثرت الدرجات القصوى (4°C و 40°C) سلّبا على الإنبات.

أكدت الملاحظات المورفولوجية وقياسات النمو (طول البادرات، الوزن الطازج والجاف) والتحليل الإحصائية على حساسية الخروب لهذين النوعين من الإجهاد. وتشير النتائج إلى أهمية التحكم في الظروف البيئية عند إعادة التشجير أو زراعة هذا النوع النباتي في المناطق المتوسطة.

تفتح هذه الدراسة المجال لأبحاث مستقبلية حول قدرة تحمل الخروب للإجهادات، وتقترح حلولاً عملية لتحسين إنباته وتثبيته في بيئات تواجه ضغوطاً بيئية متزايدة.