REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou

Département d'Ecologie et Environnement

Mémoire

Presenté pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences de la Nature et de laVie
Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Biodiversité et Ecologie Végétale

Sujet :

Contribution à l'étude de l'adaptation de *Ziziphus lotus* (L.) Desf. à l'aridité par le biais des traits fonctionnels

Par :

KDYEM Fazia et LOUNICI Massinissa

Soutenue publiquement le, 29/06/2025 devant le jury composé de :

Mme SAADOUN Noria	Professeur, à l'UMMTO	Présidente
Mme BERRACHED Rachda	MCA, à l'UMMTO	Promotrice
Mme METNA Fatiha	MCA, à l'UMMTO	Examinatrice

Année universitaire : 2024/2025

Résumé

Le changement climatique actuel exacerbe l'aridification des milieux, en particulier dans les régions méditerranéennes, posant des défis majeurs à la végétation. En Algérie, où les zones arides couvrent près de 95% du territoire, la compréhension des stratégies d'adaptation des plantes est cruciale. Cette étude se concentre sur *Ziziphus lotus* (L.) Desf., (jujubier sauvage), un arbuste largement répandu et reconnu pour ses adaptations remarquables à la sécheresse. L'objectif était d'explorer la variabilité de ses traits morpho-fonctionnels pour comprendre ses mécanismes d'adaptation face aux gradients d'aridité. Huit stations, réparties entre les régions arides de Djelfa et subhumides de Boumerdès, ont été échantillonnées. Divers traits morphologiques (hauteur, largeur de la canopée) et foliaires (surface, longueur, largeur, épaisseur, Surface Foliaire Spécifique, Teneur en Matière Sèche des Feuilles) ont été mesurés et analysés statistiquement. Les résultats ont révélé des différences très significatives des traits entre les stations. Les feuilles étaient généralement plus petites et épaisses dans les milieux arides, associées à une surface foliaire spécifique plus faible et un teneur en matière sèche plus élevé, indiquant une stratégie de conservation des ressources. Inversement, la largeur de la canopée tendait à être plus grande dans les zones arides. Des corrélations complexes ont mis en évidence des compromis fonctionnels, comme une relation inverse entre la taille des feuilles et leur épaisseur. Ces ajustements fonctionnels démontrent la remarquable plasticité et résilience de *Z. lotus* face aux contraintes hydriques, lui permettant de persister dans des environnements très hétérogènes en adaptant ses traits vers des stratégies conservatives ou acquisitives selon les conditions locales.

Mots-clés : Adaptation, aridité, traits fonctionnels, SLA, LDMC, *Ziziphus lotus*, Algérie.

Remerciement

À Madame BERRACHED Rachda,

Il y a des rencontres qui marquent, des personnes qui, sans le savoir, laissent en nous une empreinte indélébile.

Comment exprimer notre gratitude envers une personne qui, bien au-delà du cadre académique, a su nous inspirer, nous guider et nous ouvrir des portes insoupçonnées ?

Vous avez été bien plus qu'une promotrice : une force tranquille, une femme d'une force admirable, capable de tendre une main vers des horizons où nous n'osions pas nous projeter.

À travers votre autorité naturelle, votre rigueur discrète, votre charisme silencieux, vous avez su imposer le respect sans jamais l'exiger, corriger sans briser, transmettre sans jamais cesser d'apprendre vous-même. Vous avez laissé une trace qui ne s'effacera jamais.

Et derrière cette exigence, il y avait aussi l'humour, la légèreté, les instants de rire partagés qui ont donné à cette aventure une chaleur inattendue. Ces moments de joie resteront gravés autant que les leçons de travail.

Et si ce mémoire est une étape, votre influence restera gravée bien au-delà de cette année de travail ensemble.

Alors merci. Merci d'avoir été cette personne qui a su voir au-delà des apparences, merci pour votre patience, votre exigence, votre confiance, et tout ce que vous avez transmis, bien souvent sans même vous en rendre compte.

Ce mémoire porte nos noms, mais il porte aussi tout ce que vous avez su nous inspirer.

Merci, simplement.

Aux membres de jury,

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Madame SAADOUN Noria, Présidente du jury, et à Madame METNA Fatiha, Examinatrice, pour l'honneur qu'elles nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

À Madame SAADOUN Noria, je souhaite également adresser quelques mots plus personnels

Votre force de caractère, votre énergie, votre façon de faire vivre le laboratoire et d'en faire un lieu accueillant, structurant, et vivant m'ont profondément marqué.

Vous incarnez une rigueur rare, mais jamais au détriment de l'humain. Vous savez créer un cadre de travail sérieux, tout en laissant place à la spontanéité, à la parole libre, au sourire, même dans les journées les plus chargées.

Vos anecdotes, votre humour, vos paroles toujours justes et jamais superflues ont apporté bien plus que vous ne l'imaginez. Vous avez cette capacité à porter un groupe, à maintenir l'ordre sans jamais éteindre ceux qui le composent, à transmettre des leçons sans forcément les formuler.

Cet accès au laboratoire, cette confiance, ce lieu où je peux avancer en paix, je ne l'oublierai pas.

Je voulais simplement souligner ce que votre présence, votre posture et votre manière d'être ont représenté pour moi tout au long de ce parcours.

Merci pour tout. Pour votre force, votre soutien, vos mots, et ce que vous êtes.

À Madame METNA Fatiha, je souhaite adresser des remerciements tout particuliers.

Ce qui n'était au départ qu'un lien professionnel s'est peu à peu transformé en une relation plus humaine, faite d'échanges quotidiens, de confiance et de respect mutuel.

Votre présence au laboratoire, votre écoute, vos attentions discrètes mais sincères, ont compté plus que vous ne l'imaginez.

Merci pour votre bienveillance, votre disponibilité, et cette chaleur qui rendait les journées plus simples.

À l'équipe du HCDS de la wilaya de Djelfa

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude envers l'équipe du Haut-Commissariat au Développement de la Steppe pour son accompagnement lors de nos sorties. Nous remercions particulièrement Monsieur BOUABDELLI Moukhtar, Haut-Commissaire, ainsi que Messieurs CHETTOUH Brahim et CHOUIHA Hakim pour leur disponibilité, leur professionnalisme et leurs conseils avisés, qui ont grandement contribué à rendre cette expérience enrichissante et inoubliable.

Exceptionnellement, nous souhaitons adresser un remerciement particulier à Monsieur MOHAMMEDI Meftah pour sa générosité, ses connaissances partagées et sa bienveillance constante, sur le terrain comme en dehors.

Merci pour les rires offerts, les histoires transmises et les petits gestes qui ont illuminé cette aventure. Vous avez marqué notre passage à Djelfa d'une humanité rare.

À La Conservation des forêts de la wilaya de Boumerdes

Nous remercions chaleureusement la Conservation des Forêts de Boumerdès pour son accueil et sa disponibilité.

Nous tenons particulièrement à exprimer notre reconnaissance à Monsieur GOUMIRI et à Madame DIAF pour leur assistance précieuse et leur collaboration dans la mise à disposition des données nécessaires à notre travail.

À l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, et particulièrement à la Faculté des Sciences Biologiques, pour la qualité de la formation dispensée, ainsi que pour les moyens mis à disposition des étudiants tout au long de notre parcours académique. Nous remercions également le Laboratoire des Ressources Naturelles, ainsi que l'ensemble de son équipe, pour le cadre de travail, le soutien logistique et scientifique qu'ils nous ont offerts durant la réalisation de ce mémoire.

À nos familles

À nos parents, frères et sœurs, ainsi qu'à nos petites et grandes familles, merci pour votre présence, votre affection et votre soutien, chacun à votre manière.

Un merci du fond du cœur à nos mères, pour leur force, leur patience, et tout ce qu'elles nous ont transmis sans toujours le dire.

À nos amies,

Merci à ceux qui, au fil de ce parcours, ont su être là par leur présence, leur écoute ou leurs encouragements, même discrets.

Une pensée particulière à celles qui ont été plus que de simples camarades.

Merci à Nermine, pour ta présence indéfectible tout au long de ce mémoire, et bien au-delà.

Tu as été là dès le début, attentive, patiente, toujours prête à aider, à expliquer, à encourager sans jamais y être obligée.

Tu as su nous accompagner non seulement dans le travail, mais aussi dans la vie, avec une bienveillance sincère et des attentions qui ont souvent fait toute la différence.

Ton soutien a été un véritable pilier. Merci, pour tout ce que tu as donné, et pour ce que tu es.

Liste des figures

Figure 1 : Diversité des aspects morphologiques du *Z. lotus* en fonction de la diversité des habitats. 6
Figure 2 : Morphologie de l'appareil végétatif et reproductif du *Z. lotus.* 8
Figure 3 : Distribution de *Z. lotus* en Algérie (Quezel et Santa, 1962). 9
Figure 4 : Le *Z. lotus* inondé au niveau de Dayat El Zerga, wilaya de Djlefa (Original, 2024). 11
Figure 5 : Présence d'un jeune individu de *Pistacia atlantica* sous l'abri de *Z. lotus* dans une Daya (Djelfa) (Originale, 2024). 13
Figure 6 : Accumulations sableuses sous les individus de *Z. lotus* (a et b) à Djelfa (Original, 2024)..... 13
Figure 7: Illustration de la hauteur et de la largeur de la canopée chez deux espèces végétales. 22
Figure 8 : Illustration des traits foliaires : longueur (L) et largeur (W) chez différentes morphologies foliaires (Liu et *al.*, 2017)..... 26
Figure 9 : Illustration du rôle de l'épaisseur foliaire dans l'adaptation à l'aridité. 28
Figure 10 : Localisation des stations d'étude dans la région de Djelfa. 38
Figure 11 : Carte de localisation des stations d'étude dans la zone de Boumerdès. 39
Figure 12 : Détermination de la ligne d'égouttement de la canopée d'un arbre et de la largeur de la canopée (Schomaker et *al.*, 2007). 41
Figure 13 : Procédure de numérisation et de mesure de la surface foliaire des feuilles de *Z. lotus* (Original, 2025). 42
Figure 14 : Détermination de la surface foliaire à l'aide du logiciel Mesurim Pro (Originale 2025)..... 43
Figure 15 : Mesure des dimensions foliaires de *Z. lotus* (Original, 2025). 44
Figure 16 : Représentation de l'absence de la normalité de toutes les variables testées à l'aide des Q-Q Plots. 46
Figure 17 : Comparaison multiple de la hauteur des individus de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés. 53
Figure 18 : Comparaison multiple de la largeur de la canopée des individus de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés. 54
Figure 19 : Comparaison multiple de la surface foliaire de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés. 55
Figure 20 : Comparaison multiple de la longueur foliaire de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés. 56
Figure 21 : Comparaison multiple de la largeur foliaire de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés. 57
Figure 22 : Comparaison multiple de l'épaisseur foliaire de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés. 58
Figure 23 : Comparaison multiple de la SLA de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés. . 59
Figure 24 : Comparaison multiple de l'LDMC de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.61

Figure 25 : Matrice des corrélations entre les traits morphologiques et fonctionnels de *Z. lotus.* 62
Figure 26. : Relation entre la largeur et la longueur foliaires chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 64
Figure 27 : Position de individus (2-8) de *Z. lotus* au niveau de la station de Leghata. 64
Figure 28 : Relation entre la largeur et la surface foliaire chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 65
Figure 29 : Relation entre la longueur et la surface foliaire chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 67
Figure 30 : Relation entre la largeur et l'épaisseur foliaire chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 68
Figure 31 : Relation entre la longueur et l'épaisseur foliaire *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 69
Figure 32 : Relation entre la surface foliaire et l'épaisseur foliaire chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 71
Figure 33 : Relation entre la largeur et le LDMC chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 72
Figure 34 : Relation entre la largeur de la canopée et le LDMC chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 73
Figure 35 : Relation entre le LDMC et le SLA chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée. 75

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification botanique de *Z. lotus* selon le système APG IV (2016). 5
Tableau 2 : Composition primaire de 100 g des graines de *Z. lotus.* 14
Tableau 3 : Principaux métabolites secondaires identifiés dans différentes parties de *Z. lotus* selon diverses sources. 16
Tableau 4 : Coordonnées géographiques, altitudes et étage bioclimatique des huit stations ... 37
Tableau 5 : Statistiques descriptives des traits fonctionnels étudiés en fonction des huit stations échantillonnées. 50
Tableau 6 : Résultat des tests ANOVA des différents traits étudiés au niveau des huit stations. 52
Tableau 7 : *P*-values des comparaisons multiples (test post-hoc). 53

Sommaire

Introduction **1**

Chapitre 1 : **4**

Généralité sur le *Ziziphus lotus* (L). Desf. **4**

1. Origine et évolution 5
2. Appellation 5
3. Classification 5
4. Caractéristiques morphologiques 6
   - 4.1. Système racinaire 7
   - 4.2. Rameaux 7
   - 4.3. Ecorce 7
   - .4.4 Feuilles 7
   - 4.5. Fleurs 7
   - 4.6 Fruits 9
5. Répartition géographique 9
   - 5.1. Dans le monde 9
   - 5.2. En Algérie 9
6. Ecologie de *Z. lotus* 10
   - 6.1 Interaction de *Z. lotus* avec son milieu abiotique 10
   - 6.2. Interaction de *Z. lotus* avec son milieu biotique 12
     - 6.2.1. Interaction de *Z. lotus* avec d'autres espèces végétales 12
     - 6.2.2. Interaction de *Z. lotus* avec les champignons 14
7. Composition biochimique 14
   - 7.1. Métabolites primaires 14
   - 7.2. Métabolites secondaires 15
8. Utilisations alimentaires 16
9. Usages environnementaux et agricoles 17
10. Activités biologiques de *Z. lotus* 17
    - 10.1. Propriétés antidiabétiques et métaboliques 17
    - 10.2. Activités gastroprotectrices et antispasmodiques 17
    - 10.3. Activités antioxydantes 17
    - 10.4. Activités antimicrobiennes et antibactériennes 18

10.5. Activités anticancéreuses et antiprolifératives 18
10.6. Activité immunomodulatrice 18
10.7. Activités dermatoprotectrices et neuroprotectrices 18
10.8. Autres activités biologiques 18
11. Propriétés insecticides de *Z. lotus* 19
Chapitre 2 : 20
Importance des traits fonctionnels dans l'étude de l'aridité 20
1. Définition des traits fonctionnels 21
2. Rôle de quelques traits fonctionnels dans les études de l'adaptation à l'aridité 21
2.1. Hauteur de la plante 21
2.1.1. Définition 21
2.1.2. Rôle de la hauteur dans l'adaptation à l'aridité et la disponibilité en eau 21
2.2. Largeur de la canopée 23
2.2.1. Définition 23
2.2.2. Influence de la largeur de la canopée sur l'adaptation à l'aridité 23
2.3. Les traits foliaires 24
2.3.1. Surface foliaire 24
2.3.1.1. Définition 24
2.3.1.2. Rôle de la surface foliaire dans la régulation des échanges hydriques (transpiration) 25
2.3.1.3. Rôle de la surface foliaire dans la régulation des échanges thermiques (température foliaire) 25
2.3.1.4. Rôle de la surface foliaire dans la photosynthèse 25
2.3.2 Longueur et largeur des feuilles 26
2.3.2.1. Définition 26
2.3.2.2. Influence de la longueur et de la largeur foliaires sur la capture de lumière et la transpiration 26
2.3.3. Épaisseur de la feuille 27
2.3.3.1. Définition 27
2.3.3.2. Rôle dans la limitation des pertes en eau 27
2.3.4. Indicateurs physiologiques des feuilles 29
2.3.4.1. Surface foliaire spécifique (Specific Leaf Area, SLA) 29
2.3.4.1.1. Définition 29
2.3.4.2. Teneur en matière sèche des feuilles (Leaf Dry Matter Content, LDMC) 30

2.3.4.2.1. Définition 30
2.3.4.2.2. Importance de l'indice LDMC dans l'adaptation à l'aridité 30
Chapitre 3 : 31
Matériels et Méthodes 31
1. Présentation de la zone d'étude 32
1.1. Présentation de région de Djelfa 32
1.1.1. Situation administrative 32
1.1.2. Géologie 32
1.1.3. Pédologie 33
1.1.4. Hydrologie 33
1.1.5. Végétation 33
1.1.6. Climat 34
1.2. Présentation de la wilaya de Boumerdès 34
1.2.1. Situation administrative 34
1.2.2. La géologie 35
1.2.3. La pédologie 35
1.2.4. L'hydrologie 35
1.2.5. La végétation 36
1.2.6. Le climat 36
2. Méthodologie 36
2.1. Choix des stations 36
2.2. Caractérisation bioclimatique des stations étudiées 37
2.3. Echantillonnage de *Z. lotus* 37
2.4. Mesures des traits fonctionnels 40
2.4.1. Hauteur de la plante 40
2.4.2. Largeur de la canopée 40
2.4.3. Les traits foliaires 40
2.4.3.1. Surface foliaire 40
2.4.3.2. Longueur et largeur de la feuille 42
2.4.3.3. Epaisseur des feuilles 43
2.4.3.5. L'indice LDMC (Leaf Dry Matter Content) 45
3. Analyses statistiques 45
3.1 Analyse de variance (ANOVA) 45

3.2 Analyse de corrélation 46
Chapitre 4 : 48
Résultats et Discussions 48
1. Résultats des statistiques descriptives des traits fonctionnels en fonction des stations 49
1.1. Hauteur (Hmax) 49
1.2. Largeur de la canopée 49
1.3. Surface foliaire 49
1.4. Longueur de la feuille 49
1.5. Largeur de la feuille 51
1.6. Epaisseur de la feuille 51
1.7. Surface foliaire spécifique (SLA) 51
1.8. Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC) 51
2. Résultats de l'analyse de variance appliqués aux traits morphologiques et fonctionnels en fonction des stations 51
2.1. Hauteur 52
2.3. Surface foliaire 54
2.4. Longueur des feuilles 56
2.5. Largeur des feuilles 57
2.6. Épaisseur foliaire 58
2.7. Surface foliaire spécifique (SLA) 59
2.8. Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC) 60
3. Résultats des corrélations entre les traits fonctionnels 62
3.1. Corrélations entre les huit variables étudiées 62
3.2. Corrélation entre la largeur et la longueur foliaires 63
3.3. Corrélation entre la largeur et la surface foliaires 65
3.4. Corrélation entre la longueur et la surface foliaires 66
3.5. Corrélation entre la largeur et l'épaisseur foliaires 67
3.6. Corrélation entre la longueur et l'épaisseur foliaires 69
3.7. Corrélation entre la surface et l'épaisseur foliaires 70
3.8. Corrélation entre la largeur foliaire et l'indice LDMC 71
3.9. Corrélation entre la largeur de la canopée et l'indice LDMC 73
3.10. Corrélation entre le LDMC et le SLA 74
Conclusion 77
Références bibliographique 80

Introduction

Introduction

Le changement climatique actuel, caractérisé par l'élévation des températures, la baisse des précipitations et l'augmentation de la fréquence des sécheresses, accentue l'aridification des milieux, en particulier dans les régions méditerranéennes (Amara et Benabdeli, 2020 ; Coleine et *al.,* 2024). Ces bouleversements affectent fortement le fonctionnement des écosystèmes, en réduisant la disponibilité en eau, la fertilité des sols et la productivité végétale (Nouidjem et *al.,* 2021), notamment au niveau des milieux arides où les précipitations constituent un facteur limitant pour la végétation (Aidoud, 1983 ; Aidoud et *al.,* 2006 ; Hirche et *al.,* 2011). Dans ce contexte, comprendre comment les plantes s'adaptent à ces contraintes abiotiques devient essentiel pour anticiper l'évolution de la végétation et orienter les efforts de conservation.

En Algérie, la zone aride couvre près de 95% du territoire national dont 80% dans le domaine hyper aride (Halitim, 1988). Néanmoins, les espèces végétales qui y vivent sont confrontées à une contrainte hydrique intense due à la rareté des précipitations, à l'évapotranspiration élevée et à la dégradation des sols. Pour faire face à ces conditions hostiles, les espèces ont développé diverses stratégies adaptatives, souvent traduites par des modifications de leurs traits morphologiques, physiologiques ou phénologiques (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013-2016 ; Torres-García et *al.,* 2021). Ces traits, connues sous le nom de « traits fonctionnels », reflètent la manière dont les plantes acquièrent, utilisent et conservent les ressources, notamment l'eau, ressource limitante majeure dans les zones arides (Giraldo-Kalil, 2022 ; Zhong et *al.,* 2023).

Parmi les traits fonctionnels les plus pertinents pour l'étude de l'adaptation à l'aridité figurent les traits foliaires tels que la surface foliaire spécifique (SLA), la teneur en matière sèche des feuilles (LDMC), la taille, l'épaisseur ou encore la densité stomatique des feuilles. Une SLA faible ou une LDMC élevée sont généralement associées à des stratégies conservatrices, favorisant la résistance au stress hydrique (Christie et *al.,* 2022 ; Liu et *al.,* 2022). Une réduction de la dimension foliaire permettrait également aux espèces végétales de faire face à une aridité croissante tout en limitant les échanges gazeux (Doghbage et *al.,* 2023). De même, la hauteur de la plante joue un rôle clé dans l'accès à la lumière et la compétition. Une faible hauteur est souvent observée dans les milieux arides afin de limiter la perte d'eau et de minimiser les effets des vents desséchants. Ces ajustements reflètent une stratégie écologique visant à maximiser l'efficience dans l'utilisation des ressources, en particulier l'eau (Anderegg et *al.,* 2020).

L'approche fonctionnelle permet de relier la structure des espèces végétales à leur fonctionnement écologique (Cornelissen et *al.,* 2003 ; Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013), et de mieux comprendre les compromis évolutifs opérés face aux contraintes. Elle offre ainsi un cadre pertinent pour analyser la variabilité intraspécifique des traits, identifier les syndromes adaptatifs, et prédire la résilience des espèces dans un monde en mutation. Dans ce contexte, la problématique centrale de ce travail est la suivante : comment les traits fonctionnels des plantes, et en particulier ceux de *Ziziphus lotus* (L.) Desf., reflètent-ils sa capacité d'adaptation aux gradients d'aridité dans un environnement soumis au changement climatique ?

Le *Z. lotus*, connu sous le nom du jujubier sauvage, un arbuste de la famille des Rhamnaceae, est un excellent modèle pour l'étude de l'adaptation des plantes à la sécheresse. Présent sur les pourtours méditerranéens, notamment en Algérie où il occupe une grande diversité d'habitats, allant des dunes sableuses du Sahara aux zones rocailleuses des régions littorales (Benamara et *al.*, 2023). Il se distingue par un système racinaire pivotant et étendu qui lui permet de puiser l'eau en profondeur, ainsi que par ses feuilles épaisses et ses rameaux épineux qui limitent les pertes hydriques (López-Rodríguez et *al.*, 2020).

Sur le plan écologique, le *Z. lotus* joue un rôle fondamental dans la stabilisation des sols, la régénération végétale et la conservation de la biodiversité. En tant que plante-nurse, il favorise l'installation d'autres espèces comme *Pistacia atlantica*, contribuant ainsi au maintien des écosystèmes steppiques fragiles (Zougar et *al.*, 2024). Son feuillage dense et persistant offre également un abri à de nombreuses espèces animales, renforçant sa valeur écologique dans les chaînes trophiques locales (Benamara et *al.*, 2023).

Par ailleurs, cet arbuste présente une forte valeur médicinale et économique. De nombreuses études ont confirmé la richesse phytochimique de ses différentes parties, notamment en flavonoïdes, tanins, saponines et polysaccharides, lui conférant des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, antidiabétiques et antimicrobiennes (Ghazghazi et *al.*, 2019). Ces composés bioactifs sont à l'origine de son usage traditionnel dans les médecines populaires du Maghreb et du Moyen-Orient, pour traiter les troubles digestifs, cutanés et respiratoires.

En outre, *Z. lotus* démontre une capacité d'interaction remarquable avec le microbiote de son environnement. Des recherches récentes ont mis en évidence des relations bénéfiques avec des champignons endophytes et épiphytes, qui peuvent améliorer la résistance de la plante aux stress biotiques et abiotiques (Ghazi et *al.*, 2022). Ces associations symbiotiques jouent un rôle crucial dans la santé de la plante, sa nutrition et sa tolérance au stress hydrique, et illustrent la complexité des réseaux écologiques dans les zones arides.

Le présent travail vise ainsi à explorer la variabilité des traits morpho-fonctionnels de *Z. lotus* dans plusieurs stations du nord de l'Algérie caractérisées par des degrés d'aridité différents. L'objectif général est d'étudier comment cette espèce ajuste ses traits en réponse au stress hydrique. Plus spécifiquement, il s'agit *(i)* de caractériser les traits fonctionnels au sein et entre les stations, *(ii)* d'évaluer statistiquement les différences et les corrélations entre ces traits et *(iii)* de comprendre les mécanismes d'adaptation de cette espèce face à l'aridité croissante dans un contexte de changement climatique global.

Dans le cadre des thématiques de recherches menées au laboratoire Ressources Naturelles, faculté des sciences biologiques et agronomiques de l'UMMTO ce mémoire a été organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre traite les caractéristiques morphologiques, écologiques et biochimiques du *Z. lotus.* Le deuxième met en évidence l'importance des traits fonctionnels dans l'étude de l'adaptation des espèces végétales à l'aridité. Le troisième chapitre, nous présente la méthodologie adoptée pour répondre à l'objectif de ce mémoire. Enfin le dernier chapitre expose les résultats obtenus ainsi que leurs discussions respectives. Le mémoire se termine avec une conclusion et des perspectives.

Chapitre 1 :

Généralité sur le *Ziziphus lotus* (L). Desf.

1. Origine et évolution

Le *Ziziphus lotus*, ou jujubier sauvage, est une espèce méditerranéenne largement répandue que l'on retrouve dans divers pays comme le Maroc, l'Algérie, la Tunisie, la Libye, le Yémen, le Moyen-Orient et l'Europe méridionale. Son nom, *Ziziphus*, proviendrait du terme arabe « Zizouf », désignant cette plante. Associé à la mythologie grecque, il est considéré comme le fruit des Lotophages, notamment sur l'île de Djerba (Ghedira, 2013). En Algérie, c'est la plante la plus commune des environnements arides et semi-arides. Son évolution est marquée par une adaptation notable aux conditions environnementales difficiles de ces zones (Houma et *al.*, 2022).

2. Appellation

Au fil du temps et des civilisations, le *Ziziphus lotus* a été désigné sous plusieurs noms, traduisant sa place dans l'écosystème et la culture locale. Parmi ces noms, nous avons (Baba Aissa, 1999 ; Ghedira, 2013) :

- Nom scientifique : *Ziziphus lotus* (L.) Desf. ;
- Nom français : Jujubier sauvage, jujubier de Berbérie, lotus des anciens, jujubier des Lotophages ;
- Noms anglais : African jujube, Lote fruit, Lotus tree, Lotus jujube, Wild jujube ;
- Nom allemand : Wilde Jujube ;
- Nom portugais : Acufeifa-menor ;
- Noms espagnols : Azufaifo africano, Azufaifo ibérico, Arto, Arto blanco, Espina de Cristo ;
- Noms arabes : Zizouf, sedra, sidr, sidr barri, n'beg (fruit) ;
- Nom berbère : âmezmem, azar, djerdjer.

3. Classification

Le système de classification des Angiospermes, connu sous le nom de l'Angiosperm Phylogeny Group (APG), dont la version APG IV (2016) est la plus récente, est une classification phylogénétique et consensuelle des plantes à fleurs. Basée sur les résultats d'études moléculaires, elle vise à refléter les relations évolutives entre les taxons. Selon ce système de classification, le *Z. lotus* est classé comme suit (Tableau 1) :

Tableau 1 : Classification botanique de *Z. lotus* selon le système APG IV (2016).

Règne	Plantae
Embranchement	Magnoliophyta
Sous-embranchement	Magnoliophytina
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Rhamnales
Famille	Rhamnaceae
Tribu	Ziziphae
Genre	*Ziziphus*
Espèce	*Ziziphus lotus* (L.) Desf.

Selon l'index synonymique de la flore de l'Afrique du Nord de Dobignard et Chatelain (2013), la nouvelle appellation de *Ziziphus lotus* est *Rhamnus lotus* L.

4. Caractéristiques morphologiques

Le *Z. lotus* est une espèce ligneuse des milieux arides, appartenant à la famille des Rhamnaceae (Maraghni et *al.,* 2010). Cette espèce se distingue par plusieurs adaptations morphologiques et physiologiques qui lui permettent de survivre et de prospérer dans des conditions climatiques difficiles. Son système racinaire, ses rameaux, son écorce, ses feuilles, ses fleurs et ses fruits présentent des caractéristiques spécifiques qui lui permettent de s'adapter à une diversité de contextes écologiques (Arndt et *al.,* 2000 ; Laamouri et *al.,* 2008). Ces formes morphologiques peuvent ainsi varier selon le milieu dans lequel l'espèce se développe, comme en bordure de forêts claires de Pin d'Alep (Figure 1a) (Amara et Benabdeli, 2020), à proximité du littoral (Figure 1b) (Torres-García, 2021), dans des milieux rocailleux dominés par le genévrier (Figure 1c) (Bencheikh et *al.,* 2023), ou encore en zones arides (Figure 1d) (Gorai et *al.,* 2010).

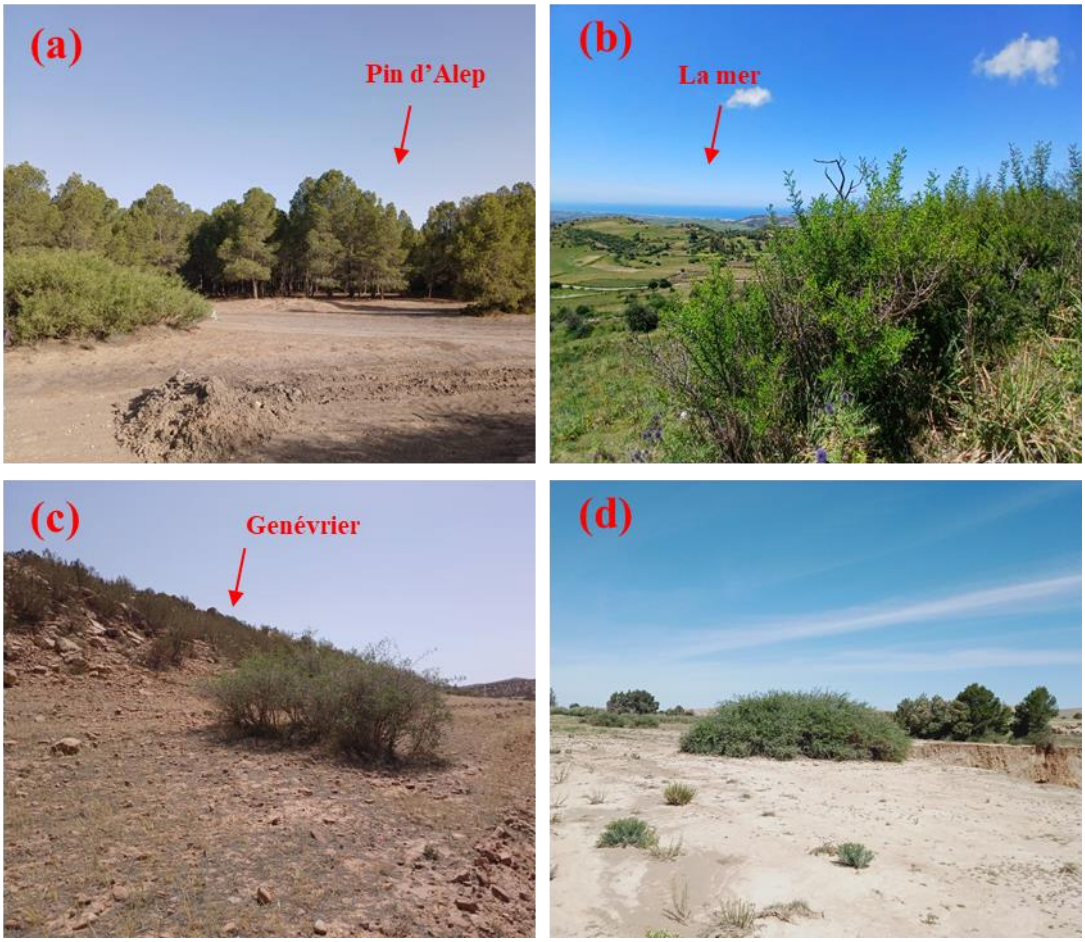

Figure 1 : Diversité des aspects morphologiques du *Z. lotus* en fonction de la diversité des habitats.

a : aspect arbustif de *Z. lotus* dans un matorral à pin D'Alep, Djelfa ; **b** : *Z. lotus* dans un milieu subhumide (Boumerdès) ; **c** : *Z. lotus* dans un matorral à Genévrier (Original, 2024) ; **d** : *Z. lotus* dans un milieu aride supérieur (Charef) (Original, 2025).

4.1. Système racinaire

Le *Z. lotus* se caractérise par un système racinaire développé qui joue un rôle essentiel dans sa propagation et son adaptation aux environnements arides (Figure 2a) (Laamouri et *al.*, 2008). La reproduction s'effectue principalement de manière végétative grâce aux racines horizontales et la couronne racinaire superficielles qui sont les principaux organes de propagation (Rsaissi et *al.*, 2013).

4.2. Rameaux

Le Z. lotus est une plante frutescente (arbrisseau) de 1.3 à 2.2 m de hauteur. Ses rameaux, très ramifiés, jouent un rôle clé dans son adaptation aux conditions arides. Ils sont flexueux, recourbés vers le bas et présentent une teinte blanc grisâtre (Ghedira, 2013) (Figure 2b). Ils sont également très épineux (Baba Aissa, 1999), avec des épines disposées par paires, droites ou recourbées (Figure 2c), renforçant ainsi leur fonction défensive et leur adaptation aux milieux semi-arides et steppiques (Ghedira, 2013). Les jeunes rameaux sont également glabres (Quezel et Santa, 1963).

4.3. Ecorce

L'écorce de *Z. lotus* présente une couleur gris-blanc, caractéristique des branches de l'espèce. Elle est lisse sur les jeunes rameaux, puis devient progressivement rugueuse et fissurée avec l'âge. Les branches poussent en zigzag (Figure 2d), une disposition typique du genre *Ziziphus* (Amara et Benabdeli, 2020).

4.4. Feuilles

Les feuilles de *Z. lotus* sont oblongues, à marge entière, courtement pétiolées, alternes et décidues (Bencheikh et *al.*, 2023). Elles sont de petite taille, mesurant entre 7 et 9 mm de large et 9 à 13 mm de long, avec un pétiole court (Ghedira, 2013). Néanmoins, Ozenda (1958) a souligné qu'elles atteignent environ (15 × 10 mm). La forme des feuilles varie entre elliptique (Baba Aissa, 1999) et ovale, avec une longueur 1.5 à 2 fois supérieure à la largeur (Quezel et Santa, 1963). Elles sont glabres, glauques en dessous et caractérisées par trois nervures distinctes (Figure 2e). Leur couleur est foncée (Yahia et *al.*, 2020), et elles présentent une variabilité morphologique notable. À la base de chaque feuille se trouvent deux stipules transformées en épines inégales et vulnérables (Bencheikh et *al.*, 2023). De plus, elles sont amphistomatiques, avec des stomates présentes sur les deux faces, adaxiale et abaxiale (Houma et *al.*, 2022).

4.5. Fleurs

Les fleurs de *Z. lotus* sont hermaphrodites et de couleur jaune (Amara et Benabdeli, 2020). Elles peuvent être solitaires ou groupées et possèdent un pédicelle court. Le calice, de forme entonnoir, est pentamère, tandis que la corolle est constituée de cinq petits pétales. Chaque fleur comprend cinq étamines épipétales ainsi que deux styles courts (Ghedira, 2013) (Figure 2f).

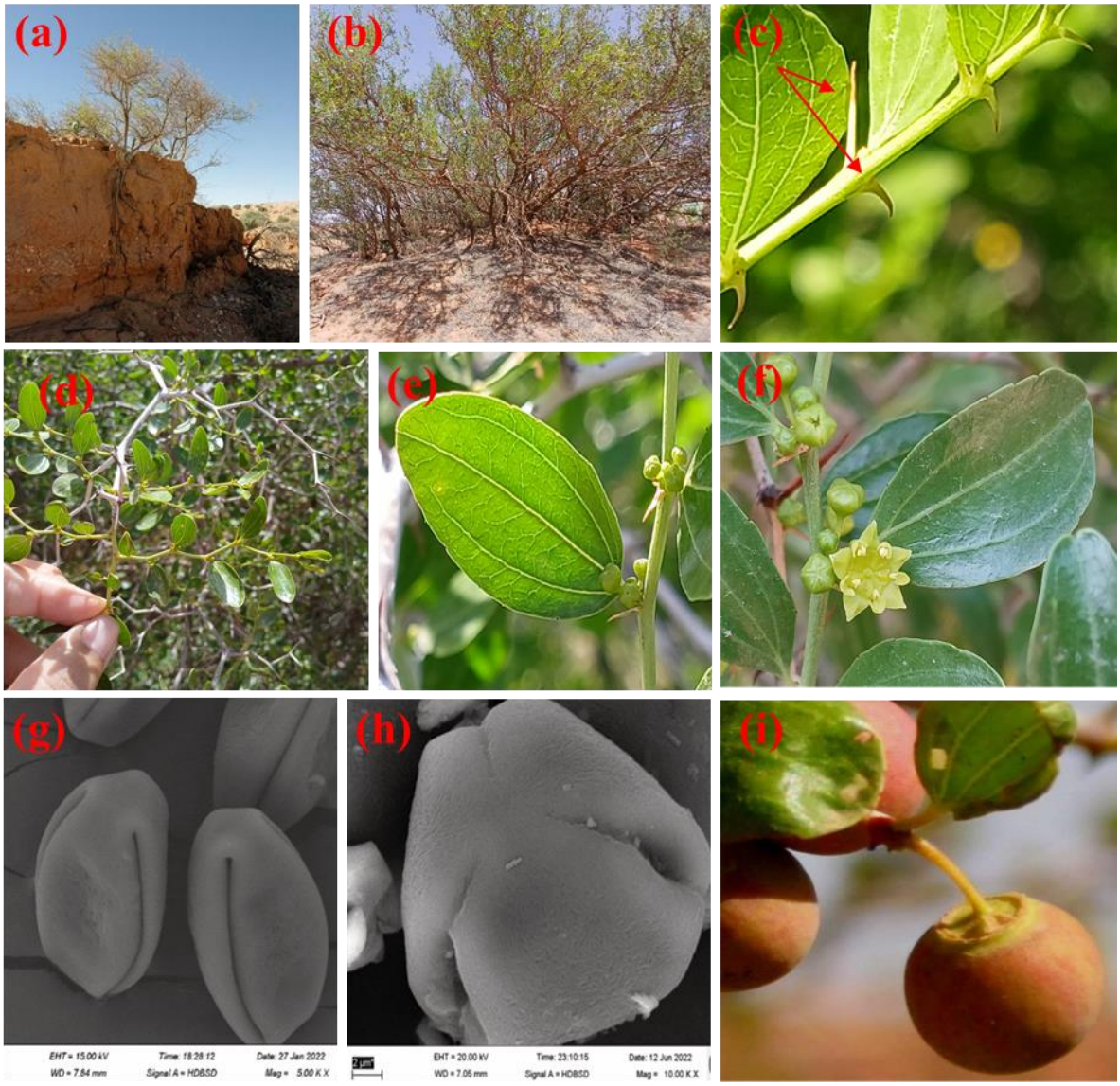

Figure 2 : Morphologie de l'appareil végétatif et reproductif du *Z. lotus.*

a : racine (http://atlas-sahara.org); **b** : ramifications denses et port frutescent de *Z. lotus* ; **c** : épines disposées en paire (une droite et une courbée ; **d** : rameau à disposition zigzagante ; **e** : feuille présentant trois nervures indiquées par des flèches rouges ; **f** : fleur (original, 2024) ; **g** : morphologie générale de grains de pollen ; **h** : forme polaire triangulaire ; **i** : fruit mature (Zouggar et *al.*, 2024).

Le pollen de *Z. lotus* présente une structure tricolporée avec de longs sillons méridiens, le classant parmi les pollens longicolporés. Il est isopolaire et symétrique radialement, apparaissant sous une forme triangulaire en vue polaire (Figure 2 g). Selon Zougar et *al.*, (2024), la taille du pollen varie entre 21.1 et 33.7 µm. La majorité des grains de pollen étudiée (92.9 %) sont de taille moyenne (25-50 µm), tandis qu'une minorité (7.1 %) appartient à la catégorie des petites tailles (10-25 µm). En ce qui concerne son diamètre équatorial (E), celui-ci se situe entre 11.8 et 21.4 µm (Figure 2h). En outre, l'ornementation de l'exine est de type rugulé.

D'un point de vue mélissopalynologique, le pollen de *Z. lotus* est largement dominant dans le miel de jujubier, sa fréquence dépassant 46 %. Un miel est qualifié de monofloral lorsque le pollen d'une seule espèce atteint une fréquence relative supérieure à 45 %.

4.6 Fruits

Les fruits de *Z. lotus* sont des drupes sphériques de petite taille, comparables à un pois (Ozenda, 1958). Ils sont globuleux, de couleur brun clair (Figure 2i), et possèdent une pulpe farineuse, douceâtre et aromatique (Baba Aissa, 1999). À pleine maturité, en octobre, leur goût rappelle celui de la pomme confite, avec une texture similaire à celle des dattes. Ils sont traditionnellement consommés sous forme de boisson fermentée, obtenue en mélangeant les fruits broyés avec de l'eau, ou transformés en farine après séchage (El Cadi et *al.*, 2020).

5. Répartition géographique

5.1. Dans le monde

Le Z. lotus est largement répandu dans le bassin méditerranéen, s'étendant de la Libye au Maroc, en passant par l'Algérie et plusieurs pays d'Europe du Sud, tels que l'Espagne, l'Italie, la Grèce et le Chypre. Il est également présent en Afrique du Nord, au Sahara et en Afrique de l'Ouest. Plus largement, le genre *Ziziphus* regroupe environ 170 espèces réparties dans les régions tropicales et subtropicales du globe (Amara et Benabdeli, 2020).

5.2. En Algérie

Le jujubier sauvage est largement répandu dans le bassin méditerranéen, notamment en Algérie (Mekious et *al.*, 2022). Il se développe préférentiellement dans les régions arides et semi-arides, en particulier dans le Sahara septentrional, central et méridional, ainsi que dans les pâturages steppiques (Nouidjem et *al.*, 2021 ; Ghazi Yaker et *al.*, 2023). Toutefois, sa présence est exclue du Tell algéro-constantinois (Amara et Benabdeli, 2020) (Figure 3).

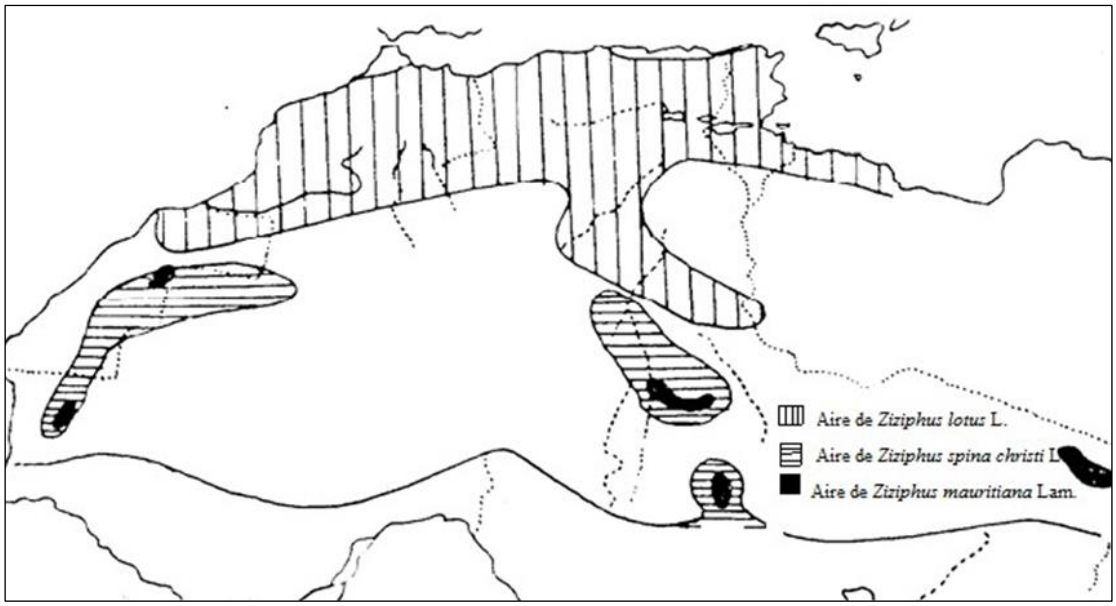

Figure 3 : Distribution de *Z. lotus* en Algérie (Quezel et Santa, 1962).

6. Ecologie de *Z. lotus*

Le *Z. lotus* est une espèce caractérisée par une forte tolérance à la sécheresse, avec une température optimale de croissance située entre 20 et 35 °C. Il est capable de survivre dans des zones désertiques où les précipitations sont extrêmement faibles (inférieure à 100 mm) (Amara et Benabdeli, 2020). Cette résistance remarquable repose sur une combinaison d'adaptations morphologiques, physiologiques et écologiques lui permettant de s'établir et de prospérer dans des milieux arides (Laamouri et *al.,* 2008).

6.1 Interaction de *Z. lotus* avec son milieu abiotique

Le *Z. lotus* se distingue par sa plasticité écologique exceptionnelle. Il est capable de se développer sur une grande variété de types de sols et de supporter des conditions extrêmes, y compris des inondations temporaires (Figure 4). Toutefois, il montre une préférence pour les sols sableux profonds bien drainés, présentant un pH neutre ou légèrement alcalin. L'espèce peut également se développer dans des zones à différences climatiques marquées, avec une pluviométrie allant jusqu'à 1 000 mm. Ses formes morphologiques varient considérablement en fonction des conditions édaphiques et climatiques (Figure 1) (Amara et Benabdeli, 2020). Cette variabilité s'étend à la morphologie des feuilles et aux caractéristiques stomatiques, témoignant de son adaptation aux pressions abiotiques locales (Houma et *al.,* 2022).

L'un des principaux mécanismes d'adaptation du *Z. lotus* à la sécheresse réside dans son système racinaire profond et vigoureux, qui lui permet d'exploiter les ressources hydriques des horizons profonds du sol. Ce développement rapide du système racinaire précède souvent la formation d'une biomasse aérienne, ce qui constitue une stratégie efficace pour l'occupation et la stabilisation des substrats arides (Laamouri et *al.,* 2008). En effet, dans ces milieux, une plus grande proportion de racines se développe en profondeur, où l'humidité est plus abondante et accessible. De plus, lorsque le déficit hydrique est prolongé, le *Z. lotus* réduit sa croissance aérienne, favorisant ainsi une allocation plus importante de biomasse aux racines pour améliorer son accès à l'eau souterraine (López-Rodríguez et *al.,* 2020). Grâce à ses racines pouvant atteindre jusqu'à 60 mètres de profondeur, le *Z. lotus* peut se qualifier de phréatophyte, formant ainsi l'un des rares écosystèmes dépendant de l'eau souterraine dans les zones semi-arides. Par ailleurs, la proximité des fractures du sol est également un facteur déterminant pour la présence du *Z. lotus*, car elle lui permet d'accéder plus efficacement aux réserves d'eau souterraine (López-Rodríguez et *al.,* 2020).

Le jujubier possède ainsi une remarquable capacité d'ajustement aux contraintes abiotiques, lui permettant de jouer un rôle écologique majeur dans la stabilisation des sols et la réhabilitation des écosystèmes dégradés (Amara et Benabdeli, 2020). A travers ses racines, il favorise l'augmentation de l'humidité du sol en redistribuant l'eau des couches profondes vers les couches plus superficielles, mettant ainsi à disposition des ressources hydriques et nutritives pour d'autres espèces végétales (López-Rodríguez et *al.,* 2020).

Sur le plan physiologique, le *Z. lotus* possède une forte tolérance à la sécheresse, comme en témoigne son faible potentiel hydrique enregistré durant l'été (Gorai et *al.,* 2010). En effet, le *Z. lotus* ajuste son potentiel hydrique afin de maintenir une activité physiologique durant cette

période (Bencheikh et *al.*, 2023). Il présente une régulation stomatique anisohydrique extrême, ce qui signifie qu'il maintient une activité photosynthétique et une assimilation du carbone même en conditions de sécheresse intense. Néanmoins, sa transpiration atteint un maximum durant l'été sec, période où la demande en eau atmosphérique est la plus élevée.

Figure 4 : Le *Z. lotus* inondé au niveau de le daya, wilaya de Djlefa (Original, 2025).

De plus, le *Z. lotus* est capable d'absorber l'eau d'un sol relativement sec et de réguler sa conductance stomatique en fonction de la disponibilité en eau. Il peut ainsi, modifier la structure de ses tissus foliaires et redistribuer hydrauliquement l'eau absorbée par ses racines profondes afin de favoriser l'absorption des nutriments par les racines superficielles (Torres-García et *al.*, 2021). Par ailleurs, l'épiderme foliaire du *Z. lotus*, est connue d'être plus épaisse chez les plantes soumises à un stress hydrique, renforçant ainsi leur résistance à la déshydratation (Maragni et *al.*, 2019).

Face au stress hydrique, le *Z. lotus* met en place d'autres stratégies d'adaptation. Il est capable d'accumuler des solutés compatibles, notamment des sucres solubles et de la proline. La production accumulée de proline et de saccharose joue un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre hydrique cellulaire et dans la protection contre les dommages oxydatifs (Maragni et *al.*, 2019). Au niveau de ses feuilles, il augmente ainsi son potentiel osmotique tout en améliorant sa résistance au déficit hydrique. Cette accumulation est particulièrement marquée sous conditions de stress, où les feuilles produisent respectivement 1.5 et 15 fois plus de sucres solubles et de proline. Dans l'éventualité d'une sécheresse sévère, le *Z. lotus* mobilise des

mécanismes de défense en accumulant des antioxydants, notamment des enzymes d'élimination des radicaux libres, en particulier dans ses racines. De plus, ses graines présentent une tolérance au stress hydrique avec une germination encore possible à un potentiel hydrique de -1 MPa (López-Rodríguez et *al.,* 2020).

Sa phénologie témoigne également de son adaptation aux contraintes climatiques. Il présente une croissance végétative active de mars à octobre, alors qu'un arrêt de croissance survient durant l'hiver en raison des basses températures (Zouaoui et *al.,* 2014). Par ailleurs, En ce qui concerne sa reproduction, la germination de ses graines est optimale à une température de 35 °C et à une profondeur de 2 cm dans un sol humide. Une profondeur supérieure à 4 cm empêche l'émergence des plantules. La germination est influencée négativement par le stress hydrique et la salinité, bien que l'espèce puisse tolérer des conditions modérément salines (Bencheikh et *al.,* 2023).

6.2. Interaction de *Z. lotus* avec son milieu biotique

Le *Z. lotus* présente un port étalé pouvant atteindre jusqu'à 3 mètres de hauteur et 15 mètres de diamètre, lui conférant un rôle central dans les écosystèmes arides. Il agit comme une espèce ingénieure en structurant le paysage et en influençant la disponibilité des ressources pour d'autres espèces (López-Rodríguez et *al.,* 2020).

6.2.1. Interaction de *Z. lotus* avec d'autres espèces végétales

En tant qu'espèce protectrice, le *Z. lotus* favorise l'établissement d'autres plantes dans les environnements arides et semi-arides en créant des conditions microclimatiques favorables (Zougar et *al.,* 2024). Il pourrait agir comme une espèce nurse pour *Pistacia atlantica* (pistachier de l'Atlas), mettant en évidence une relation bénéfique entre les deux espèces. Il est mentionné comme faisant partie de la strate arborée qui accompagne le pistachier de l'Atlas (Figure 5), suggérant une cohabitation naturelle dans le même type d'environnement. De plus, il est cité comme une espèce pouvant être utilisée pour créer des ceintures végétales visant à assurer une protection naturelle au pistachier de l'Atlas. Cette fonction protectrice peut être attribuée à sa capacité à moduler les conditions microclimatiques et à réduire l'impact des facteurs abiotiques défavorables, tels que l'aridité et l'érosion des sols. Par ailleurs, la présence de jeunes pousses de *P. atlantica* sous l'abri de *Z. lotus*, est à l'origine d'un taux de régénération plus élevé du pistachier dans ces conditions. Le jujubier pourrait favoriser l'établissement et la survie des jeunes plants de pistachier en leur procurant un microclimat plus favorable et également une protection contre les herbivores (Benaradj et *al.,* 2015).

Le *Z. lotus* contribue également à la création d'îlots de fertilité (Figure 6) dans les environnements arides et semi-arides, facilitant ainsi la croissance et la reproduction d'autres espèces végétales. Dans les zones sableuses, il favorise l'accumulation de sédiments et de matière organique sous son couvert, formant ainsi des structures géomorphologiques distinctes appelées « nebkhas » (López-Rodríguez et *al.,* 2020).

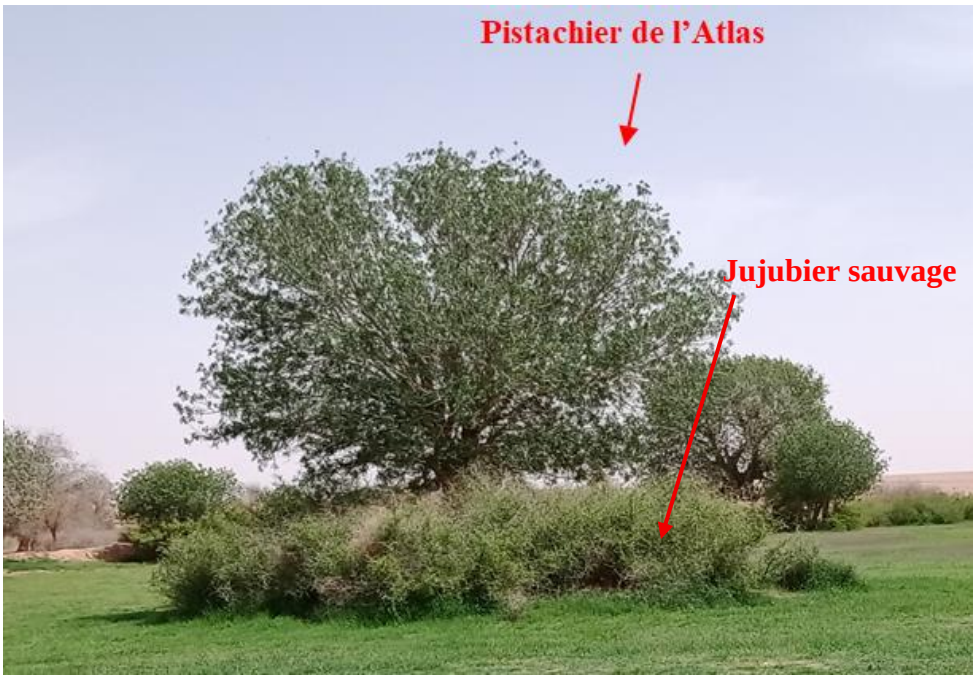

Figure 5 : Présence d'un jeune individu de *Pistacia atlantica* sous l'abri de *Z. lotus* dans une Daya (Djelfa) (Originale, 2024).

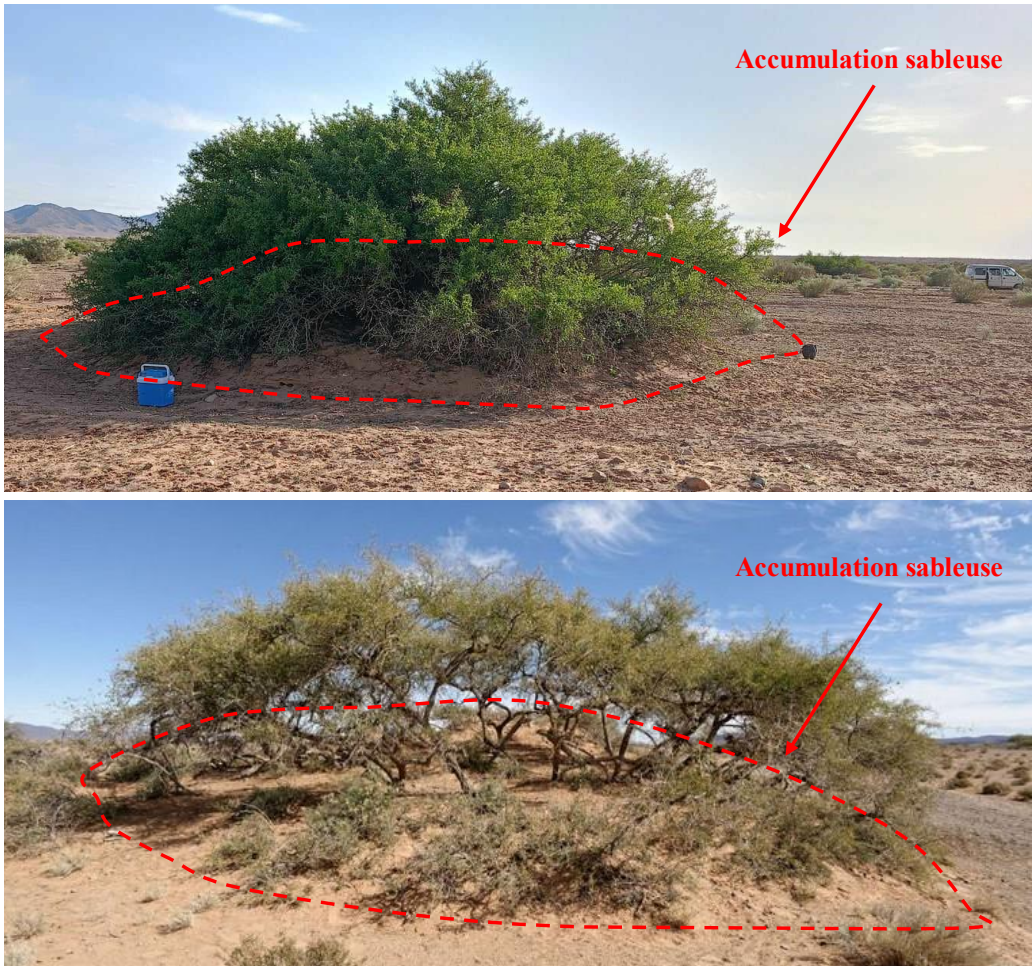

Figure 6 : Accumulations sableuses sous les individus de *Z. lotus* à Djelfa (Original, 2024).

6.2.2. Interaction de *Z. lotus* avec les champignons

La composition des communautés fongiques de *Z. lotus* est très riche aussi bien en épiphytes qu'endophytes. Néanmoins, cette composition et leur répartition varient selon leur mode de colonisation, les conditions environnementales et les interactions entre les espèces. Une étude réalisée dans la région de Tizi-Ouzou a identifié 52 espèces fongiques associées aux feuilles de cette plante, dont 19 épiphytes et 45 endophytes, avec 12 espèces communes aux deux communautés (Ghazi-Yaker et *al.*, 2023).

Les champignons épiphytes se développent à la surface des feuilles et interagissent directement avec l'environnement extérieur. Parmi les genres identifiés dans cette étude, nous avons *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Botrytis*, *Ceriporia*, *Cladosporium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Phanerochaete*, *Schizophyllum*, *Stemphylium* et *Trichothecium*. Leur présence est influencée par des facteurs environnementaux tels que l'humidité, la température et les nutriments disponibles à la surface foliaire.

Les champignons endophytes, quant à eux, colonisent l'intérieur des feuilles sans provoquer de symptômes visibles. L'étude de Ghazi-Yaker et *al.* (2023) a révélé une richesse plus importante dans cette communauté, avec des espèces appartenant aux genres *Alternaria*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Barnettella*, *Bipolaris*, *Cladosporium*, *Epicoccum*, *Fusarium*, *Humicola*, *Mollisia*, *Monodictys*, *Oidiodendron*, *Penicillium*, *Phialophora*, *Phlebia*, *Rhizopus*, *Sarocladium*, *Stemphylium*, *Talaromyces*, *Trichothecium*, *Ulocladium* et *Xylaria*.

7. Composition biochimique

La composition biochimique de *Z. lotus* est riche et variée, englobant à la fois des métabolites primaires et secondaires. Cette composition peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que l'origine géographique de la plante, les conditions climatiques, la saison de récolte, la partie de la plante analysée (racines, feuilles, fruits, graines, etc.) et la méthode d'extraction utilisée (Bencheikh et *al.*, 2023).

7.1. Métabolites primaires

Le *Z. lotus* est une espèce adaptée à des conditions écologiques spécifiques lui permettant de présenter des caractéristiques biochimiques particulières. L'analyse de la composition en métabolites primaires de ses graines, récoltés à Sidi Bouzid en Tunisie (Chouaibi et *al*., 2011), a révélé la présence des composés suivants (Tableau 2) :

Tableau 2 : Composition primaire de 100 g des graines de *Z. lotus.*

Catégorie	Composants	Valeurs
Composition globale	Cendres	1.05 %
	Huile	32.92 %
	Protéines	19.11 %
	Glucides totaux	40.87 %
	Humidité	6.05 %
Acides aminés	Thréonine	26.73 %
	Acide glutamique	17.28 %
	Leucine	13.11 %

	Arginine	9.47 %
	Acide aspartique	7.76 %
Acides gras	Acide oléique	61.93 %
	Acide linoléique	18.31%
	Acide palmitique	9.14 %
Triacylglycérols	Trioléate de glycérol (OOO)	26.48 % du total
Minéraux	Calcium, Potassium, Magnésium	Riche
	Sodium	7.30 mg/100 g
	Fer	1.21 mg/100 g
Vitamines	Thiamine (B1) et Riboflavine (B2)	Faibles concentrations
	Vitamine C	31.14 g/100 g

7.2. Métabolites secondaires

Les divers travaux sur la composition du *Z. lotus* en métabolites secondaires ont révélé la présence d'une importance richesse de celles-ci. Le tableau 3 récapitule les principaux métabolites secondaires identifiées dans différentes parties de *Z. lotus.*

Différentes parties de la plante sont utilisées en fonction des besoins thérapeutiques. Les racines, les feuilles et les fruits sont administrés sous forme de poudre, de décoction ou d'infusion, tandis que la décoction et la macération sont traditionnellement employées comme toniques, diurétiques, sédatifs et anti-inflammatoires. Une préparation particulière, à base de cendre de bois de jujubier additionnée de vinaigre, est utilisée en application locale pour traiter les morsures de serpent ainsi que pour les soins capillaires, notamment sous forme de décoction de feuilles pour renforcer les cheveux (Ghedira, 2013 ; Bencheikh et *al.,* 2023).

L'usage médicinal du *Z. lotus* varie également selon les régions et les pays. En Algérie, les populations d'El-Bayadh utilisent la décoction des feuilles comme antitussif et antiseptique, tandis qu'à Tlemcen, les racines et les feuilles servent à traiter le diabète, les ulcères de l'œsophage et les douleurs corporelles. À M'Sila, l'infusion et la poudre de feuilles sont appliquées pour soulager l'eczéma et leurs propriétés anti-inflammatoires sont appréciées. Dans la région saharienne d'Oued Righ, la décoction est employée comme tonique et sédatif (Bencheikh et *al.,* 2023).

Au Maroc, il est utilisé dans le Nord-Est pour traiter les troubles musculaires, le diabète, les problèmes urinaires, les maladies de la peau et les troubles digestifs. A Fès-Meknès, il est réputé pour son action contre les calculs rénaux. Dans le Haut Atlas central, les fruits et les feuilles sont reconnus pour leurs propriétés anti-ulcéreuses, antidiabétiques et cicatrisantes, alors qu'à Agadir Ida Outanane, la décoction de graines est spécifiquement employée pour lutter contre le diabète (Abdoul-Azize, 2016 ; Bencheikh et *al.,* 2023).

D'autres pays font également usage du *Z. lotus* dans leur médecine traditionnelle. En Mauritanie, notamment dans le district d'Adrar, il est recommandé contre les douleurs d'estomac et épigastriques. En Libye, l'écorce, les fruits, les feuilles et les racines sont utilisées pour traiter la constipation, la gastrite, la sciatique et les troubles hépatiques. En Jordanie, les graines et les fruits sont employés pour soulager la toux, la rougeole et comme

antispasmodiques. En Palestine, les feuilles servent de désinfectant, tandis qu'en Tunisie, le *Z. lotus* est prisé pour ses effets bénéfiques sur les irritations broncho-pulmonaires et son action antidiabétique (Chouaibi et *al.,* 2011 ; Bencheikh et *al.,* 2023).

Tableau 3 : Principaux métabolites secondaires identifiés dans différentes parties de *Z. lotus* selon diverses sources.

Catégorie	**Composés spécifiques**	**Partie étudiée**	**Source**
Tocophérols	β-tocophérol (130,47 mg/100 g d'huile), tocophérols totaux (141,07 mg/100 g d'huile)	Huile de graines	Chouaibi et *al*., (2011), Snoussi et *al.*, (2021)
Stérols	Δ7-campestérol (147,82 mg/100 g d'huile), β-sitostérol (82,10 mg/100 g d'huile)	Huile de graines	Chouaibi et *al*., (2011)
Polyphénols	Composés phénoliques	Huile de graines	Chouaibi et *al*., (2011), Snoussi et *al.*, (2021)
Caroténoïdes et Chlorophylle	Caroténoïdes (6,34 mg/kg huile), chlorophylle (0,16 mg/kg huile)	Huile de graines	Chouaibi et *al*., (2011), Snoussi et *al.*, (2021)
Flavonoïdes	Quercétine et dérivés	Feuilles	Ghedira (2013), Hani et *al.*, (2020)
Alcaloïdes	Lotusines AG, lotusanines AB, sanjoinénine, sanjoinine, frangufoline	Racines	Ghedira (2013)
Saponines	Jujubosides A, B, C, lotosides I et II	Feuilles	Hani et *al.* (2020)
		Racines	Ghedira (2013)
Tanins	/	Feuilles	Hani et *al.*, (2020)
Terpènes	/	Feuilles	Hani et *al.*, (2020)
Acides gras	Acide linoléique	Pulpe de fruit	Ghedira (2013)
Vitamines	Rétinol (Vit A), Acide ascorbique (Vit C)	Pulpe de fruit	Ghedira (2013)

8. Utilisations alimentaires

Les fruits du *Z. lotus* constituent une source de nourriture à la fois peu coûteuse et nutritive. Riches en sucres, fibres, vitamines A et C, acides gras, tanins et antioxydants, ils offrent des bénéfices nutritionnels importants (Ait Bouzid et *al.*, 2024). En plus de leur consommation directe, ces fruits sont appréciés comme apéritifs dans certaines régions du Maroc (Bencheikh et *al.,* 2023). Le *Z. lotus* est également valorisé à travers son miel, réputé pour ses propriétés

antioxydantes et antimicrobiennes (Mekious et *al.*, 2020). Par ailleurs, ses feuilles sont utilisées en infusion, notamment en Chine, où elles sont consommées sous forme de thé (Yahia et *al.*, 2020).

9. Usages environnementaux et agricoles

Le *Z. lotus* joue un rôle écologique essentiel, notamment dans la stabilisation des sols et la lutte contre l'érosion grâce à son système racinaire vigoureux, ce qui en fait une espèce précieuse pour le reboisement (Laamouri et *al.*, 2008). Il est également recommandé pour la réhabilitation des steppes dégradées et la restauration des zones menacées par l'ensablement (Amara et Benabdeli, 2020). Sur le plan agricole, ses feuilles peuvent être utilisées comme fourrage dans les zones arides, constituant ainsi une ressource alimentaire précieuse pour le bétail (Amara et Benabdeli, 2020).

10. Activités biologiques de *Z. lotus*

Il est important de noter que les propriétés biologiques de *Z. lotus* peuvent varier en fonction de la partie de la plante utilisée (racine, feuille, fruit, etc.) et du type d'extrait. En effet, des études réalisées *in vitro* ou sur des modèles d'animaux ont montré son efficacité, néanmoins des recherches cliniques supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ces effets chez l'homme (Bencheikh et *al.*, 2023).

10.1. Propriétés antidiabétiques et métaboliques

L'extrait aqueux des fruits de *Z. lotus* a démontré une activité antidiabétique significative. Il contribue à la régulation de la glycémie grâce à l'inhibition de l'α-amylase et de l'α-glycosidase, enzymes impliquées dans la digestion des glucides. Par ailleurs, l'extrait aqueux des fruits améliore le profil lipidique en réduisant les taux de cholestérol chez des modèles animaux soumis à un régime riche en graisses, suggérant ainsi un potentiel antihyperlipidémique et anti-obésité. La poudre des fruits de *Z. lotus* a également montré des effets bénéfiques sur les concentrations de lipides plasmatiques (Bencheikh et *al.*, 2023).

10.2. Activités gastroprotectrices et antispasmodiques

Les fruits de *Z. lotus* possèdent une activité gastroprotectrice démontrée par leur effet inhibiteur sur les ulcères induits par l'éthanol et l'aspirine chez le rat (Abdoul-Azize, 2016). De plus, les extraits aqueux et méthanoliques des feuilles et des écorces de racines présentent des propriétés antispasmodiques en réduisant les contractions du duodénum (Borgi et *al.*, 2007 ; Abdoul-Azize, 2016).

10.3. Activités antioxydantes

Plusieurs parties de *Z. lotus* (racines, feuilles, tiges, pulpe de fruits et graines) présentent une forte activité antioxydante, mesurée par des tests tels que DPPH, FRAP et ABTS. L'extrait méthanolique des feuilles s'est révélé particulièrement puissant (Ghazghazi et *al.*, 2014). Une étude a montré que l'intensité de l'activité antioxydante suit l'ordre suivant : pulpe de fruit < graines < feuilles < racines < tiges (Ghedira, 2013). La richesse en composés phénoliques permet à *Z. lotus* de neutraliser les radicaux libres, avec une efficacité potentiellement

supérieure à celle des antioxydants synthétiques (Mekious et *al.,* 2020 ; Ghazi-Yaker et *al.,* 2023).

10.4. Activités antimicrobiennes et antibactériennes

Les extraits de *Z. lotus* ont démontré une activité antibactérienne notable contre différentes souches, notamment *Staphylococcus aureus, Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa* (Bencheikh et *al.,* 2023). L'extrait acétonique des feuilles s'est révélé particulièrement efficace contre *Staphylococcus aureus*, y compris les souches résistantes à la méthicilline, ainsi que contre *Staphylococcus epidermidis* et *Listeria monocytogenes* (Bencheikh et *al.,* 2023). Par ailleurs, l'extrait méthanolique des racines a montré une action bactéricide contre *Esherichia coli*, *Enterobacter aerogenes*, *Serratia liquefaciens*, *Staphylococcus sp.*, et *Lactobacillus sp.* (Rached et *al.,* 2019). Un extrait enrichi en alcaloïdes des écorces de racines a également démontré une activité inhibitrice contre plusieurs pathogènes, dont *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Mycobacterium smegmatis* (Ghedira, 2013 ; Ghazi-Yaker et *al.,* 2023).

10.5. Activités anticancéreuses et antiprolifératives

L'extrait lipophile d'écorce de racine de *Z. lotus* a montré un potentiel antiprolifératif contre la lignée cellulaire du cancer du sein triple négatif *MDA-MB-231*. De plus, les extraits pétroliers et dichlorométhaniques des racines ont démontré une forte cytotoxicité contre les cellules neuroblastiques humaines (Bencheikh et *al.,* 2023). D'autres recherches indiquent que *Z. lotus* présente des effets antitumoraux prometteurs (El Yakoubi et *al.,* 2024).

10.6. Activité immunomodulatrice

Certaines études suggèrent que le *Z. lotus* possède des effets immunomodulateurs. En particulier, il pourrait moduler l'activité antioxydante et influencer la prolifération des cellules T humaines (Ghazghazi et *al.,* 2014). Les extraits de *Z. lotus* ont également montré des propriétés immunosuppressives (Ghedira, 2013).

10.7. Activités dermatoprotectrices et neuroprotectrices

L'extrait aqueux des fruits de *Z. lotus* a démontré une capacité inhibitrice de la tyrosinase, suggérant un potentiel pour la protection de la peau et la régulation de la pigmentation. Par ailleurs, certaines études indiquent un effet neuroprotecteur potentiel de *Z. lotus*, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour en préciser les mécanismes (Bencheikh et *al.*, 2023).

10.8. Autres activités biologiques

L'huile extraite des graines de *Z. lotus* présente des propriétés anti-inflammatoires (Rached et *al.*, 2019), tandis que la plante pourrait également avoir des effets anti-urolithiatiques, suggérant un potentiel dans la prévention des calculs rénaux (El Yakoubi et *al.*, 2024).

11. Propriétés insecticides de *Z. lotus*

Une étude menée par Rabie et *al.*, (2019) dans la région de Tissemsilt à l'ouest algérien a démontré que les feuilles de *Z. lotus* contiennent divers composés bioactifs tels que les flavonoïdes, les tanins, les alcaloïdes et des saponines de type dammarane, qui pourraient être à l'origine de ses effets insecticides et que les extraits aqueux des feuilles de *Z. lotus* sont toxiques pour les larves de *Thaumetopoea pityocampa (*la processionnaire du pin), avec une efficacité plus marquée par contact que par ingestion. Ces résultats suggèrent que la plante pourrait être intégrée dans des stratégies de lutte biologique contre la processionnaire du pin, en tant qu'alternative aux insecticides chimiques. Par ailleurs, les triterpènes pentacycliques, tels que l'acide bétulinique, sont reconnus pour leurs multiples activités biologiques, notamment antimicrobiennes, anti-inflammatoires et potentiellement insecticides (Cacciola et *al.*, 2022).

Chapitre 2 :

Importance des traits fonctionnels dans l'étude de l'aridité

L'étude des traits fonctionnels des espèces végétales est considérée comme une approche essentielle pour comprendre leurs stratégies d'adaptation aux divers environnements, en particulier dans les milieux arides où les ressources, notamment l'eau, sont limitées (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016).

1. Définition des traits fonctionnels

Les traits fonctionnels jouent un rôle crucial dans la compréhension des stratégies d'adaptation des végétaux aux différentes contraintes écologiques, notamment dans les milieux arides où la disponibilité en eau est limitée et les températures sont souvent élevées (Laamouri et *al.,* 2008). Ils sont définis comme des caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologiques, mesurables au niveau de l'individu, qui influencent l'aptitude évolutive de la plante ou son impact sur l'écosystème. Ces traits permettent de décrypter comment les plantes répondent aux facteurs environnementaux et façonnent les propriétés des écosystèmes (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013-2016).

2. Rôle de quelques traits fonctionnels dans les études de l'adaptation à l'aridité

2.1. Hauteur de la plante

2.1.1. Définition

La hauteur maximale de la plante (H_{max}) est définie comme la distance entre le sommet des tissus photosynthétiques et le niveau du sol (Figure 7a) (Berrached et *al.,* 2017). Ce trait morphologique est influencé par divers facteurs, parmi lesquels figurent l'âge de la plante (Abdoul-Azize, 2016), les conditions environnementales (type de sol, climat, disponibilité en eau), la compétition interspécifique, ainsi que les facteurs anthropozoogènes, c'est-à-dire les perturbations d'origine anthropique ou animale (Houma et *al.,* 2022). Chez les espèces ligneuses, telles que les arbres et les arbustes, cette variabilité est également façonnée par la composante génétique (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016).

2.1.2. Rôle de la hauteur dans l'adaptation à l'aridité et la disponibilité en eau

La hauteur maximale de la plante est généralement liée à la capacité compétitive des espèces. De plus, elle influence l'exposition de la plante aux conditions difficiles, comme l'air sec, et permet également d'impacter son succès reproducteur, notamment la dispersion des graines (Berrached et *al.,* 2017). La hauteur joue également un rôle crucial dans la régulation du microclimat autour de la plante. Une canopée plus élevée peut générer de l'ombre, réduisant ainsi l'évaporation et les températures extrêmes, bien que cette configuration expose aussi les feuilles supérieures à un stress hydrique accru dû à un transport de l'eau plus exigeant (Wang et *al.,* 2024).

Dans les environnements secs, les plantes ont tendance à être de plus petite taille, ce qui réduit leur exposition au vent et au rayonnement solaire, limitant ainsi la transpiration et la perte d'eau. Cette caractéristique traduit une stratégie d'adaptation visant à optimiser l'usage des ressources hydriques disponibles (Lozia et *al.,* 2023). Une faible hauteur favorise également un investissement plus important dans le système racinaire, permettant ainsi une meilleure exploration du sol à la recherche d'eau (López-Rodríguez et *al.,* 2020).

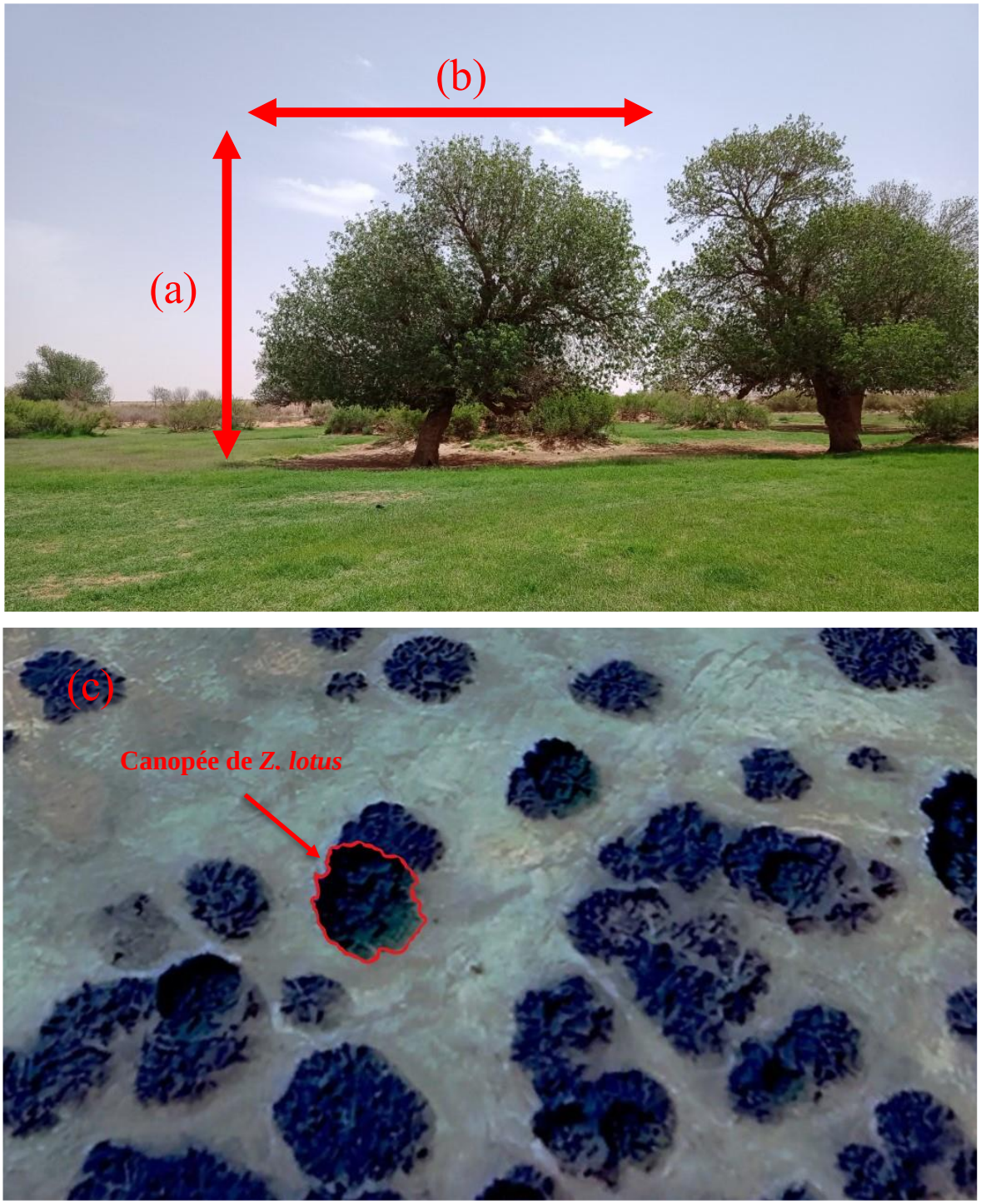

Figure 7: Illustration de la hauteur et de la largeur de la canopée chez deux espèces végétales.

a : Hauteur maximale (H_{max}) d'un arbre de *Pistacia atlantica* dans une Daya ; **b** : Largeur de la canopée de la même espèce ; **c** : Vue satellite de la canopée de *Z. lotus* (Original, 2024).

Cependant, cette tendance à la faible hauteur des plantes dans les régions arides peut connaître des exceptions. En effet, Cheng et *al.* (2023) ont mis en évidence la prédominance de grands arbustes tels que *Ammopiptanthus mongolicus* et *Caragana korshinskii* à la lisière du désert de Tengger, qui borde la partie sud-est du plateau d'Alxa en Chine, une zone marquée par une aridité et une teneur élevée en sable. À l'inverse, des petits arbustes comme *Reaumuria*

soongorica et *Salix passerina* étaient plus fréquents dans le cône de déjection des monts Helan, massif montagneux en Chine, un environnement relativement moins rude. Cette variation de taille peut influencer la structure des communautés végétales et moduler la répartition de la lumière sous la canopée, créant ainsi des conditions favorables à certaines espèces. Par ailleurs, la hauteur des plantes dans ces milieux semble davantage refléter la disponibilité en ressources abiotiques que la compétition pour la lumière (Krintza et *al.,* 2024).

Il a été démontré également que la relation entre la hauteur et l'aridité dépend fortement des stratégies adoptées par les espèces. Une corrélation a été observée entre la hauteur maximale des plantes et l'indice d'aridité, indiquant que les espèces plus hautes sont souvent présentes dans des zones bénéficiant d'un accès relativement plus important à l'eau, grâce à des adaptations anatomiques facilitant le transport hydrique du xylème (Liu et *al.,* 2019).

L'interprétation de la hauteur des espèces comme un indicateur d'adaptation à l'aridité reste cependant complexe. Ce trait est souvent associé à d'autres paramètres fonctionnels tels que la surface foliaire spécifique (SLA), la masse des graines ou la densité du bois, qui influencent la tolérance à la sécheresse et la stratégie de survie des plantes (Bär Lamas et *al.*, 2016). De plus, des variations intra-spécifiques peuvent être observées selon les conditions environnementales et le stade de développement des plantes, ce qui implique que l'adaptation à l'aridité ne peut être analysée uniquement à travers ce facteur (Wang et *al.,* 2024).

2.2. Largeur de la canopée

2.2.1. Définition

La largeur de la canopée est définie comme la distance horizontale maximale entre les extrémités de la couronne d'un arbre, c'est-à-dire son envergure maximale. Conceptuellement, elle correspond au côté le plus étendu de la couronne, identifié en observant l'arbre sous différents angles (Figure 7a).

2.2.2. Influence de la largeur de la canopée sur l'adaptation à l'aridité

La taille et la forme de la canopée peuvent influencer la redistribution des ressources. Dans les zones arides, les communautés végétales forment des mosaïques composées d'espaces de sol nu et de zones de végétation. Lors des épisodes pluvieux, les parcelles de sol nu agissent comme des zones de collecte où l'eau ruisselle, tandis que les parcelles végétalisées reçoivent ce ruissellement et accumulent ainsi l'eau et les nutriments. La structure de la canopée joue un rôle clé dans cette dynamique en modulant la répartition spatiale de ces ressources (Cheng et *al.,* 2023).

La taille de la canopée peut également être un facteur clé dans la compétition pour les ressources. L'extension verticale et horizontale des plantes définit leur capacité à accéder à la lumière et à l'eau. Dans les milieux arides, caractérisés par un fort rayonnement solaire, une large canopée permet de limiter l'évaporation de l'eau du sol en créant un ombrage au sol environnant, reduisant ainsi l'évaporation en créant ainsi un microclimat plus frais et humide pour les racines ainsi que pour les plantules voisines (Cheng et *al.,* 2023 ; Wang et *al.,* 2024). Ce phénomène, qualifié « d'îles de fertilité », est particulièrement marqué chez les arbustes

(López-Rodríguez et *al.,* 2020 ; Yang et *al.,* 2024). De plus, une canopée plus large peut potentiellement intercepter davantage de lumière, ce qui est crucial pour la photosynthèse.

L'architecture de la canopée influence aussi la transpiration et la perte d'eau (Figure 7c). Une canopée plus étendue, surtout si elle est dense, entraîne une surface foliaire plus importante, augmentant ainsi les pertes en eau par transpiration. En outre, la disposition des feuilles et des branches joue un rôle dans l'exposition au vent et au soleil, ce qui impacte directement les taux de transpiration (Wang et *al.,* 2024).

Enfin, la relation entre la hauteur et la largeur de la canopée varie selon les conditions environnementales. Dans les milieux arides, cette relation est souvent allométrique plutôt qu'isométrique, ce qui suggère que, sous stress hydrique, la croissance est répartie différemment entre la hauteur et l'étendue de la canopée pour optimiser l'acquisition des ressources (Dai et *al.,* 2009).

2.3. Les traits foliaires

Dans les écosystèmes arides et semi-arides, les traits foliaires jouent un rôle déterminant dans la survie et le développement des plantes. Ils conditionnent les échanges gazeux, la transpiration, la photosynthèse et la gestion des ressources. Ce qui influence l''acquisition et l'utilisation de l'eau, la régulation de la température foliaire, l'efficacité de la photosynthèse et la résistance aux stress abiotiques (Arndt, 2001). Comprendre ces adaptations au niveau foliaire est crucial pour appréhender l'adaptation des espèces vivant dans ces écosystèmes (Torres-García et *al.,* 2021).

Plusieurs traits foliaires peuvent être utilisés dans les études de l'adaptation des espèces végétales à l'aridité. Parmi ces traits, nous avons la surface foliaire, un facteur clé pour l'interception de la lumière et les échanges gazeux (Cornelissen et *al.,* 2003) et les échanges hydriques (Maraghni, 2013), ainsi que la longueur et la largeur des feuilles, des dimensions fondamentales qui influencent leur forme et leur surface (Wang et *al.,* 2017). L'épaisseur des feuilles est souvent liée à la conservation de l'eau et à la résistance au stress (Cornelissen et *al.,* 2003 ; Maraghni, 2013). Les indices SLA (Specific Leaf Area) et LDMC (Leaf Dry Matter Content), en tant qu'indicateurs physiologiques, sont souvent étudiés pour mieux cerner la réponse des espèces végétales à l'aridité du milieu. Ils traduisent des compromis entre la capture de lumière et l'utilisation des ressources et s'ajustent essentiellement aux contraintes hydriques (Maraghni, 2013).

2.3.1. Surface foliaire

2.3.1.1. Définition

La surface foliaire est un trait morphologique fondamental qui influence directement l'interaction de la plante avec son environnement, notamment en ce qui concerne les échanges hydriques et thermiques (Torres-García et *al.,* 2021).

La surface foliaire est ponctuée de stomates, dont les cellules de garde sont les seules cellules épidermiques à contenir des chloroplastes, les organites responsables de la conversion de

l'énergie lumineuse en énergie chimique sous forme de sucres (Poorter et *al.,* 2009 ; Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013). De plus, cette surface est parsemée de stomates, des pores permettant les échanges gazeux avec l'atmosphère. Ces structures facilitent l'absorption du dioxyde de carbone (CO_2), un élément clé de la photosynthèse, et la libération de l'oxygène (O_2), sous-produit du processus. La densité stomatique (nombre de stomates par unité de surface foliaire) peut également influencer l'efficacité de ces échanges (Torres-García et *al.,* 2021).

2.3.1.2. Rôle de la surface foliaire dans la régulation des échanges hydriques (transpiration)

La surface foliaire est la principale interface pour la transpiration, le processus par lequel la plante libère de la vapeur d'eau dans l'atmosphère via les stomates et à travers les parois cellulaires. Une surface foliaire plus importante peut potentiellement entraîner une perte d'eau plus élevée. Ce phénomène est d'autant plus critique au niveau des environnements arides, dans lesquels l'eau est une ressource limitée et où une perte excessive par transpiration peut constituer un désavantage pour la plante. Cependant, la régulation stomatique et d'autres adaptations morphologiques, telle que la réduction de la surface foliaire, peuvent moduler cette perte (Torres-García et *al.,* 2021).

2.3.1.3. Rôle de la surface foliaire dans la régulation des échanges thermiques (température foliaire)

La surface foliaire influence également la manière dont la plante intercepte le rayonnement solaire et dissipe la chaleur. Une surface foliaire plus petite peut réduire le gain de chaleur en diminuant l'interception du rayonnement solaire direct, ce qui est un avantage dans les environnements chauds et arides. De plus, la transpiration contribue au refroidissement de la feuille par évaporation. Des feuilles plus petites ont une plus grande capacité à maintenir leur température proche des niveaux ambiants, ce qui réduit la quantité d'eau perdue par transpiration (Torres-García et *al.,* 2021).

2.3.1.4. Rôle de la surface foliaire dans la photosynthèse

La surface foliaire est l'organe principal de la plante dédié à l'interception de la lumière, source essentielle d'énergie pour la photosynthèse (Poorter et *al.,* 2009 ; Zheng et *al.,* 2023). Une plus grande surface foliaire permet à la plante de capturer davantage de lumière solaire, augmentant ainsi son potentiel photosynthétique (Torres-García et *al.,* 2021 ; Towers et *al.,* 2024). En particulier, la surface foliaire bien exposée est directement liée à la quantité de lumière que la plante peut intercepter, ce qui influence son efficacité photosynthétique (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013). Toutefois, la forme des feuilles joue un rôle important. Lorsqu'elles ne sont pas plates, la mesure de la surface foliaire totale (unilatérale) permet de mieux estimer la quantité réelle de tissu actif dans la photosynthèse (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013). L'orientation des feuilles peut également influencer la quantité d'énergie solaire absorbée (Torres-García et *al.,* 2021).

La taille et la structure des feuilles varient en fonction des conditions environnementales. Dans les environnements arides, certaines plantes réduisent leur surface foliaire pour minimiser la

perte d'eau par transpiration. Cependant, cette adaptation limite également la surface disponible pour la photosynthèse, illustrant un compromis entre la conservation de l'eau et l'efficacité photosynthétique (Torres-García et *al.*, 2021).

2.3.2 Longueur et largeur des feuilles

2.3.2.1. Définition

La longueur et la largeur des feuilles sont des paramètres morphologiques clés qui permettent d'analyser l'adaptation des plantes aux conditions environnementales (Wang et *al.*, 2023-2024) (Figure 8).

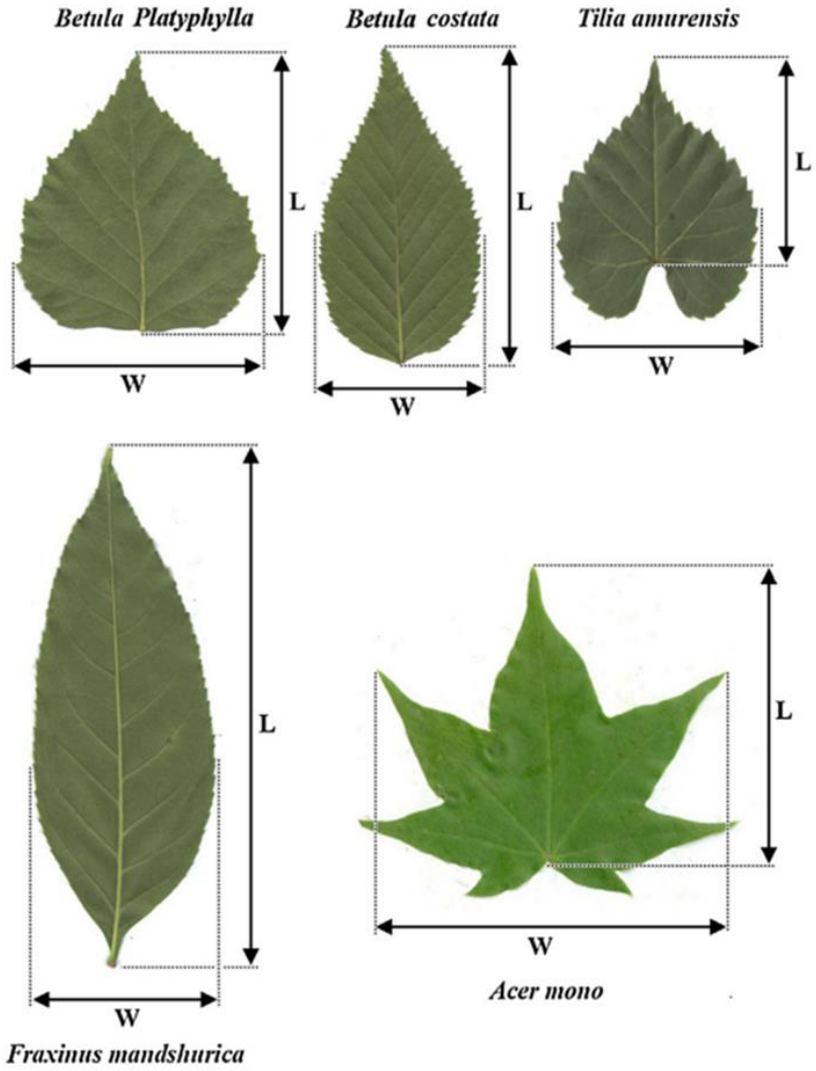

Figure 8 : Illustration des traits foliaires : longueur (L) et largeur (W) chez différentes morphologies foliaires (Liu et *al.*, 2017).

2.3.2.2. Influence de la longueur et de la largeur foliaires sur la capture de lumière et la transpiration

La taille de la feuille, déterminée par sa longueur et sa largeur, est un trait fonctionnel essentiel influençant l'équilibre énergétique et hydrique des plantes (Cornelissen et *al.*, 2003 ; Yang et

al., 2023). Elle joue un rôle clé dans la photosynthèse et la transpiration des feuilles (Yang et *al.*, 2023).

Dans des environnements soumis à des stress intenses, tels que le stress thermique, hydrique, au froid ou dû à un fort rayonnement, les plantes tendent à développer des feuilles plus petites pour limiter ces contraintes. Par exemple, différentes populations du pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus*) ont montré une hétérogénéité dans la taille des feuilles, suggérant une adaptation à l'aridité par la réduction des dimensions de la feuille, une des caractéristiques xéromorphes observées chez cette espèce (Doghbage et *al.*, 2023) De même, l'armoise blanche (*Artemisia herba-alba*) présente un dimorphisme saisonnier des feuilles, développant des feuilles plus petites et moins découpées à l'approche de la saison sèche. Cette variation morphologique permet de réduire la surface transpirante et de limiter les pertes d'eau, illustrant une autre stratégie d'adaptation au stress hydrique (Berrached, 2017).

À l'inverse, une dimension foliaire plus grande favorise la capture de lumière et améliore la photosynthèse lorsque l'eau est disponible et que les conditions sont favorables (Poorter et *al.*, 2009), bien qu'elle puisse également entraîner une perte d'eau accumulée par transpiration (Yang et *al.*, 2023).

2.3.3. Épaisseur de la feuille

2.3.3.1. Définition

L'épaisseur de la feuille, en tant que trait fonctionnel foliaire majeur, influence plusieurs processus physiologiques essentiels. Elle joue un rôle clé dans la régulation de l'état hydrique, en reflétant la teneur en eau des tissus et la capacité de la plante à faire face à la déshydratation (Afzal, 2021). L'épaisseur est également impliquée dans l'adaptation à la sécheresse, notamment par l'épaississement de l'épiderme et des tissus palissadiques, comme mentionné chez *Populus euphratica*, permettant une meilleure rétention d'eau en conditions extrêmes (Wang et *al.*, 2024).

2.3.3.2. Rôle dans la limitation des pertes en eau

L'épaisseur des feuilles est étroitement liée à leur teneur en eau, servant ainsi d'indicateur précis et en temps réel de l'état hydrique des plantes (Afzal, 2017 ; Lauriks et *al.*, 2017). L'épaisseur des feuilles joue un rôle essentiel dans l'adaptation des plantes à la sécheresse en influençant la gestion de l'eau, la photosynthèse et la résistance aux conditions de stress. Elle détermine le trajet optique de la lumière à travers la feuille et le nombre de structures anatomiques, comme les parois cellulaires et les chloroplastes, qui modulent la réflexion, l'absorption et la transmission de la lumière, ce qui impacte directement la productivité et la répartition de la biomasse (Pauli et *al.*, 2017) (Figure 9a).

En situation de stress hydrique, certaines plantes adoptent une stratégie d'épaississement foliaire, permettant une meilleure rétention d'eau grâce à des tissus plus développés (Figure 9b), notamment l'épiderme supérieur ainsi que les parenchymes palissadiques et spongieux (Yavas et *al.*, 2024). Cet épaississement contribue également à limiter les pertes hydriques en

augmentant la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, réduisant ainsi la transpiration (Coneva et *al.*, 2017). Inversement, d'autres espèces optent pour une réduction de cette épaisseur afin de faciliter la diffusion du CO_2 et d'optimiser les échanges gazeux, maintenant une activité photosynthétique minimale en période de sécheresse (Yavas et *al.*, 2024).

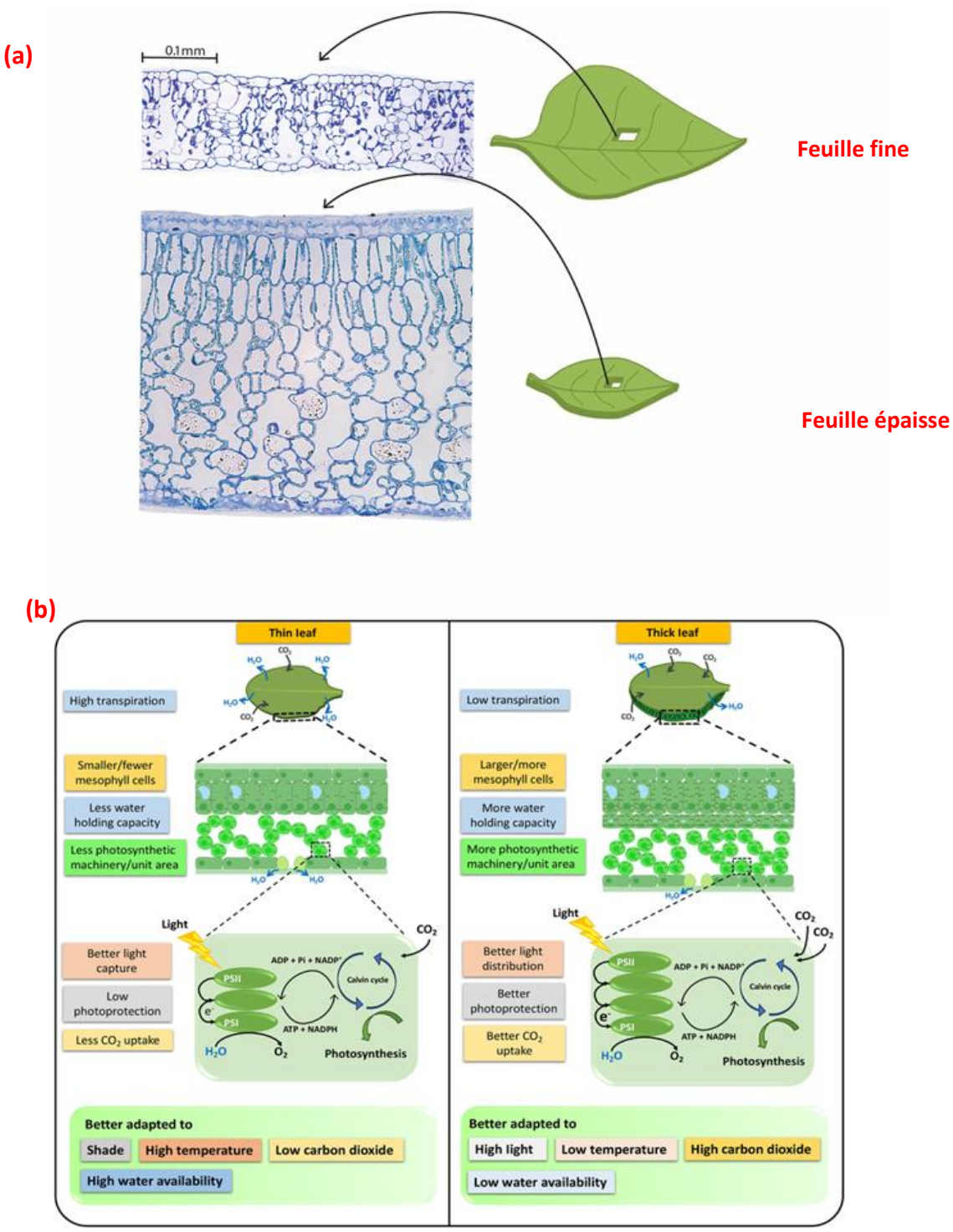

Figure 9 : Illustration du rôle de l'épaisseur foliaire dans l'adaptation à l'aridité.

a : coupe transversale d'une feuille de tournesol (*Helianthus annuus*) très fine à une feuille de thé (*Camellia sasquana*) épaisse (Phys.org, 2013) ; **b** : comparaison des performances physiologiques entre une feuille fine et une feuille épaisse (Aneja et *al.*, 2024).

2.3.4. Indicateurs physiologiques des feuilles

2.3.4.1. Surface foliaire spécifique (Specific Leaf Area, SLA)

2.3.4.1.1. Définition

La SLA est un trait clé qui reflète les stratégies de croissance des plantes et leur capacité à s'adapter aux variations environnementales (Utkin et *al.,* 2022). Elle intègre de multiples fonctions et traduit les stratégies des plantes pour obtenir des ressources (Liu et *al.,* 2022 ; Zhong et *al.,* 2022). La SLA est considérée ainsi comme un indicateur de la stratégie d'utilisation des ressources de la plante. Des valeurs élevées étant souvent associées à une croissance rapide et des valeurs faibles à une longévité foliaire plus importante et potentiellement à une meilleure conservation de l'eau (Cornelissen et *al.,* 2003 ; Torres-García et *al.,* 2021).

2.3.4.1.2. Rôle de l'indice SLA dans l'adaptation à l'aridité

La valeur de la SLA varie en fonction des conditions environnementales telles que la disponibilité en lumière, l'eau, les nutriments du sol, la température et le rayonnement (Liu et *al.,* 2022). Une valeur de SLA plus élevé est fréquemment observé dans des milieux riches en ressources, comme les écosystèmes forestiers, où la végétation du sous-bois présente généralement des feuilles plus fines et moins denses (Liu et *al.,* 2022). En revanche, dans les environnements chauds et secs, où l'intensité lumineuse est élevée, l'indice SLA tend à être plus faible, traduisant une stratégie de conservation des ressources et une meilleure résistance au stress hydrique (Thomas et *al.,* 2022).

D'une manière plus précise, une valeur élevée de l'indice SLA est généralement associé à des feuilles fines et peu denses, avec un investissement réduit en masse sèche par unité de surface foliaire (Thomas et *al.,* 2022). Une SLA élevée permet également d'augmenter la surface foliaire exposée à la lumière, améliorant ainsi l'efficacité du captage lumineux et la capacité photosynthétique des plantes (Zhong et *al.,* 2023). Ceci est ainsi corrélé à un taux photosynthétique par unité de masse plus élevée, une importante concentration en azote foliaire, une faible longévité des feuilles et une réduction de l'investissement en composés secondaires comme les tanins et la lignine (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013-2016). Les valeurs élevées de la SLA sont également associées à une croissance rapide et une forte capacitée d'acquisition des ressources (Berrached et *al.,* 2017).

À l'inverse, une SLA faible correspond à des feuilles épaisses et denses, nécessitant un investissement plus important en masse sèche par unité de surface foliaire (Thomas et *al.,* 2022). Une faible valeur de l'indice SLA est également liée à une sclérophyllie plus marquée (Torres-García et *al.,* 2021), à des taux d'échange gazeux probable plus bas (Torres-García et *al.,* 2021), à une durabilité foliaire (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013-2016), ce qui favorise la résistance de la plante aux contraintes environnementales (Berrached et *al.,* 2017). L'adaptation des plantes aux conditions arides se manifeste donc par une faible SLA, ce qui réduit leur transpiration et améliore leur tolérance au stress hydrique.

2.3.4.2. Teneur en matière sèche des feuilles (Leaf Dry Matter Content, LDMC)

2.3.4.2.1. Définition

La teneur en matière sèche des feuilles (LDMC) représente la proportion de matière sèche dans la feuille fraîche et peut refléter la densité des tissus et la tolérance au stress hydrique (Cornelissen et *al.,* 2003).

2.3.4.2.2. Importance de l'indice LDMC dans l'adaptation à l'aridité

L'indice LDMC est un trait foliaire important qui reflète la densité des tissus foliaires et l'investissement en matière sèche par rapport à la masse fraîche. Il est souvent utilisé pour évaluer les stratégies d'allocation des ressources des plantes, leur adaptation à l'environnement, le taux de croissance des plantes, ainsi que leur capacité à stocker et assimiler le carbone (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016). Un LDMC faible correspond à des feuilles moins denses et plus fines, favorisant une croissance plus rapide mais avec une longévité plus courte (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016). A l'inverse, un LDMC élevé est généralement associé à des feuilles plus denses et épaisses, contenant davantage de composés structurés et parfois de défense. Ces feuilles présentent une sclérophyllie plus marquée, ce qui les rend plus dures et rigides, et peuvent avoir une durée de vie plus longue (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016). Cette résistance est en partie due à une concentration accrue en composés de la paroi cellulaire, notamment en lignine et en métabolites secondaires riches en carbone, tels que les tanins (Poorter et *al.,* 2009), jouant un rôle dans la défense chimique contre l'herbivorie et la tolérance au stress abiotique, notamment au déficit hydrique (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016). Les feuilles denses peuvent ainsi mieux maintenir leur structure face aux conditions difficiles (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016).

D'un point de vue écologique, les plantes vivantes dans des milieux pauvres en ressources, comme les environnements arides, tendent à avoir un LDMC plus élevé. Cela reflète une stratégie de conservation des ressources et une meilleure résistance au stress (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016).

Chapitre 3 :

Matériels et Méthodes

La présente étude s'inscrit dans le cadre de l'analyse des traits fonctionnels de *Z. lotus*, un arbuste fruitier appartenant à la famille des Rhamnaceae (Rabie et *al.,* 2019), reconnu pour sa capacité à survivre dans des conditions environnementales extrêmes (Constantinou et *al.,* 2021). Son choix repose sur sa large distribution dans les différents étages bioclimatiques de l'Algérie, notamment au niveau des milieux arides, ainsi que sur son rôle écologique important dans la protection des sols et la lutte contre la désertification (Constantinou et *al.,* 2021).

Tout au long de ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques de la zone d'étude, les conditions de prélèvement. Ensuite, nous détaillerons les paramètres mesurés, les méthodes utilisées pour leur mesure, et les outils mobilisés à cet effet.

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Présentation de région de Djelfa

Le chef-lieu de la Wilaya de Djelfa est situé à 300 km au sud de la capitale Alger. Il se trouve dans la zone de transition de deux grandes structures : les hauts plateaux et l'atlas saharien. Il est situé dans une position centrale par apport à l'ensemble de la Wilaya et du pays (Guendouz, 2018).

1.1.1. Situation administrative

La wilaya de Djelfa est située dans la partie centrale de l'Algérie du Nord, au de-là des piémonts Sud de l'Atlas Tellien. Elle est comprise entre 2° et 5° de longitude Est et entre 33° et 35° de latitude Nord. Elle couvre une superficie de 66 415 km² représentant 1.36% de la superficie totale du pays. La wilaya de Djelfa est limitée :

- au Nord par les wilayas de Médéa et de Tissemsilt ;
- à l'Est par les wilayas de M'sila et de Biskra ;
- à l'Ouest par les wilayas de Laghouat et Tiaret ;
- au Sud par les wilayas de Ouargla et de Ghardaïa.

1.1.2. Géologie

La géologie est une science qui consiste à étudier les parties de la Terre accessibles à l'observation et à élaborer des hypothèses qui permettent de reconstituer leur histoire et expliquer leur agencement. Elle n'a aucune influence directe sur la végétation, mais elle est à l'origine de la nature lithologique et des formes géomorphologiques (Pouget, 1980).

La région de Djelfa, dans l'Atlas saharien central contient des lithologies méso-cénozoïques, à l'exception de celle de la période jurassique que l'on peut trouver, et rarement, dans les régions de Bou Saada et de Laghouat à l'est et à l'ouest, respectivement. Les formations mésozoïques débutent au Trias sous forme de diapirs contenant des évaporites et des argiles. La majeure partie de la série s'étend du Néocomien au Sénonien, essentiellement constituée de dépôts fluviaux et de plateformes, tandis que les formations tertiaires représentent un environnement continental (Amri et *al.,* 2017).

1.1.3. Pédologie

La pédologie dans la région de Djelfa est marquée par des défis environnementaux significatifs, notamment la désertification et l'érosion. Les sols de cette région, caractérisés par une forte teneur en sable et en calcaire, présentent une faible matière organique, ce qui complique leur fertilité et leur capacité à soutenir l'agriculture et l'élevage (Ghafoul et *al.*, 2019). De plus, les pratiques agropastorales, bien que traditionnelles et adaptées, sont menacées par la dégradation des parcours steppiques due à des facteurs anthropiques et naturels (Roose et *al.*, 2001 ; Khader et *al.*, 2014).

1.1.4. Hydrologie

L'hydrologie est la science qui étudie les précipitations, le ruissellement et les inondations résultant du cycle hydrologique. Il examine les processus d'évaporation des plans d'eau, de formation des nuages et de précipitations, qui sont des éléments essentiels de la distribution de l'eau sur Terre (Shaw, 1983).

L'hydrologie de Djelfa se caractérise par des défis importants en raison de son climat majoritairement aride, qui influence fortement les ressources en eaux souterraines. Les eaux souterraines, estimaient entre 0,71 et 14 mm/an (Ali Rahmani et *al.*, 2017 ; Ali Rahmani et Chibane, 2018), constituent la principale source d'eau dans cette région, ce qui nécessite des stratégies de gestion efficaces pour répondre à la demande croissante et aux facteurs de stress environnementaux.

1.1.5. Végétation

La végétation joue un rôle antiérosif très important et favorise d'une part l'infiltration de l'eau dans le sol et d'autre part, la fixation du sable qui permet un bon développement du couvert végétal (Tarhouni et *al.*, 2007).

La végétation à Djelfa a été historiquement dominée par des forêts, mais la désertification a entraîné un remplacement par une végétation arbustive (Liiv et *al.*, 2025). Cette végétation a diminué de 83 % entre 1971 et 2018, principalement en raison des variations climatiques et du surpâturage, entraînant une dégradation alarmante du couvert végétal et une augmentation de l'érosion hydrique (Belaid et *al.*, 2023). La végétation de Djelfa est constituée, majoritairement, par :

- **les forêts** : occupent les chaînes de montagnes du Senalba, du Djebel Zerga et du Djebel Boukahil. Les principales essences forestières sont le Pin d'Alep, le Chêne vert et le Genévrier de Phénicie ;
- **les reboisements** : les espèces utilisées sont : *Tamarix*, *Retama retam*, *Atriplex canescens*, l'Oliver de bohême, *Medicago arborea*, Pin d'Alep et quelques espèces de graminées ;
- **les formations steppiques** : ce sont des formations à base de graminées vivaces (Alfa, Sparte, Drinn) et à base de chaméphytes vivaces (Armoise blanche, Armoise champêtre, etc.). Globalement, les surfaces utilisées comme parcours représentent 82% de la superficie totale de la wilaya ;

- **les cultures et les jachères** : les superficies utilisées pour la céréaliculture et autres comportent 1.6% de la superficie totale. Cette dernière varie selon l'année en fonction de la pluviosité (DPAT, 2006).

1.1.6. Climat

Le climat désigne l'ensemble des éléments météorologiques qui caractérisent les conditions moyennes et extrêmes de l'atmosphère sur une région donnée de la surface du globe et pendant une longue période de temps. Il joue un rôle déterminant dans la répartition des formations végétales. En effet, la variation des paramètres climatiques détermine les variations de la phytomasse, la production primaire, la richesse floristique, la phénologie des espèces, l'occupation du sol (Aïdoud, 1983 ; Le Houérou, 2005 ; Aïdoud et *al.*, 2006 ; Hirche et *al.*, 2011 ; Nedjraoui et *al.*, 2016).

Le climat de la wilaya de Djelfa est semi-aride à aride, avec d'importantes variations de température et de précipitations. Cette région connaît un climat continental, ce qui entraîne des changements saisonniers distincts et des défis liés à la sécheresse et à la chaleur urbaine. Les conditions climatiques de Djelfa sont résumées comme suit (Guesmi et *al.*, 2017) :

- Djelfa a enregistré une tendance au réchauffement climatique d'environ 1 °C au cours des 40 dernières années, les augmentations les plus importantes ayant été observées en été et en automne ;
- la température minimale moyenne a augmenté de 1,4 °C, tandis que la température maximale a augmenté de 0,92 °C, ce qui indique un changement dans la dynamique des températures saisonnières ;
- les données pluviométriques de 1975 à 2016 ont montré une variabilité drastique, avec une diminution notable des précipitations annuelles, en particulier en hiver et au printemps ;
- la région est confrontée à un stress hydrique, menace la végétation et contribue à la désertification, avec des inondations estivales occasionnelles dues à des pluies intenses.

1.2. Présentation de la wilaya de Boumerdès

La Wilaya de Boumerdes est une wilaya côtière du centre du pays avec 100 Km de profil littoral. Elle se situe dans la région Nord Centre, partie intégrante de l'Est de l'aire métropolitaine d'Alger. La superficie globale de la wilaya de Boumerdès est de 1 456,16 Km.

1.2.1. Situation administrative

La Wilaya de Boumerdes est créée suite à la promulgation de la loi n°84-09 du 04 Février 1984 relative au découpage territorial administratif. Elle compte actuellement 32 Communes regroupées autour de 09 Dairas : Boumerdes, Boudouaou, Bordj-Ménaiel, Baghlia, Dellys, Isser, Khemis El Khechna, Naciria et Thénia.

La wilaya de Boumerdès est délimitée :

- au Nord par la mer Méditerranée entre Boudouaou El Bahri et Afir ;

- à l'Ouest par la wilaya d'Alger ;
- à l'Est par la wilaya de Tizi Ouzou (massif de la haute Kabylie) ;
- au Sud-Ouest par la wilaya de Blida (plaine de la Mitidja) ;
- au Sud par la wilaya de Bouira (plateau de Bouira).

1.2.2. La géologie

La wilaya de Boumerdès appartient à l'Atlas tellien, plus précisément à la chaîne tellienne, et présente une géologie complexe dominée par une tectonique de nappes d'âge tertiaire affectant des terrains mésozoïques et cénozoïques. La région de Thénia, située à une cinquantaine de kilomètres à l'est d'Alger, illustre bien cette complexité avec ses formations sédimentaires très épaisses, principalement carbonatées (calcaires, dolomies) et marneuses. Elle est traversée par un grand accident tectonique, la faille de Thénia, orientée nord-est/sud-ouest, responsable d'un important rejet vertical et de chevauchements. La carte géologique au 1/50 000 révèle une structure riche en plis, failles et chevauchements, avec plusieurs unités lithostratigraphiques allant du Jurassique au Miocène, souvent répétées par l'activité tectonique. Cette dynamique géologique confère à la région un intérêt particulier pour l'étude de la sismicité active.

1.2.3. La pédologie

Compte tenu de la diversité des caractéristiques morphologiques, lithologiques et climatiques de la wilaya, un large éventail de formation en sols conditionne la couverture végétale. Trois catégories principales de sols caractérisent la structure agro-pédologique du territoire de la wilaya (DPSB, 2012) :

- les sols fertiles, à haut rendement agricole formant les plaines du littoral dont une partie est souvent marécageuse, situés en bordure des oueds ;
- les sols cultivables, mais parfois accidentés et exposés à l'érosion, favorables à la pratique de la céréaliculture et de l'arboriculture rustique au niveau des piémonts ;
- les sols pratiquement incultes formant les massifs montagneux rocailleux, accidentés et recouverts de végétation forestière.

1.2.4. L'hydrologie

L'hydrologie de la région de Boumerdès est caractérisée par des interactions complexes entre le transport des sédiments, l'évolution morphologique et la dynamique des eaux souterraines. L'hydrodynamique côtière de la région est influencé par les conditions énergétiques des vagues, ce qui entraîne un transport de sédiments important et des modifications du littoral. En effet, la côte de Boumerdès connaît des taux de transport de sédiments élevés en raison des ondes énergétiques, avec des taux annuels de transport de sédiments côtiers estimés entre 3.5 et 22.02 × 10^5 m³/an (Salem Cherif et *al.,* 2019). Par ailleurs, la dynamique des eaux souterraines est également affectée par des facteurs géologiques et hydrogéologiques, qui peuvent influencer la sensibilité de la zone à la liquéfaction, en particulier à la suite d'événements sismiques (Bourenane et *al.,* 2018).

Le réseau hydraulique reste très dense avec des débits importants en période tempérée représenté par plusieurs oueds qui prennent naissance dans l'Atlas Tellien pour se diriger vers la mer (Oued Isser, Oued Sebaou, Oued Corso, etc.).

1.2.5. La végétation

La végétation de Boumerdès est caractérisée par diverses communautés végétales influencées par des facteurs climatiques et anthropiques. Les recherches indiquent que les dunes côtières de Boumerdès abritent un nombre limité d'espèces, avec une richesse floristique variant de 9 espèces sur les dunes embryonnaires à 28 sur les dunes grises stabilisées, ce qui nécessite des efforts de conservation (Hanifi et *al.,* 2007). En outre, l'espace forestier de la wilaya s'étale sur 22 951 ha, couvrant 16 % du territoire de la wilaya, le reste étant constitué de maquis et de broussailles. Il abrite d'importantes espèces médicinales, telles que l'*Origanum vulgare*, qui présente de fortes propriétés antimicrobiennes, soulignant l'importance écologique et économique de la flore local (Bendifallah et *al.,* 2015). Néanmoins, la majeure partie des formations forestières se trouvent au niveau des versants jouant ainsi un rôle important dans la protection des sols contre l'érosion. Mais elles se trouvent dans un état préoccupant protégeant mal le sol et restent pauvres du point de vue diversité faunistique et floristique.

1.2.6. Le climat

La wilaya de Boumerdès est située dans la zone climatique méditerranéenne, caractérisée par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Selon la Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires (2012), le climat de la région de Boumerdès est caractérisé par :

- une pluviométrie irrégulière qui varie entre 600 et 1000 mm par an, du mois d'octobre jusqu'au mois de mars, néanmoins les régions de Nord-Est de la wilaya de Boumerdès sont plus arrosées que le reste de la wilaya avec une pluviométrie moyenne supérieur à 900 mm/an ;
- une température moyenne annuelle de 17,6°C, tandis que la température moyenne annuelle des mois les plus chauds est de 22,66 °C (novembre à avril) et la température moyenne annuelle des mois les plus froids est de 12,65 °C (Mars à Octobre) ;
- un écart entre la température mensuelle des minima et la température mensuelle des maxima varie entre 7,6 °C en décembre et 33,8°C en août.

2. Méthodologie

2.1. Choix des stations

L'échantillonnage de *Z. lotus* a été réalisé au niveau de huit stations réparties entre deux régions contrastées : Djelfa et Boumerdès. Ce choix vise à comparer les réponses adaptatives de *Z. lotus* face à des conditions écologiques différentes. Cinq stations sont situées dans la région de Djelfa, caractérisée par un climat aride typique des hautes plaines steppiques (Figure 10). Deux d'entre elles - El Argoub Lahmar et Bahrara - ont été échantillonnées par notre groupe au cours d'une sortie pédagogique le 21 Mai 2024, tandis que les trois autres ont été échantillonnées, en avril 2024, par les étudiantes Kabyl Lydia et Titouche Cherifa, dont les données ont été mises à notre

disposition. Les trois stations restantes sont situées au niveau de la région de Boumerdès, zone à climat subhumide. Ces dernières ont été échantillonnées par notre promotrice Berrached Rachda (Figure 11).

2.2. Caractérisation bioclimatique des stations étudiées

Afin de caractériser le climat des stations échantillonnées, nous avons déterminé les étages bioclimatiques correspondant à chaque station à partir des travaux antérieurs. Pour les stations de Djelfa, la détermination des étages bioclimatiques s'est appuyée sur la carte bioclimatique de la steppe algérienne proposée par Le Houérou et *al.*, (1977). En ce qui concerne les stations de Boumerdès, l'étage bioclimatique a été déduit à partir de l'étude Plan d'Aménagement du Territoire de la Wilaya de Boumerdès (DPSB, 2012) (Tableau 4).

Tableau 4 : Coordonnées géographiques, altitudes et étage bioclimatique des huit stations.

Wilaya	Daïra	Commune	Nom de la station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Etage bioclimatique	Variante thermique a hiver
Djelfa	Messaad	Deldoul	El Koum	34°05'45.629"N	3°29'12.35"E	777	Aride inférieur	Frais
	Birine	Benhar	Benhar	35°30'24.574"N	3°4'31.141"E	667	Aride moyen	Frais
	Hassi Bahbah	Ain Maabad	El Sedara	34°53'32.917"N	3°9'40.692"E	959	Aride moyen	Frais
			El Argoub Lahmar	34°42'54.446"N	3°11'46.352"E	1130	Aride supérieur	Froid
			Bahrara	34°48'40.982"N	3°10'6.232"E	1188	Aride supérieur	Froid
Boumerdès	Bordj-Menaïel	Cap Djinet	Ouled Bounoua	36°53'10.47"N	3°45'23.58"E	118	Subhumide	/
			Khoudiat El Leban	36°49'59.08"N	3°45'49.23"E	369	Subhumide	/
		Leghata	Leghata	36°44'33.64"N	3°39'40.42"E	85	Subhumide	/

2.3. Echantillonnage de *Z. lotus*

Selon Gounot (1969), l'échantillonnage *« consiste en général à choisir dans un ensemble, un nombre limité d'éléments de façon à obtenir des informations objectives et d'une précision mesurable sur l'ensemble »*. L'échantillonnage est ainsi, la première phase de tout travail écologique qui permet de choisir les relevés ou encore les échantillons les plus représentatifs et les plus exhaustifs possibles.

L'échantillonnage retenu pour notre mémoire est l'échantillonnage subjectif. Le choix de ce type d'échantillonnage est justifié par la simplicité de sa mise en œuvre. Également, cet échantillonnage nous permet de choisir les populations les plus représentatives et les plus homogènes pour y mesurer les traits fonctionnels (Gounot, 1969). Au niveau de chaque station, dix individus de *Z. lotus* ont été sélectionnés, en tenant compte de critères de sélection stricts, à savoir des arbustes matures, en bon état phytosanitaire, non pâturés, non taillés et exposés de manière homogène aux conditions locales.

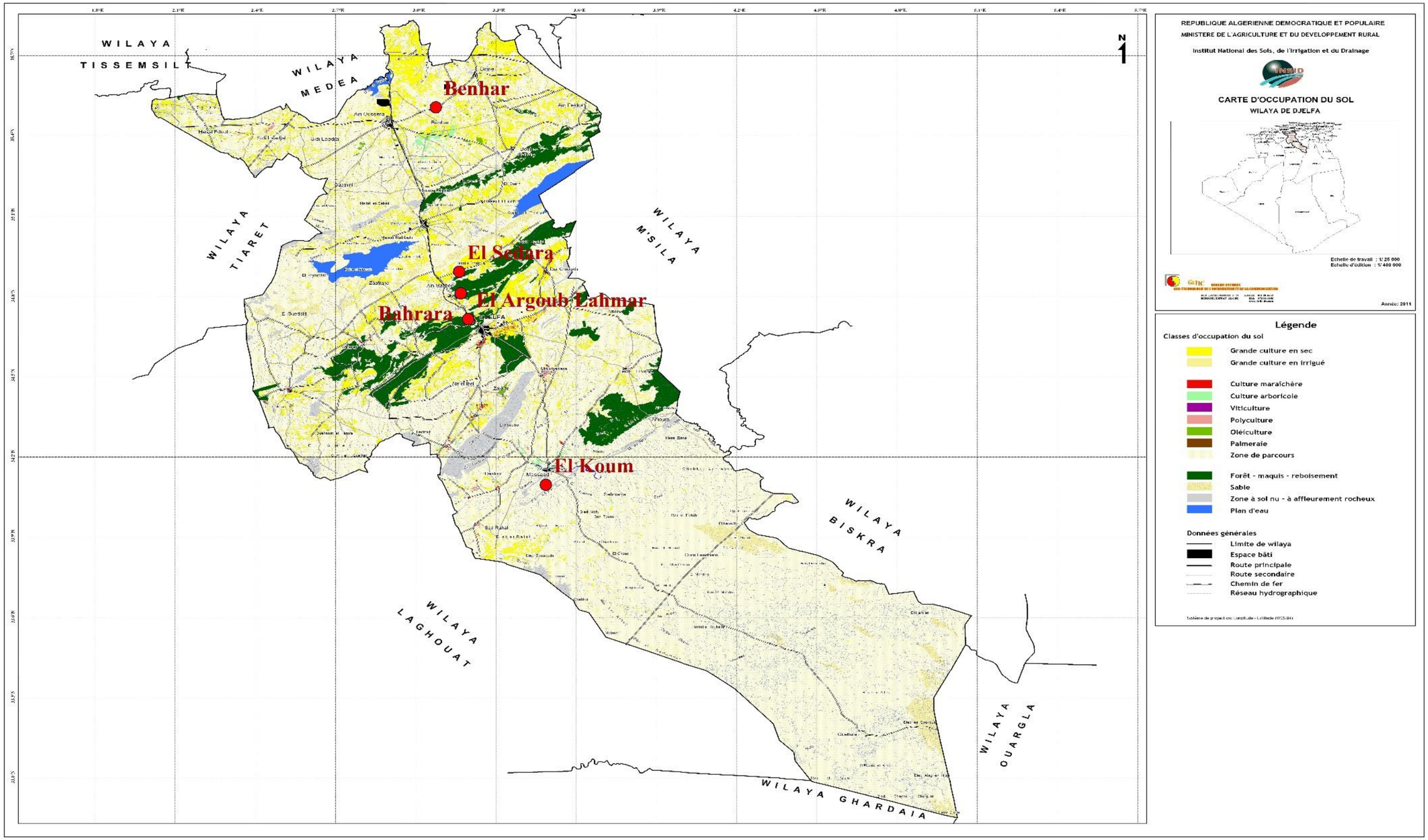

Figure 10 : Localisation des stations d'étude dans la région de Djelfa.

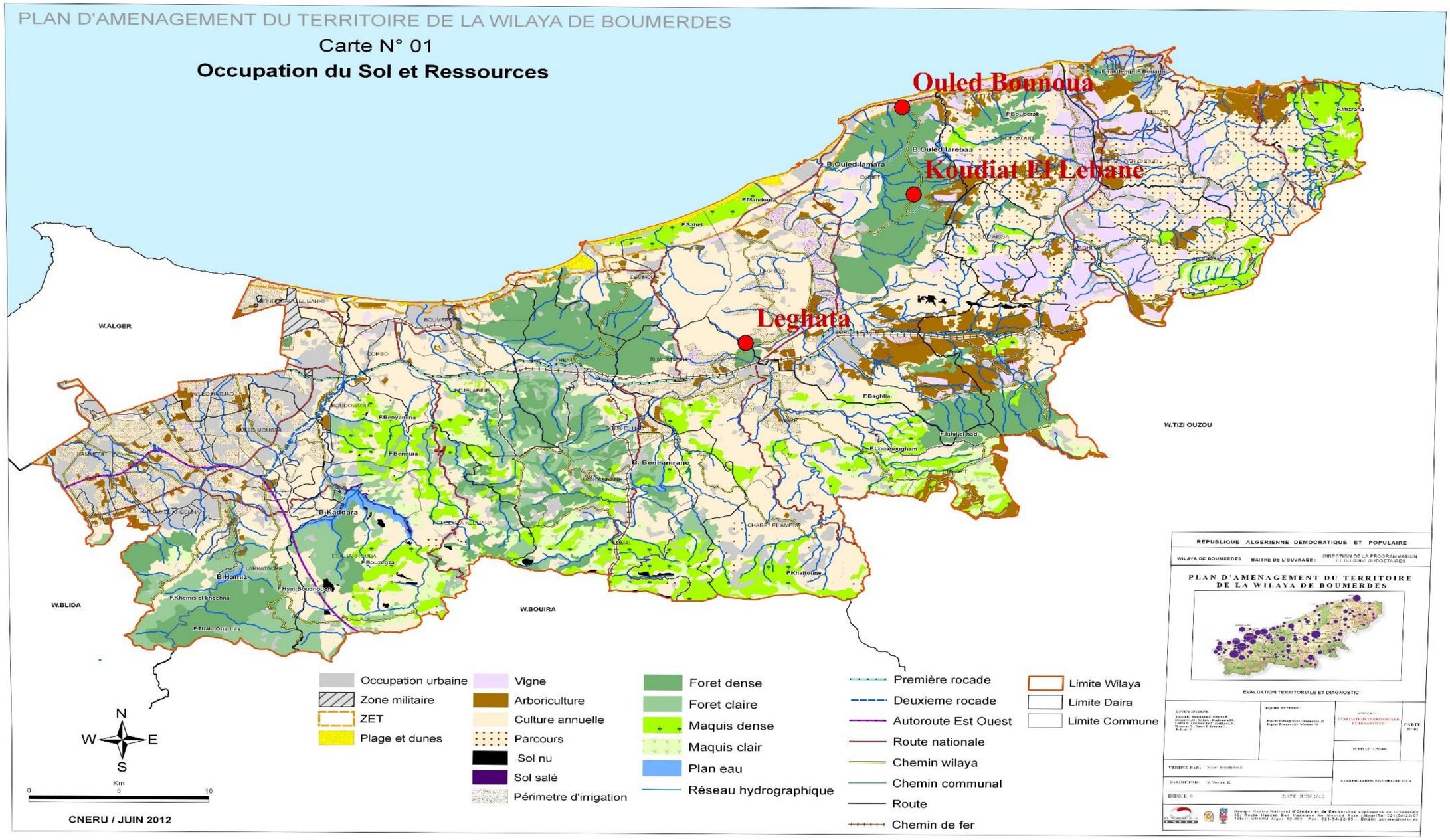

Figure 11 : Carte de localisation des stations d'étude dans la zone de Boumerdès.

2.4. Mesures des traits fonctionnels

L'étude de ces traits permettra de mieux caractériser les stratégies d'adaptation du jujubier sauvage aux conditions arides, en tenant compte de la variabilité potentielle de ces traits au sein des individus et entre les stations étudiées. Cette analyse contribuera à une meilleure compréhension du fonctionnement de cette espèce ingénieure d'écosystème et de sa résilience face aux défis environnementaux, notamment le stress hydrique (Torres-García et *al.,* 2021).

2.4.1. Hauteur de la plante

La hauteur (H_{max}) a été mesurée en m du sol jusqu'à l'extrémité la plus haute de la plante (Figure 12a), à l'aide d'un ruban décamètre.

2.4.2. Largeur de la canopée

La largeur de la canopée correspond à la distance entre les deux extrémités opposées de celle-ci et elle est mesurée à l'aide d'un ruban décamètre. Par la suite, une moyenne est calculée pour estimer la largeur finale de la canopée (Schomaker et *al.,* 2007 ; Wangyal, 2012). Dans le cas de notre travail, pour chaque individu, la largeur de la canopée a été mesurée perpendiculairement à l'aide d'un décamètre et elle est exprimée en m (Figure 12b).

2.4.3. Les traits foliaires

A partir de chaque individu de *Z. lotus*, des feuilles saines ont été échantillonnées pour mesurer les traits fonctionnels. Les feuilles ont été immédiatement placées dans des sacs Zip-Loc remplis d'eau distillée et conservées à basse température et à l'obscurité (dans une glacière) jusqu'à leur traitement au laboratoire. Cela permet de préserver leur fraîcheur et limiter les pertes en eau et les réactions osmotiques (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013). Lors du traitement en laboratoire, le pétiole des feuilles a été soigneusement coupé afin de ne conserver que la partie photosynthétique, conformément aux recommandations méthodologiques.

2.4.3.1. Surface foliaire

La surface foliaire (ou aire foliaire) représente la surface totale d'une feuille, généralement mesurée sur une seule face (Torres-García et *al.,* 2021). Trente feuilles matures ont été prélevées par individu. Ces feuilles fraiches ont été scannées à l'aide d'un scanneur Canon LIDE 110, à haute résolution (Figure 13a-b) afin d'obtenir des images numériques nettes. La surface de chaque feuille a ensuite été mesurée à l'aide du logiciel Mesurim Pro, version 3.4. Avant toute mesure, une calibration a été effectuée à partir d'un papier millimétré placé à côté des feuilles lors du scan (Figure 13c-d). Cela a permis au logiciel de reconnaître les dimensions réelles sur l'image, en convertissant les pixels en centimètres, pour donner des mesures précises. Le logiciel permet ensuite de placer des points le long du contour des feuilles à l'aide de ses outils de dessin intégrés, puis calcule automatiquement la surface en (cm^2) (Figure 14). Cette valeur a été convertie en (mm^2) afin de faciliter le calcul de l'indice SLA (voir plus bas).

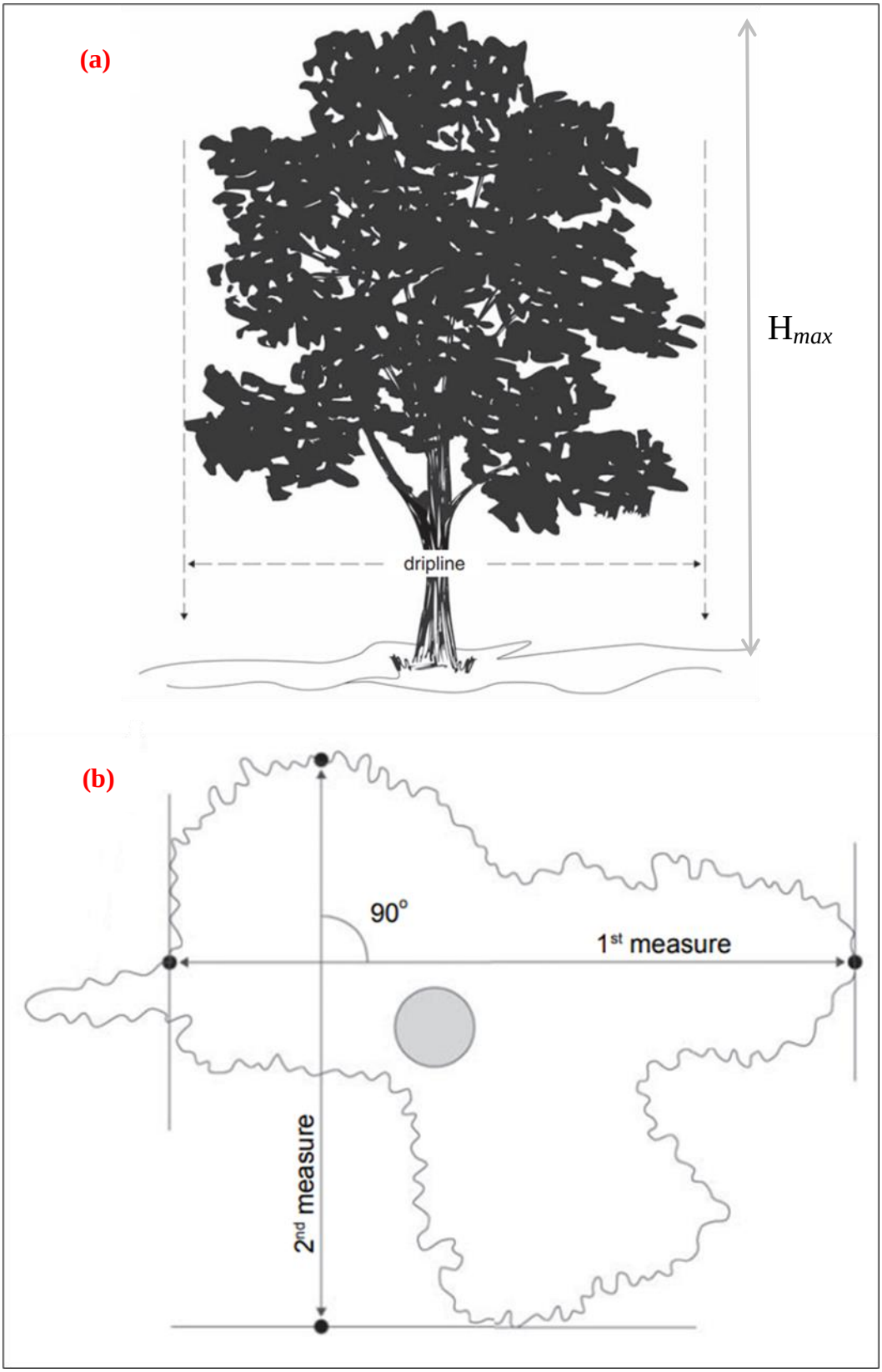

Figure 12 : Détermination de la ligne d'égouttement de la canopée d'un arbre et de la largeur de la canopée (Schomaker et *al.*, 2007).

a : determination de la hauteur ; **b** : mesure perpendiculaire du diamètre de la canopée selon deux direction.

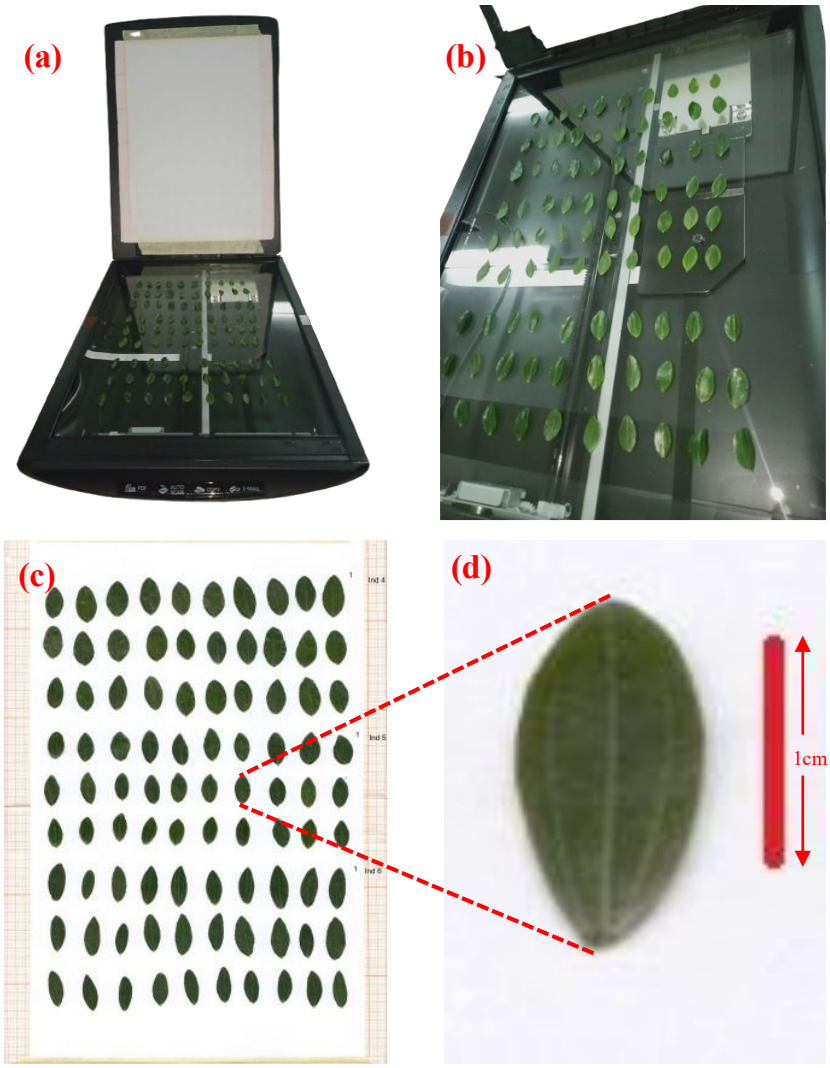

Figure 13 : Procédure de numérisation et de mesure de la surface foliaire des feuilles de *Z. lotus* (Original, 2025).

a : Disposition des feuilles fraîches sur le plateau du scanneur Canon LIDE 110 avant la numérisation ; **b** : Vue rapprochée de la disposition régulière des feuilles matures sur la vitre du scanneur, accompagnées d'un papier millimétré pour la calibration ; **c** : Image obtenue après scan montrant les feuilles sur fond blanc avec papier millimétré ; **d** : Zoom sur une feuille individuelle avec échelle de calibration (1 cm), utilisée pour la mesure de la surface foliaire à l'aide du logiciel Mesurim Pro.

2.4.3.2. Longueur et largeur de la feuille

La longueur foliaire (LL) correspond à la distance maximale entre la base, où il se rattache au pétiole, et l'apex du limbe de la feuille, tandis que la largeur (LW) représente la distance maximale entre les marges latérales du limbe de la feuille, perpendiculairement à la longueur (Houma et *al.*, 2022 ; Wang et *al.*, 2024). Ces deux dimensions sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse et exprimées en mm (Figure 15a-b).

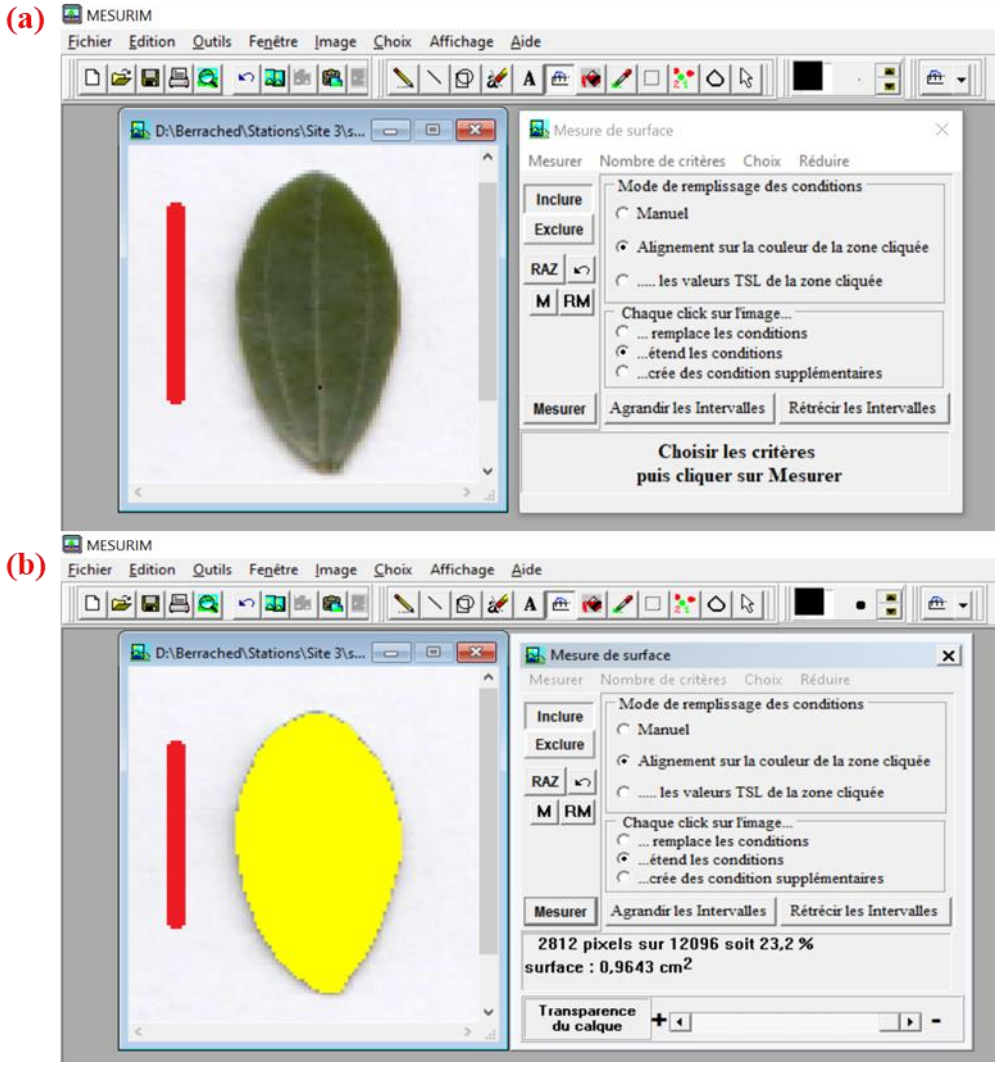

Figure 14 : Détermination de la surface foliaire à l'aide du logiciel Mesurim Pro (Originale 2025).

a : Feuille fraîche scannée affichée dans le logiciel Mesurim Pro, avec une échelle de calibration (barre rouge de 1 cm) ; **b** : Mesure automatique de la surface de la feuille (zone jaune).

2.4.3.3. Epaisseur des feuilles

L'épaisseur des feuilles (LT) est définie comme la distance mesurable entre l'épiderme adaxial (supérieur) et l'épiderme abaxial (inférieur) d'une feuille (Afzal, 2017 ; Coneva et *al.*, 2017). Cette dimension a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse, en (mm), avec trois réplicas à des endroits différents, afin d'en assurer la précision (Figure 15c).

2.4.3.4. L'indice SLA (Specific Leaf Area)

La Surface Foliaire Spécifique (SLA) est définie comme le rapport entre la surface de la feuille fraiche unilatérale et sa masse sèche (Utkin et *al.*, 2022).

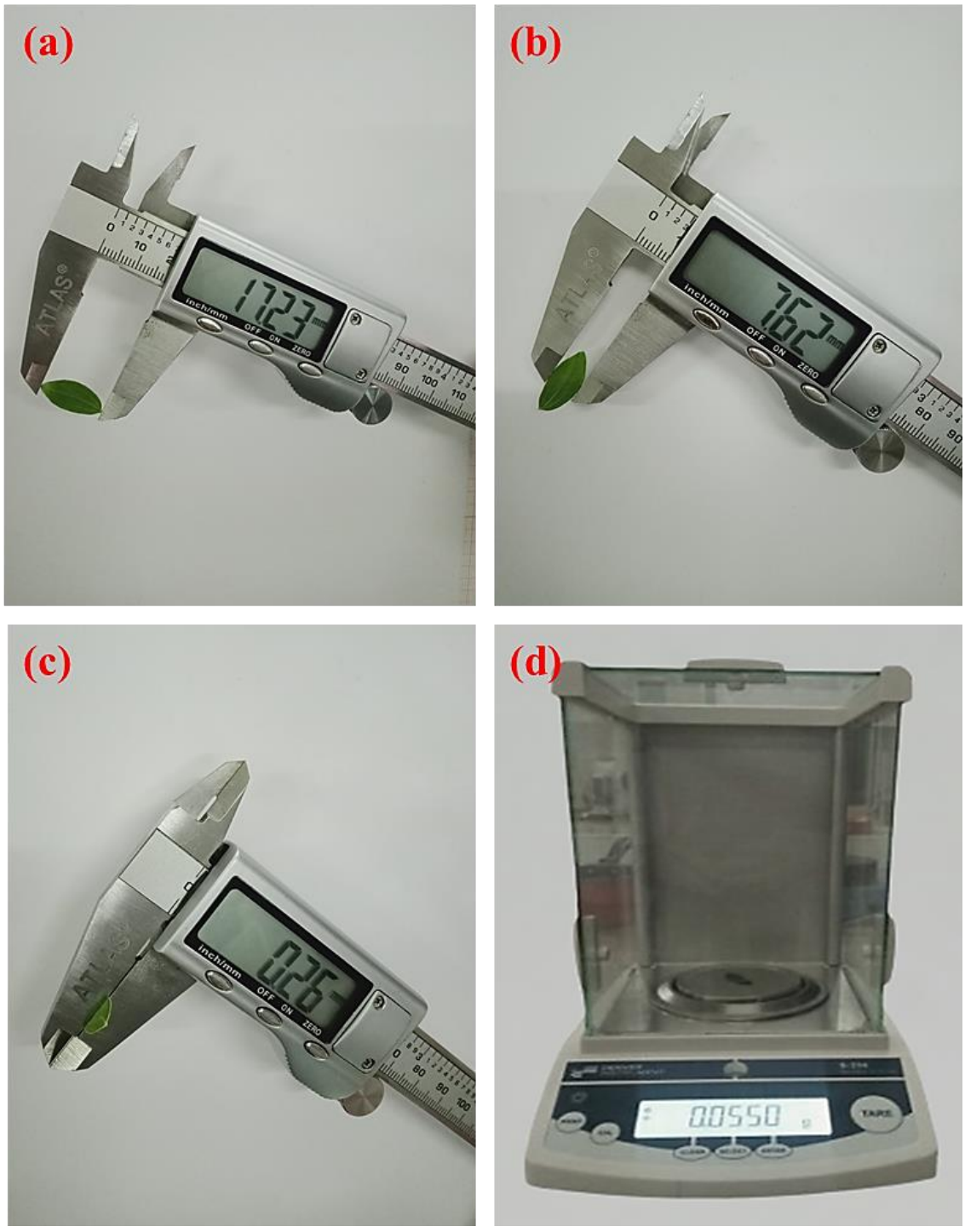

Figure 15 : Mesure des dimensions foliaires de *Z. lotus* (Original, 2025).

a : Mesure de la longueur foliaire ; **b** : Mesure de la largeur de la feuille à l'aide d'un pied à coulisse électronique ; **c** : Mesure de l'épaisseur foliaire ; **d** : Pesée des feuilles fraîches sur une balance de précision.

Dans le cas de notre travail, les feuilles fraîches ont été pesées (poids frais) avec une balance a précision (Figure 15d), séchées à l'air libre pendant un mois, puis pesées à nouveau pour obtenir le poids sec. Le SLA est, par la suite, calculé par le rapport entre la surface foliaire en (mm^2) et le poids sec en (mg).

2.4.3.5. L'indice LDMC (Leaf Dry Matter Content)

Le LDMC ou teneur en matière sèche foliaire est défini comme le rapport entre la masse sèche d'une feuille après séchage et sa masse fraîche saturée en eau (Berrached et *al.,* 2017). Il correspond au rapport du poids sec de la feuille en (mg) sur le poids frais en (g).

3. Analyses statistiques

Les traitements statistiques permettent d'interpréter les données collectées de manière rigoureuse, en identifiant les tendances générales et les différences significatives entre les traits morphologiques et traits fonctionnels de *Z. lotus*.

3.1 Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA ou ANalysis Of Variance) vise à tester les différences significatives entre les moyennes en comparant les variances (Armstrong et *al.,* 2002). Le test ANOVA est considéré comme étant significatif lorsque la valeur-p est le rapport F sont significatifs. La valeur-p représente le seuil de signification du test statistique. Par exemple, une valeur-p de 0.05 indique qu'il existe une probabilité de 5% que la relation entre les variables de l'échantillon soit due au hasard. La valeur de F est considérée comme étant la variance entre les groupes rapportée à la variance à l'intérieur des groupes. Plus la variance entre les groupes est supérieure à celle à l'intérieur des groupes, plus l'effet de la variable testée a des chances de ne pas être dû au hasard. Dans le cadre de notre mémoire, nous avons testé si les variables (traits fonctionnels) présentent une différence significative entre les huit stations étudiées.

Avant d'appliquer l'analyse de variance, nous avons vérifié les trois hypothèses clés permettant de décider le type d'analyse de variance à tester. La première hypothèse concerne la détection de valeurs aberrantes au niveau de chacune des variables. Le résultat de ce test a montré la présence de plusieurs valeurs aberrantes. La deuxième hypothèse consiste à tester si les différentes variables suivent une loi normale. Néanmoins, cette hypothèse n'a pas été satisfaite du moment que les distributions de toutes les variables ne soient pas normales. En effet, les tests de Shapiro-Wilk et les représentations graphiques de la normalité par les Q-Q Plots (Figure 16) confirment celles-ci. La dernière hypothèse à vérifier concerne l'homogénéité des variances. Dans ce cas, nous avons évalué si nous avons une égalité de variance entre les échantillons en utilisant le test de Levene (test appliqué lorsque la normalité n'est pas satisfaite). Les résultats de ce test ont montré que les variances ne sont pas égales.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que les trois hypothèses n'ont pas été assurées et donc le test ANOVA ordinaire n'est plus fiable pour nos données. Pour remédier à celà, nous avons appliqué une robuste ANOVA en utilisant le package *WRS2* (Mair et Wilcox, 2020) du logiciel RStudio. Ce type d'ANOVA est le plus appropriée pour comparer les moyennes entre plusieurs traits fonctionnels de *Z. lotus*. En cas de différences significatives, un test post-hoc est utilisé pour déterminer les stations qui diffèrent entre elles.

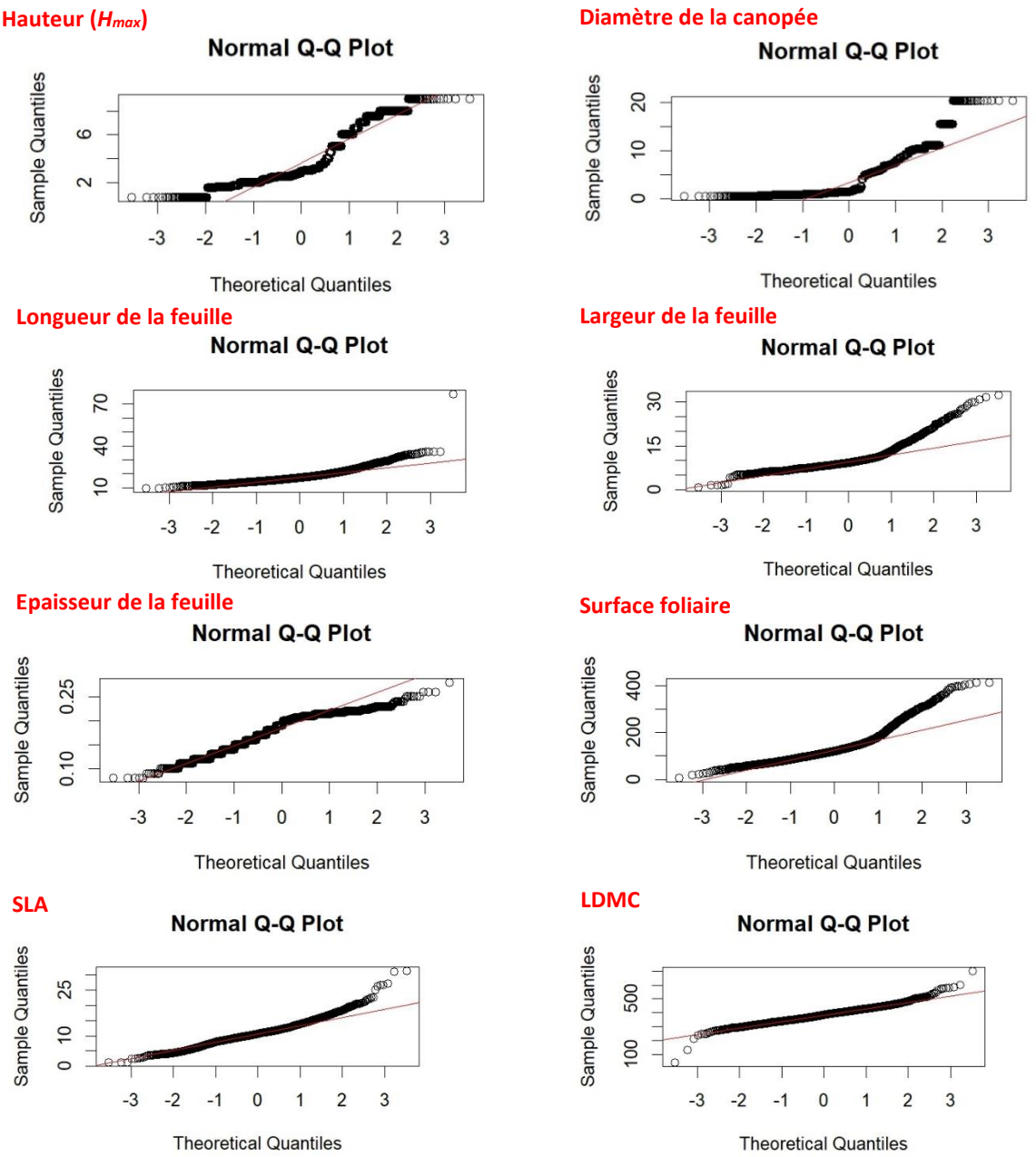

Figure 16 : Représentation de l'absence de la normalité de toutes les variables testées à l'aide des Q-Q Plots.

3.2 Analyse de corrélation

L'analyse de corrélation est une méthode statistique destinée à tester la relation entre deux variables quantitatives. La corrélation permet donc de *(i)* déterminer s'il existe une relation entre deux variables X et Y, *(ii)* de caractériser la forme de cette relation, relation positive ou négative selon la valeur du coefficient de corrélation, et *(iii)* de tester si cette relation est statistiquement significative à travers la valeur-p (Rakotomalala, 2015). Le coefficient de corrélation sert à caractériser si la relation linéaire est positive ou négative. Sa valeur varie entre -1 et +1. Plus il est proche de 1 (en valeur absolue), plus la relation entre X et Y est forte. Lorsque r = 0, ceci indique l'absence d'une corrélation.

Dans le cadre de notre étude, nous avons étudier la possible relation entre les huit variables (traits fonctionnels) à travers les matrices de corrélations générées avec les packages *corrplot* et *GGally*.

Chapitre 4 :

Résultats et Discussions

1. Résultats des statistiques descriptives des traits fonctionnels en fonction des stations

Une analyse descriptive des traits fonctionnels de *Z. lotus* a été effectuée dans le but de caractériser la variabilité morphologique et fonctionnelles observées au sein de chaque station ainsi qu'entre les stations étudiées. Cette étape repose sur des indicateurs statistiques, notamment le nombre d'échantillons, la moyenne et l'écart-type, permettant de résumer les données mesurées pour chaque trait. Dans cette étude, le nombre d'échantillons est constant, avec 10 individus et 300 feuilles analysés par station, assurant ainsi une base de comparaison homogène entre les sites (Tableau 5).

1.1. Hauteur (Hmax)

Les hauteurs moyennes des individus de *Z. lotus* varient sensiblement entre les stations. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées à Bahrara (5.90 ± 2.271 m) et El Argoub Lahmar (5.45 ± 1.683 m), tandis que les plus faibles sont observées à Leghata (1.76 ± 1.19 m) et Benhar (2.31 ± 1.24 m). Ces différences traduisent une variabilité morphologique marquée d'un site à l'autre et que celle-ci n'est pas toujours dépendante de l'aridité. Par ailleurs, les écarts-types relativement élevés au sein de certains sites (Bahrara, El Argoub Lahmar et Ouled Bounoua), indiquent une grande dispersion des hauteurs au sein de ces sites, suggérant une hétérogénéité importante dans la hauteur des individus.

1.2. Largeur de la canopée

Les valeurs moyennes de la largeur de la canopée varient notablement selon les stations. Les plus grandes valeurs sont enregistrées à El Sedara (8.42 ± 3.13 m) et El Koum (8.96 ± 4.44 m), tandis que les plus faibles sont observés à Ouled Bounoua (0.835 ± 0.242 m) et Koudiat El Lebane (0.925 ± 0.203 m). Autrement dit, au niveau des climat subhumide, le *Z. lotus* a tendance à présenter des valeurs très faibles de la largeur de sa canopée. Ceci indique que l'augmentation de l'aridité favorise le développement en largeur de la biomasse aérienne chez le *Z. lotus.*

1.3. Surface foliaire

Les données de la surface foliaire montrent une variation marquée entre les sites étudiés. Les moyennes varient de (101 ± 27.5 mm²) à El Koum à (185 ± 61.4 mm²) à Ouled Bounoua, ce qui témoigne d'une importante diversité des surfaces foliaires d'un site à l'autre. La station de Ouled Bounoua présente la plus grande moyenne, suivi de Leghata et Koudiat El Lebane (168 mm²), indiquant des feuilles globalement plus grandes dans les régions caractérisées par un climat subhumide. À l'inverse, El Koum et Bahrara (104 ± 30.9 mm²) affichent les moyennes les plus faibles, traduisant des feuilles plus petites. Ce résultat confirme que les feuilles deviennent de plus en plus petites avec l'augmentation de l'aridité du climat.

1.4. Longueur de la feuille

La moyenne des longueurs foliaires varie considérablement d'un site à l'autre, allant de 14.4 ± ±1.96 mm à Benhar à 22.6 ± 5.70 mm à Leghata, ce qui indique une variation notable de cette

Tableau 5 : Statistiques descriptives (moyenne ± écart type) des traits fonctionnels étudiés en fonction des huit stations échantillonnées.

Stations	Hauteur (H_{max})	Largeur de la canopée	Surface foliaire	Longueur de la feuille	Largeur de la feuille	Epaisseur de la feuille	Surface foliaire spécifique (SLA)	Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC)
Bahrara	5.90±2.271	1.24±0.337	104±30.9	16.4±2.72	8.47±1.43	0.185±0.021	9.48±1.83	411±40.8
Benhar	2.31±0.263	6.72±1.240	118±25.4	14.4±1.96	7.21±1.27	0.211±0.006	13.4±3.59	349±34
El Argoub Lahmar	5.45±1.683	1.50±0.238	123±31.0	16.9±2.11	9.50±1.66	0.179±0.023	10.1±1.40	409±30.5
El Koum	2.94±0.481	8.96±4.440	101±27.5	15.3±1.70	8.18±1.18	0.213±0.007	11.4±3.98	368±51.5
El Sedara	2.60±0.280	8.42±3.130	113±26.2	15.9±2.11	8.30±1.17	0.213±0.007	12.6±2.21	351±47.5
Koudiat El Lebane	4.30±1.809	0.925±0.203	168±78.3	21.7±3.77	11.9±3.11	0.15±0.020	9.57±2.09	396±34.7
Leghata	1.76±0.590	1.82±1.190	168±92.8	22.6±5.70	16.0±5.59	0.135±0.024	7.13±3.69	384±43.0
Ouled Bounoua	3.39±1.817	0.835±0.242	185±61.4	19.5±2.37	11.9±2.47	0.183±0.032	12.2±2.06	388±52.2

caractéristique entre les stations. Les feuilles les plus longues sont observées à Leghata, Koudiat El Lebane (21.7 ± 3.77mm) et Ouled Bounoua (19.5 ± 2.37 mm), tandis que les plus courtes sont relevées à Benhar et El Koum (15.3 ± 1.70 mm). Ces résultats indiquent que la longueur foliaire du *Z. lotus* diminue avec l'augmentation de l'aridité.

1.5. Largeur de la feuille

Les données de la largeur foliaire montrent une grande diversité entre les sites. Les moyennes varient de 7.21 ± 1.27 mm à Benhar à 16.0 ± 5.59 mm à Leghata, ce qui indique des différences notables dans les dimensions de la largeur des feuilles. Leghata présente la largeur moyenne la plus élevée, suivi de Koudiat El Lebane et Ouled Bounoua (11.9 ± 2.47 mm), tandis que Benhar et El Koum (8.18 ± 1.18 mm) enregistrent les valeurs les plus faibles reflétant des feuilles moins larges dans ces sites. Nous constatons que la largeur de la feuille est également dépendante de l'augmentation de l'aridité au niveau des stations étudiées.

1.6. Epaisseur de la feuille

L'épaisseur moyenne des feuilles de *Z. lotus* montre une variabilité modérée entre les stations, avec des valeurs comprises entre 0.135 ± 0.024 mm à Leghata et 0.213 mm à El Koum et El Sedara. Ces deux derniers sites présentent les épaisseurs moyennes les plus élevées, tandis que Leghata et Koudiat El Lebane (0.150 mm) enregistrent les valeurs les plus faibles, traduisant des feuilles plus fines dans ces régions. Nos résultats indiquent qu'avec l'augmentation de l'aridité, les feuilles ont tendance à être plus épaisses.

1.7. Surface foliaire spécifique (SLA)

Les données relatives à l'indice SLA montrent une variabilité notable entre les stations. Les moyennes s'étendent de (7.13 ± 3.69 mm^2/mg) à Leghata, indiquant des feuilles plus massive et denses, jusqu'à (13.4 ± 3.59 mm^2/mg) à Benhar, traduisant des feuilles plus fines avec une plus grande surface. Ce résultat permet de constater que l'indice SLA présentent des valeurs contrastées selon le gradient d'aridité.

1.8. Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC)

Les données sur le LDMC révèlent des variations marquées entre les stations. Les moyennes s'échelonnent de (349 ± 34 mg/g) à Benhar, indiquant des feuilles avec une faible proportion de matière sèche, à (411 ±40.8 mg/g) à Bahrara, traduisant des feuilles plus denses et riches en matière sèche. Les résultats montrent également que les valeurs de LDMC les plus élevées sont enregistrées au niveau des stations appartenant à un climat aride supérieur.

2. Résultats de l'analyse de variance appliqués aux traits morphologiques et fonctionnels en fonction des stations

Afin d'évaluer si les traits morphologiques et fonctionnels de *Z. lotus* varient significativement entre les huit stations échantillonnées, une analyse de la variance a été réalisée pour chacun de ces traits. La comparaison des valeurs-p obtenues avec le seuil de signification fixé à $\alpha = 0.05$ a permis de déterminer la significativité des différences observées. Lorsque la valeur-p était

inférieure à ce seuil, cela traduisait une différence statistiquement significative entre les stations.

Les résultats de l'analyse ont révélé que les traits mesurés présentent des différences très hautement significatives entre les différentes stations, suggérant une variabilité marquée entre les populations comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 6 : Résultat des tests ANOVA des différents traits étudiés au niveau des huit stations.

Variable	Statistique de test (F)	*p*-value	Significativité
Hauteur (m)	596.9771	< 0.0001	Très hautement significative
Diamètre de la canopée (m)	1524.105	< 0.0001	Très hautement significative
Surface (mm^2)	86.2035	< 0.0001	Très hautement significative
Longueur (mm)	211.5465	< 0.0001	Très hautement significative
Largeur (mm)	203.1615	< 0.0001	Très hautement significative
Epaisseur (mm)	669.9485	< 0.0001	Très hautement significative
SLA (mm^2/mg)	220.4858	< 0.0001	Très hautement significative
LDMC (mg/g)	172.3492	< 0.0001	Très hautement significative

Suite aux résultats significatifs obtenus par l'analyse de variance, un test post-hoc a été réalisé afin d'identifier les différences spécifiques entre les stations (Tableau 7). En complément, des boites a moustaches (boxplots) ont été élaborés pour visualiser la distribution des données et renforcer l'interprétation des variations significatives observées pour chaque trait analysé.

2.1. Hauteur

L'analyse de variance révèle une très forte différence significative entre les stations ($p < 0.0001$), avec une statistique de test de (596.98), une variance expliquée de (81.3 %) et une taille d'effet très élevée ($\eta^2 = 0.902$), indiquant une hétérogénéité marquée de la hauteur de *Z. lotus* entre les sites. Cette variabilité inter-populationnelle s'aligne avec les résultats de Houma (2013), qui a observé une grande diversité morphologique chez cette espèce en Algérie, et qui est en lien avec les variations des conditions écologiques locales. Nous observons notamment des médianes de hauteur plus élevées à Bahara, El Argoub Lahmar, Koudiat El Lebane et Ouled Bounoua, contrastant avec des stations comme Leghata ou Benhar, où les hauteurs sont plus faibles et homogènes (Figure 17). Ces différences traduisent une réponse adaptative à l'aridité, la taille réduite pouvant refléter une stratégie d'évitement du stress hydrique (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2016), tandis que les tailles plus élevées dans certains sites -Bahrara et El Arkoub Lahmar- peuvent résulter d'une meilleure disponibilité en eau, accessible grâce au système racinaire très profond de l'espèce, atteignant jusqu'à 60 mètres (López-Rodríguez et *al.,* 2020 ; Torres-García et *al.,* 2021).

Cette diversité de hauteur entre stations est également cohérente avec les travaux de Krintza et *al.* (2024), qui soulignent que la hauteur des plantes varie significativement selon le gradient d'aridité. La variabilité morphologique observée, notamment à Bahara et El Argoub Lahmar marquée par des moustaches étendues et des valeurs extrêmes confirme cette capacité adaptative, essentielle dans les milieux arides (Laamouri et *al.*, 2008).

Tableau 7 : *P*-values des comparaisons multiples (test post-hoc).

Variable	Station	*p*-value
Hauteur	Bahara *vs.* Leghata	0.0748
Diamètre de la canopée	Benhar *vs.* Ouled Bounoua	0.5192
	Bahrara *vs.* El Argoub Lahmar	0.6662
	Koudiat El Lebane *vs.* Leghata	0.1916
Surface foliaire	El Koum *vs.* Bahrara	0.6120
	Koudiat El Lebane *vs.* Ouled Bounoua	0.9576
	Sedara *vs.* Benhar	0.0744
Longueur	El Koum *vs.* El Argoub Lahmar	0.3704
	Koudiat El Lebane *vs.* Ouled Bounoua	0.0720
Largeur	El Koum *vs.* El Argoub Lahmar	0.1128
	Bahrara *vs.* El Argoub Lahmar	0.2526
	Koudiat El Lebane *vs.* Leghata	0.5674
Épaisseur	El Koum *vs.* Leghata	0.9790
	El Sedara *vs.* Bahrara	0.4748
	Sedara *vs.* El Argoub Lahmar	0.0658
	Behrara *vs.* El Argoub Lahmar	0.2816
SLA	Bahrara *vs.* Leghata	0.1112
	El Sedara *vs.* El Argoub Lahmar	0.0188
LDMC	El Koum *vs.* Benhar	0.1236
	El Sedara *vs.* El Argoub Lahmar	0.2772
	Koudiat El Lebane *vs.* Leghata	0.0832

Seules les comparaisons non significatives ($p \geq 0.05$) sont présentées ci-dessous, les autres étant toutes statistiquement significatives.

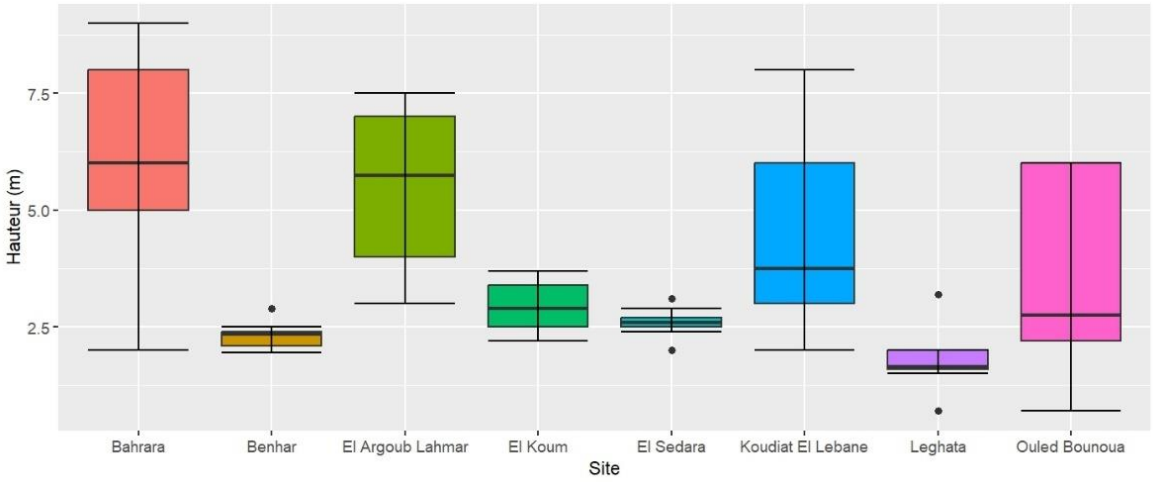

Figure 17 : Comparaison multiple de la hauteur des individus de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.

2.2. Largeur de la canopée

L'analyse de variance révèle une différence très hautement significative entre les stations (F = 1524.105 ; $p < 0.0001$), indiquant une forte hétérogénéité du diamètre de la canopée de *Z. lotus*. Le test post-hoc montre cependant trois comparaisons non significatives, notamment entre Benhar et Ouled Bounoua ($p = 0.5192$), Bahara et El Argoub Lahmar ($p = 0.6662$), ainsi que Koudiat El Lebane et Leghata ($p = 0.1916$), traduisant certaines similitudes locales. La figure 18 met en évidence des médianes très élevées et une dispersion marquée à El Koum et El Sedara, tandis que des stations comme Bahara ou Koudiat El Lebane présentent des valeurs plus faibles et homogènes.

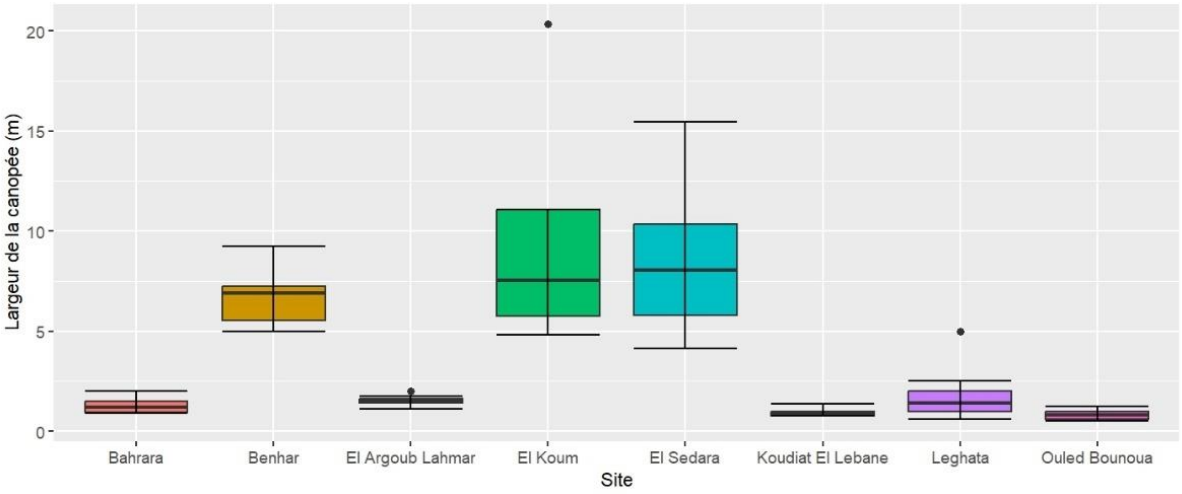

Figure 18 : Comparaison multiple de la largeur de la canopée des individus de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.

Ce trait fonctionnel, directement lié à la taille de la plante, reflète sa capacité d'adaptation aux ressources abiotiques. Dans les milieux arides, une grande largeur de la canopée peut témoigner d'un enracinement profond et d'une meilleure capacité à mobiliser l'eau souterraine (López-Rodríguez et *al.*, 2020 ; Torres-García, 2021), tandis que des tailles réduites reflètent des stratégies plus conservatrices. La variabilité observée, notamment à El Koum et Leghata, est un mécanisme adaptatif clé en réponse à la variabilité environnementale locale (Houma, 2013 ; Pérez-Harguindeguy et *al.*, 2016). Ces résultats confirment l'aptitude de *Z. lotus* à ajuster son architecture selon les contraintes du milieu aride et à s'investir dans le développement d'une biomasse aérienne assez importante qui se manifeste, dans le cadre de notre étude, par une largeur de la canopée considérable.

2.3. Surface foliaire

L'analyse de variance révèle une différence très hautement significative entre les stations (F = 82.2035 ; $p < 0.0001$), traduisant une hétérogénéité importante de la surface foliaire. Le test post-hoc indique, cependant, des absences de différences significatives entre certaines paires de sites, notamment El Koum *vs.* Bahrara ($p = 0.6120$), Koudiat El Lebane *vs.* Ouled Bounoua ($p = 0.9576$), et El Sedara *vs.* Benhar ($p = 0.0744$), suggérant des réponses convergentes à des conditions similaires.

La figure 19 illustre une dispersion marquée des valeurs selon les stations, avec des médianes distinctes et une variabilité intra-site variable. Des stations comme Leghata, Koudiat El Lebane et Ouled Bounoua présentent une forte hétérogénéité (valeurs extrêmes « petite et grande », valeurs aberrantes), traduisant une variabilité importante de la surface foliaire au sein de chaque station. À l'inverse, des stations telles que Bahrara ou El Sedara montrent une distribution plus resserrée, suggérant des conditions environnementales plus homogènes.

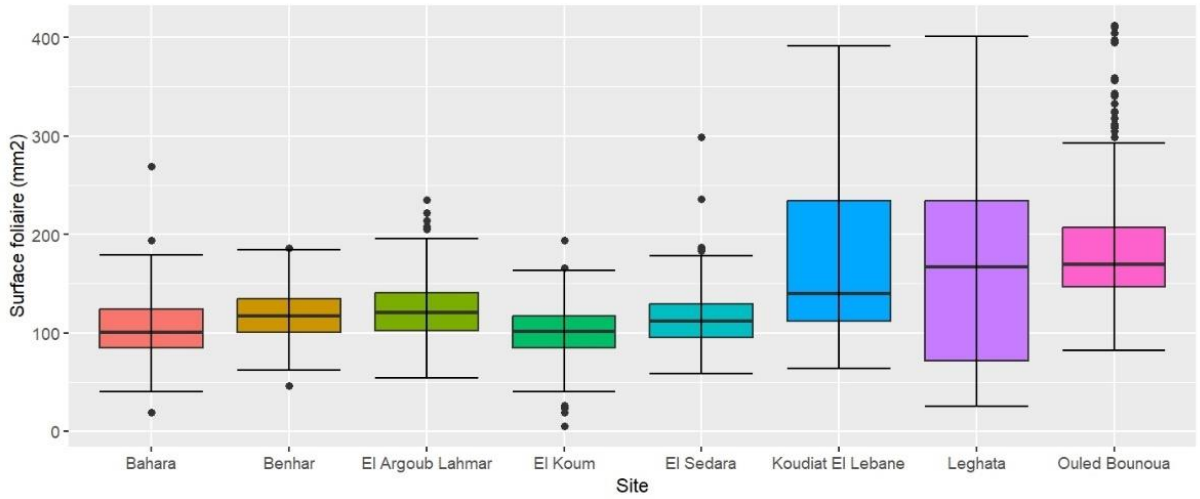

Figure 19 : Comparaison multiple de la surface foliaire de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.

Cette variabilité de la surface foliaire s'inscrit dans le cadre de la variabilité intraspécifique, mécanisme clé de l'adaptation des plantes aux contraintes abiotiques (Lozia et *al.*, 2023). Dans les environnements arides, les espèces ont tendance à développer des feuilles de petite taille pour limiter la transpiration et accentuer la photoinhibition (Poorter et *al.*, 2009 ; Doghbage et *al.*, 2023). Chez le *Z. lotus*, cette réduction constitue une stratégie d'adaptation permettant de maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans des milieux contraignants (Torres-García et *al.*, 2021).

Par ailleurs, la forte hétérogénéité observée dans certaines stations peut refléter l'expression d'une plasticité phénotypique favorisée par une variabilité environnementale locale (Krintza et *al.*, 2024). À l'opposé, les convergences de la surface foliaires dans certaines stations pourraient résulter de microclimats similaires ou de stratégies d'adaptation similaires malgré la distance géographique (Wang et *al.*, 2024 ; Lozia et *al.*, 2023). Des travaux précédents sur *Z. lotus* en Algérie confirment cette variabilité morphologique inter- et intra-populations, notamment en lien avec la taille foliaire (Houma, 2013 ; Rais et *al.*, 2017 ; Yahia et *al.*, 2020).

En somme, la variation de la surface foliaire chez *Z. lotus* témoigne de sa capacité adaptative au gradient d'aridité, en mobilisant à la fois des mécanismes physiologiques et des ajustements structurels qui pourraient être hérités de la sélection naturelle (Zheng et *al.*, 2023 ; Zhong et *al.*, 2023).

2.4. Longueur des feuilles

L'analyse de variance met en évidence une différence très hautement significative entre les stations pour la longueur des feuilles (F=211.5465, $p < 0.0001$), traduisant une hétérogénéité morphologique marquée (Tableau 6). La figure 20 confirment cette hétérogénéité, avec des médianes variables entre les sites : des valeurs plus élevées à Leghata, Ouled Bounoua et Koudiat El Lebane, plus faibles à El Koum et Benhar. Le test post-hoc montre cependant l'absence de différences significatives entre certaines paires de sites (El Koum *vs.* El Argoub Lahmar, $p = 0.3704$; Koudiat El Lebane *vs.* Ouled Bounoua, $p = 0.0720$), suggérant une homogénéité des conditions environnementales locales qui se manifestent par des convergences morphologiques (Tableau 7). Ce résultat confirme, qu'au niveau des milieux les moins contraignants, les feuilles ont tendance à être plus longues comparativement aux milieux présentant une aridité assez importante.

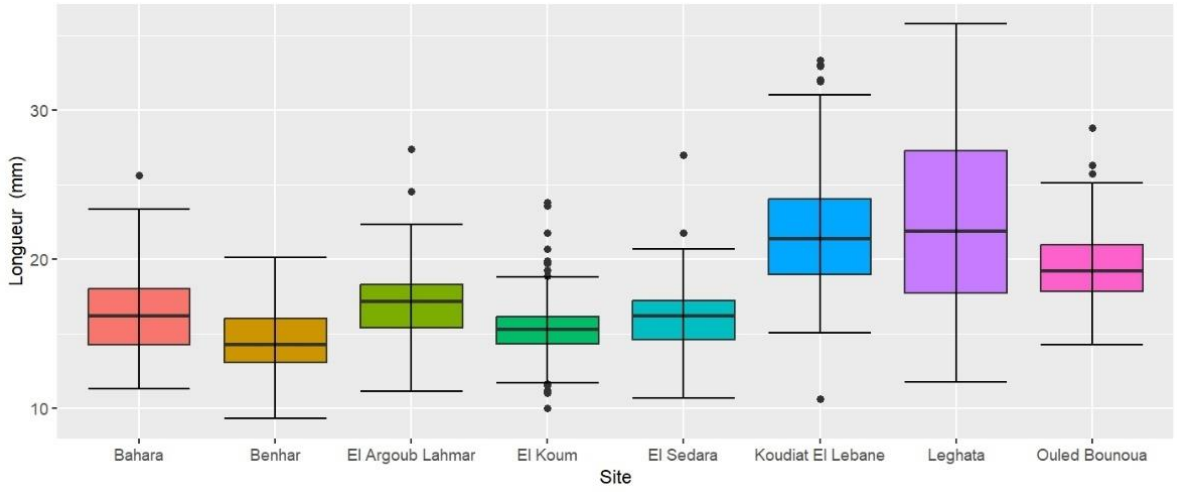

Figure 20 : Comparaison multiple de la longueur foliaire de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.

Cette variabilité, à la fois inter- et intra-stations, reflète l'adaptabilité de *Z. lotus* aux conditions écologiques locales. La longueur de la feuille, en tant que composante de la surface foliaire, influe directement sur le bilan hydrique de la plante. Dans les milieux arides, des feuilles plus petites sont généralement favorisées pour limiter la transpiration et maintenir une température foliaire proche de l'ambiante, augmentant ainsi l'efficacité d'utilisation de l'eau. Selon l'étude de Laamouri et *al.*, (2008), La réduction de la taille des feuilles est ainsi une stratégie adaptative courante observée chez des espèces telles que *Pistacia lentiscus* dans des contextes de sécheresse ou d'altitude. Les variations entre stations peuvent donc être interprétées comme des réponses adaptatives aux conditions édaphiques et climatiques locales (précipitations, durée de la saison sèche, disponibilité en eau). Ces observations confirment la forte plasticité de *Z. lotus*, déjà démontrée par Houma (2013), et sa capacité à ajuster ses traits fonctionnels pour faire face à l'aridité.

2.5. Largeur des feuilles

L'analyse ANOVA montre une différence très hautement significative entre les stations pour la largeur des feuilles (F = 203.1615, $p < 0.0001$). Cette forte hétérogénéité entre les stations traduit une variabilité morphologique marquée de ce trait fonctionnel. Le test post-hoc révèle toutefois des absences de différences significatives entre certaines paires de stations (El Koum *vs.* El Argoub Lahmar, Bahrara *vs.* El Argoub Lahmar, Koudiat El Lebane *vs.* Leghata), indiquant des proximités morphologiques ou des réponses adaptatives convergentes à des microclimats similaires. La figure 21 confirment une variabilité inter-site importante, avec des médianes plus élevées à Leghata et Koudiat El Lebane. Une dispersion accentuée et de nombreuses valeurs aberrantes, notamment à El Koum, El Sedara et Ouled Bounoua, témoignent d'une forte variabilité intra-stationnelle, révélatrice d'une plasticité phénotypique significative.

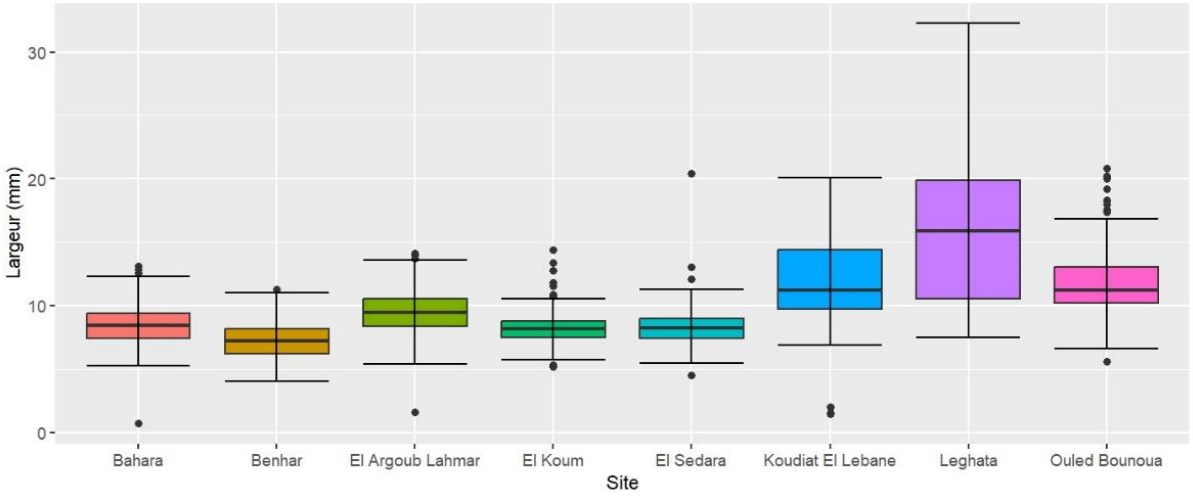

Figure 21 : Comparaison multiple de la largeur foliaire de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.

La largeur de la feuille, en tant que composante de la surface foliaire, joue un rôle déterminant dans le bilan hydrique et énergétique des plantes (Pérez-Harguindeguy et *al.*, 2016 ; Liu et *al.*, 2017). Dans les milieux arides, une réduction de la taille foliaire est une stratégie commune pour limiter la transpiration et maintenir une température foliaire modérée, cela est confirmé par Doghbage et *al.*, (2023) et Torres-García et *al.*, (2021). Des feuilles étroites permettent une dissipation thermique plus efficace, un avantage crucial dans les environnements chauds et secs (Cornelissen et *al.*, 2003 ; Yang et *al.*, 2023).

Les variations observées confirment les résultats de Lozia et *al.* (2023), qui soulignent l'impact des gradients climatiques locaux, même à échelle réduite, sur la distribution des traits fonctionnels. Elles rejoignent également les études algériennes sur *Z. lotus*, réalisées par Houma, (2013) ; Amara et Benabdeli, (2020) et Yahia et *al.*, (2020) qui mettent en évidence une forte variabilité morphologique, façonnée par des facteurs génétiques, édaphiques et climatiques. L'importance de la plasticité intraspécifique dans cette espèce permet à ses

populations d'exprimer des morphotypes adaptés à des conditions très contrastées, renforçant leur résilience écologique (Krintza et *al.*, 2024 ; Zhong et *al.*, 2023).

En somme, la largeur foliaire constitue un marqueur adaptatif clé chez *Z. lotus* qui pourrait refléter à la fois des contraintes environnementales locales et la capacité d'ajustement structurel de l'espèce face à l'aridité.

2.6. Épaisseur foliaire

L'analyse ANOVA révèle une différence très hautement significative entre les stations pour l'épaisseur foliaire ($F = 669.9485$, $p < 0.0001$), traduisant une variabilité inter-site notable. Toutefois, plusieurs comparaisons post-hoc ne sont pas significatives (El Koum *vs.* Leghata, El Sedara *vs.* Bahrara, Sedara *vs.* El Argoub Lahmar, Bahrara *vs.* El Argoub Lahmar), suggérant une stabilité de ce trait entre ces stations, possiblement liée à des conditions microclimatiques similaires ou à des convergences adaptatives.

La figure 22 montre également des différences notables dans la distribution de l'épaisseur foliaire entre les stations. Certaines stations comme El Koum et El Sedara présentent une médiane élevée et une distribution relativement resserrée, suggérant une homogénéité locale. À l'inverse, Ouled Bounoua et Leghata présentent une forte dispersion des valeurs avec de nombreuses valeurs aberrantes, traduisant une grande variabilité intra-stationnelle. Bahrara et El Argoub Lahmar, caractérisées par un bioclimat aride supérieur, se démarquent en revanche par une médiane plus importante, indiquant des feuilles relativement épaisses en moyenne. En outre, Benhar, El Sedara et El Koum, qui se trouvent respectivement dans des bioclimats aride moyen et aride inférieur, ont noté les feuilles les plus épaisses.

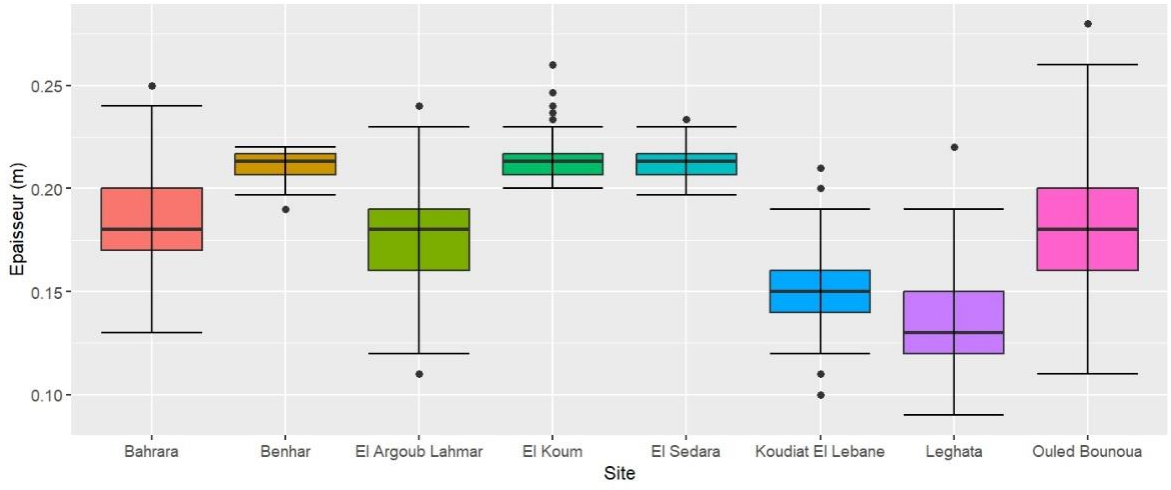

Figure 22 : Comparaison multiple de l'épaisseur foliaire de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.

Sur le plan fonctionnel, l'épaisseur foliaire constitue un trait clé dans les stratégies de tolérance à la sécheresse. Elle est souvent associée à une densité foliaire plus élevée et à une réduction de la surface transpirante, contribuant ainsi à prolonger la longévité des feuilles sous stress hydrique. Cette relation a été mise en évidence par Coneva et *al.*, qui soulignèrent en 2017

l'importance de ces caractéristiques dans l'adaptation morphologique. De même, Poorter et ses collaborateurs (2009) ont démontré que des feuilles plus épaisses permettent une meilleure conservation de l'eau. Pérez-Harguindeguy et *al.,* (2016) confirment également que l'augmentation de l'épaisseur s'accompagne souvent d'une plus grande robustesse structurelle.

Chez le *Z. lotus*, des ajustements structuraux internes comme l'épaississement du mésophylle spongieux ou des épidermes ont été observés en réponse à des conditions de sécheresse (Maraghni et *al.,* 2019 ; Zougar et *al.,* 2024). En effet, la variabilité observée tant entre les stations qu'au sein d'une même station, illustre la remarquable plasticité phénotypique de *Z. lotus*. Houma (2013) décrit cette espèce comme particulièrement résiliente dans les milieux arides, une caractéristique également soulignée par Amara et Benabdeli (2020). La coexistence de schémas de stabilité et de plasticité dans ce trait traduit une réponse adaptative aux pressions écologiques hétérogènes, notamment celles liées à la disponibilité en eau, à la température et aux contraintes édaphiques locales, comme l'ont montré Torres-García et *al.,* (2021) et Krintza et *al.,* (2024).

2.7. Surface foliaire spécifique (SLA)

La surface foliaire spécifique (SLA) présente une différence très hautement significative entre les stations étudiées ($p < 0.0001$), avec une statistique de test F de 220.4858 (Tableau 6). Cette variabilité inter-stationnelle marquée illustre une forte hétérogénéité écologique. Comme l'ont souligné Pérez-Harguindeguy et ses collaborateurs en 2016, ainsi que Torres-García et *al.,* en 2021, la SLA est un trait fonctionnel central dans les stratégies d'acquisition ou de conservation des ressources.

La figure 23 illustre clairement une forte hétérogénéité inter-stationnelle de la SLA chez *Z. lotus*, avec des écarts notables de médianes entre plusieurs stations, traduisant des stratégies foliaires différenciées en fonction des contraintes environnementales.

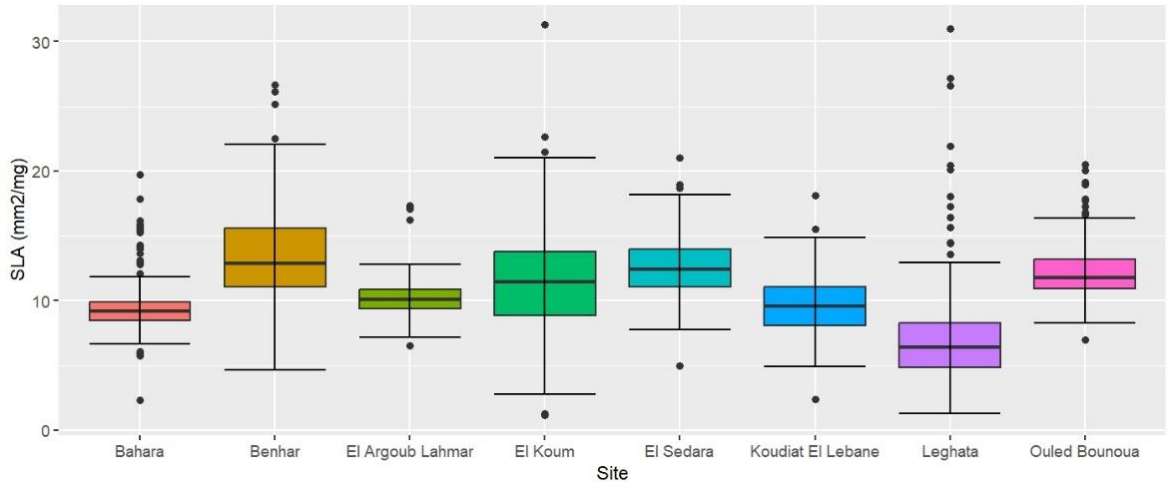

Figure 23 : Comparaison multiple de la SLA de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.

Certaines stations, comme Benhar et Leghata, se distinguent par une dispersion très large et de nombreuses valeurs extrêmes, ce qui traduit une variabilité intra-stationnelle importante. Cette

dispersion peut résulter d'une forte hétérogénéité micro-environnementale ou d'une variabilité phénotypique élevée. À l'inverse, des sites tels qu'El Argoub Lahmar et Bahara présentent des distributions plus resserrées autour de la médiane, témoignant d'une stratégie foliaire plus homogène, potentiellement liée à des conditions écologiques plus stables ou à une adaptation fonctionnelle similaire.

Selon les travaux de Poorter et *al.,* (2009) et de Liu et *al.,* (2017), une SLA élevée est généralement caractéristique des espèces à croissance rapide dans des milieux riches ou temporairement favorables, alors qu'une SLA faible traduisant une masse foliaire spécifique élevée est associée à des feuilles plus denses et durables, typiques des milieux arides et pauvres. Chez *Z. lotus*, cette variabilité reflète des ajustements physiologiques aux contraintes locales, comme la lumière, le stress hydrique ou les propriétés édaphiques (Houma, 2013 ; Amara et Benabdeli, 2020).

Cette importante variabilité intraspécifique des traits joue un rôle fondamental dans la résilience de l'espèce. D'après Torres-García et *al.*, (2021) et Krintza et *al.,* (2024), elle permet à un même génotype de manifester différentes expressions phénotypiques selon le contexte environnemental, renforçant ainsi la capacité de l'espèce à s'établir dans des niches écologiques variées. De plus, comme l'ont noté Torres-García et ses collègues en 2021, certaines feuilles, bien qu'ayant une SLA plus élevée, possèdent une surface foliaire réduite, ce qui constitue un compromis fonctionnel permettant d'optimiser l'usage de l'eau tout en maintenant une activité photosynthétique dans les environnements les plus secs.

En résumé, la SLA apparaît comme un indicateur clé de l'adaptation de *Z. lotus* à l'aridité, traduisant à la fois une variabilité inter et intra stationnelle, une diversité fonctionnelle marquée et des ajustements morphologiques différenciés selon les conditions locales.

2.8. Teneur en matière sèche des feuilles (LDMC)

L'ANOVA révèle des différences très hautement significatives du LDMC entre stations ($F = 172.3492$, $p < 0.0001$) (Tableau 6). Par ailleurs, trois comparaisons issues du test post-hoc ne sont pas significatives (El Koum *vs.* Benhar, El Sedara *vs.* El Argoub Lahmar, Koudiat El Lebane *vs.* Leghata), suggérant une certaine stabilité du trait entre ces sites, potentiellement liée à des conditions micro-environnementales similaires ou à des convergences fonctionnelles.

Les profils de distribution de l'indice LDMC sont globalement similaires entre les stations, avec des médianes relativement proches (Figure 24). Toutefois, des différences apparaissent dans la répartition des valeurs. Certaines stations, comme Bahara et El Arkoub Lahmar, appartenant à un climat aride supérieur, semblent privilégier un contenu en matière sèche plus élevé, traduisant potentiellement une stratégie de conservation des ressources, typique des milieux soumis à des stress hydriques. Cependant, les stations se trouvant dans des climats moins contraignants - subhumide – ont enregistrées des valeurs légèrement élevées. D'autres, comme Benhar, El Sedara ou El Koum, montrent des valeurs centrales un peu plus basses, suggérant des feuilles plus tendres, souvent associées à une croissance plus rapide mais à une moindre tolérance à la sécheresse. Ceci témoigne que l'hypothèse du départ, suggérant des valeurs de

LDMC élevées avec l'augmentation de l'aridité, n'est pas confirmée pour l'ensemble des stations étudiées.

Par ailleurs, la présence de nombreuses valeurs extrêmes, notamment à El Koum, Koudiat El Lebane et Ouled Bounoua, révèle une variabilité intraspécifique marquée. Cette hétérogénéité peut refléter une forte variabilité physiologique, où les individus ajustent leur contenu en matière sèche en fonction des micro-conditions locales. Cette variabilité est un indicateur important de la capacité d'adaptation de *Z. lotus* à des environnements contrastés.

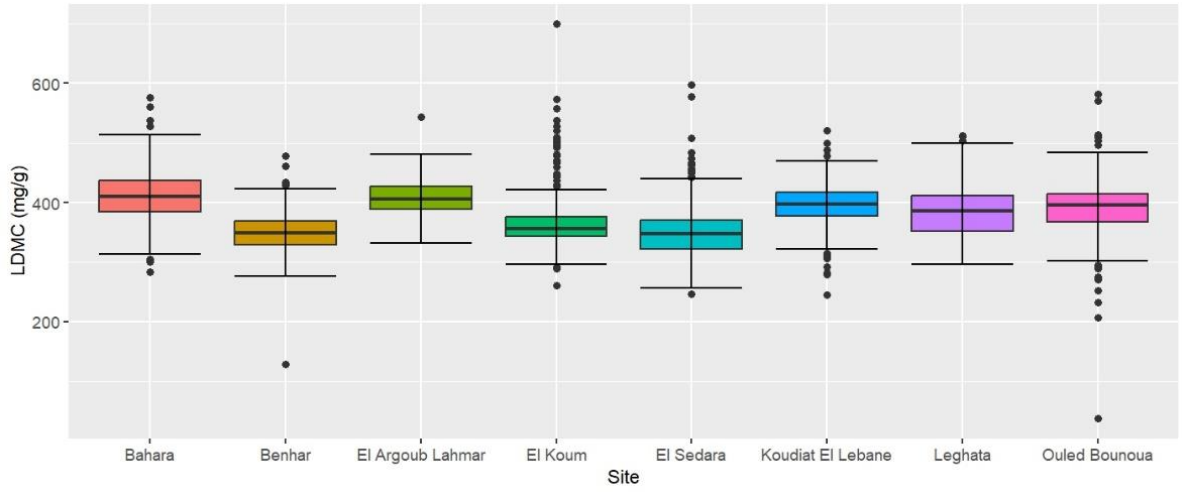

Figure 24 : Comparaison multiple de l'LDMC de *Z. lotus* selon les huit sites échantillonnés.

Ainsi, malgré des tendances générales similaires, les écarts observés entre et au sein des sites traduisent une diversité fonctionnelle non négligeable, témoignant de la flexibilité adaptative de l'espèce face aux contraintes environnementales.

Des valeurs élevées de LDMC traduisent une forte densité tissulaire, une longévité foliaire prolongée et une résistance accrue aux contraintes mécaniques et hydriques, comme le montrent les travaux de Poorter et *al.*, (2009) et de Towers et *al.*, (2024). Selon Maraghni et *al.*, (2019), les feuilles à forte densité, généralement plus sclérophylles, sont plus efficaces pour limiter la perte d'eau et résister au dessèchement, une adaptation essentielle dans les milieux xériques. Cette interprétation est confirmée par Lozia et *al.*, (2023), qui soulignent l'intérêt de telles structures dans les environnements arides.

Chez *Z. lotus*, la variabilité intermédiaire observée dans le LDMC suggère, selon Krintza et *al.*, (2024), une stratégie double : d'une part, une relative stabilité des valeurs entre les stations, reflet d'une adaptation à des conditions globalement similaires ; d'autre part, une capacité d'ajustement morpho-fonctionnel local grâce à une forte plasticité phénotypique. D'après Torres-García et *al.*, (2021), cette plasticité se manifeste notamment par l'épaississement des tissus internes tel que le mésophylle et externe tels que l'épiderme, comme l'ont également observé Maraghni et ses collaborateurs en 2019.

Enfin, selon l'étude de López-Rodríguez et *al.*, (2020), le *Z. lotus* adopte également une stratégie d'accès profond aux ressources en eau grâce à son statut de phréatophyte, ce qui lui permet de maintenir ses fonctions physiologiques même en conditions de sécheresse prolongée.

3. Résultats des corrélations entre les traits fonctionnels

3.1. Corrélations entre les huit variables étudiées

Une analyse des corrélations entre les traits fonctionnels de *Z. lotus* a été réalisée dans le but d'examiner les relations linéaires existantes entre eux. Cette approche permet de détecter d'éventuels liens positifs ou négatifs, traduisant des compromis ou des synergies fonctionnelles. L'étude s'appuie sur le calcul du coefficient de corrélation de Pearson, appliqué à l'ensemble des variables, afin d'explorer la stabilité ou la variabilité de ces relations selon les conditions locales (Figure 25).

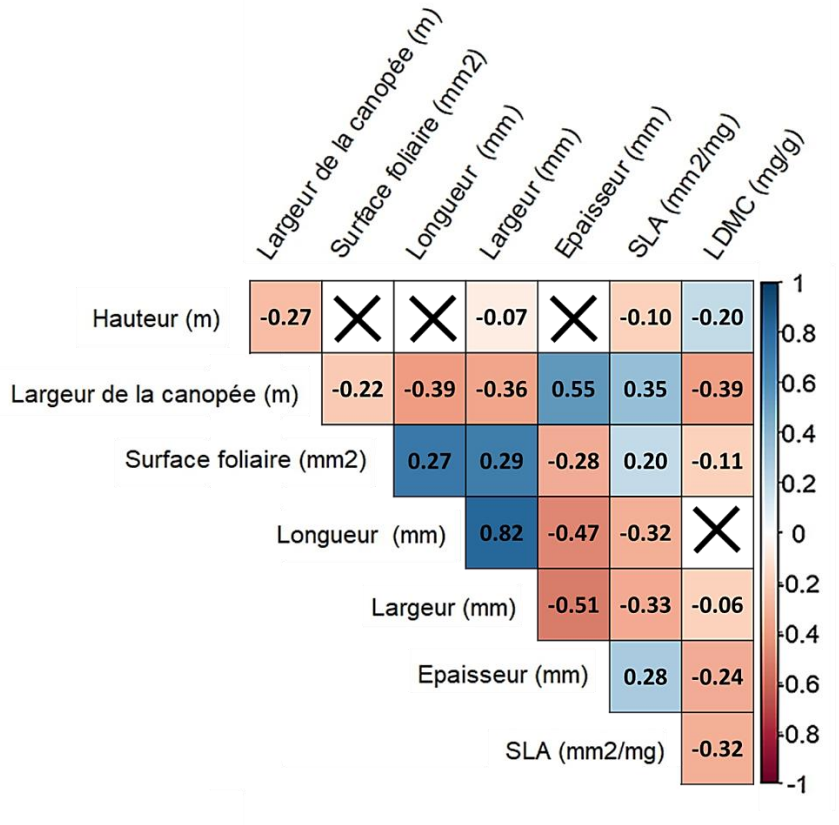

Figure 25 : Matrice des corrélations entre les traits morphologiques et fonctionnels de *Z. lotus.*

Dans la matrice de corrélation, les croix noires indiquent l'absence de corrélations significatives entre certaines paires de variables. En dehors de ces cas, la matrice révèle des associations fonctionnelles entre les traits de *Z. lotus*, traduisant des stratégies adaptatives à l'aridité. La surface foliaire est positivement liée à la longueur et à la largeur des feuilles, une relation morphologique attendue. En revanche, ces dimensions présentent une corrélation négative avec l'épaisseur, suggérant que les feuilles plus grandes sont aussi plus fines. Cette tendance, observée aussi par Wang et *al.*, (2016), traduit une plasticité structurale qui permet à *Z. lotus*, espèce phréatophyte, d'adapter sa morphologie selon la disponibilité en eau.

La largeur de la canopée, corrélée positivement à l'épaisseur et modérément a la SLA, indique une coordination entre architecture et structure foliaire. Cela reflète une stratégie mixte, combinant capture de lumière et robustesse, potentiellement soutenue par un accès aux nappes profondes (Liu et *al.,* 2022). Par ailleurs, les corrélations négatives entre SLA et taille foliaire -longueur et largeur- suggèrent que des feuilles plus grandes ont une surface spécifique plus faible, reflet d'un investissement structurel accru en contexte aride (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013 ; Zhong et *al.,* 2023).

Enfin, le LDMC, faiblement corrélé aux autres traits, exprime une relative autonomie. Sa valeur négative avec la canopée et la SLA indique un compromis entre densité tissulaire et croissance (Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013 ; Krintza et *al.,* 2024). Cette indépendance, relevée par Afzal (2017) et Zheng et *al.,* (2023), participe à la plasticité globale de *Z. lotus*, qui module finement ses traits face aux contraintes locales (Doghbage et *al.,* 2023 ; Houma et *al.,* 2022).

3.2. Corrélation entre la largeur et la longueur foliaires

La corrélation linéaire positive observée entre la longueur et la largeur foliaires chez *Z. lotus* dans l'ensemble des stations étudiées (r = 0.82), traduit une proportionnalité morphologique typique du développement foliaire (Figure 26). Cette relation indique que, de manière générale, les feuilles plus longues tendent aussi à être plus larges, suggérant une coordination structurale dans la croissance des feuilles. Ce lien a également été confirmé par Houma et *al.,* (2022), qui ont mis en évidence une corrélation significative entre ces deux dimensions foliaires, en lien avec des gradients écologiques.

Dans la majorité des stations, telles que Bahrara, Benhar, El Argoub Lahmar, El Koum, El Sedara ou Koudiat El Lebane, les nuages de points issus de la corrélation sont concentrés et les pentes modérées, traduisant une relation claire mais modérée entre les deux variables. Cela suggère que, bien qu'il existe une tendance générale, certaines feuilles présentent à longueur égale une largeur légèrement différente, témoignant d'une variabilité morphologique locale.

À Leghata, en revanche, la corrélation est particulièrement forte, avec une pente plus marquée et des feuilles de grande taille (jusqu'à 35 mm de long et plus de 20 mm de large). Cette configuration traduit probablement une meilleure disponibilité en ressources ou des conditions édapho-climatiques plus favorables à un développement foliaire complet. Ce type de réponse locale est cohérent avec les observations de López-Rodríguez et *al.,* (2020), qui ont souligné que la taille des feuilles de *Z. lotus* varie selon le contexte bioclimatique, avec des feuilles plus grandes en milieux plus humides. En réalité, en plus du climat subhumide caractérisant cette station, qui expliquerait la taille importante des feuilles, la proximité des individus de *Z. lotus* échantillonnés des champs agricoles (Figure 27) pourrait également favoriser l'espèce à s'investir dans le développement foliaire.

Le site de Ouled Bounoua présente quant à lui une distribution plus dispersée du nuage de points, avec une relation positive bien visible mais accompagnée d'une variabilité plus importante. Certaines feuilles atteignent presque les tailles observées à Leghata, ce qui pourrait refléter une hétérogénéité intra-stationnelle liée à la diversité génétique ou à la présence de

micro-habitats différenciés. Ce phénomène illustre la plasticité phénotypique de l'espèce, qui permet à *Z. lotus* d'ajuster ses traits morphologiques en fonction des contraintes locales, notamment l'aridité et la disponibilité en eau (Doghbage et *al.,* 2023 ; Torres-García et *al.,* 2021).

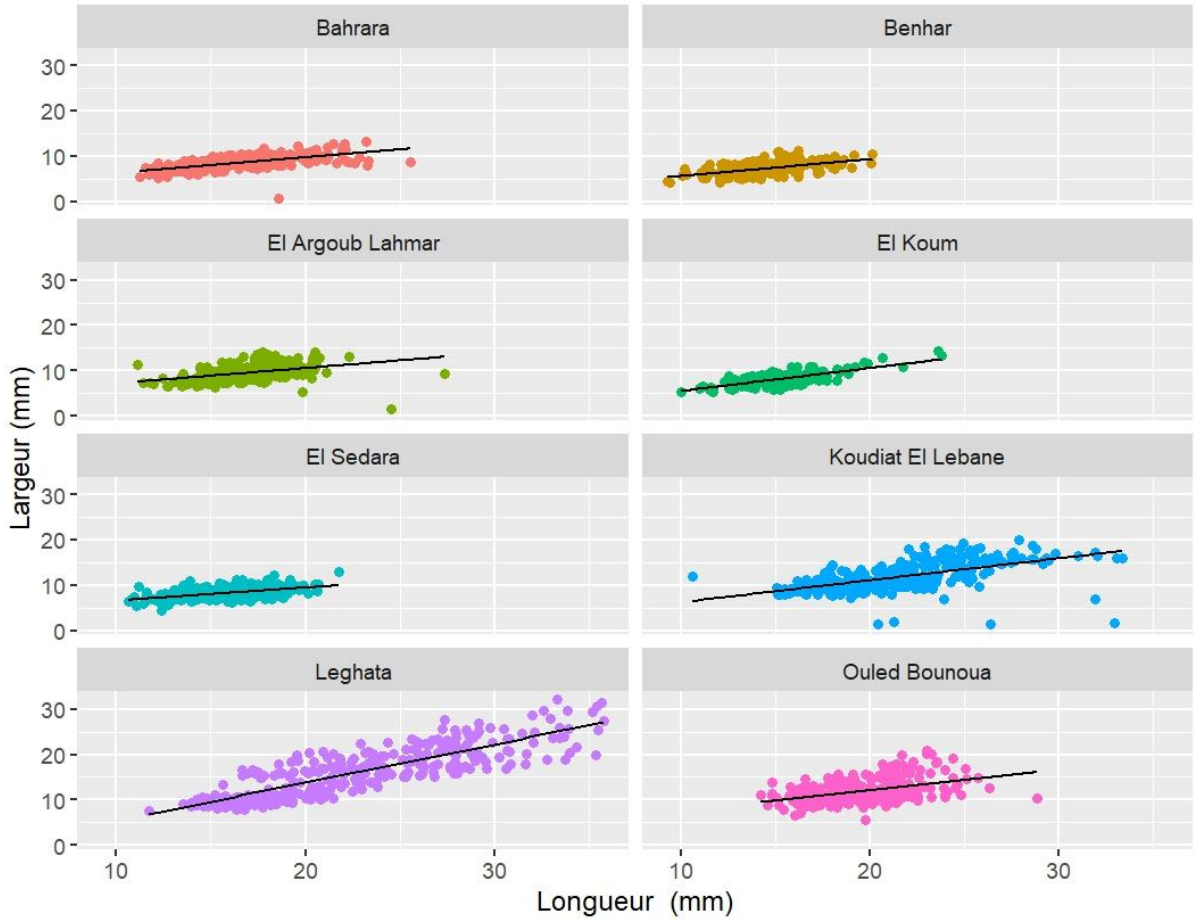

Figure 26 : Relation entre la largeur et la longueur foliaires chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

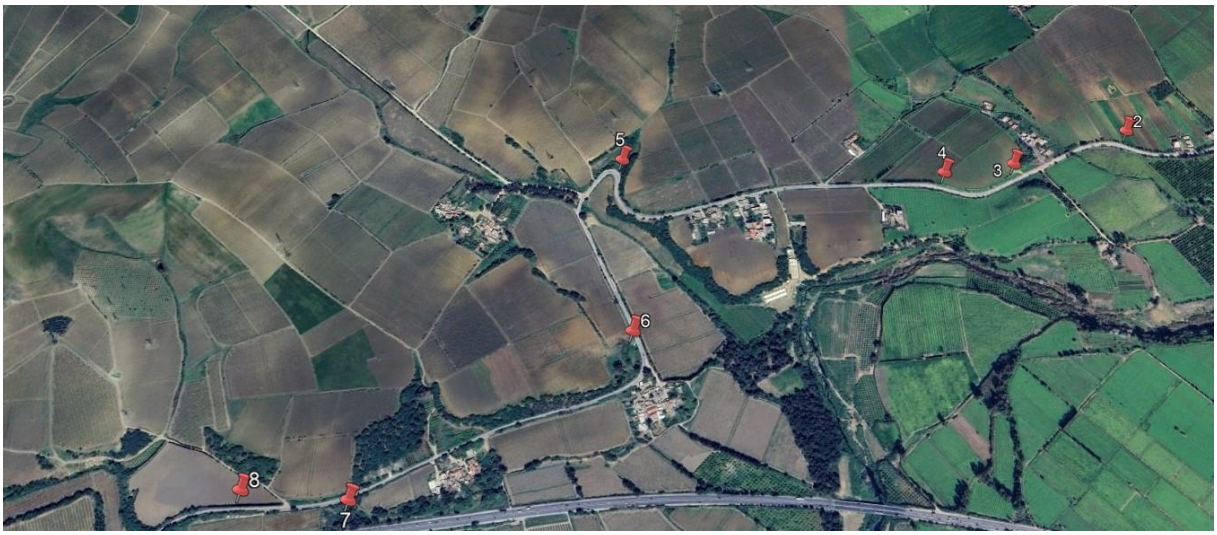

Figure 27 : Position de individus (2-8) de *Z. lotus* au niveau de la station de Leghata.

Ainsi, bien que le schéma général de corrélation entre la longueur et la largeur soit conservé, les variations dans l'intensité et la distribution de cette relation entre stations mettent en lumière l'interaction complexe entre contraintes abiotiques et potentiel morphologique chez *Z. lotus*.

3.3. Corrélation entre la largeur et la surface foliaires

La corrélation positive observée entre la largeur et la surface foliaire chez *Z. lotus* (r = 0.69), bien qu'hétérogène selon les sites, traduit une réponse morphologique adaptative à la variabilité environnementale (Figure 28). Dans la majorité des stations, une tendance claire indique que les feuilles plus larges tendent à avoir une surface totale plus importante, une relation particulièrement marquée à Leghata et Koudiat El Lebane, où la largeur contribue fortement à la surface foliaire globale. Ces observations rejoignent celles de Liu et *al.*, (2017) et Yang et *al.*, (2023), qui montrent que la surface des feuilles peut être estimée à partir des dimensions linéaires, soulignant un lien morphologique fondamental. Toutefois, la faiblesse ou l'absence de cette relation dans des sites comme Benhar ou El Koum suggère des contraintes écologiques spécifiques, pouvant freiner l'élargissement foliaire même lorsque la surface augmente. Ces variations inter-sites illustrent l'adaptation marquée de *Z. lotus* (Lozia et *al.*, 2023 ; Wang et *al.*, 2024), modulée par l'aridité, la température et la disponibilité en eau (Doghbage et *al.*, 2023 ; Poorter et *al.*, 2009).

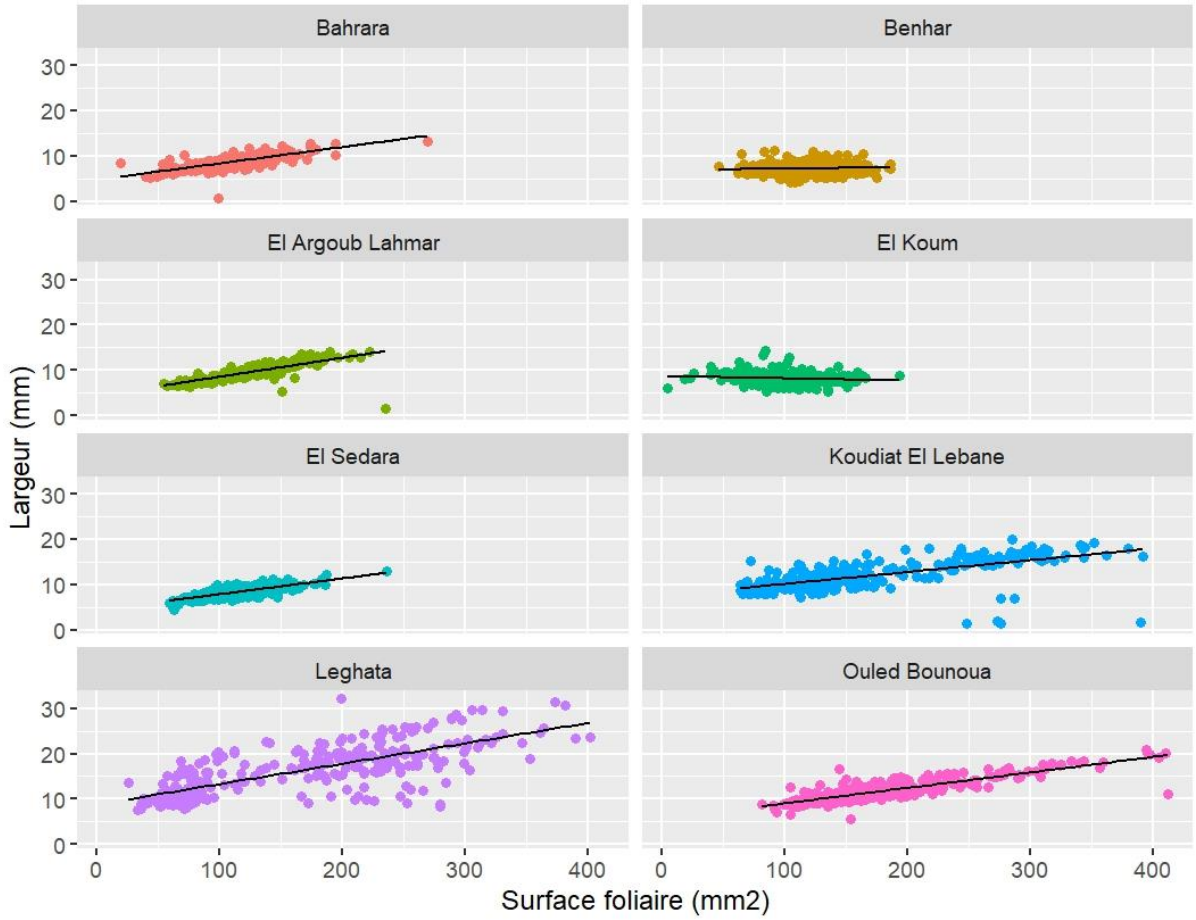

Figure 28 : Relation entre la largeur et la surface foliaire chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

Dans les environnements arides, une réduction de la taille foliaire, y compris de la largeur, est une stratégie d'adaptation bien documentée pour minimiser la transpiration et améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau selon Torres-García et *al.,* 2021 et Doghbage et *al.,* 2023. Des feuilles plus étroites peuvent également faciliter une dissipation thermique plus efficace dans les conditions chaudes et ensoleillées comme l'a souligné Cornelissen et *al.,* (2003). Inversement, dans les sites où la relation est plus forte, la disponibilité en eau souterraine pourrait permettre une expression plus complète du potentiel morphologique de l'espèce. Poorter et *al.,* (2009) a indiqué qu'en tant que plante phréatophyte, *Z. lotus* bénéficie d'un accès profond à la nappe phréatique, ce qui peut soutenir une surface foliaire plus développée et favoriser l'acquisition de carbone. Ainsi, la variabilité de cette relation entre largeur et surface foliaire n'est pas un simple bruit écologique, mais reflète la capacité de *Z. lotus* à ajuster ses traits fonctionnels en fonction des pressions abiotiques locales, illustrant une stratégie écologique d'adaptation efficace à l'aridité.

3.4. Corrélation entre la longueur et la surface foliaires

La relation observée entre la longueur et la surface foliaires chez *Z. lotus* (Figure 29) révèle une corrélation positive forte et constante à travers l'ensemble des stations ($r = 0.72$), traduisant une dynamique morphogénétique stable. D'après les travaux de Liu et *al.,* (2017) et Yang et *al.,* (2023), l'allongement des feuilles contribue directement à l'augmentation de leur surface, et cette coordination développementale bien documentée permet même d'estimer la surface foliaire à partir des dimensions linéaires de la feuille, ce qui témoigne d'un schéma de croissance proportionnelle robuste, maintenu malgré la variabilité environnementale.

Des différences inter-sites demeurent toutefois perceptibles. Par exemple, à Leghata et Koudiat El Lebane, une variabilité morphologique plus marquée a été observée, sans remise en cause de la tendance globale. Ce phénomène pourrait s'expliquer par l'influence de micro-habitats ou par une éventuelle diversité génétique locale (Houma et *al.,* 2022 ; Yahia et *al.,* 2020 ; Doghbage et *al.,* 2023). Lozia et *al.* (2023) soutiennent également que cette variabilité illustre la plasticité phénotypique de l'espèce face aux pressions écologiques locales, tandis que Krintza et *al.* (2024) insistent sur la capacité adaptative des espèces méditerranéennes à ajuster finement leurs traits foliaires. À l'inverse, une distribution plus homogène des données, comme observé à El Sedara ou Benhar, pourrait refléter soit des contraintes environnementales plus strictes, soit une plus grande homogénéité génétique, réduisant ainsi l'expression phénotypique observable (Houma et *al.,* 2022).

Dans les milieux arides, la taille des feuilles, plus particulièrement leur surface, joue un rôle déterminant dans le bilan hydrique et énergétique des plantes. En effet, la réduction de la surface foliaire constitue une stratégie adaptative classique visant à limiter la perte d'eau par transpiration (Cornelissen et *al.,* 2003 ; Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013). Cette stratégie a été confirmée récemment par Doghbage et *al.* (2023) et Lozia et *al.* (2023), qui soulignent que la diminution des dimensions foliaires contribue à la résilience physiologique des plantes face à la sécheresse.

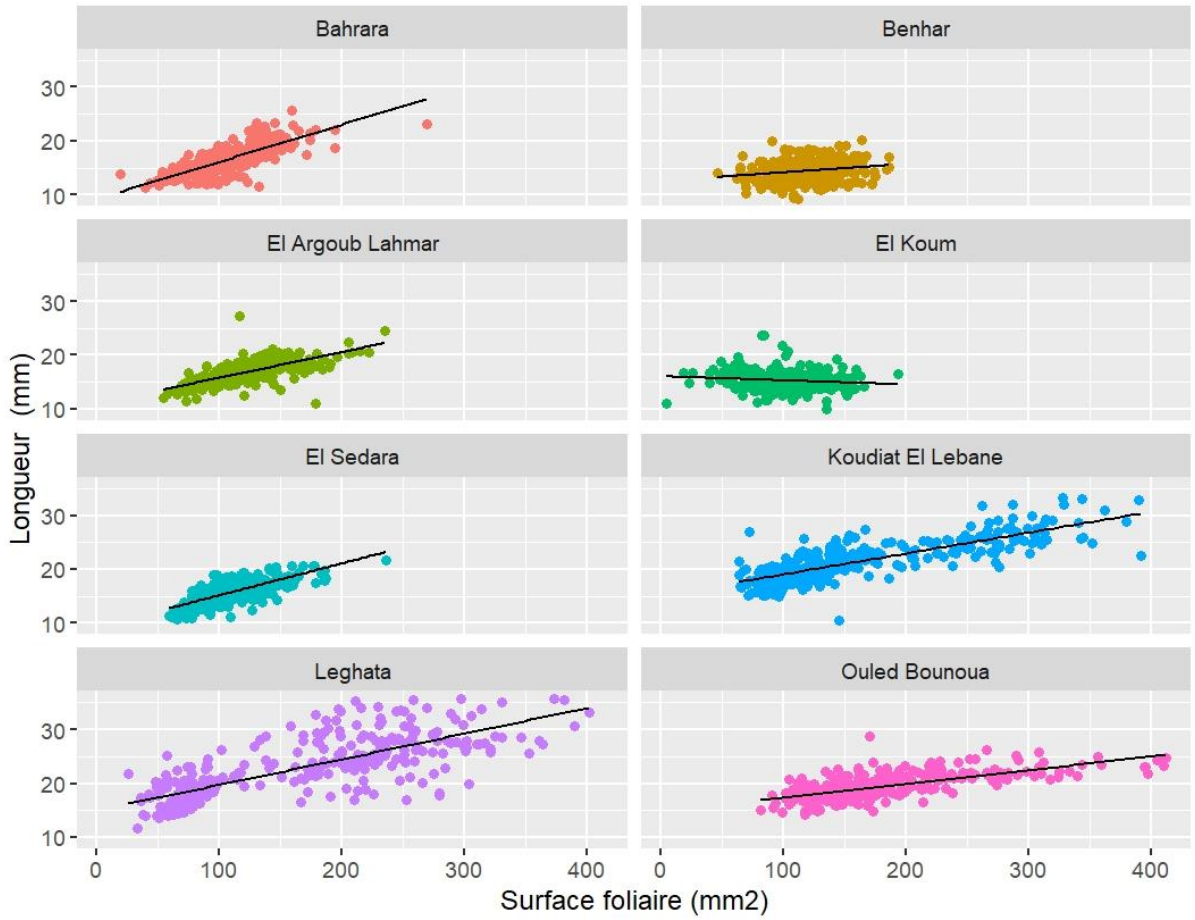

Figure 29 : Relation entre la longueur et la surface foliaire chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

Malgré ces contraintes, le *Z. lotus* parvient à maintenir une coordination morphologique stable entre la longueur et la surface foliaire. Ce maintien, tout en modulant l'intensité d'expression de ces traits selon les contextes écologiques, traduit un haut degré de capacité adaptative. Amara et Benabdeli (2020), ainsi que Torres-García et *al.* (2021), mettent en avant cette capacité remarquable d'ajustement morpho-fonctionnel, tandis que Krintza et *al.* (2024) rappellent que cette flexibilité est essentielle à la survie des espèces dans les environnements arides et hétérogènes. Nous pouvons déduire que le *Z. lotus* démontre ici une stratégie efficace conciliant performance fonctionnelle et adaptation morphologique.

3.5. Corrélation entre la largeur et l'épaisseur foliaires

La relation entre la largeur et l'épaisseur foliaires chez *Z. lotus* bien que variable selon les stations (Figure 30), reflète la capacité de cette espèce à ajuster ses traits morphologiques en réponse aux conditions environnementales locales. Dans des stations comme El Koum, Leghata et El Sedara, où cette corrélation est nette, les feuilles tendent à être à la fois larges et épaisses, traduisant un développement foliaire plus complet sous des conditions écologiquement plus favorables. Ce schéma est cohérent avec les observations de Houma et *al.*, (2022), qui rapportent des feuilles plus grandes dans les bioclimats humides, ainsi qu'avec les travaux de Yang et *al.*, (2023) et Poorter et *al.*, (2009), montrant qu'une plus grande surface foliaire, liée à une largeur accrue, améliore la capture de lumière et la photosynthèse, tant que l'eau est

disponible. L'épaisseur foliaire, en parallèle, constitue un trait fonctionnel clé favorisant la rétention d'eau et la tolérance au stress thermique (Coneva et *al.*, 2017 ; Doghbage et *al.*, 2023 ; Wang et *al.*, 2024).

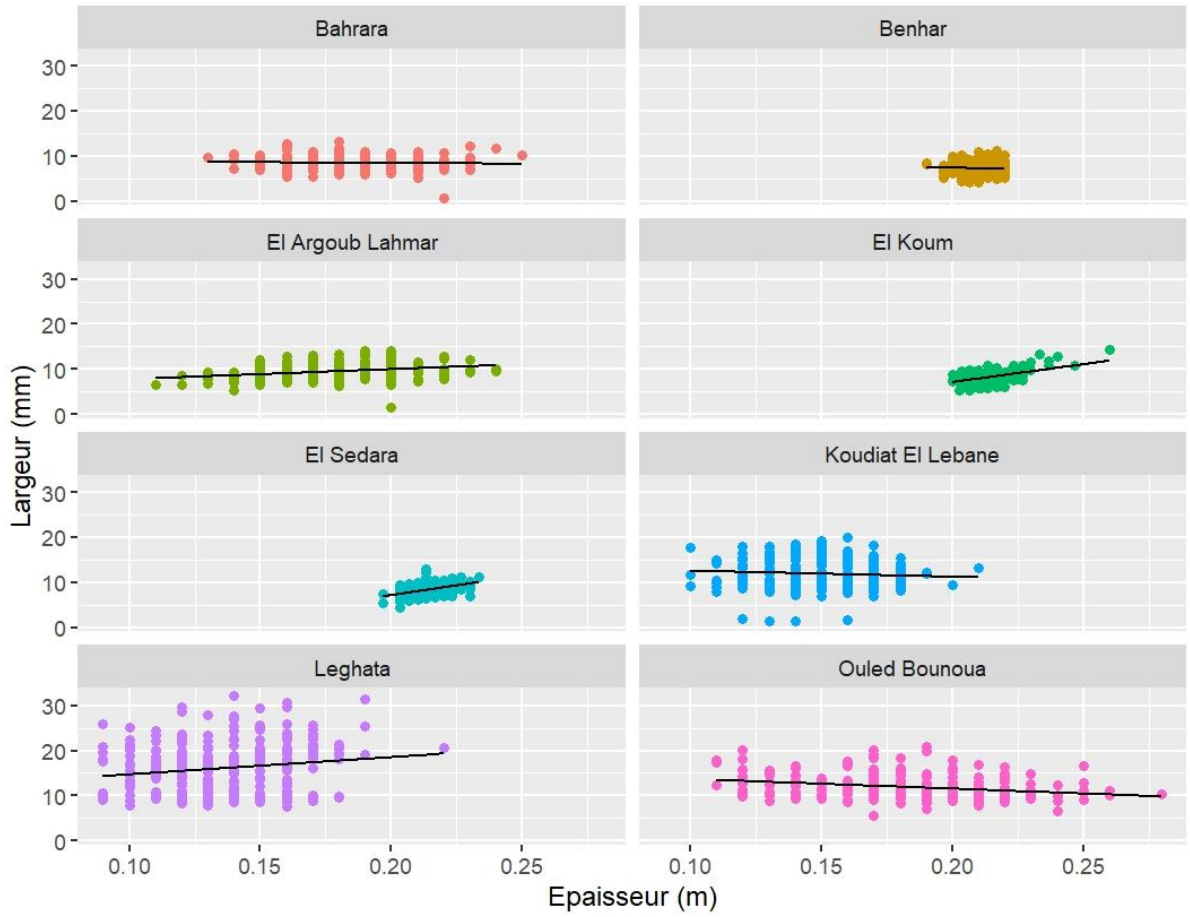

Figure 30 : Relation entre la largeur et l'épaisseur foliaire chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

En revanche, dans d'autres stations comme Bahrara, Benhar ou Koudiat El Lebane, la corrélation est plus faible, voire absente, indiquant une dissociation partielle entre la largeur et l'épaisseur. Maraghni et *al.*, (2011) indiquent que cette indépendance traduit une réponse plus différenciée aux contraintes locales, telles que le déficit hydrique, qui limite la croissance foliaire de manière sélective. De telles réponses suggèrent que certains traits peuvent être priorisés selon les pressions environnementales spécifiques. La réduction simultanée de la largeur et de l'épaisseur foliaire est d'ailleurs reconnue comme une stratégie xeromorphique permettant de limiter la transpiration et d'améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau (Torres-García, 2021 ; Lozia *al.*, 2023 ; Doghbage et *al.*, 2023).

Cette variabilité intersites dans l'intensité de la relation entre la largeur et l'épaisseur témoigne ainsi de l'adaptation physiologique de *Z. lotus*, espèce phréatophyte à comportement anisohydrique, capable de puiser l'eau en profondeur (López-Rodríguez et *al.*, 2020 ; Torres-García, 2021). Lorsqu'elle dispose d'un accès suffisant à l'eau, elle peut maintenir un développement foliaire optimal ; à l'inverse, une réduction différentielle de ses dimensions foliaires constitue une réponse adaptative efficace aux restrictions hydriques. Ce contrôle fin

de la morphologie traduit une stratégie d'ajustement dynamique, essentielle pour sa survie dans des milieux arides et écologiquement contrastés.

3.6. Corrélation entre la longueur et l'épaisseur foliaires

La matrice de corrélation montre une tendance générale à une relation négative entre la longueur et l'épaisseur de la feuille chez *Z. lotus*, avec un coefficient de corrélation r = -0.47 (Figure 25). En revanche, la figure ci-dessous met en évidence des tendances contrastées dans la relation entre la longueur et l'épaisseur foliaires en fonction les stations échantillonnées. Dans certaines stations comme Leghata, El Sedara et El Koum, une corrélation positive est observée, suggérant un développement foliaire coordonné où l'allongement des feuilles s'accompagne d'un épaississement foliaire. Ce schéma pourrait refléter des conditions environnementales plus favorables, où une disponibilité en eau suffisante permet le déploiement simultané de traits associés à la croissance (longueur) et à la robustesse (épaisseur). Houma et *al.* (2022) ont d'ailleurs constaté la présence de feuilles plus grandes dans les zones à précipitations élevées, ce qui appuie cette interprétation pour la station de Leghata par exemple. Maraghni et *al.* (2019), quant à eux, ont rapporté un épaississement du mésophylle palissadique dans des conditions non stressantes, soutenant ainsi l'idée d'un développement foliaire amplifié lorsque les contraintes hydriques sont moindres.

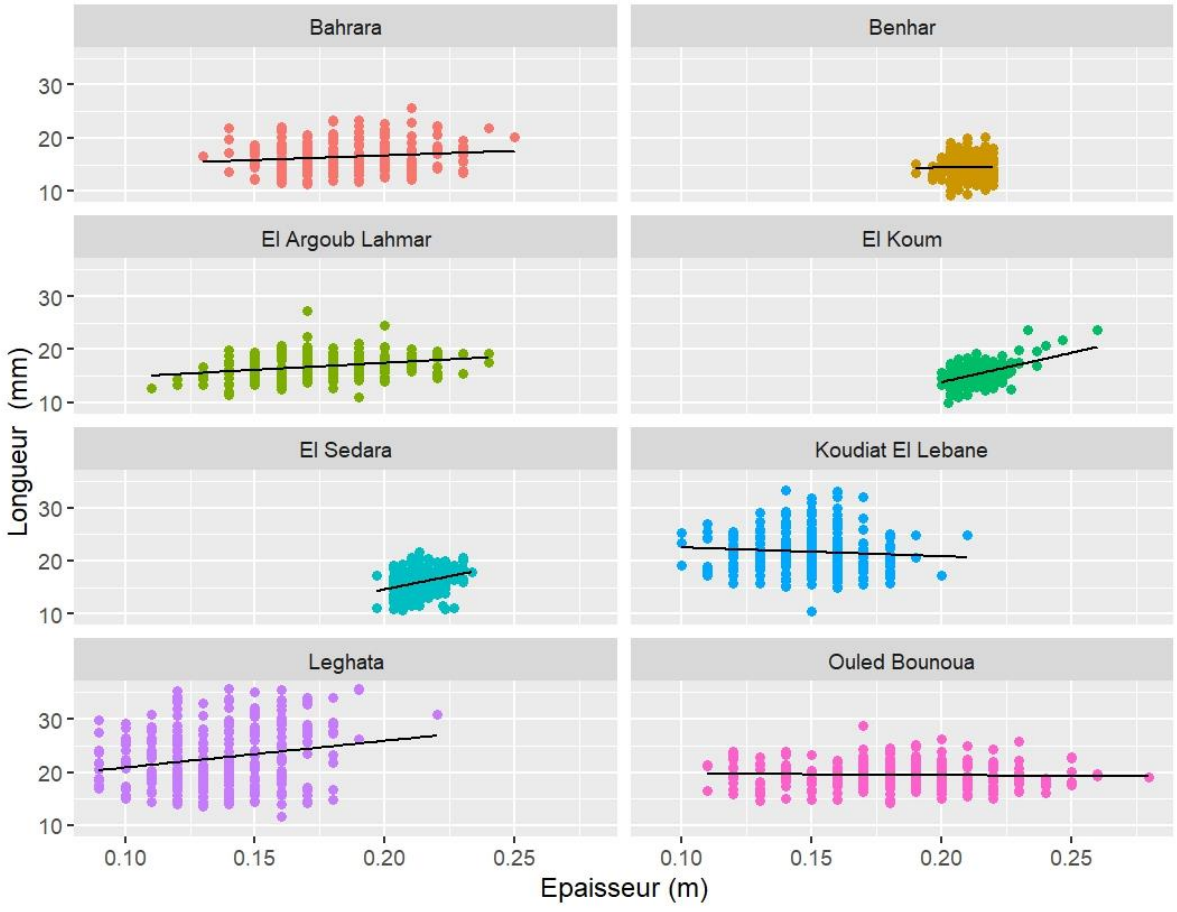

Figure 31 : Relation entre la longueur et l'épaisseur foliaire *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

En revanche, dans des stations telles que Koudiat El Lebane et Benhar, la relation devient légèrement négative : les feuilles les plus longues tendent à être plus fines. Ce compromis morphologique pourrait traduire une stratégie adaptative face à des contraintes hydriques, où l'investissement est priorisé dans la longueur foliaire pour maximiser la capture de lumière, tandis que l'épaisseur est réduite pour limiter les coûts métaboliques. Maraghni et *al.,* (2019) ont également observé, sous stress hydrique, une réduction du mésophylle parallèlement à un épaississement de l'épiderme, conférant aux feuilles une structure plus fine mais mécaniquement renforcée. Une telle configuration permettrait de concilier l'efficacité photosynthétique et conservation de l'eau, en réduisant la surface transpirante tout en maintenant une certaine rigidité tissulaire.

Ces variations inter-sites traduisent la plasticité morpho-anatomique remarquable de *Z. lotus*, que Laamouri et *al.,* (2008), puis plus récemment Torres-García et ses collaborateurs (2021) et Lozia Lorenzo Maria et *al.,* (2023), ont décrite comme un mécanisme adaptatif fondamental face aux contraintes environnementales. L'épaisseur foliaire constitue un trait fonctionnel clé pour la tolérance à la sécheresse, car elle reflète directement l'investissement en structures internes liées à la rétention d'eau. Ainsi, la variabilité observée dans la relation entre la longueur et l'épaisseur des feuilles illustre l'adaptation de *Z. lotus* à son environnement, où les compromis morphologiques permettent d'optimiser la performance foliaire selon le contexte écologique (Coneva et *al.,* 2017 ; Pauli et *al.,* 2017).

3.7. Corrélation entre la surface et l'épaisseur foliaires

La figure 32 illustre la relation entre deux traits morpho-fonctionnels clés « la surface et l'épaisseur foliaire » chez *Z. lotus*, selon les sites d'échantillonnage. La surface foliaire, qui reflète la taille des feuilles, influence directement le bilan hydrique et énergétique, tandis que l'épaisseur traduit l'investissement structurel, souvent associé à la tolérance au stress hydrique. Effectivement, des feuilles plus épaisses témoignent généralement d'une meilleure résistance aux contraintes environnementales (Coneva et *al.,* 2017, Pérez-Harguindeguy et *al.,* 2013 ; Yang et *al.,* 2023).

Les corrélations observées varient entre les stations, révélant des stratégies adaptatives différenciées. Au niveau de la station de Leghata, par exemple, la présence d'une corrélation positive suggère que les individus peuvent investir simultanément dans des feuilles grandes et épaisses. Houma et *al.,* (2022) notent que cette configuration est typique d'environnements moins contraignants, où la disponibilité en eau et les stress thermiques sont moindres. Cette tendance est confirmée par les travaux de Coneva et *al.,* (2017) et Liu et *al.,* (2017), qui montrent que cette combinaison de traits permet à la fois d'optimiser la capture lumineuse et de renforcer la robustesse des tissus foliaires.

En revanche, dans des stations plus arides et contraignantes comme El Koum (aride inférieur) et Benhar (aride moyen), une corrélation négative est observée. En effet, les feuilles épaisses tendent à être de plus petite surface. Selon Cornelissen et *al.,* (2003), cette configuration reflète une stratégie d'économie hydrique, visant à limiter la transpiration. Ce type d'architecture

foliaire améliore la résistance à la déshydratation, au rayonnement solaire intense et au stress thermique (Doghbage et *al.*, 2023 ; Bär Lamas et *al.*, 2016 ; Lozia et *al.*, 2023).

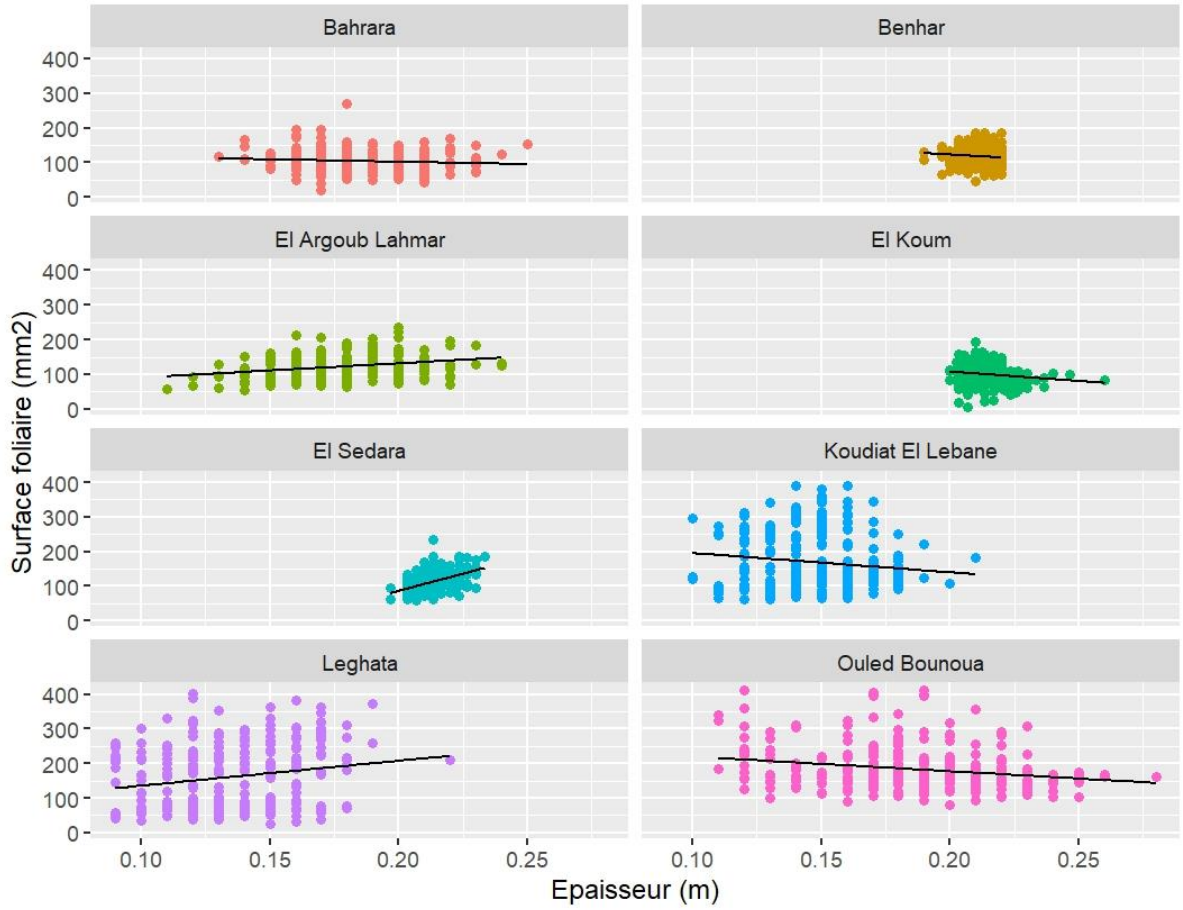

Figure 32 : Relation entre la surface foliaire et l'épaisseur foliaire chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

Ces contrastes soulignent la remarquable plasticité morphologique de *Z. lotus*. Il a été démontré que cette espèce a la capacité à ajuster ses traits foliaires en réponse aux variations locales des contraintes édapho-climatiques (Amara et Benabdeli, 2020 ; Torres-García et *al.*, 2021 ; Krintza et *al.*, 2024 ; Zheng et *al.*, 2023). Cette variabilité intra-spécifique constitue un atout majeur pour la résilience de *Z. lotus* face aux dynamiques d'aridification croissante de ses habitats.

3.8. Corrélation entre la largeur foliaire et l'indice LDMC

La corrélation négative observée entre la largeur foliaire et le LDMC chez *Z. lotus* met en évidence des stratégies adaptatives différentielles selon les sites d'échantillonnage (Figure 33). Globalement, des feuilles plus étroites sont associées à un LDMC plus élevé, traduisant une plus grande densité tissulaire et une rigidité accrue. Cornelissen et ses collaborateurs (2003) ont montré que ce type de structure est typique des espèces adoptant une stratégie conservatrice, notamment dans les milieux arides, car il permet de réduire les pertes hydriques et d'allonger la durée de vie des feuilles. Cette idée est appuyée par les travaux de Pérez-Harguindeguy, qui

a souligné en 2013 puis en 2016 que le LDMC est un indicateur central de la résistance mécanique et de la tolérance au stress abiotique.

Dans la même lignée, Coneva et *al.* (2017) ainsi que Wang et *al.* (2024) ont confirmé que des feuilles à LDMC élevé sont mieux adaptées aux conditions de sécheresse. Afzal (2017) et Doghbage (2023) ont également souligné que l'augmentation du LDMC est souvent accompagnée d'une réduction de la surface foliaire, ce qui limite la transpiration et optimise la conservation de l'eau.

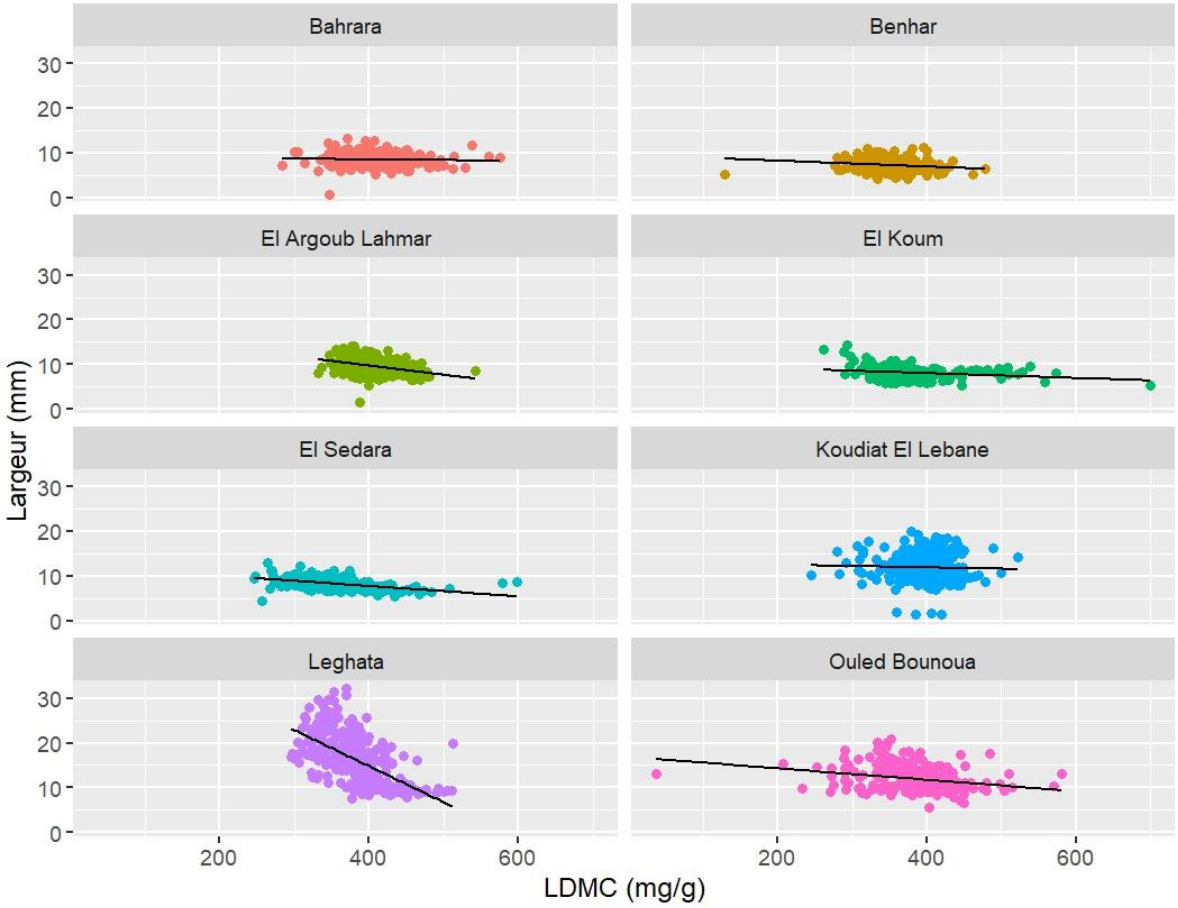

Figure 33 : Relation entre la largeur et le LDMC chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

Cette relation négative entre largeur et LDMC suggère ainsi que *Z. lotus*, en situation de stress hydrique, investit davantage dans des structures foliaires robustes plutôt que dans l'élargissement des feuilles. Maraghni et *al.* (2011-2019) ont d'ailleurs observé que cette espèce développe un épiderme épaissi et réorganise son mésophylle en réponse au déficit hydrique, ce qui appuie l'interprétation de notre étude.

Finalement, les variations inter-sites dans la relation entre largeur foliaire et LDMC illustrent la plasticité phénotypique remarquable de *Z. lotus*. Les travaux de Lozia et *al.* (2023), ainsi que ceux de Krintza (2024), ont bien mis en lumière cette capacité d'ajustement fin aux contraintes environnementales. L'espèce semble ainsi réguler activement ses traits fonctionnels en fonction

de la disponibilité en eau, assurant un équilibre entre performance physiologique et conservation des ressources dans des environnements contrastés, un comportement déjà bien décrit par Doghbage (2023).

3.9. Corrélation entre la largeur de la canopée et l'indice LDMC

La relation inverse observée entre la teneur en matière sèche foliaire (LDMC) et la largeur de la canopée chez *Z. lotus*, mise en évidence par nos analyses de corrélation, souligne l'existence de deux stratégies écophysiologiques contrastées, directement liées à la plasticité phénotypique de l'espèce face à l'aridité. Une corrélation négative nette a été observée dans les stations de Benhar et El Koum (Figure 34), indiquant que l'augmentation du LDMC s'accompagne d'une réduction de la largeur de la canopée. Cette tendance, bien que plus modérée, apparaît également à El Sedara. En revanche, dans d'autres sites comme Bahhara, El Argoub Lahmar, Koudiat El Lebane, Leghata et Ouled Bounoua, la relation entre les deux variables est quasi inexistante, traduisant une absence de lien marqué entre ces deux variables. Cela confirme que la relation entre les traits foliaires et l'architecture de la canopée est fortement modulée par des facteurs locaux spécifiques à chaque station. Nous pouvons déduire, par conséquent, que dans les milieux les plus arides, le *Z. lotus* tend à s'investir dans le développement en largeur de sa biomasse aérienne et en matière sèche foliaire.

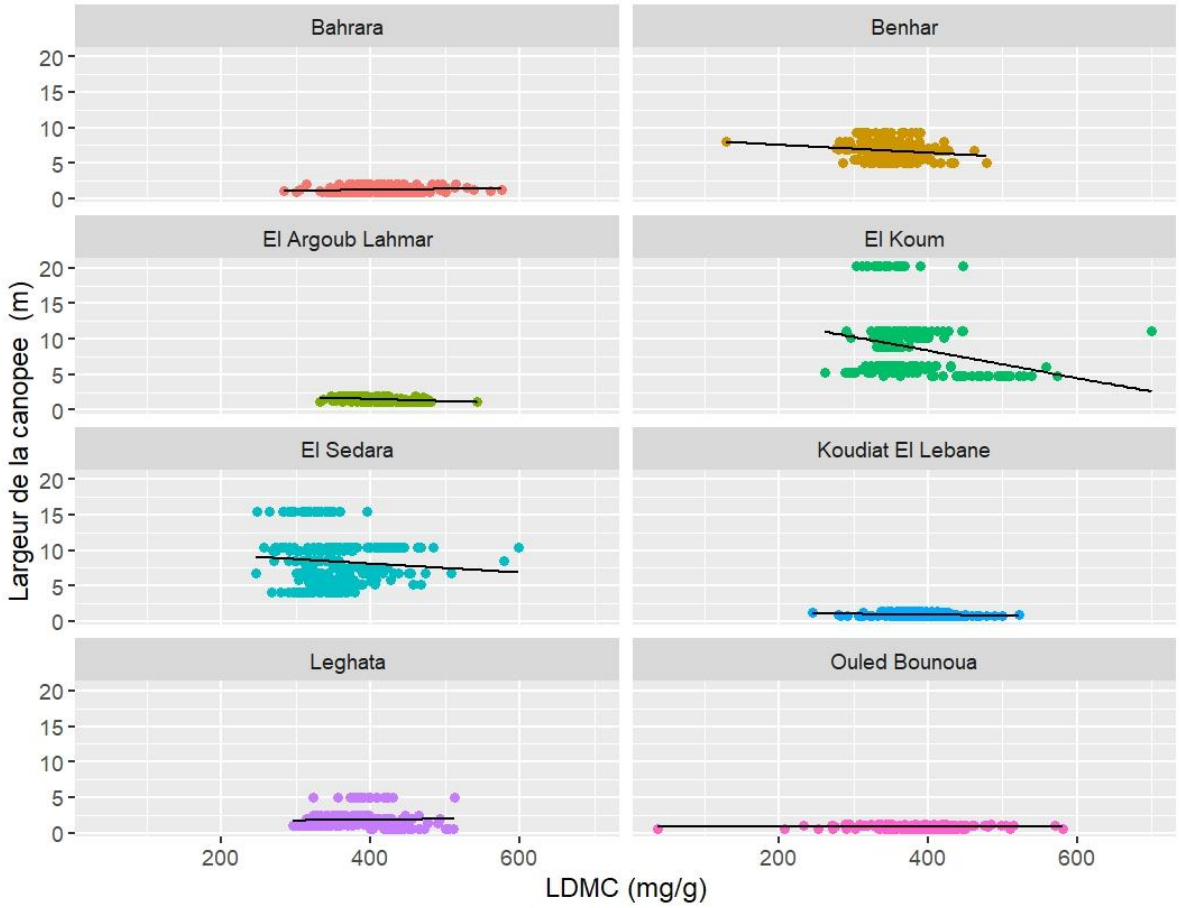

Figure 34 : Relation entre la largeur de la canopée et le LDMC chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

Dans les sites montrant une corrélation négative significative, des individus à fort LDMC présentent une canopée plus réduite. Comme l'expliquent Pérez-Harguindeguy et *al.* (2013), un LDMC élevé reflète la présence de feuilles plus denses, rigides et durables, typiques d'une stratégie conservative. Ce type de stratégie est adapté aux environnements contraignants, car il favorise la longévité des tissus végétatifs au détriment de la croissance latérale (Poorter et *al.*, 2009 ; Torres-García et *al.*, 202 ; Houma et *al.*, 2022). Effectivement, les feuilles plus épaisses contribuent à réduire les pertes hydriques en limitant la surface d'évapotranspiration (Cornelissen et *al.*, 2003 ; Coneva et *al.*, 2017 ; Lozia et *al.*, 2023). Par ailleurs, Torres-García et *al.*, (2021) suggèrent que l'architecture fermée observée chez certains individus parfois décrite comme une forme « en cage » peut résulter d'une adaptation morphologique à l'aridification ou au surpâturage.

À l'opposé, nos données révèlent qu'à El Koum, des individus à faible LDMC possèdent des canopées plus étendues. Ce profil correspond à une stratégie écophysiologique dite acquisitive. D'après les travaux de Pérez-Harguindeguy et *al.*, (2013) et Zhong et *al.*, (2023), cette stratégie repose sur le développement de feuilles plus fines, souples et à renouvellement rapide, conférant une productivité élevée dans les environnements plus cléments. Une canopée plus large permet, comme l'ont souligné Wangyal (2012) et Liu et *al.*, (2022), une meilleure capture de la lumière, tandis que Torres-García et *al.*, (2021) y associent une assimilation carbonée plus efficace. Toutefois, cette stratégie suppose une exigence hydrique plus importante, ce qui est cohérent avec le comportement anisohydrique de *Z. lotus* décrit par Torres-García (2021), qui maintient son activité photosynthétique même durant la saison sèche.

La forte hétérogénéité des relations observées entre les sites, marquée par une dispersion importante des valeurs, reflète une plasticité intraspécifique prononcée. Krintza et *al.*, (2024) et Lozia et *al.*, (2023) soulignent cette capacité de l'espèce à ajuster ses traits fonctionnels et son architecture selon les variations édapho-climatiques. Doghbage et *al.*, (2023) ainsi que Zheng et *al.*, (2023) considèrent cette flexibilité comme un atout majeur dans la résilience écologique des espèces xériques. Enfin, en tant qu'espèce phréatophyte dépendante des ressources hydriques souterraines, *Z. lotus* ajuste la taille de sa canopée en fonction de la disponibilité en eau (López-Rodríguez et *al.*, 2020 ; Wang et *al.*, 2024). Cette capacité d'adaptation structurelle et fonctionnelle lui permet de survivre dans des milieux caractérisés par une forte imprévisibilité climatique, comme l'avaient déjà mis en évidence Arndt et *al.*, (2001) puis confirmés par Maraghni et *al.*, en 2019.

3.10. Corrélation entre le LDMC et le SLA

La relation négative observée entre la surface foliaire spécifique (SLA) et la teneur en matière sèche des feuilles (LDMC) chez *Z. lotus*, confirmée par l'analyse de corrélation, révèle une structuration fonctionnelle marquée entre deux stratégies écologiques opposées (Figure 35). Cette corrélation inverse suggère que les feuilles présentant une SLA élevé donc fines, légères et à croissance rapide sont systématiquement associées à un LDMC faible, indicateur d'une faible densité tissulaire. Selon Pérez-Harguindeguy et *al.* (2013), ce profil correspond à une stratégie dite « acquisitive », favorisant une assimilation rapide des ressources et une productivité élevée, dans des environnements relativement permissifs. Ce schéma est bien

illustré dans les stations caractérisées par un climat subhumide, Ouled Bounoua et Koudiat El Lebane, où les feuilles présentent à la fois une forte SLA et un faible LDMC, traduisant une dynamique morpho-fonctionnelle typique des contextes écologiquement plus favorables.

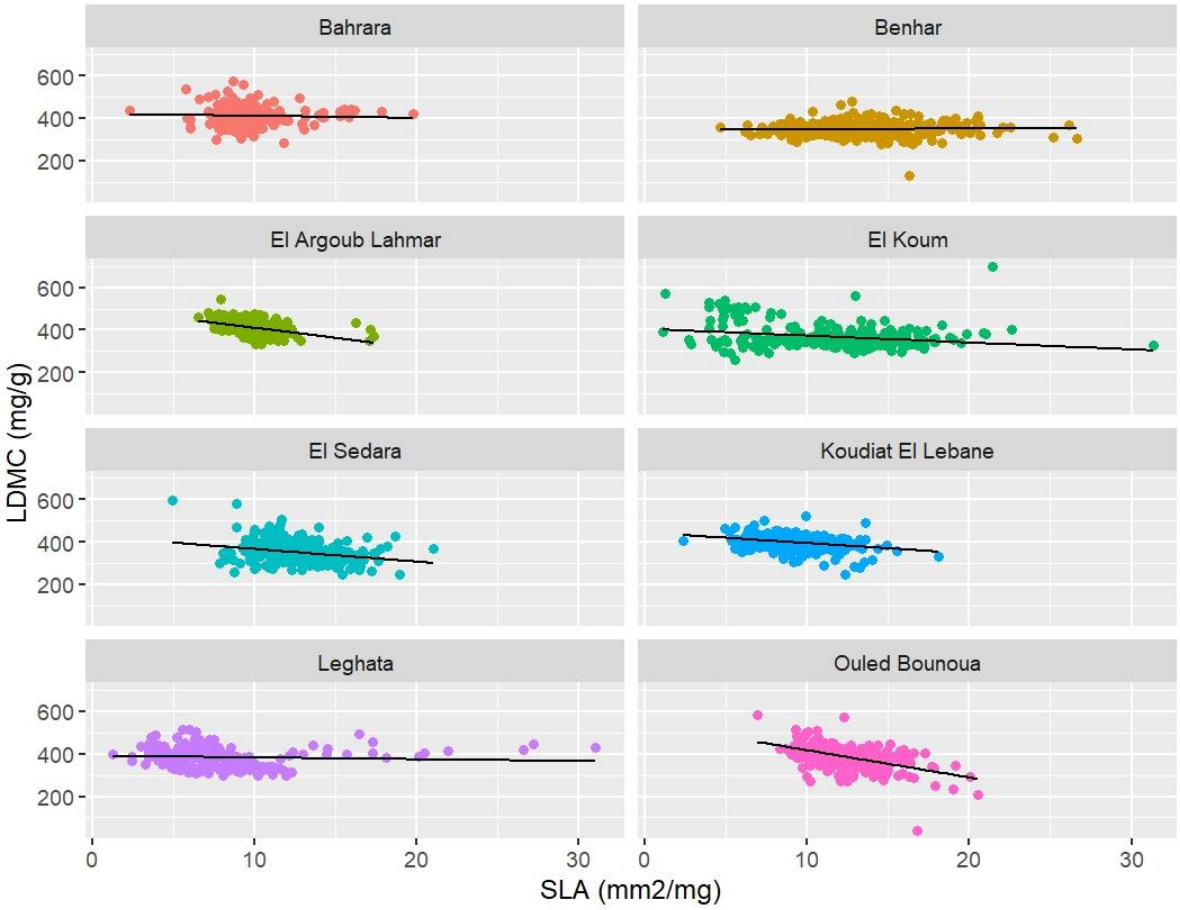

Figure 35 : Relation entre le LDMC et le SLA chez *Z. lotus* selon les huit sites d'échantillonnée.

À l'inverse, des sites comme El Argoub Lahmar, El Sedara et El Koum montrent une configuration fonctionnelle conservatrice. Les individus y développent des feuilles épaisses, rigides et denses traduites par une SLA faible et un LDMC élevé en réponse à des conditions de stress hydrique plus marquées. Maraghni et *al.,* (2019) soulignent que ce type de feuillage, associé à un épaississement de l'épiderme, améliore la résistance mécanique et limite les pertes hydriques, conférant une meilleure tolérance aux environnements xériques. Cette stratégie conservative est également décrite par Torres-García et *al.*, (2021), qui insistent sur la durabilité et la résilience des feuilles à fort LDMC.

Entre ces deux pôles, des stations comme Bahrara et Leghata se distinguent par une faible variabilité du couple SLA-LDMC, ce qui pourrait traduire une adaptation atténuée ou un fonctionnement écophysiologique plus stabilisé sous contraintes homogènes. Cette observation est cohérente avec les travaux de Lozia et *al.* (2023), qui ont mis en évidence des réponses plus restreintes du feuillage dans des habitats à faibles gradients d'aridité.

Par ailleurs, la corrélation négative observée entre la longueur et la largeur foliaire avec la SLA, couplée à une corrélation positive avec l'épaisseur foliaire et l'indice LDMC, confirme l'existence d'un axe morpho-fonctionnel cohérent. Wang et *al.,* (2016) et Cornelissen et *al.,* (2003) ont déjà décrit cette coordination, où des feuilles longues et larges tendent à être plus fines et moins denses, optimisant ainsi la capture de lumière et l'efficacité photosynthétique dans des conditions propices.

Enfin, la variabilité de l'intensité de cette relation selon les stations reste forte dans certains cas, plus atténuée dans d'autres met en lumière la plasticité adaptative de *Z. lotus*. Comme le soulignent Poorter et *al.,* (2009) et Zheng et *al.* (2023), cette espèce ajuste ses traits fonctionnels en réponse à des gradients écologiques fins, que ce soit en température, en lumière ou en disponibilité en eau. Cette capacité à moduler son architecture foliaire lui permet d'optimiser son fonctionnement physiologique face aux contraintes des milieux arides et semi-arides (Doghbage et *al.,* 2023 ; López-Rodríguez et *al.,* 2020).

Conclusion

Conclusion

Dans un contexte de changement climatique où l'aridité s'intensifie, notamment dans les régions méditerranéennes, comprendre les réponses adaptatives des plantes est devenu une priorité tant sur le plan écologique que scientifique. Ce mémoire a porté sur *Ziziphus lotus* (L.) Desf., un arbuste emblématique des milieux arides algériens, dans le but d'évaluer comment ses traits fonctionnels expriment sa capacité d'ajustement face aux gradients d'aridité. Ce choix n'est pas anodin : *Z. lotus* occupe une large gamme d'habitats, joue un rôle central dans la stabilisation des sols, et interagit fortement avec la biodiversité locale.

L'étude des traits morpho-fonctionnels, notamment la surface foliaire spécifique (SLA), la teneur en matière sèche des feuilles (LDMC), la taille, l'épaisseur, la hauteur et la largeur de la canopée, a mis en évidence une variabilité significative selon les stations. Ces différences révèlent une grande plasticité adaptative, avec une tendance claire à adopter des stratégies conservatrices dans les milieux les plus arides : feuilles plus épaisses, plus petites, densité tissulaire plus élevée, et hauteur réduite. Ces ajustements permettent au *Z. lotus* de limiter la perte d'eau, d'améliorer l'efficience de ses échanges gazeux, et de maintenir un fonctionnement physiologique minimal dans des environnements très contraignants. Ces résultats confirment donc le lien étroit entre les traits fonctionnels et la réponse adaptative à l'aridité, et répondent directement à la problématique posée.

En allant au-delà des données chiffrées, ce travail a surtout permis de mieux comprendre comment une espèce ligneuse, bien implantée dans les paysages arides algériens, module activement ses caractéristiques pour faire face à un déficit hydrique croissant. Il met en lumière l'utilité des traits fonctionnels comme indicateurs écologiques fiables et accessibles sur le terrain. Il confirme aussi le rôle clé de *Z. lotus* dans le fonctionnement des écosystèmes secs, en tant que plante-nurse, espèce ingénieure, et ressource médicinale ou fourragère. L'étude apporte ainsi une contribution utile à la connaissance des stratégies adaptatives végétales en contexte méditerranéen aride.

Cependant, certaines limites doivent être reconnues. Le travail s'est basé sur une seule période de prélèvement, correspondant à la phase de feuillaison de *Z. lotus*, ce qui constitue la seule fenêtre possible pour l'étude des traits foliaires. Néanmoins, cette approche ponctuelle ne permet pas d'explorer la variabilité interannuelle ou les effets d'événements climatiques exceptionnels. Le nombre de stations reste restreint, ce qui limite la portée des généralisations. Par ailleurs, l'analyse reste centrée sur les traits morpho-fonctionnels, sans intégrer les dimensions physiologiques, génétiques ou microbiennes qui enrichiraient la compréhension globale des mécanismes d'adaptation.

Ces limites ouvrent justement des perspectives intéressantes. Il serait pertinent de compléter cette étude par un suivi temporel pour mieux cerner la variabilité intra-annuelle des traits. L'exploration des interactions de *Z. lotus* avec son microbiote, notamment les champignons endophytes ou rhizosphériques, pourrait également offrir un éclairage nouveau sur ses capacités adaptatives. En parallèle, l'intégration de paramètres édaphiques, comme la texture du sol,

permettrait de mieux comprendre l'influence des propriétés physiques du sol sur l'expression des traits fonctionnels. Des approches complémentaires intégrant la physiologie (potentiel hydrique, conductance stomatique) ou la génétique (marqueurs d'adaptation) permettraient d'affiner les interprétations. Enfin, les résultats de ce travail encouragent l'usage de *Z. lotus* dans des programmes de restauration écologique ou de lutte contre la désertification, où sa résilience, sa valeur patrimoniale et ses nombreux usages en font une espèce ressource stratégique.

Références bibliographique

Références bibliographiques

1. Abdoul-Azize, S., Bendahmane, M., Hichami, A., Dramane, G., Simonin, A.-M., Benammar, C., Sadou, H., Akpona, S., El Boustani, E.-S., et Khan, N. A. (2013). Effects of *Zizyphus lotus* L. (Desf.) polyphenols on Jurkat cell signaling and proliferation. *International immunopharmacology*, 15(2), 364–371. https://doi.org/10.1016/j.intimp.2012.11.013
2. Aidoud, A. (1983). Contribution à l'étude des écosystèmes steppiques du Sud-Oranais : phytomasse, productivité primaire et applications pastorales. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Alger. 256 p. + Annexe.
3. Aidoud, A., Le Floc'h, E., et Le Houérou, H. N. (2006). Les steppes arides de l'Afrique du Nord. *Sécheresse*, 17(1), 19–30.
4. Ait Bouzid, H., Bijla, L., Ibourki, M., Asbbane, A., Sakar, E. H., Koubachi, J., et Gharby, S. (2024). Nutritional potential of *Ziziphus lotus* (L.) Lam. almonds as compared to some oilseeds from Morocco : evidence from proximate composition, mineral profiling, and oil physicochemical traits. *Journal of food quality*, 2024(1), 6685429. https://doi.org/10.1155/2024/6685429
5. Ali Rahmani, S. E., Chibane, B., et Boucefiène, A. (2017). Estimation de la recharge des eaux souterraines en zone semi-aride : étude de cas dans la région de Djelfa (Algérie). *Applied water science*, 7(5), 2255–2265.
6. Ali Rahmani, S. E., et Chibane, B. (2018). Délimitation de la zone de recharge potentielle à l'aide d'un modèle hybride, cas du bassin versant de Djelfa Hadjia. *Aan journal of geosciences*, 11(214).
7. Amara, M., et Benabdeli, K. (2020). Potentialités écologiques de *Zizyphus lotus* et possibilités de développement durable des espaces arides : cas de la région de Naâma (Algérie). *Geo-Eco-Trop.*, 44(2), 269–277.
8. Amri, K., Rabai, G., Benbakhti, I. M., et Khennouche, M. N. (2017). Cartographie géologique du district de Djelfa (Atlas saharien, Algérie), à l'aide des données Landsat 7 ETM+ : une méthode alternative pour discerner la lithologie et les éléments structuraux. *Arabian journal of geosciences*, 10(87).
9. Anderegg, W. R. L., Hicke, J. A., Fisher, R. A., Allen, C. D., Aukema, J., Bentz, B., Hood, S., Lichstein, J. W., Macalady, A. K., McDowell, N., Pan, Y., et al. (2015). Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New phytologist*, 208(3), 674–683. https://doi.org/10.1111/nph.13477
10. Arndt, S. K., Clifford, S. C., Wanek, W., Jones, H. G., et Popp, M. (2001). Physiological and morphological adaptations of the fruit tree *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive drought stress. *Tree physiology*, 21(11), 705–715. https://doi.org/10.1093/treephys/21.11.705
11. Baba Aïssa, F. (1999). Encyclopedie des plantes utiles. Flore d'Algérie et du Maghreb. Substances végétales d'Afrique, d'orient et d'occident. Librairie Moderne, Rouiba, 327 p. + Annexes.

12. Bär Lamas, M. I., Carrera, A. L., et Bertiller, M. B. (2016). Meaningful traits for grouping plant species across arid ecosystems. *Journal of plant research*, 129(3), 449–461. https://doi.org/10.1007/s10265-016-0803-6

13. Belaid, L., et Fakroun, M. F. (2023). Évaluation de la cartographie du facteur C de l'équation universelle révisée de perte de sol (RUSLE), dans la région d'Ain Maabed, Djelfa, Algérie. Publié le 7 juin 2023.
14. Benaradj, A., Bouazza, M., et Boucherit, H. (2015). Écologie du groupement à *Pistacia atlantica* dans l'Atlas saharien oranais (Bechar-Algérie). *Fl. Medit*, 25, 87–94.
15. Bencheikh, N., Radi, F. Z., Fakchich, J., Elbouzidi, A., Ouahhoud, S., Ouasti, M., Bouhrim, M., Ouasti, I., Hano, C., et Elachouri, M. (2023). Ethnobotanical, phytochemical, toxicological, and pharmacological properties of *Ziziphus lotus* (L.) Lam. : a comprehensive review. *Pharmaceuticals*, 16(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/ph16040575
16. Bendifallah, L., Tchoulak, Y., Djouabi, M., Oukili, M., et Ghezraoui, R. (2015). Phytochemical study and antimicrobial activity of *Origanum vulgare* L. (Lamiaceae) in Boumerdes mountainous region (Algeria). *Journal of medical and bioengineering*, 4(6), 471–474.
17. Berrached, R. (2017). Contribution à l'étude spatio-temporelle des stations à armoise blanche (*Artemisia herba-alba* Asso.) des hautes plaines steppiques et études phénologiques. Thèse de doctorat 3e cycle, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger. 155 p. + Annexes.
18. Berrached, R., Kadik, L., Mouheb, H. A., et Prinzing, A. (2017). Deep roots delay flowering and relax the impact of floral traits and associated pollinators in steppe plants. *PLOS ONE*, 12(3), e0173921. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173921
19. Bourenane, H., Bouhadad, Y., et Tas, M. (2018). Liquefaction hazard mapping in the city of Boumerdès, Northern Algeria. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 77, 329–342.
20. Cacciola, A., D'Angelo, V., Raimondo, F. M., Germanò, M. P., Braca, A., et De Leo, M. (2022). *Ziziphus lotus* (L.) Lam. as a source of health promoting products : metabolomic profile, antioxidant and tyrosinase inhibitory activities. *Chemistry & biodiversity*, 19(6), e202200237. https://doi.org/10.1002/cbdv.202200237
21. Cadi, H. E., Bouzidi, H. E., Selama, G., Cadi, A. E., Ramdan, B., Oulad El Majdoub, Y., Alibrando, F., Dugo, P., Mondello, L., Fakih Lanjri, A., Brigui, J., et Cacciola, F. (2020). Physico-chemical and phytochemical characterization of Moroccan wild jujube *Zizyphus lotus* (L.) fruit crude extract and fractions. *Molecules*, 25(22), Article 22. https://doi.org/10.3390/molecules25225237
22. Cheng, T.-L., Pan, Y.-X., Wang, X.-P., et Li, Y. (2023). Community plant height modulated by aridity promotes spatial vegetation patterns in Alxa plateau in Northwest China. *Ecology and evolution*, 13(2), e9823. https://doi.org/10.1002/ece3.9823
23. Chouaibi, M., Mahfoudhi, N., Rezig, L., Donsì, F., Ferrari, G., et Hamdi, S. (2012). Nutritional composition of *Zizyphus lotus* L. seeds. *Journal of the science of food and agriculture*, 92(6), 1171–1177. https://doi.org/10.1002/jsfa.4659

24. Coneva, V., Frank, M. H., Balaguer, M. A. de L., Li, M., Sozzani, R., et Chitwood, D. H. (2017). Genetic architecture and molecular networks underlying leaf thickness in desert-adapted tomato *Solanum pennellii*. *Plant physiology*, 175(1), 376–391. https://doi.org/10.1104/pp.17.00790
25. Constantinou, E., Sarris, D., et Vogiatzakis, I. N. (2021). The possible role of *Ziziphus lotus* as an ecosystem engineer in semiarid landscapes. *Journal of arid environments*, 195, 104614. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104614
26. Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Reich, P. B., Ter Steege, H., Morgan, H. D., Van Der Heijden, M. G. A., Pausas, J. G., et Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian journal of botany*, 51(4), 335–380. https://doi.org/10.1071/BT02124
27. Dai, X., Jia, X., Zhang, W., Bai, Y., Zhang, J., Wang, Y., et Wang, G. (2009). Plant height–crown radius and canopy coverage–density relationships determine above-ground biomass–density relationship in stressful environments. *Biology letters*, 5(4), 571–573. https://doi.org/10.1098/rsbl.2009.0228
28. Département de la Planification et de l'Aménagement du Territoire (DPAT). (2006). Monographie de la wilaya de Djelfa. 296 p. Éditions DPAT.
29. Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires (DPSB). (2012).
30. Dobignard, A., et Chatelain, C. (2012). Index synonymique de la flore d'Afrique du Nord. Dicotyledoneae : Oleaceae à Zygophyllaceae. Volume 5. Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève, Genève, 451 p.
31. Doghbage, A., Belhadj, S., Belhouadjeb, F. A., Boukerker, H., Mevy, J. P., Gauquelin, T., Tonetto, A., Merdas, S., Touati, B., Saimi, F., Rahem, R., Derridj, A., Hassen, F. F., et Soufan, W. (2023). Leaf morphological and epidermal traits variability along environmental gradients in ten natural populations of *Pistacia lentiscus*. *Life*, 13(7), Article 7. https://doi.org/10.3390/life13071617
32. El Yakoubi, N., El Ahmed, A., Rehhali, M., Ansari, Z. N., Bounab, L., El, K. M. L., et El, B. B. (2024). Assessment of phytochemical, antioxidant and antibacterial properties of *Ziziphus lotus* fruit extracts. *Ecological engineering & environmental technology*, 25(11). https://doi.org/10.12912/27197050/192826
33. Ghafoul, M., Dellal, A., Latreche, A., et Hadjadj, K. (2019). Étude de la désertification dans les parcours steppiques algériens : cas de la région de Djelfa. *Azarian journal of agriculture*, 6(5), 150–158.
34. Ghazghazi, H., Aouadhi, C., Riahi, L., Maaroufi, A., et Hasnaoui, B. (2014). Fatty acids composition of Tunisian *Ziziphus lotus* L. (Desf.) fruits and variation in biological activities between leaf and fruit extracts. *Natural product research*, 28(14), 1106–1110. https://doi.org/10.1080/14786419.2014.913244
35. Ghazi-Yaker, A., Kraak, B., Houbraken, J., Houali, K., et Saadoun, N. (2023). Diversity of epiphytic and endophytic fungal communities associated with leaves of *Ziziphus lotus* (L.) Lam. from Algeria. *Polish journal of ecology*, 70(4), 159–174. https://doi.org/10.3161/15052249PJE2022.70.4.003
36. Ghedira, K. (2013). *Ziziphus lotus* (L.) Desf. (Rhamnaceae) : jujubier sauvage. *Phytothérapie*, 11(3), 149–153. https://doi.org/10.1007/s10298-013-0776-8

37. Gorai, M., Maraghni, M., et Neffati, M. (2010). Relationship between phenological traits and water potential patterns of the wild jujube *Ziziphus lotus* (L.) Lam. in southern Tunisia. *Plant ecology & diversity*, 3(3), 273–280. https://doi.org/10.1080/17550874.2010.500337
38. Gounot, M. (1969). Méthodes d'étude quantitative de la végétation. Paris : Masson & Cie, 314 p.
39. Guendouz. (2018). Djelfa, réalité et perspective. *Revue Haqa'iq des études psychologiques et sociales*, (12), 168–169. Université de Djelfa.
40. Guesmi Boubakeur, S., Sahnoune, M., et Chakali, G. (2017). Analyse des relevés de température de l'air de la station météorologique de Djelfa de 1975 à 2014 : la réalité du réchauffement climatique de Djelfa. *International journal of global warming*, 12(1), 66–84.
41. Halitim, A. (1988). Sols des régions arides d'Algérie. Office des Publications Universitaires, Alger, 384 p.
42. Hanifi, N., Kadik, L., et Guittonneau, G.-G. (2007). Analyse de la végétation des dunes littorales de Zemmouri (Boumerdès, Algérie). *Acta botanica gallica*, 154(1), 63–76.
43. Hirche, A., Salamani, M., Abdellaoui, A., Benhouhou, S., et Valderrama, J. M. (2011). Landscape changes of desertification in arid areas : the case of south-west Algeria. Environmental monitoring and assessment, 179, 403–420. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1744-5
44. Houma, I. (2022). *Ziziphus lotus* (L.) morphological description from wild populations in Algeria. *Agrobiologia*, 12(1), 2915–2931.
45. Iozia, L. M., Crisafulli, V., et Varone, L. (2022). Climatic variations along an aridity gradient drive significant trait intraspecific variability in Mediterranean species. *bioRxiv*. https://doi.org/10.1101/2022.08.21.504686
46. Shaw, E. M. (1983). Hydrology in practice. Van Nostrand Reinhold, Wokingham, Royaume-Uni, XIII, 569 p.
47. Khader, M., Mederbal, K., et Chouieb, M. (2014). Suivi de la dégradation de la végétation steppique à l'aide de la télédétection : cas des parcours steppiques de la région de Djelfa (Algérie). *Courrier du savoir*, (18), 1–8.
48. Krintza, N., Dener, E., et Seifan, M. (2024). Stress induces trait variability across multiple spatial scales in the arid annual plant *Anastatica hierochuntica*. *Plants*, 13(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/plants13020256
49. Laamouri, A., Ammari, Y., Albouchi, A., Sghaier, T., Mguis, K., et Akrimi, N. (2008). Étude comparative de la croissance et du développement du système racinaire de trois espèces de jujubier en Tunisie. *Geo-eco-trop*, 32, 37–46.
50. Lauriks, F. S., Van De Put, H. A. L., De Pauw, D. J. W., et Steppe, K. (2017). Use of leaf thickness sensors in horticultural crops. *Acta horticulturae*, 1182, 79–86. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1182.9
51. Le Houérou, H. N. (1995). Considérations biogéographiques sur les steppes arides du nord de l'Afrique. *Sécheresse*, 6(3), 167–182.
52. Liiv, J., Mefti, M., Poolakese, M., Rikmann, E., et Shanskiy, M. (2025). Innovative reforestation strategies to combat desertification in Algeria : insights from the Djelfa region. *Sustainability*, 17(2), 715.

53. Liu, H., Gleason, S. M., Hao, G., Hua, L., He, P., Goldstein, G., et Ye, Q. (2019). Hydraulic traits are coordinated with maximum plant height at the global scale. *Science advances*, 5(2), eaav1332. https://doi.org/10.1126/sciadv.aav1332
54. Liu, Z., Zhao, M., Zhang, H., Ren, T., Liu, C., et He, N. (2023). Divergent response and adaptation of specific leaf area to environmental change at different spatio-temporal scales jointly improve plant survival. *Global change biology*, 29(4), 1144–1159. https://doi.org/10.1111/gcb.16518
55. Liu, Z., Zhu, Y., Li, F., et Jin, G. (2017). Non-destructively predicting leaf area, leaf mass and specific leaf area based on a linear mixed-effect model for broadleaf species. *Ecological indicators*, 78, 340–350. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.025
56. López-Rodríguez, M. D., Salinas-Bonillo, M. J., Torres, M. T., Pacheco-Romero, M., Guirado, E., Castro Nogueira, H., et Cabello, J. (2020). Impulsando estrategias colectivas ciencia-gestión-sociedad para conservar el hábitat de *Ziziphus lotus* (Hábitat prioritario 5220). https://doi.org/10.7818/ECOS.1890
57. Mair, P., et Wilcox, R. (2020). Robust statistical methods in R using the WRS2 package. *Behavior research methods*, 52, 464–488. https://doi.org/10.3758/s13428-019-01246-w
58. Maraghni, M., Gorai, M., et Neffati, M. (2010). Seed germination at different temperatures and water stress levels, and seedling emergence from different depths of *Ziziphus lotus*. *South African journal of botany*, 76(3), 453–459. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.02.092
59. Maraghni, M., Gorai, M., et Neffati, M. (2011). The influence of water-deficit stress on growth, water relations and solute accumulation in wild jujube (*Ziziphus lotus*). *Journal of ornamental plants*, 2(2), 63.
60. Maraghni, M., Gorai, M., Neffati, M., et Van Labeke, M. C. (2014). Differential responses to drought stress in leaves and roots of wild jujube, *Ziziphus lotus*. *Acta physiologiae plantarum*, 36(4), 945–953. https://doi.org/10.1007/s11738-013-1473-9
61. Maraghni, M., Gorai, M., Steppe, K., Neffati, M., et Van Labeke, M. C. (2019). Coordinated changes in photosynthetic machinery performance and water relations of the xerophytic shrub *Ziziphus lotus* (L.) Lam. (*Rhamnaceae*) following soil drying. *Photosynthetica*, 57(1), 113–120. https://doi.org/10.32615/ps.2019.025
62. Mekious, S. (2021). Caractéristiques mélissopalynologiques et contenu phénolique du miel de *Ziziphus lotus* produit dans les régions de Djelfa et de Laghouat (Algérie). *Agrobiologia*, 10(3), 2220–2228.
63. Mugasha, W. A., Bollandsås, O. M., et Eid, T. (2013). Relationships between diameter and height of trees in natural tropical forest in Tanzania. *Southern forests : a journal of forest science*, 75(4), Article 4. https://www.ajol.info/index.php/sfjfs/article/view/96850
64. Nedjraoui, D., et Hirche, A. (2016). Surveillance à long terme des écosystèmes steppiques et suivi de la désertification : cas de la steppe du Sud-Ouest oranais (Algérie). In *Séminaire international « Biodiversité et Changements globaux »* (pp. 5–21). Djelfa.
65. Nouidjem, R., Hichem, K., Sakina, M., et Etayeb, B. (2021). Diversity, ecology and therapeutic properties of the medicinal plants in Ziban region (Algeria). *Journal of bioresource management*, 8(1). https://doi.org/10.35691/JBM.1202.0163

66. Ozenda, P. (1958). Flora of Northern and Central Sahara. National Center for Scientific Research.
67. Pauli, D., White, J. W., Andrade-Sanchez, P., Conley, M. M., Heun, J., Thorp, K. R., French, A. N., Hunsaker, D. J., Carmo-Silva, E., Wang, G., et Gore, M. A. (2017). Investigation of the influence of leaf thickness on canopy reflectance and physiological traits in upland and Pima cotton populations. *Frontiers in plant science*, 8. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01405
68. Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., et al. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian journal of botany*, 61, 167–234. https://doi.org/10.1071/BT12225
69. Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., de Vos, A. C., … Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. https://hdl.handle.net/11299/177647
70. Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, É., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., de Vos, A. C., … Al, E. (2016). Corrigendum to : New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian journal of botany*, 64(7–8), 715–716. https://doi.org/10.1071/BT12225_CO
71. Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., et Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA) : a meta-analysis. *The new phytologist*, 182(3), 565–588. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x
72. Pouget, M. (1980). Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algérois. Document ORSTOM, 555 p. ORSTOM.
73. Quézel, P. (1962). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique.
74. R Core Team. (2022). R : A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/
75. Rabie, F. (2019). Effet insecticide des extraits aqueux des feuilles de *Pistacia lentiscus* L. et de *Ziziphus lotus* L. sur les différents stades larvaires de la chenille processionnaire du pin *Haumetopea pityocampa* Schiff. (*Lepidoptera : Thaumetopoeidae*). *Agrobiologia*, 9(1), 1242–1254.
76. Rached, W., Barros, L., Ziani, B. E. C., Bennaceur, M., Calhelha, R. C., Heleno, S. A., Alves, M. J., Marouf, A., et Ferreira, I. C. F. R. (2019). HPLC-DAD-ESI-MS/MS screening of phytochemical compounds and the bioactive properties of different plant parts of *Zizyphus lotus* (L.) Desf. *Food & function*, 10(9), 5898–5909. https://doi.org/10.1039/c9fo01423c
77. Rakotomalala, R. (2015). Analyse de corrélation : étude des dépendances – variables quantitatives. 99 p. Université Lumière Lyon 2.

78. Roose, É., Chebbani, R., et Bourougaa, L. (2001). Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation.
79. Rsaissi, N., Bencharki, B., et Bouhache, M. (2013). Study of some elements of biology of wild jujube *Ziziphus lotus* (L.) Desf. *G.J.B.A.H.S.*, 2(4), 82–89.
80. Salem Cherif, Y., Mezouar, K., Guerfi, M., Sallaye, M., et Dahmani, A. E. A. (2019). Nearshore hydrodynamics and sediment transport processes along the sandy coast of Boumerdes, Algeria.
81. Samojedny Jr, T. J., Garnica-Díaz, C., Grossenbacher, D. L., Adamidis, G. C., Dimitrakopoulos, P. G., Siebert, S. J., Spasojevic, M. J., Hulshof, C. M., et Rajakaruna, N. (2022). Specific leaf area is lower on ultramafic than on neighbouring non-ultramafic soils. *Plant ecology & diversity*, 15(5–6), 243–252. https://doi.org/10.1080/17550874.2022.2160673
82. Snoussi, A., Koubaier, H. B. H., Chouaibi, M., et Bouzouita, N. (2022). Comparative study of the fatty acids and tocopherol profiles, physical properties, and antioxidant activities of *Zizyphus lotus* L. seed oils based on the geographical origin. *Chemistry Africa*, 5(1), 69–78. https://doi.org/10.1007/s42250-021-00294-0
83. Tarhouni, M., Ouled Belgacem, A., Neffati, M., et Chaieb, M. (2007). Dynamique des groupements végétaux dans une aire protégée de Tunisie méridionale. *Cahiers agricultures*, 16(6), 491–495. https://doi.org/10.1684/agr.2007.0046
84. Territoire, D. D. de la P. et de l'Aménagement du, et DPAT. (2009). Monographie de la wilaya de Bejaia 2008. DPAT.
85. The Angiosperm Phylogeny Group, Chase, M. W., Christenhusz, M. J. M., Fay, M. F., Byng, J. W., Judd, W. S., Soltis, D. E., Mabberley, D. J., Sennikov, A. N., Soltis, P. S., et Stevens, P. F. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants : APG IV. *Botanical journal of the Linnean society*, 181(1), 1–20. https://doi.org/10.1111/boj.12385
86. Torres-García, M. T., Salinas-Bonillo, M. J., Gázquez-Sánchez, F., Fernández-Cortés, Á., Querejeta, J. I., et Cabello, J. (2021). Squandering water in drylands : the water-use strategy of the phreatophyte *Ziziphus lotus* in a groundwater-dependent ecosystem. *American journal of botany*, 108(2), 236–248. https://doi.org/10.1002/ajb2.1606
87. Torres-García, M. T., Salinas-Bonillo, M. J., Pacheco-Romero, M., et Cabello, J. (2021). Modular growth and functional heterophylly of the phreatophyte *Ziziphus lotus* : a trait-based study. *Plant species biology*, 36(4), 554–566. https://doi.org/10.1111/1442-1984.12343
88. Towers, I. R., O'Reilly-Nugent, A., Sabot, M. E. B., Vesk, P. A., et Falster, D. S. (2024). Explaining plant trait variation in response to soil water availability using an optimal height-growth model. *bioRxiv*. https://doi.org/10.1101/2024.01.23.576942
89. Utkin, A., Ermolova, L., Utkina, I., Dulepova, N., et Rosbakh, S. (2022). Utkin et al.'s dataset on specific leaf area. *Ecology*, 103(7), e3714. https://doi.org/10.1002/ecy.3714
90. Wahida, B., Abderrahman, B., et Nabil, C. (2007). Antiulcerogenic activity of *Zizyphus lotus* (L.) extracts. *Journal of ethnopharmacology*, 112(2), 228–231. https://doi.org/10.1016/j.jep.2007.02.024
91. Wang, C., Zhou, J., Xiao, H., Liu, J., et Wang, L. (2016). Variations in leaf functional traits among plant species grouped by growth and leaf types in Zhenjiang, China.

Journal of forestry research, 28(2), Article 2. https://doi.org/10.1007/s11676-016-0290-6

92. Wang, J., Zhai, J., Zhang, J., Han, X., Ge, X., Si, J., Li, J., et Li, Z. (2024). Leaf trait variations and ecological adaptation mechanisms of *Populus euphratica* at different developmental stages and canopy heights. *Forests*, 15(8), Article 8. https://doi.org/10.3390/f15081283
93. Yahia, Y., Benabderrahim, M. A., Tlili, N., Bagues, M., et Nagaz, K. (2020). Bioactive compounds, antioxidant and antimicrobial activities of extracts from different plant parts of two *Ziziphus* Mill. species. *PLOS ONE*, 15(5), e0232599. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232599
94. Yang, Y., Wang, Z., Bao, W., Wu, N., Hu, H., Yang, T., Li, X., Nkrumah, D. T., et Li, F. (2024). Environmental aridity driving latitudinal pattern of biomass allocation fractions in root systems of 63 shrub species in dry valleys. *Ecology and evolution*, 14(8), e70091. https://doi.org/10.1002/ece3.70091
95. Yavas, I., Jamal, M. A., Din, K. U., Ali, S., Hussain, S., et Farooq, M. (2024). Drought-induced changes in leaf morphology and anatomy : overview, implications and perspectives. https://doi.org/10.15244/pjoes/174476
96. Zheng, Y., Zhang, L., Li, P., Ren, X., He, H., Lv, Y., et Ma, Y. (2023). Evaluation of the Community Land Model-simulated specific leaf area with observations over China : impacts on modeled gross primary productivity. *Forests*, 14(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/f14010164
97. Zhong, G., Tian, Y., Liu, P., Jia, X., et Zha, T. (2023). Leaf traits and resource use efficiencies of 19 woody plant species in a plantation in Fangshan, Beijing, China. *Forests*, 14(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/f14010063
98. Zouaoui, R., Ksontini, M., et Ferchichi, A. (2014). Comparative phenological study of *Ziziphus lotus* (L.) Lam. in the arid area of Tunisia. *Pakistan journal of botany*, 46(5), 1611–1620.
99. Zouggar, H., Haj Jilani, I. B., Mekious, S., Belhadj, S., Moustafa Mahdad, Y., Masseaux, C., et Boulahbel, H. (2024). Miel de jujubier d'Algérie : analyse mélissopalynologique et caractères morphologiques du pollen. *BASE*. https://doi.org/10.25518/1780-4507.20682

Références électroniques

1. Atlas Sahara. *Ziziphus lotus* : https://www.atlassahara.ma/fr/especes/fiche/*ziziphus-lotus* (consulté le 06 mars 2025).
2. Phys.org : https://phys.org/news/2013-10-secret-math-biologists-uncover-leaf.html (consulté le 01 Mai 2025).

Abstract

Current climate change is exacerbating the aridification of ecosystems, particularly in Mediterranean regions, posing major challenges to vegetation. In Algeria, where arid zones cover nearly 95% of the territory, understanding plant adaptation strategies is crucial. This study focuses on *Ziziphus lotus* (L.) Desf. (wild jujube), a widely distributed shrub known for its remarkable drought adaptations. The objective was to explore the variability of its morpho-functional traits to understand its adaptation mechanisms in response to aridity gradients. Eight stations, ranging from the arid regions of Djelfa to the sub-humid areas of Boumerdès, were sampled. Various morphological (height, canopy width) and foliar traits (leaf area, length, width, thickness, Specific Leaf Area - SLA, Leaf Dry Matter Content - LDMC) were measured and statistically analyzed. The results revealed highly significant differences in traits between stations. Leaves were generally smaller and thicker in arid environments, associated with lower SLA and higher LDMC, indicating a resource-conserving strategy. Conversely, canopy width tended to be larger in arid zones. Complex correlations highlighted functional trade-offs, such as an inverse relationship between leaf size and thickness. These functional adjustments demonstrate the remarkable plasticity and resilience of *Z. lotus* in coping with water stress, enabling it to persist in highly heterogeneous environments by adjusting its traits towards conservative or acquisitive strategies depending on local conditions.

Keywords : Adaptation, aridity, functional traits, SLA, LDMC, *Ziziphus lotus*, Algeria.

ملخص

تُفاقِم التغيرات المناخية الحالية من ظاهرة التصحر، خصوصًا في المناطق المتوسطية، مما يشكّل تحديات كبيرة للنباتات .وفي الجزائر، تغطي المناطق الجافة ما يقارب 95٪ من المساحة، تُعَدّ دراسة استراتيجيات تأقلم النباتات أمرًا بالغ الأهمية. .تركز هذه الدراسة على نبات السدر البري، وهو شجيرة واسعة الانتشار معروفة بقدرتها المذهلة على مقاومة الجفاف هدفت الدراسة إلى استكشاف تنوع الصفات المورفولوجية والوظيفية لهذا النبات لفهم آليات تأقلمه مع تدرجات الجفاف .تم أخذ عينات من ثماني محطات موزعة بين المناطق الجافة في الجلفة والمناطق شبه الرطبة في بومرداس .شملت القياسات صفات مورفولوجية) مثل الارتفاع وعرض القمة التاجية (وصفات ورقية)المساحة، الطول، العرض، السماكة، المساحة وتم تحليلها إحصائيًا .أظهرت النتائج فروقًا معنوية ،(LDMC ومحتوى المادة الجافة في الأوراق ،SLA الورقية النوعية وارتفاع SLA جدًا بين المحطات .كانت الأوراق عمومًا أصغر وأكثر سماكة في البيئات الجافة، مصحوبة بانخفاض في مما يدل على اعتماد استراتيجية للحفاظ على الموارد .بالمقابل، لوحظ أن عرض القمة التاجية يميل إلى ،LDMC في الزيادة في المناطق الجافة .كشفت الارتباطات المعقدة عن وجود مقايضات وظيفية، مثل العلاقة العكسية بين حجم الورقة وسماكتها .تعكس هذه التعديلات الوظيفية مدى مرونة وقدرته على التكيف مع الإجهاد المائي، مما يمكّنه من البقاء في بيئات متباينة للغاية من خلال تعديل صفاته نحو استراتيجيات محافظة أو استحواذية حسب الظروف المحلي

الكلمات المفتاحية : التأقلم، الجفاف، الصفات الوظيفية، LDMC ، SLA ،الجزائر