

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Ghardaia



Faculté des Sciences de la Nature et de Vie et Sciences de la Terre

Département de Biologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Ecologie

Par : HADEF Imane
OULAD HAMMADI Meriem

Thème

Contribution à l'étude de l'adaptation des plantes aux environnements arides : caractérisation des traits fonctionnels de *Pergularia tomentosa* L. dans la région de Ghardaïa.

Soutenu publiquement, le 14/06 /2026,

Devant le jury composé de :

M ^{me} . HAMEL Imane	Maitre de conférence B	Univ. Ghardaia	Président
M ^{me} . HEROUINI Amel	Maitre de conférence B	Univ. Ghardaia	Encadrant
M. CHIKHI Faredj	Maitre de conférence B	Univ. Ghardaia	Co-encadrant
M ^{me} . CHERIF Rekia	Maitre de conférence A	Univ. Ghardaia	Examineur

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements



Louange à Allah, Seigneur de l'univers, qui, par Sa grâce et Son soutien, nous a permis de mener à bien ce modeste travail, en nous accordant la patience, la persévérance et la détermination nécessaires à son accomplissement.

C'est avec un immense plaisir et une profonde gratitude que nous présentons ce travail.

C'est avec plaisir que nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements :

à Madame le **Dr. HEROUINI Amel**, directrice de ce mémoire, qui n'a cessé de nous apporter ses précieux conseils scientifiques ainsi que ses orientations pertinentes. Son accompagnement et son soutien constant ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos vifs remerciements à **Dr. CHIKHI Faredj**, maître de conférences, pour l'intérêt qu'il a manifesté envers ce travail, ainsi que pour le soutien et les encouragements qu'il nous a prodigués, contribuant ainsi à l'amélioration de sa qualité.

Nous sommes profondément honorés de pouvoir exprimer notre respect et notre reconnaissance à Madame le **Dr. HAMEL Imane**, Maître de conférences à l'Université de Ghardaïa et présidente du jury, qui a aimablement accepté de présider ce jury, apportant ainsi une valeur scientifique notable à notre travail.

Nous tenons également à remercier sincèrement Madame **Dr. CHERIF Rekia**, Maître de conférences à l'Université de Ghardaïa, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire, ainsi que pour ses remarques constructives et ses précieuses contributions scientifiques qui ont enrichi ce travail.

Nous adressons nos remerciements particuliers à Monsieur le **Dr. BENSEMAOUNE Youcef**, pour l'attention et le soutien continu qu'elle nous a témoignés tout au long des différentes étapes de l'élaboration de cette étude.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Madame le **Dr. Rachda** et Madame **Nermine**, qui ont contribué de manière active et efficace à la réalisation de ce travail de recherche, et dont l'aide directe et le soutien ont eu un impact considérable sur le bon déroulement de ce travail.

Nous remercions enfin les responsables du laboratoire et leur équipe pour leur aide précieuse et les facilités qu'ils nous ont accordées lors de la réalisation de la partie pratique de ce travail.

Dédicace

***Au nom d'ALLAH, le tout miséricordieux, le très miséricordieux.
Ô Allah, accorde Ta prière et Ton salut à notre maître Muhammad***

Je dédie ce modeste travail, fruit de mes efforts et de ma persévérance, aux personnes les plus chères de ma vie...

À celle qui m'a donné naissance et m'a entourée de son amour et de sa tendresse, ma chère mère, qu'ALLAH lui fasse miséricorde et l'accueille dans son vaste paradis.

À mon cher père, qu'ALLAH lui accorde une longue vie, pour son soutien, sa patience et ses précieux conseils.

À ma chère sœur (Karima), qui a été pour moi une seconde mère, qui m'a élevée, soutenue et accompagnée tout au long de ma vie, et à qui je suis très redevable.

À ma chère famille, notamment à mes sœurs et à mon frère, pour leur présence, leurs encouragements et leur soutien constant.

Louange à Allah pour ses bienfaits innombrables ; nous le louons jusqu'à ce qu'il soit satisfait, et nous continuons de le louer après qu'il soit satisfait, pour sa grâce infinie et sa miséricorde.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

HADEF Imane

Dédicace

Mon père :

Toi qui ne m'as jamais laissée affronter la vie seule quand tout s'écroulait autour de moi. Tu as été la montagne où je me suis réfugiée, La voix qui m'a chuchoté : Tu es encore capable. Par ta confiance, tu m'as rendu mon âme, et par tes paroles encourageantes, j'ai découvert une force en moi que j'ignorais. Tu m'as appris que l'échec n'est pas la fin du chemin, mais le début d'un autre.

Merci, mon père, d'être resté à mes côtés, pour ton amour inébranlable, d'être à la fois mon père, ma mère, mon frère et mon ami. Je n'oublierai jamais ce que tu as fait pour moi.

Ma mère :

Toi qui as porté mon fardeau pendant mon absence sans rien me demander. Tu as élevé ma fille comme si elle était ta propre enfant, tu l'as couverte d'une tendresse qui dépasse tout sacrifice. Tu lui as appris à prononcer mon nom alors que j'étais loin, et tu as dessiné mon image dans son cœur pour qu'elle ne m'oublie pas. Tu as veillé tard, donné sans compter, sans jamais te plaindre.

Merci, ma mère, pour ta patience infinie, pour ton amour qui m'a englobée, moi et ma fille après moi. Tu es le paradis dans lequel je vis, et je prie Dieu qu'Il ne te prive pas du Tien.

À mes deux amies :

Vous avez été ma fenêtre vers la lumière dans mes nuits les plus sombres. Merci d'être là. Votre présence n'a pas de prix.

À ma famille :

Vous êtes mon soutien, mon refuge. Merci à chacun de vous.

Et aux visages silencieux :

Vous qui donnez sans bruit, qui êtes restés à mes côtés sans vous montrer. Parmi vous, celui qui est la personne la plus proche de moi, qui porte mes soucis et me soutient là où nul autre que moi ne le voit. Merci, Car vous êtes le trésor caché de ma vie

OUED HAMMADI Meriem

المساهمة في دراسة تكيف النباتات مع البيئات القاحلة : توصيف السمات الوظيفية *Pergularia tomentosa* L. لنبات في منطقة غرداية.

الملخص.

تتعرض الجزائر بشدة للتغيرات المناخية، لاسيما تزايد فترات الجفاف وطول أمدها، مما يزيد من هشاشة النظام البيئي. في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تحليل بعض السمات المورفولوجية والوظيفية لنبات الغلقة المأخوذ من منطقة وادي متليلي (غرداية) و تم أخذ عشر أوراق من كل فرد، ليصبح المجموع 240 ورقة، ثم قيسَت وحُللت إحصائياً. شملت السمات المدروسة منها الطول، والعرض، والمساحة الورقية، والسماكة، والمساحة الورقية النوعية ومحتوى المادة الجافة في الورقة. وتضمنت التحليلات الإحصائية اختبارات شابير-ويلك، وكروسكال-واليس، ومعامل ارتباط سبيرمان. تشير النتائج إلى أن نبات الغلقة يطور استراتيجية مزدوجة للتكيف مع الجفاف، تتمثل في إنتاج أوراق صلبة تحد من فقدان الماء، وإظهار تباين كبير بين الأفراد. ويكشف التحليل عن ثلاثة أبعاد وظيفية مستقلة هي: الحجم، ومحتوى الماء والمادة الجافة، والشكل الورقي، بالإضافة إلى بُعد رابع مرتبط بالسماكة. كما يكشف عن وجود مفاضلة بين المساحة الورقية المعرضة والصلابة البنوية؛ فكلما زادت الصلابة، انخفضت المساحة النسبية. وتساهم هذه الآلية في بقاء النوع وتأقلمه في البيئة الجافة.

الكلمات المفتاحية: السمات الوظيفية، المساحة الورقية النوعية ، محتوى المادة الجافة في الورقة ، الغلقة.

Contribution à l'étude de l'adaptation des plantes aux environnements arides : caractérisation des traits fonctionnels de *Pergularia tomentosa* L. dans la région de Ghardaïa.

Résumé.

L'Algérie est fortement exposée aux effets du changement climatique, notamment à l'augmentation et à la prolongation des périodes de sécheresse, qui fragilisent les écosystèmes arides et semi-arides. Dans ce contexte, La présente étude vise à analyser certains traits morphologiques et fonctionnels de *P. tomentosa* récolte dans la région d'Oued Metlili (Ghardaïa).

Dix feuilles ont été prélevées sur chaque individu, soit 240 feuilles au total, puis mesurées et analysées statistiquement. Les traits étudiés étaient la longueur, la largeur, la surface foliaire, l'épaisseur, la SLA et la LDMC. Les analyses statistiques ont inclus les tests de Shapiro-Wilk, Kruskal-Wallis et la corrélation de Spearman.

Les résultats indiquent que *P. tomentosa* développe une double stratégie d'adaptation à la sécheresse : des feuilles rigides limitant la perte d'eau et une forte variabilité entre les individus. L'analyse met en évidence trois dimensions fonctionnelles indépendantes soit la taille, la teneur en eau, matière sèche et la forme foliaire ainsi qu'une quatrième dimension liée à l'épaisseur. Elle révèle également un compromis entre la surface foliaire exposée et la rigidité structurelle : lorsque la rigidité augmente, la surface relative diminue. Ce mécanisme contribue à la survie de l'espèce en milieu aride.

Mots-clés : *Pergularia tomentosa*, traits fonctionnels, SLA, LDMC.

A contribution to the study of plant adaptation to arid environments:
characterisation of the functional traits of *Pergularia tomentosa* L. in the
Ghardaïa region.

Abstract.

Algeria is highly exposed to the effects of climate change, particularly the increase and prolongation of drought periods, which further weaken arid and semi-arid ecosystems. In this context, the present study aims to analyze certain morphological and functional traits of *Pergularia tomentosa* collected from the Oued Metlili region (Ghardaïa).

Ten leaves were sampled from each individual, for a total of 240 leaves, which were then measured and statistically analyzed. The traits studied were length, width, leaf area, thickness, specific leaf area (SLA), and leaf dry matter content (LDMC)..

Statistical analyses included the Shapiro-Wilk test, Kruskal-Wallis test, and Spearman's correlation. The results show that *P. tomentosa* exhibits a dual drought-adaptation strategy: leaves with increased rigidity that reduce water loss, and marked inter-individual variability. The analysis identifies three independent functional axes—size, water/dry matter content, and leaf shape—as well as a fourth axis related to thickness. It also highlights a trade-off between exposed leaf area and structural rigidity, where greater rigidity is associated with reduced relative area. This mechanism contributes to the species' survival in arid environments.

Keywords: *Pergularia tomentosa*, functional traits, SLA, LDMC.

Table de matière

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des photographies	
Résumé	
الملخص	
Abstract	

Introduction

Chapitre I : Méthodologie de travail

1: Présentation de la région d'étude

1.		05
1.1	Situation géographique et administrative de la commune Metlili).....	06
1.2.	Synthèse climatique.....	07
1.2.1	Climat.....	06
1.2.2	La température.....	08
1.2.3	Le vent.....	08
1.2.4.	L'humidité:.....	08
1.3	Synthèse Bioclimatique.....	08
1.3.1	Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN.....	08
1.3.2	Climagramme D'emberger	09
2.	2: Intérêt des traits fonctionnels pour l'étude de l'aridité	11
2.1	Les traits fonctionnel:.....	11
3.	3: Généralités sur <i>Pergularia tomentosa</i>	13
3.1.	Description botanique de <i>Pergularia tomentosa</i>	14
3.2.	Position systématique de <i>Pergularia tomentosa</i>	15
3.3.	Écologie de l'espèce <i>Pergularia tomentosa</i>	15
3.4.	Interaction <i>Pergularia tomentosa</i> son milieu Abiotiques	16
4.	4: Protocoles expérimentale et la méthodologie de travail	17
4.1.	Objectif de l'étude.	17
4.2.	Matériel biologique.....	17
4.3.	Site d'étude.	17
4.4.	Équipement de terrain.	18
4.5.	Équipement de laboratoire.	18
4.6.	Méthodes d'étude.	19
4.6.1	Échantillonnage.	19
4.7.	Mesure des traits fonctionnels.	19
4.7.1.	Mesures au niveau des feuilles.	20
4.7.1.1	Mesure de l'épaisseur, de la longueur et de la largeur du limbe.	20
4.7.1.2	Mesure de la surface foliaire.	21
4.7.1.3	Mesure du poids frais.	22
4.7.1.4	Séchage et mesure du poids sec.	22
4.7.1.5	Indices SLA (Specific Leaf Area) et LDMC (Leaf Dry Matter Content).	22
4.8.	Démarche d'analyse statistique.	23
4.8.1.	Statistiques descriptives.	23
4.8.2	Test de normalité (Shapiro-Wilk).	24
4.8.3.	Test de Kruskal-Wallis (variabilité inter-individuelle).	24
4.8.4	Corrélations de Spearman.	24
4.8.5	Analyse en Composantes Principales (ACP).	25

	Chapitre II : Résultats et discussion	26
1.	Statistiques descriptives des traits fonctionnels	26
2.	Variabilité inter-individuelle Test de Kruskal-Wallis	27
3.	Corrélations de Spearman entre traits foliaires	28
3.1.	Corrélation entre la SLA et le LDMC ($\rho = -0,581$; $p < 0,001$).....	29
3.2.	Corrélation entre la SLA et la surface foliaire ($\rho = +0,661$; $p < 0,001$).....	29
3.3.	Corrélation entre la surface foliaire et le poids frais ($\rho = +0,808$; $p < 0,001$	30
3.4.	Corrélation entre le LDMC et le poids frais ($\rho = -0,545$; $p < 0,001$).....	30
3.5.	Corrélation entre la longueur et la largeur des feuilles ($\rho = +0,787$; $p < 0,001$).....	30
4.	Analyse en Composantes Principales (ACP).....	30
5.	Discussion générale.	38
	Conclusion	41
	Références bibliographiques	43

Liste des figures

N°	Titre du figure	Page
1	Limites administratives de la wilaya de Ghardaïa (HADEF. OULAD HAMMADI.2026).	5
2	Carte de la situation géographique de la région d'étude Metlili (HADEF. OULAD HAMMADI.2026).....	6
3	Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen Caractéristique de La region de Ghardaïa (2013-2023).	9
4	Etage Bioclimatique de Ghardaïa Selon Climagramme D'emberger (2013-2023).	10
5	Cadre conceptuel proposé par (Lavorel et Garnier (2002) des effets des changements environnementaux sur les communautés végétales et le fonctionnement des écosystèmes, via les traits.	12
6	Variance expliquée par composante (barres bleues), variance cumulé (courbe coral), modèle broken-stick (pointillés gris) et seuil de Kaiser (ligne bleue à 12.5 %).....	31
7	Matrice des loadings : corrélations de chaque variable avec chaque composante principale. Rouge = corrélation positive forte ; bleu = corrélation négative forte.....	33
8	ACP — Projection des 24 individus (gauche) et cercle des corrélations des 8 traits foliaires (droite). PC1 = 32,3 %, PC2 = 25,9 % de variance. L'individu 17 (orange) est biologiquement distinct. Flèches foncées : variables à forte contribution ($r > 0,55$).....	34
9	Projection des 24 individus sur les plans PC1–PC2. Les points petits représentent les 10 feuilles de chaque individu ; les grands points sont les moyennes individuelles. L'individu 17 (orange) présente un profil fonctionnel exceptionnel (SLA élevée, LDMC faible). PC1 + PC2 = 58,2 % de la variance totale.....	35
10	Cercle des corrélations des 8 traits foliaires sur les plans PC1–PC2. La longueur des vecteurs est proportionnelle à la contribution de la variable à l'axe. Les flèches de couleur foncée (bleu royal) indiquent les variables les mieux représentées (contribution ≥ 55 %). Le cercle de référence représente la corrélation maximale ($r = 1$).....	36
11	Contributions des 8 variables aux composantes PC1, PC2, PC3 et PC4. La ligne verticale coral matérialise le seuil moyen (12.5 %). Les barres bleu foncé dépassent ce seuil ; les barres claires restent en dessous.....	37

Liste des tableaux

	Titre du tableau	Page
1	Données climatiques moyennes de la région de Ghardaïa (2014– 2023) (TUTIEMPO, 2024)	7
2	Statistiques descriptives et résultats du test de Shapiro-Wilk pour les 8 traits foliaires.....	26
3	Résultats des tests de Kruskal-Wallis pour la variabilité inter- individuelle.....	27
4	Matrice de corrélations de Spearman (ρ). Les cellules foncées indiquent les corrélations fortes ($\rho > 0,50$).	29
5	Résultats des valeurs propres par composante principale	32
6	Résultats des loadings des variables par rapport aux premières composantes principales considérées.....	34

Liste des photographies

N°	Titre de la photographie	Page
1	<i>Pergularia tomentosa</i> au stade végétatif (Oued Metlili, Ghardaïa. Février, 2026) (A: Plant entier, B: Tiges feuillées, C: Fruits, D: Latex, E: fleur) (Hade et Oulad hammadi ,2026).....	15
2	Stations d'études Oued Metili (Google map).....	18
3	Échantillonnage de (<i>Pergularia tomentosa</i>) sur le terrain.(Hade et Oulad hammadi ,2026).	19
4	Mesure de l'épaisseur, de la longueur et de la largeur des feuilles à l'aide d'un pied à coulisse électronique (précision au millimètre) (Hade et Oulad hammadi ,2026).....	20
5	Scanner des feuilles (<i>Pergularia tomentosa</i>).....	21
6	Mesure du poids des feuilles à l'aide d'une balance scientifique (Hade et Oulad hammadi ,2026).	22
7	Mesure de la surface foliaire à l'aide du logiciel Mesurim Pro.....	23

Introduction

Introduction

L'Algérie, de l'Ouest à l'Est et du Nord au Sud, est caractérisée par une grande diversité géographique, bioclimatique, géologique, géomorphologique et édaphique, à l'origine d'une richesse écosystémique et floristique considérable. (Quézel, 1965 et Ozenda, 1982) Les milieux désertiques sont depuis longtemps considérés comme des environnements caractérisés par des conditions climatiques particulièrement contraignantes, rendant la survie des formations végétales difficile. Cette contrainte s'explique principalement par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, associées à des températures élevées et à une forte fréquence des vents. Toutefois, les recherches scientifiques ont mis en évidence l'existence d'une diversité végétale notable, dominée essentiellement par des espèces spontanées présentant des capacités d'adaptation remarquables aux conditions climatiques extrêmes. (Baameur,2021)

Parmi les différents écosystèmes de l'Algérie, le Sahara algérien occupe une place prépondérante. Le Sahara algérien couvre près de 2 millions de km², soit environ 85 % de la superficie totale du pays. Il constitue l'une des plus vastes régions désertiques du monde et se caractérise par une grande diversité de paysages, comprenant des massifs montagneux d'origine cristalline et volcanique ainsi que de vastes étendues sableuses(Berrazoum & Seddiali, 2024) Dans ce contexte contraignant, les écosystèmes sahariens se distinguent par une couverture végétale clairsemée et une diversité floristique limitée, dominée par des espèces vivaces et annuelles. La répartition de cette flore est fortement conditionnée par les facteurs écologiques locaux, notamment la disponibilité hydrique et les caractéristiques édaphiques, traduisant ainsi l'organisation spécifique des milieux sahariens (Benseghier, 2018).

Par ailleurs, la végétation présente dans ces milieux arides a développé diverses stratégies d'adaptation, à la fois morphologiques, physiologiques et fonctionnelles, lui permettant de survivre aux contraintes sévères du milieu, caractérisées par la rareté de l'eau, les températures élevées et la persistance de longues périodes de sécheresse (Monod, 1992).

Selon Ozenda (1991) et Ramade (2003), la grande importance écologique et environnementale des plantes sahariennes résulte de leur capacité à s'adapter aux conditions climatiques extrêmement difficiles du désert, notamment en ce qui concerne les périodes de

sécheresse prolongée et les problèmes liés à la subsistance. Cette adaptation unique est le produit de conditions extrêmement variées. D'après Charles (1859), l'adaptation peut être définie comme le processus évolutif par lequel les caractéristiques physiques, physiologiques et comportementales d'un organisme sont modifiées au fil du temps pour augmenter sa survie et sa reproduction dans un environnement donné.

Les traits fonctionnels permettent de comparer les organismes dans différents écosystèmes en tenant compte de leurs rôles écologiques et de leurs réponses à l'environnement, et pas seulement du nombre d'espèces (Violle et al., 2007 ; Vandewalle et al., 2010). Chez les plantes, des traits comme la hauteur, la surface foliaire spécifique, la densité du bois, la masse des graines ou la teneur en azote des feuilles expliquent des stratégies telles que la croissance rapide, la tolérance au stress et la compétition (Westoby, 1998 ; Wright et al., 2004 ; Díaz et al., 2016). Ils sont aussi utiles pour étudier les effets des changements globaux, comme le changement climatique, la fragmentation des habitats et la perte de biodiversité (Lavorel & Garnier, 2002 ; Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

L'étude des traits fonctionnels permet d'affiner la compréhension de la performance d'une espèce en relation avec son environnement. Le choix du trait étudié est crucial : si le caractère retenu n'est pas lié à la valeur sélective de l'individu, son analyse n'apportera rien à l'étude des capacités adaptatives de l'espèce. Dans sa définition la plus simple, un trait correspond à toute caractéristique morphologique, physiologique ou phénologique mesurable à l'échelle de l'individu (Violle et al., 2007). La nécessité de généralisation et de comparaison en écologie a conduit à sélectionner des traits pertinents et faciles à mesurer (Westoby 1998, Garnier et al., 2004).

Chez les végétaux en particulier, les traits fonctionnels permettent à la fois d'étudier la réponse des espèces aux gradients environnementaux et à leurs évolutions (McGill et al., 2006).

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'efficacité 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.

Le genre *Pergularia* représente l'un des genres les plus importants de la famille des Asclepiadaceae. Ce genre comprend deux espèces : *Pergularia daemia* et *Pergularia tomentosa*. Selon Quezel et Santa (1962), seule l'espèce *Pergularia tomentosa* est présente en Algérie. Celle-ci est répartie dans le Sahara septentrional et central algérien (Ozenda, 1958).

Pergularia tomentosa L. est une plante chaméphyte vivace rustique. Elle présente une amplitude écologique relativement large vis-à-vis du substrat : on la retrouve aussi bien sur des sols sableux, argileux, graveleux ou pierreux. Elle colonise les lits d'oueds ainsi que les plateaux caillouteux (regs). Cette espèce se développe également dans les déserts chauds où la pluviométrie annuelle ne dépasse pas 100 mm. La dissémination des graines s'effectue principalement par anémochorie (dispersion par le vent) (Al-Said et *al.*, 1989).

Dans ce contexte, la présente étude vise à analyser la variation des attributs morpho-fonctionnels de *Pergularia tomentosa* dans une station située dans la partie septentrionale du Sahara algérien, caractérisée par un niveau d'aridité marqué. Elle s'intéresse plus particulièrement à la manière dont les traits fonctionnels de cette espèce reflètent sa capacité d'adaptation aux gradients d'aridité dans un environnement soumis aux effets du changement climatique. L'objectif de ce travail est de déterminer comment *Pergularia tomentosa* modifie ses traits morpho-fonctionnels en réponse à la contrainte hydrique.

Ce mémoire est structuré en deux chapitres. Le premier chapitre est consacré à la présentation du site d'étude, aux généralités sur la plante étudiée et sur les traits fonctionnels,

ainsi qu'à la description détaillée de la méthodologie adoptée pour répondre aux objectifs du mémoire. Le deuxième chapitre présente les principaux résultats obtenus, leur interprétation, puis une discussion permettant de les mettre en perspective.

Chapitre I : Matériels et méthodes

Chapitre I : Matériels et méthodes

1: Présentation de la région d'étude

En Algérie ; le désert constitue un quart de la superficie du grand Sahara africain et représente les trois quarts de la superficie totale du pays. Le Sahara algérien s'étend sur environ deux millions de kilomètres carrés et se subdivise en plusieurs ensembles régionaux. Le Sahara central, qui correspond à l'une de ces grandes subdivisions, couvre notamment la région de Ghardaïa. (Addoun, 2018)

La wilaya de Ghardaïa a été créée conformément au découpage administratif algérien établi par la loi n° 84-09 du 4 février 1984, sur une superficie de 84 660,12 km². Ce cadre territorial a ensuite été modifié par la loi n° 19-12 du 12 novembre 2019, laquelle actualise et complète la législation de 1984, portant le nombre total de wilayas à 58 et celui des communes à 1 541. Parmi les évolutions majeures de cette réorganisation figure la création de la wilaya d'Al-Ménéa, issue du démembrement de la wilaya de Ghardaïa conformément à l'article 52 bis 9. Cette nouvelle circonscription administrative comprend trois communes Al-Ménéa, Hassi el F'Hel et Hassi el Gara ,et s'étend sur une superficie totale de 58 494,69 km². (HAMEL, 2023)

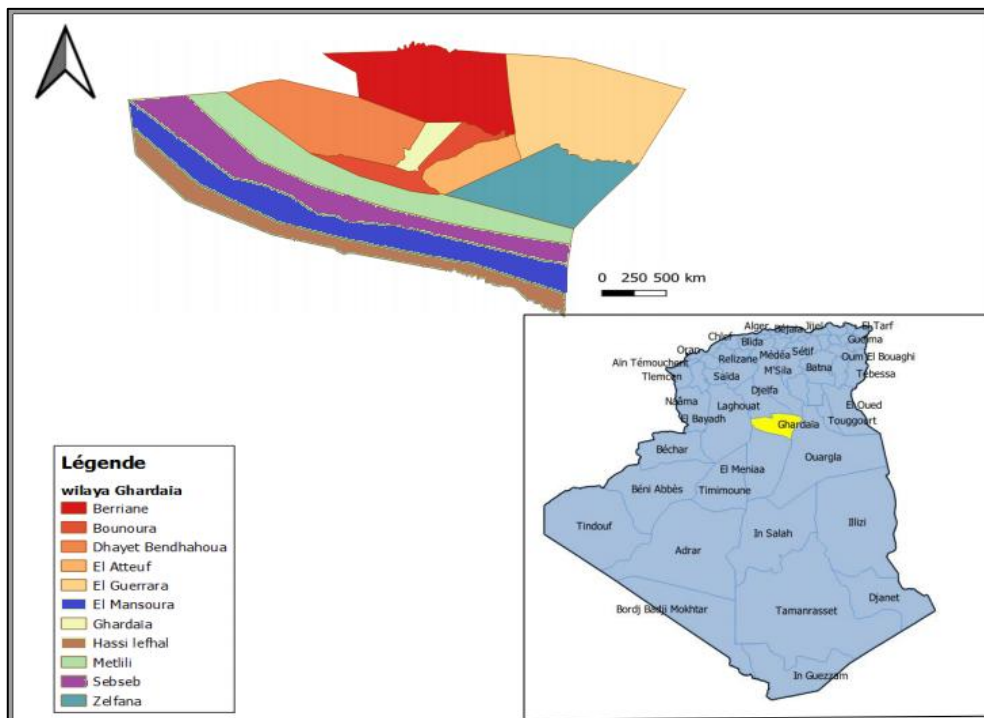


Figure 01: Limites administratives de la wilaya de Ghardaïa (Hadeef et Oulad Hammadi.2026)

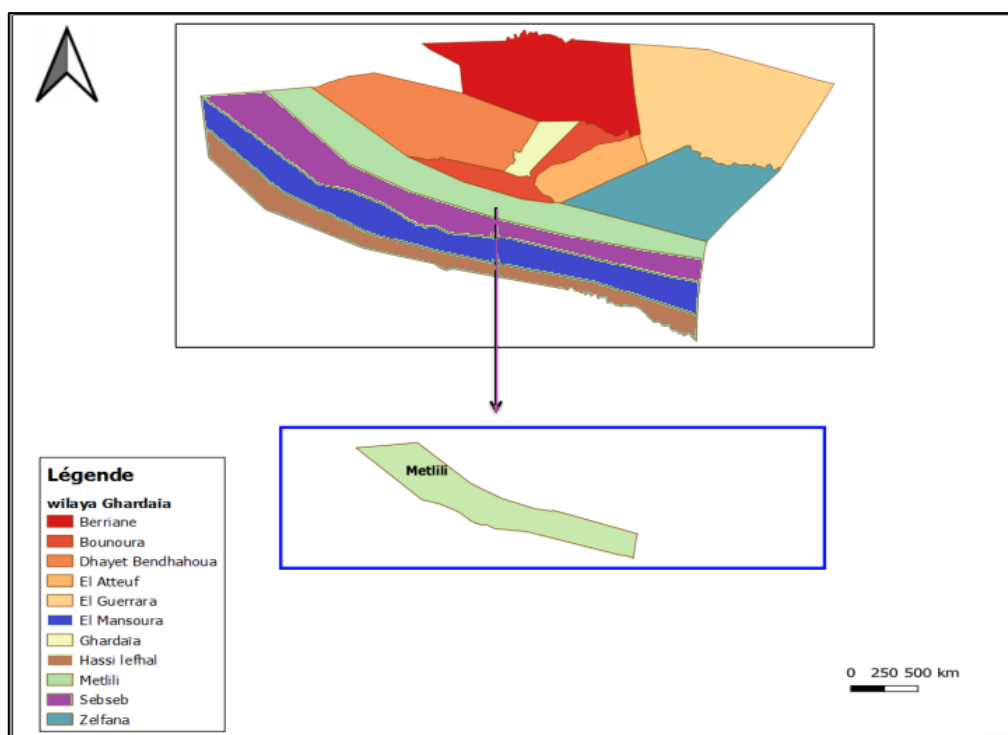


Figure 02 : Carte de la situation géographique de la région d'étude Metlili (Hadeff et Oulad Hammadi.2026)

1.1. Situation géographique et administrative de la commune Metlili.

L'étude a été réalisée dans La commune de Metlili relève de la wilaya de Ghardaïa et se situe à 40 kilomètres du chef-lieu de cette wilaya. Ses coordonnées géographiques sont les suivantes :

- ✚ Altitude de 455 mètres,
- ✚ Latitude 32° 16' nord,
- ✚ Longitude 03° 38' est.

Elle s'étend sur une superficie de 7 300 km². Ses limites administratives sont définies comme suit :

- ✚ Au nord par la wilaya d'El Bayadh et les communes de Bounoura, El Atteuf et Zelfana .
- ✚ Au sud par la commune de Sebseb .
- ✚ A l'est par la wilaya d'Ouargla .
- ✚ A l'ouest par la wilaya d'El Bayadh.

La population de la commune de Metlili est estimée à 53.676 habitants. Le tissu urbain de la ville se caractérise par une structuration en pôles d'évolution, témoignant d'une tendance à la saturation (APC METLILI, 2015).

1.2. Synthèse climatique.

1.2. Climat.

Le climat de Ghardaïa est un climat particulièrement aride, cette aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air (Benslama.2021). Pour présenter le climat de cette région, nous nous sommes basés sur les données climatiques de (Tutimpo, 2026),

Les moyennes climatiques mensuelles analysées couvrent une période de dix ans (2013-2023), (Tutimpo, 2026), permettant une identification précise des variations climatiques dans la région d'étude. Les résultats indiquent un climat typiquement saharien, caractérisé par deux saisons distinctes : une saison chaude et sèche (Avril à Septembre) et une saison tempérée (Octobre à Mars), avec une amplitude thermique marquée entre l'été et l'hiver (A.N.R.H., 2012). L'irrégularité pluviométrique, avec des précipitations annuelles inférieures à 100 mm, complète ce profil désertique.

Tableau 1. Données climatiques de la station météorologique de Ghardaia (Adjila et Cheikhi.2025)

Température (C°)				P	H	V.V
	Min	Max	Moy	(mm)	(%)	(m/s)
Janvier	6,72	18,98	12,78	1,65	46,9	13,16
Février	8,61	20,86	14,74	3,84	40,6	18,38
Mars	12,21	25,16	18,87	4,04	34,7	17,56
Avril	16,71	30,79	24,1	3,96	29,9	17,89
Mai	21,86	36,03	29,32	4,04	26,4	17,49
Juin	27,33	41,93	35,2	0,71	21,4	16,48
Juillet	31,35	45,68	39,03	0,20	18,6	13,7
Aout	30,3	44,02	37,45	4,39	23,6	12,89
Septembre	26,31	39,6	33,01	5,33	32,3	12,85
Octobre	19,53	32,4	25,99	4,11	37,6	11,59
Novembre	13,13	24,55	18,45	4,88	44,8	13,04
Décembre	8,44	19,75	13,85	3,87	54,2	12,79
Moyenne	18,55	31,64	25,23	41.02*	34,2*	14,82

T : Température moyenne (°C) ; **TM** : Température maximale (°C) ; **Tm** : Température minimale (°C) ; **PP** : Précipitations (mm) ; **V** : Vitesse moyenne du vent (Km/h) ; **H** : Humidité relative moyenne (%) ; * : Cumul des précipitations moyennes mensuelles (mm)

1.2.1. Température.

D'après le tableau 1, la température minimale la plus basse du mois le plus froid, (Janvier) était de 6,72 °C, tandis que la température maximale la plus élevée du mois le plus chaud, (Juillet) a atteint 45,68 °C. La température moyenne la plus élevée a été enregistrée en juillet, à 39,03 °C, tandis que la température moyenne la plus basse a été enregistrée en janvier, à 12,78 °C (Tutiempo, 2026).

1.2.2. Précipitations.

Les pluviosités sont rares et irrégulières tout au long des saisons et des années. Le cumul annuel de la région de Ghardaïa durant 10 ans (2013-2023) est de 41,02 mm, il est marqué par un maximum en Janvier avec une valeur de 1,65 mm et un minimum en Février et en Juillet estimé à 3,84 mm et 0,20 mm respectivement (Tutiempo, 2026).

1.2.3. Vent.

La plus forte vitesse de vent est de 17,89 m/s au mois d'Avril, et la plus faible est de 11,59 m/s au mois de Novembre. Alors que, la moyenne annuelle est de 14,82 m/s 9 (tableau.1) (Tutiempo, 2026).

1.2.4. Humidité.

D'après le tableau (01), l'humidité relative de l'air est faible, la moyenne annuelle est de 34,2 %, le minimum est de 18,6 % en juillet et le maximum est de 54,2 % au mois de décembre (Tutiempo, 2026).

3. Synthèse Bioclimatique.

3.1. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN:

Selon le critère de (Gausсен in Dajoz, 1982) la sécheresse survient lorsque la pluviosité mensuelle (exprimée en mm) est inférieure au double de la température moyenne (exprimée en °C). L'intersection entre ces deux valeurs définit la période sèche. Pour notre région d'étude, celle-ci s'étend sur l'ensemble de l'année (Fig.3).

L'exploitation des relevés des données de précipitations et de températures mensuelles, enregistrés sur une période dix ans, permet de tracer la courbe pluviométrique, dont le but est de déterminer la période sèche

Le Diagramme Ombrothermique de Bagnouls Et Gaussen (1953) permet de suivre les variations saisonnières de la réserve hydrique, il est représenté.

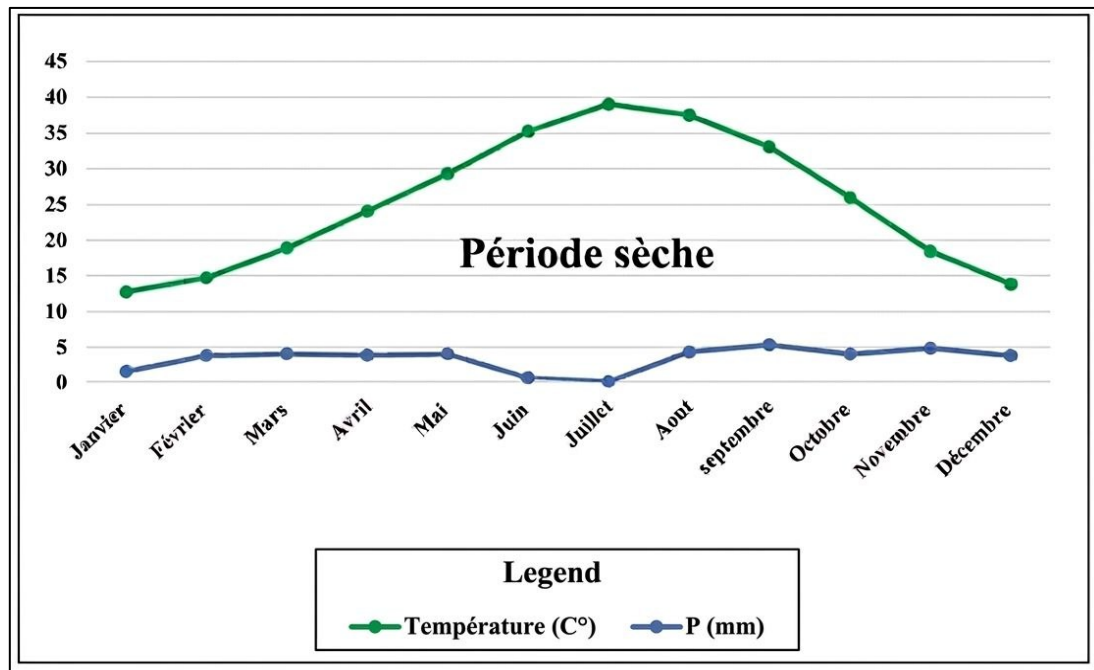


Figure 3. Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen Caractéristiques de La région de Ghardaïa (2013-2023)

3.2. Climagramme D'emberger.

Il permet de classer les différents types de climats méditerranéens (Dajoz, 1985) et (Dajoz, 2003). Le calcul du potentiel bioclimatique pour chaque étage bioclimatique est fondé sur la carte bioclimatique. L'utilisation des cartes bioclimatiques permet de corréler les données climatiques de base avec des stratégies appropriées et des mesures de conception correspondantes. Il est défini par la formule simplifiée suivante (Stewart, 1969).

Il permet de connaître l'étage bioclimatique de la région d'étude. Il est représenté :

- ✚ En abscisse par la moyenne des minima du mois le plus froid.
- ✚ En ordonnées par le quotient pluviométrique (Q2) D'emberger, (1933).

On a utilisé la formule de Stewart (1969) adapté pour l'Algérie, qui se présente comme Suit :

$$Q2 = \frac{3.43 \times P}{(M - m)}$$

Q2 : quotient thermique d'Emberger.

P : pluviométrie annuelle en mm.

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en °C.

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid en °C.

D'après la (Fig.4), Ghardaïa se situe dans l'étage bioclimatique aride à hiver doux et Son Quotient thermique (Q2) est de 10, 74.

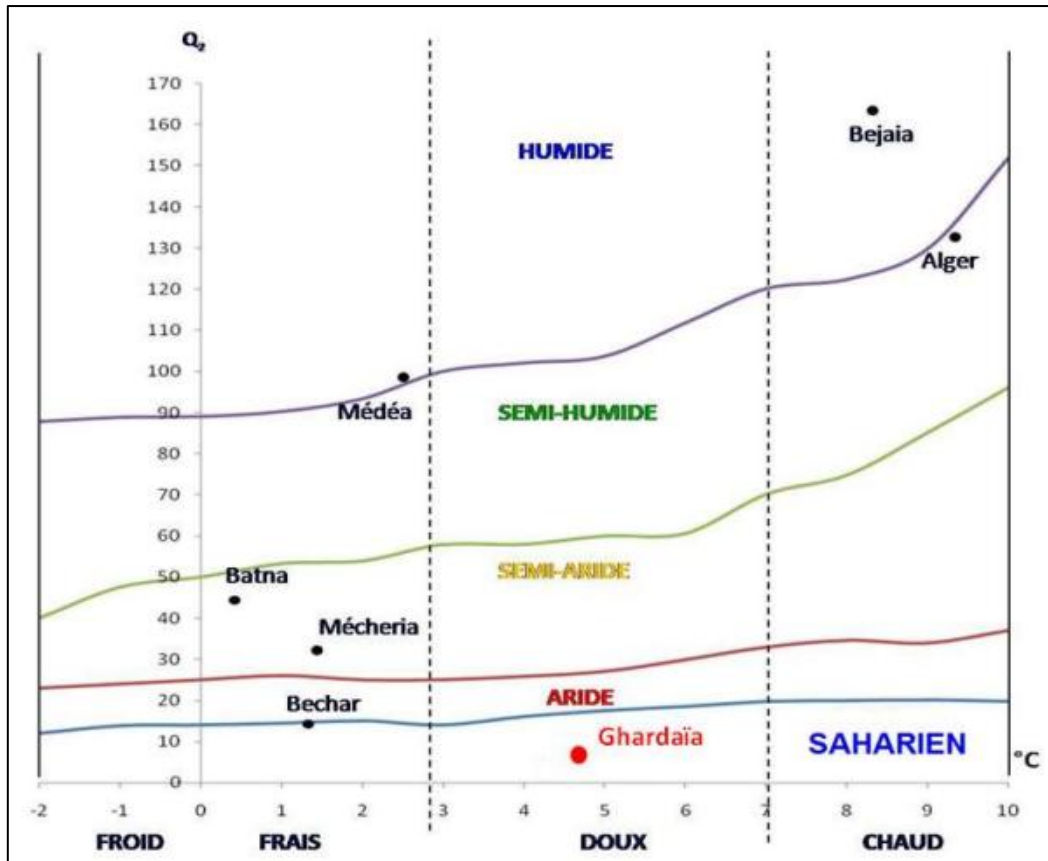


Figure 04 : Etage Bioclimatique de Ghardaïa Selon Climagramme D'emberger (1998 –2018). (HAMEL, 2022)

2: Intérêt des traits fonctionnels pour l'étude de l'aridité

2.1. Traits fonctionnel.

Selon Violle et *al.*, (2007), les traits fonctionnels se définissent comme tout caractère morphologique, physiologique ou phénologique mesurable à l'échelle de l'individu et exerçant une influence sur sa performance au sein de l'écosystème. Ces traits sont associés aux grandes fonctions végétales, notamment la photosynthèse, la croissance, la longévité des organes (ex. : les feuilles), ainsi que la reproduction et la dispersion (Westoby et *al.*, 1998 ; Weiher et *al.*, 1998 ; McGill et *al.*, 2006 ; Navas & Garnier, 2012).

Les traits fonctionnels sont définis comme les caractéristiques morphologiques, physiologiques et phénologiques mesurables à l'échelle de l'individu. Ils déterminent sa capacité à survivre, croître et se reproduire. Ils aident également à comprendre comment les espèces végétales sont influencées par leur environnement et les mécanismes qu'elles adoptent pour s'adapter aux conditions environnantes (Cornelissen et *al.*, 2003).

La littérature scientifique distingue deux catégories de traits :

- ✚ Traits « soft », dont la mesure est aisée pour un grand nombre d'espèces, bien qu'ils ne soient pas toujours directement reliés à une fonction spécifique
- ✚ Traits « hard », plus complexes à mesurer, mais qui présentent une relation directe avec une fonction donnée (Hodgson et *al.*, 1999 ; Reich et *al.*, 1999).

Chez une plante, la valeur d'un trait mesurée dans des conditions environnementales spécifiques, à un moment donné et au sein d'une population déterminée, est qualifiée d'attribut (Lavorel et *al.*, 2007 ; Garnier & Navas, 2012). Cette valeur est variable dans le temps et selon les caractéristiques du milieu, sous l'influence des gradients environnementaux (Garnier & Navas, 2012).

Étant évalués à l'échelle individuelle, les traits fonctionnels rendent compte des interactions entre la plante et son environnement. Ils offrent ainsi un cadre pour décrire, quantifier et comparer les stratégies de réponse des espèces face aux variations de leur habitat (Violle et *al.*, 2007 ; Lavorel & Garnier, 2002).

Parmi ces traits, on distingue les traits de réponse, dont les variations traduisent l'ajustement des organismes aux facteurs abiotiques et biotiques du milieu (Lavorel et *al.*, 1997). Ces ajustements s'observent, par exemple, en réaction aux perturbations d'origine

humaine, à la compétition entre espèces, au pâturage, ou encore aux variations climatiques (Mabry & Fraterrigo, 2009 ; Navas & Violle, 2009 ; Pierce *et al.*, 2017 ; Diaz *et al.*, 2001 ; Moles *et al.*, 2014 ; Madani *et al.*, 2018).

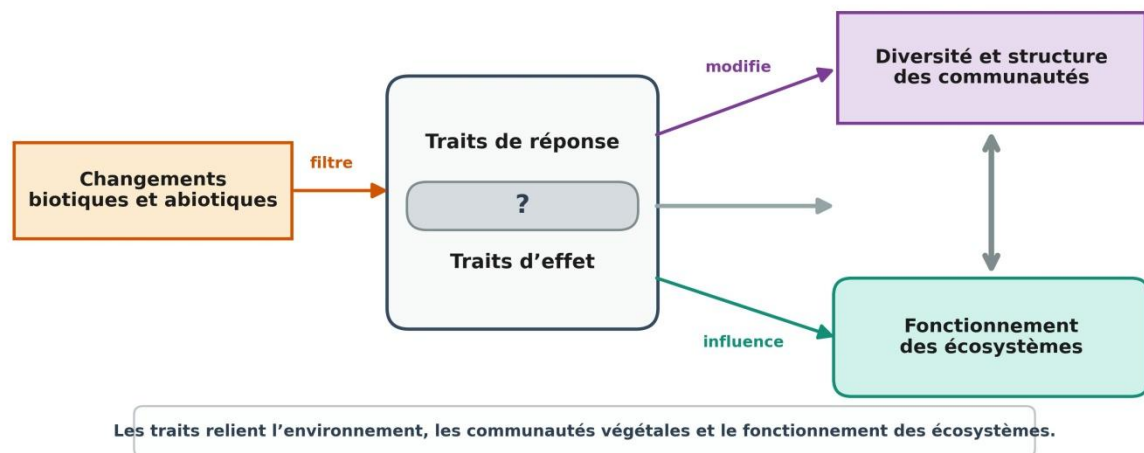


Figure 5. Cadre conceptuel proposé par Lavorel et Garnier (2002) des effets des changements environnementaux sur les communautés végétales et le fonctionnement des écosystèmes, via les traits.

Les traits d'effet désignent les caractéristiques qui modulent l'environnement, en particulier l'impact des végétaux sur les processus physiques et chimiques des écosystèmes, tels que la productivité primaire, les cycles biogéochimiques (notamment celui de l'azote) (Lavorel & Garnier, 2002 ; Pontes *et al.*, 2007 ; Madani *et al.*, 2018 ; Craine *et al.*, 2002 ; Cornwell *et al.*, 2008).

Les variations observées dans les valeurs des traits le long des gradients environnementaux traduisent les capacités d'adaptation des végétaux et permettent de dégager des compromis (trade-offs) entre différentes fonctions, en particulier celles liées à l'exploitation des ressources (Ackerly *et al.*, 2000 ; Reich *et al.*, 2003 ; Grime, 2001 ; Lavorel *et al.*, 2007 ; Wright *et al.*, 2004 ; Diaz *et al.*, 2016 ; Pierce *et al.*, 2017).

Les traits fonctionnels n'évoluent pas de manière isolée ; ils s'organisent en stratégies fonctionnelles à l'échelle globale (Wright *et al.*, 2004 ; Diaz *et al.*, 2004). Ces organisations reflètent soit des contraintes environnementales ou physiologiques limitant leur évolution indépendante, soit le résultat d'une sélection favorisant des combinaisons de traits plus performantes selon les conditions du milieu (Weiher *et al.*, 1998 ; Grubb, 2016).

Ces traits sont étroitement liés entre eux et se structurent en stratégies fonctionnelles, mettant en évidence soit des contraintes d'ordre environnemental ou physiologique, soit l'effet d'une sélection favorisant les combinaisons de traits les mieux adaptées aux conditions du milieu (Wright et *al.*, 2004 ; Diaz et *al.*, 2004 ; Weiher et *al.*, 1998 ; Grubb, 2016).

Un grand nombre de traits sont utilisés pour définir les groupes fonctionnels chez les plantes. Des protocoles standardisés ont été développés afin d'uniformiser les méthodes de mesure et de permettre l'analyse de données provenant d'espèces et de biomes variés (Cornelissen et *al.*, 2003 ; Kattge et *al.*, 2011 ; Pérez-Harguindeguy et *al.*, 2013 ; Cornelissen et *al.*, 2008).

Les traits fonctionnels foliaires sont considérés comme des indicateurs privilégiés pour l'identification des stratégies fonctionnelles des plantes et pour l'étude des interactions entre les végétaux et leur environnement (Wright et *al.*, 2004, 2005 ; Shipley, 2006).

3: Généralités sur *Pergularia tomentosa*

3.1. Description botanique de *Pergularia tomentosa*:

la famille des Asclepiadaceae regroupe 200 genres et 2 500 espèces d'arbustes et d'herbacées vivaces, principalement répartis dans les régions tropicales et chaudes du monde, avec une concentration notable dans la région saharienne. L'espèce *P. tomentosa*, appartenant à cette famille, est couramment employée en médecine traditionnelle pour diverses indications. Sa composition chimique inclut une grande variété de métabolites, tels que des hétérosides cardiotoniques, des flavonoïdes, des alcaloïdes, des saponines, des tanins, des anthraquinones, entre autres. Les études de l'activité biologique menées ont démontré que cette plante présente des propriétés antioxydantes, cytotoxiques, antibactériennes et antifongiques, entre autres effets. (Gohar et al., (2000)et (Tlili. 2015).Les analyses phytochimiques menées sur *Pergularia tomentosa* ont mis en évidence une richesse en métabolites secondaires, en particulier en cardénolides et en hétérosides. Ces substances, connues pour leur toxicité, sont susceptibles d'induire des perturbations physiologiques touchant notamment les systèmes respiratoire, cardiovasculaire et musculaire. (Herouini.2021).

D'après la description de Chehma (2006), *P. tomentosa* se caractérise par :

- Port : plante herbacée ou semi-ligneuse, arbrisseau vivace dépassant 1 m de hauteur.
- Rameaux : jeunes rameaux volubiles s'enroulant autour des plus anciens, aspect touffu.
- Latex : blanc, corrosif, pouvant endommager la peau.
- Tige : grimpante ou volubile, couverte de courts poils verdâtres, tomenteuse à l'état jeune.
- Feuilles : opposées, vert amande, ovales ou arrondies, en cœur à la base, sans stipules, pétiole de 0,5 à 1,5 cm de long.
- Inflorescence : en grappes abondantes au bout de longs pédoncules.
- Fleurs : bisexuées, régulières, parfumées, pentamères, sépales et pétales plus ou moins soudés à la base, corolle rotacée ou campanulacée doublée d'une paracorolle à 5 pièces d'origine staminale, étamines au nombre de 5 à anthères sessiles adhérentes au stigmate et souvent déhiscentes en pollinies.
- Fruits : composés de deux follicules portant de petites pointes.
- Graines : ovoïdes, aplaties, de 7 à 9 mm sur 6 mm environ, à bords pâles, couvertes de poils courts denses, munies d'une touffe de poils à une extrémité d'environ 3 cm de long

Période de végétation : floraison au printemps . (Schmelzer et Gurib-Fakim, 2013)



Photographie 1: *Pergularia tomentosa* au stade végétatives (Oued Metlili, Ghardaïa. Février,2026) (A: Plant entier, B: Tiges feuillées, C: Fruits, D: Latex, E: fleur) (Hade et Oulad hammadi ,2026).

3.2. Position systématique de *Pergularia tomentosa*.

- Embranchement : *Spermaphytes*
- Sous Embranchement: *Angiospermes*
- Classe : *Dicotylédones*
- Sous classe : *Rosidae*
- Ordre : *Gentianales*
- Famille : *Asclepiadaceae*
- Genre : *Pergularia*
- Espèce : *Pergularia tomentosa* L. (Ozenda, 1991).

3.3.Écologie de l'espèce *P. tomentosa*.

P. tomentosa est une plante vivace caractéristique des zones arides, qui se développe dans les régions désertiques où les précipitations annuelles n'excèdent généralement pas 100 mm, que l'on rencontre aussi bien dans les lits d'oueds que sur les terrains plateau, colonisant divers types de sols allant des textures argilo-sableuses aux substrats graveleux et pierreux, avec une distribution altitudinale qui s'étend du niveau de la mer jusqu'à 1 000 m d'altitude, et qui, le long de la mer Rouge, s'intègre aux communautés végétales dominantes des plaines sableuses (Schmelzer et Gurib-Fakim, 2013).

3.4.Interaction *P. tomentosa* avec son milieu abiotique.

P. tomentosa est considérée comme une espèce végétale clé dans les zones arides, et elle revêt une importance particulière à des fins médicinales (Hosseini, 2016). Cette espèce se caractérise par une faible densité dans les pâturages secs, ce qui en fait un sujet de préoccupation environnementale. Elle a été traditionnellement utilisée en médecine populaire dans plusieurs régions, notamment dans la péninsule arabique et en Afrique du Nord.

La répartition de *P. tomentosa* est fortement influencée par les propriétés édaphiques de son milieu. Plusieurs études ont montré que cette espèce est positivement corrélée à des sols riches en carbonate de calcium (CaCO_3), en potassium et en limons (Piliania and Panchal, 2016 ; Hosseini, 2016). Le calcium joue notamment un rôle important dans l'amélioration de la structure du sol, favorisant ainsi l'installation et le développement de l'espèce (Shabala et al., 2003).

Les formations géologiques représentent également un facteur majeur dans la distribution de *P. tomentosa* (Panchal and Pandey, 2002 ; Vogiatzakis et al., 2003). L'espèce est généralement associée aux formations congломératiques et aux zones collinaires, alors qu'elle est absente des formations ignées et des régions montagneuses (Abdollahi et al., 2013 ; Hosseini, 2016). Plusieurs travaux réalisés en zones arides ont confirmé l'influence déterminante des formations géologiques et des unités géomorphologiques sur la répartition de *P. tomentosa* ainsi que sur les propriétés des sols qui lui sont associées (Erfanzadeh and Hosseini Kahnuj, 2015 ; Erfanzadeh et al., 2014).

Bien que l'altitude puisse agir indirectement sur certaines variables environnementales, telles que les conditions climatiques et le rayonnement solaire, son effet sur la distribution de *P. tomentosa* demeure limité lorsque le gradient altitudinal est faible (Ashrafzadeh et al., 2015). Dans ces conditions, les facteurs géologiques, géomorphologiques et édaphiques apparaissent comme les principaux déterminants de la présence et de la répartition de l'espèce.

4: Protocoles expérimentale et la méthodologie de travail

4.1. Objectif de l'étude.

Notre travail expérimental vise à mettre en évidence l'importance des traits fonctionnels dans l'étude de l'adaptation des plantes aux conditions arides, à travers l'analyse morphologique des feuilles de *P. tomentosa* récoltées dans la région d'Oued Metlili (Ghardaïa). Cette étude cherche à caractériser les stratégies adaptatives développées par cette espèce pour faire face aux contraintes environnementales du milieu saharien. Elle contribue ainsi à une meilleure compréhension du rôle des feuilles dans les mécanismes d'adaptation des plantes désertiques.

À ce propos, la réponse de *P. tomentosa* aux conditions désertiques a été évaluée par la mesure de plusieurs traits fonctionnels foliaires. Dix paramètres morpho-fonctionnels ont été déterminés, à la fois à l'échelle de la plante entière et au niveau des feuilles individuelles, afin d'appréhender les différentes stratégies mises en œuvre par cette espèce pour assurer sa survie et son développement dans un environnement aride.

4.2. Matériel biologique.

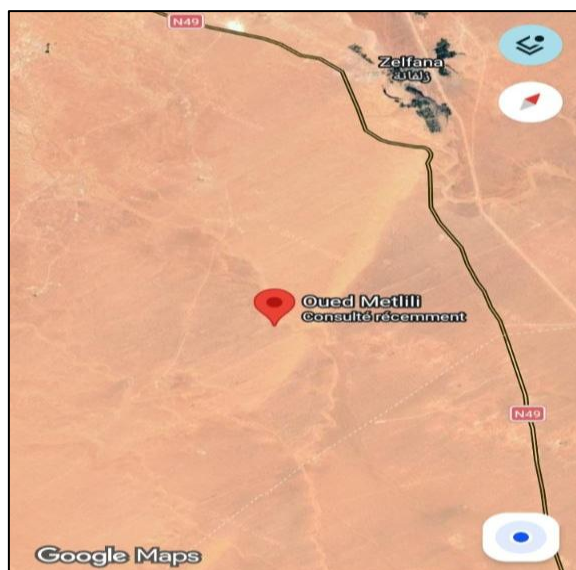
Le matériel biologique est constitué de 24 plantes (pieds) de l'espèce *P. tomentosa*, sélectionnés dans la zone d'étude. De chaque arbre, nous avons prélevé 10 feuilles saines et matures, soit un total de 240 feuilles analysées.

4.3. Site d'étude.

Notre étude a été menée dans la région d'Oued Metlili, située dans la wilaya de Ghardaïa, au Sahara algérien. Ce site a été retenu en raison de l'abondance et de la distribution relativement homogène de *P. tomentosa*, ainsi que de son climat aride caractérisé par des précipitations faibles et irrégulières. Les échantillons ont été collectés le 16 février 2026

Les caractéristiques géographiques du site d'étude sont les suivantes :

- Latitude : 32° 16' Nord
- Longitude : 03° 38' Est
- Altitude : 455 m



Photographie 2. Oued Metili (Google maps)

4.4. Équipement de terrain.

Pour mener à bien notre expérimentation et atteindre les objectifs fixés, nous avons utilisé sur le terrain un ensemble d'outils simples et adaptés aux échantillons prélevés, en vue de leur identification et analyse ultérieures au laboratoire. Ces outils comprennent :

- ✚ Décamètre.
- ✚ Sacs plastiques stériles.
- ✚ Eau distillée.
- ✚ Glacière Isotherme.
- ✚ Appareil Photo pour photographier les espèces végétales.
- ✚ GPS pour le positionnement des relevés.

4.5. Équipement de laboratoire.

Pour les analyses en laboratoire, nous avons utilisé le matériel suivant :

- ✚ Pied à coulisse électronique : pour mesurer la longueur, la largeur et l'épaisseur des feuilles avec une précision millimétrique.
- ✚ Scanner (Canon) : pour numériser les feuilles et obtenir des images hautes résolution.
- ✚ Balance scientifique de précision (précision 0,001 g) : pour peser les feuilles (poids frais et poids sec).
- ✚ Sacs en papier : pour le séchage des échantillons.

4.6. Méthodes d'étude.

4.6.1. Échantillonnage.

L'échantillonnage a été réalisé sur une station unique à (Metlili) 24 individus de *P. tomentosa*, ont été sélectionnés, espacés d'environ 50 à 100 mètres les uns des autres pour garantir l'indépendance des échantillons.

Pour chaque individu, les feuilles ont été prélevées en veillant à couvrir l'ensemble de l'arbre, depuis les branches inférieures jusqu'aux parties supérieures, et sur différents côtés de la canopée, afin d'éviter un prélèvement localisé et de garantir la représentativité de l'échantillon. Au total, 10 feuilles par individu ont été collectées, soit 240 feuilles.

Après le prélèvement, les échantillons ont été placés dans des sacs plastiques stériles contenant de l'eau distillée et conservés dans une glacière isotherme jusqu'au transfert au laboratoire, afin de préserver la structure des feuilles et éviter leur altération



Photographie 3. Échantillonnage de *P. tomentosa* sur le terrain (Hadeef et Oulad hammadi, 2026)

4.7. Mesure des traits fonctionnels.

Hauteur de l'arbre : Il s'agit de la mesure verticale allant de la surface du sol jusqu'au point le plus haut des tissus photosynthétiques principaux de l'arbre. Cette distance a été relevée en mètres à l'aide d'un ruban métrique, en partant de la base jusqu'à la cime de l'individu végétal.

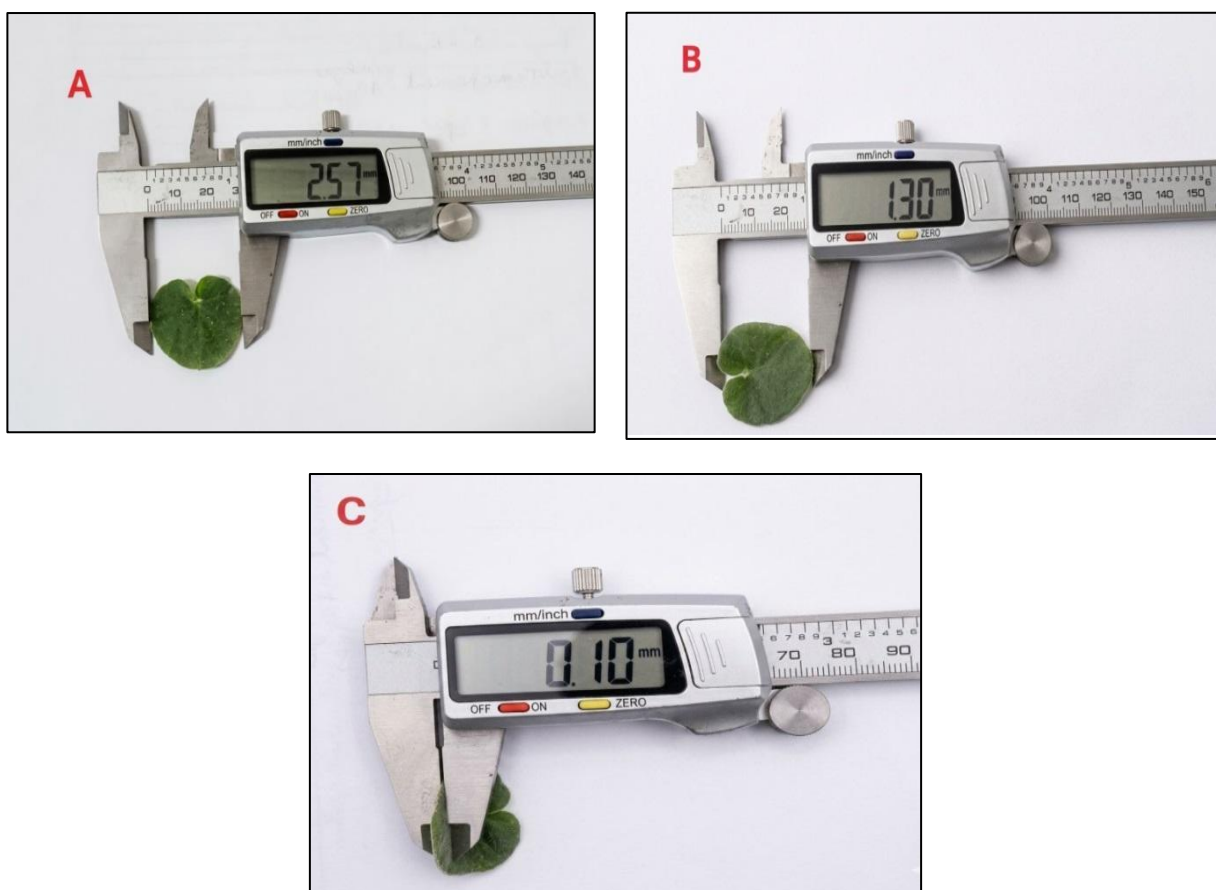
Largeur du houppier : Elle correspond à l'extension horizontale de la couronne de l'arbre. Elle a été estimée en mètres à l'aide d'un ruban métrique, en effectuant deux mesures

selon des directions perpendiculaires (longueur et largeur), c'est-à-dire le long de deux axes formant un angle droit (90°). La première mesure représente l'extension maximale du houppier, tandis que la seconde est prise perpendiculairement à celle-ci, ce qui permet d'obtenir une estimation plus précise de sa dimension globale.

4.7.1. Mesures au niveau des feuilles.

4.7.1.1. Mesure de l'épaisseur, de la longueur et de la largeur du limbe.

Les mesures ont été effectuées sur un échantillon de 240 feuilles au laboratoire, comme suit : Les feuilles ont été détachées de leurs pétioles, puis essuyées avec du papier absorbant afin d'éliminer l'humidité superficielle. Ensuite, l'épaisseur, la longueur et la largeur du limbe ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse électronique avec une précision au millimètre, toutes les mesures ayant été enregistrées pour assurer la rigueur expérimentale.

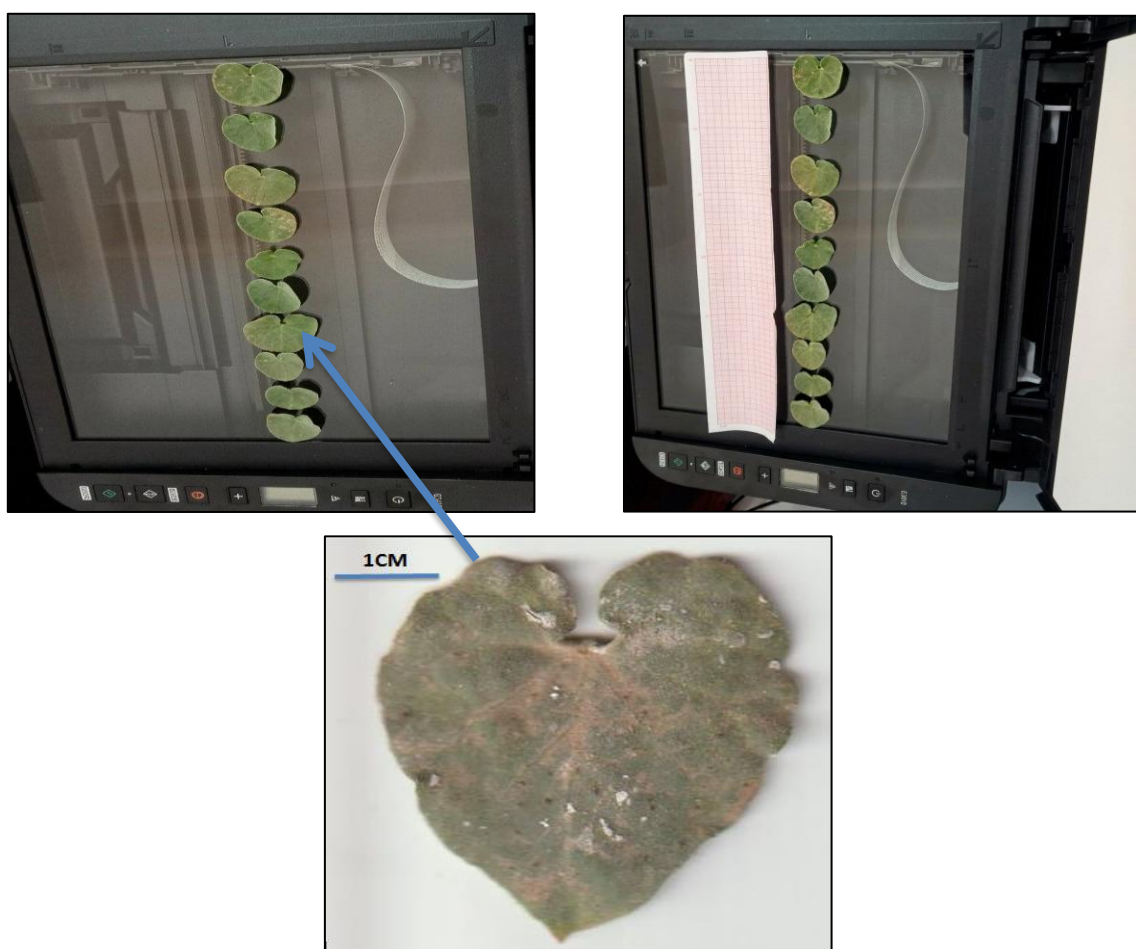


Photographie 04. Mesure de l'épaisseur, de la longueur et de la largeur des feuilles à l'aide d'un pied à coulisse électronique (précision au millimètre) (Hadeef et Oulad hammadi. 2026)

4.7.1.2.- Mesure de la surface foliaire.

La détermination de la surface des feuilles s'est déroulée en deux étapes :

1. Numérisation : Les feuilles ont été scannées à l'aide d'un scanner (Canon) pour obtenir des images numériques nettes. Une feuille millimétrée a été placée à côté des feuilles lors de la numérisation pour calibrer les mesures.
2. Analyse des images : Après calibration, le logiciel Mesurim Pro a été utilisé pour déterminer le périmètre de chaque feuille et calculer automatiquement sa surface en centimètres carrés, puis convertir les valeurs en millimètres carrés afin de faciliter le calcul des indicateurs fonctionnels des plantes.



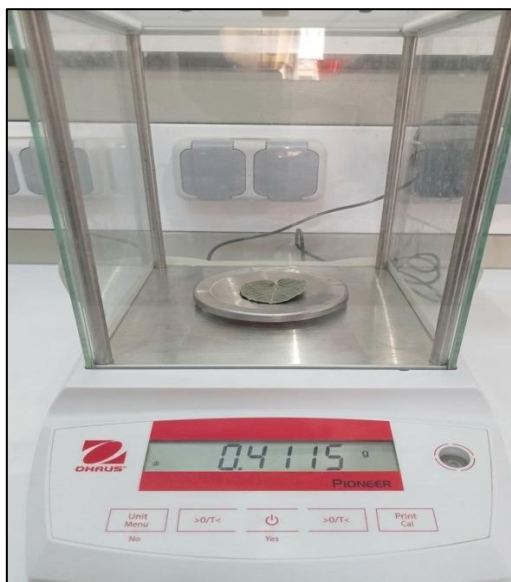
Photographie 5. Scanner des feuilles de *Pergularia tomentosa*.

4.7.1.3.- Mesure du poids frais.

La masse initiale (frais) de l'ensemble des 240 feuilles a été enregistrée immédiatement après leur collecte, à l'aide d'une balance électronique de précision (sensibilité de 0,001 g), afin d'obtenir des lectures précises.

4.7.1.4.- Séchage et mesure du poids sec.

Après la pesée, les échantillons foliaires, au nombre de 240, ont été conservés dans des sacs en papier à l'abri de l'humidité pendant une période variant de un mois jusqu'à l'achèvement du processus de séchage. L'opération s'est poursuivie jusqu'à l'obtention d'une masse constante, indication une dessiccation complète. Enfin, la masse sèche de chacune des 240 feuilles a été mesurée à l'aide de la même balance électronique pour garantir la cohérence des résultats.



Photographie 6. Mesure du poids des feuilles à l'aide d'une balance scientifique (Hadeef et Oulad hammadi, 2026)

4.7.1.5. - Indices SLA (Specific Leaf Area) et LDMC (Leaf Dry Matter Content).

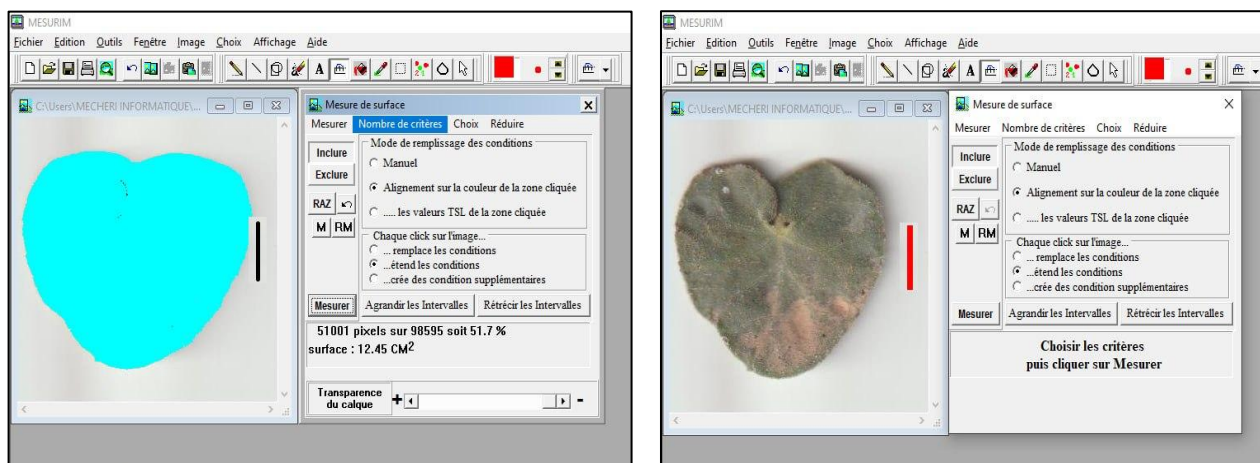
L'indice de surface foliaire spécifique, couramment désigné par l'abréviation SLA (Specific Leaf Area), exprime le quotient de la surface d'une feuille (en mm²) par sa masse anhydre (en mg), selon la définition proposée par (Pérez-Harguindeguy et *al.*, 2016). Quant au contenu en matière sèche des feuilles, ou LDMC (Leaf Dry Matter Content), il représente la fraction de matière sèche contenue dans les limbes par rapport à leur masse fraîche ; son calcul consiste à diviser la masse sèche (mg) par la masse fraîche (g). Ces deux indicateurs occupent une place centrale en écologie fonctionnelle des végétaux, car ils renseignent sur les réponses adaptatives des espèces aux conditions du milieu (Cornelissen et *al.*, 2003).

Pour le calcul de ces indices, des mesures précises ont été réalisées au laboratoire :

- Mesure de la masse fraîche : La masse fraîche de chaque feuille a été déterminée à l'aide d'une balance de précision scientifique affichant une sensibilité de 0,001 g (Photo.8)
- Dessiccation : Les échantillons foliaires ont ensuite été déposés dans des sachets en papier, protégés de toute exposition à l'humidité, jusqu'à l'atteinte d'une masse invariante, garantissant ainsi un assèchement total
- Mesure de la masse sèche : La masse de chaque feuille a été relevée en utilisant la même balance scientifique

✚ Formules de calcul :

- $SLA = \text{surface foliaire (en mm}^2\text{)} / \text{masse sèche (en mg)}$
- $LDMC = \text{masse sèche (en mg)} / \text{masse fraîche (en g)}$.



Photographie 7. Mesure de la surface foliaire à l'aide du logiciel Mesurim Pro.

4.8. Démarche d'analyse statistique.

L'ensemble des traitements statistiques a été réalisé sous Python 3 (bibliothèques pandas, scipy, scikit-learn). La démarche suit un enchaînement logique et justifié en quatre étapes :

4.8.1. Statistiques descriptives.

Les statistiques descriptives classiques ont été calculées pour chaque trait : moyenne, médiane, écart-type, minimum, maximum et coefficient de variation ($CV = \text{écart-type} / \text{moyenne} \times 100$). Le CV permet d'évaluer la variabilité relative de chaque trait indépendamment de son unité, ce qui est essentiel lorsqu'on compare des variables de natures très différentes (longueur en mm, masse en mg, surface en mm^2).

La médiane est privilégiée comme mesure de tendance centrale en complément de la moyenne, car les distributions asymétriques fréquentes pour les traits fonctionnels peuvent fortement biaiser la moyenne (Field, 2009).

4.8.2. Test de normalité (Shapiro-Wilk)

Avant tout test inférentiel, la normalité des distributions a été vérifiée via le test de Shapiro-Wilk (SW). Ce test est retenu de préférence au test de Kolmogorov-Smirnov pour les échantillons de taille modérée à grande ($n \leq 2000$), car il présente une puissance statistique supérieure pour détecter les déviations à la normalité (Razali & Wah, 2011). Le seuil de décision est $\alpha = 0,05$. Ce test conditionne le choix des tests inférentiels ultérieurs : si la normalité est rejetée, les tests non paramétriques s'imposent pour comparer les distributions et estimer les corrélations.

4.8.3. Test de Kruskal-Wallis (variabilité inter-individuelle)

La variabilité inter-individuelle a été testée par le test de Kruskal-Wallis, équivalent non paramétrique de l'ANOVA à un facteur. Ce test compare les rangs des observations entre les 24 groupes (individus). Il a été préféré à l'ANOVA classique car :

- Les distributions des traits sont non normales (résultat du test de Shapiro-Wilk).
- Les effectifs par groupe sont égaux (10 feuilles/individu), ce qui n'invalide pas l'ANOVA, mais le rejet de la normalité et les fortes asymétries observées rendent le test de Kruskal-Wallis plus robuste.
- Le test de Kruskal-Wallis ne requiert ni normalité ni homogénéité des variances (hypothèse de Levene).

L'hypothèse nulle est H_0 : les distributions sont identiques dans tous les groupes. L'hypothèse alternative H_1 : au moins un groupe se distingue. La statistique H suit approximativement une loi du chi-deux à $(k-1) = 23$ degrés de liberté (Conover, 1999).

4.8.4. Corrélations de Spearman.

Les corrélations entre traits ont été estimées par le coefficient de corrélation de Spearman (ρ). Ce coefficient, basé sur les rangs des observations, est préféré à la corrélation de Pearson pour les raisons suivantes :

- Les distributions ne sont pas normales (condition requise par Pearson).
- Plusieurs traits présentent des distributions très asymétriques (notamment SLA et poids sec), pour lesquelles la corrélation de Pearson peut être fortement influencée par les valeurs extrêmes.

- Le coefficient de Spearman est insensible aux outliers et aux non-linéarités monotones (Corder & Foreman, 2014).

La significativité des coefficients ρ est testée par le test t à $(n-2)$ degrés de liberté. Les seuils de significativité retenus sont : *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns non significatif.

4.8.5. Analyse en Composantes Principales (ACP).

L'ACP a été réalisé sur les 8 traits standardisés (centrage-réduction) afin d'explorer la structure multivariée des données. La standardisation est indispensable ici car les traits sont exprimés dans des unités très différentes (mm, g, mg, mm²/mg), ce qui rendrait les résultats sans standardisation entièrement dominés par les traits à grande variance absolue (notamment surface et poids sec en valeurs brutes).

La standardisation transforme chaque variable x_i en : $z_i = (x_i - \mu_i) / \sigma_i$, garantissant que chaque trait contribue équitablement à l'analyse. Le critère de Kaiser (rétention des composantes à valeur propre > 1) est utilisé pour déterminer le nombre de composantes à interpréter (Jolliffe, 2002).

Chapitre II.

Résultats et discussion

Chapitre II. Résultats et discussion

II.1. Statistiques descriptives des traits fonctionnels.

Une analyse descriptive des traits fonctionnels de *P. tomentosa* a été effectuée pour caractériser la variabilité morphologique et fonctionnelles observées pour tous les individus. 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 24 individus et 240 feuilles analysés par la station.

Tableau 2. Statistiques descriptives et résultats du test de Shapiro-Wilk pour les 8 traits foliaires. CV > 80 % (variabilité très élevée) ; Asymétrie > 3 ; W et p-valeur (H_0 rejetée pour tous les traits). n = 240, $\alpha = 0.05$.

Variable	N	Moyenne	Médiane	Écart-type	CV(%)	Min	Max	W (SW)	p (SW)	KW (p)
Longueur (mm)	240	1.907	1.785	0.537	28.2	1.12	5.16	0.881	<0.001	<0.001
Largeur (mm)	240	1.519	1.440	0.349	23.0	1.02	3.92	0.843	<0.001	0.009
Épaisseur (mm)	240	0.264	0.233	0.121	45.7	0.11	0.66	0.925	<0.001	<0.001
Poids frais (g)	240	0.374	0.354	0.131	35.0	0.15	0.88	0.954	<0.001	<0.001
Poids sec (mg)	240	58.9	53.6	58.1	98.7	5.99	809	0.291	<0.001	<0.001
Surface (mm ²)	240	1826	1682	684	37.4	765	4210	0.947	<0.001	<0.001
SLA (mm ² /mg)	240	43.5	29.5	53.7	123.3	2.72	356	0.384	<0.001	<0.001
LDMC (mg/g)	240	168.0	159.6	159.0	94.6	12.1	1973	0.236	<0.001	<0.001

Les statistiques descriptives pour les 8 traits foliaires mesurés sur 240 feuilles (24 individus) sont présentées dans le tableau suivant. La colonne CV (%) renseigne sur la variabilité relative de chaque trait ; les colonnes SW (Shapiro-Wilk) et KW (Kruskal-Wallis) anticipent les résultats des tests différentiels détaillés aux sections suivantes.

La SLA présente le coefficient de variation le plus élevé (123,3 %), indiquant une très forte hétérogénéité entre individus. Sa distribution est extrêmement asymétrique : la médiane (29,5 mm²/mg) est bien inférieure à la moyenne (43,5 mm²/mg), suggérant une distribution à queue droite lourde.

La LDMC affiche également une variabilité relative élevée (94,6 %), avec une valeur maximale de 1973,2 mg/g correspondant à une feuille quasi entièrement déshydratée, biologiquement plausible en conditions de stress hydrique extrême (confirmé par l'expert).

Le poids sec présente une variabilité relative plus élevée des traits dimensionnels (98,7 %), reflétant d'importantes différences de teneur en matière sèche entre individus.

L'épaisseur foliaire montre un CV modéré (45,7 %), avec des valeurs allant de 0,11 à 0,66 mm, une gamme de variation substantielle révélatrice de différences anatomiques interindividuelles.

La longueur et la largeur présentent une variabilité relative plus modérés (28,2 % et 23,0 %) et des distributions moins asymétriques (moyennes et médianes proches).

II.2. Variabilité inter-individuelle --Test de Kruskal-Wallis.

Les résultats présents dans le tableau ci-dessous du test de Kruskal-Wallis appliqué aux différents traits foliaires de *P. tomentosa*. Cette analyse a été réalisée afin de mettre en évidence l'existence d'une variabilité inter-individuelle au sein des individus étudiée. Les valeurs de H et les niveaux de significativité obtenus montrent que tous les traits considérés diffèrent significativement entre les individus, traduisant une forte variabilité morphologique et fonctionnelle au sein de l'espèce.

Tableau 3. Résultats des tests de Kruskal-Wallis pour la variabilité inter- individuelle.

Variable	Stat. H	Ddl	p-valeur	($\alpha=0.05$)
Longueur (mm)	57.90	23	< 0.001	***
Largeur (mm)	41.94	23	0.009	***
Épaisseur (mm)	158.71	23	< 0.001	***
Poids frais (g)	145.35	23	< 0.001	***
Poids sec (mg)	80.97	23	< 0.001	***
Surface (mm ²)	141.07	23	< 0.001	***
SLA (mm ² /mg)	80.65	23	< 0.001	***
LDMC (mg/g)	89.00	23	< 0.001	***

Les résultats montrent que l'ensemble des traits foliaires étudiés varie significativement entre les 24 individus de *P. tomentosa*. Cette variation est hautement significative pour la plupart des traits ($p < 0,001$), tandis que la largeur des feuilles présente également une différence significative, bien que moins marquée ($p = 0,009$). Ces observations indiquent que les individus étudiés possèdent des caractéristiques fonctionnelles foliaires différentes, même lorsqu'ils appartiennent à une même population et occupent le même site. Cette variabilité peut résulter de micro-variations des conditions édaphiques et topographiques affectant l'accès aux ressources hydriques, d'une diversité génétique entre les individus, ou encore de différences liées au stade phénologique et à l'exposition aux facteurs climatiques tels que le rayonnement solaire, la température et le vent.

L'épaisseur foliaire affiche la statistique H la plus élevée ($H = 158,71$), indiquant que c'est le trait le plus discriminant entre individus, ce qui est cohérent avec le fait que l'épaisseur des feuilles est un trait anatomique finement régulé par les conditions microclimatiques locales.

II.3. Corrélations de Spearman entre traits foliaires.

Afin d'étudier les relations existant entre les différents traits morphologiques et fonctionnels foliaires de *P. tomentosa*, une analyse de corrélation de Spearman a été réalisée sur l'ensemble des observations ($n = 240$). Cette analyse permet d'identifier les associations positives ou négatives entre les variables étudiées et d'évaluer leur intensité ainsi que leur significativité statistique. Les résultats présentés dans le (Tab. 5) montrent une diversité de relations entre les traits foliaires, allant de corrélations faibles ou non significatives à des corrélations fortes et hautement significatives. Les associations les plus marquées concernent notamment les dimensions foliaires, les paramètres liés à la biomasse et à la teneur en matière sèche, ainsi que les traits fonctionnels tels que la surface foliaire spécifique (SLA) et la teneur en matière sèche foliaire (LDMC), révélant ainsi les principaux compromis fonctionnels mis en œuvre par l'espèce dans les conditions arides du site étudié.

Tableau 4. Matrice de corrélations de Spearman (ρ). Les cellules foncées indiquent les corrélations fortes ($\rho > 0,50$). Seuils de significativité : $p < 0,001$, $p < 0,01$, $p < 0,05$.NS : non significatif. $n = 240$.

	Longueur	Largeur	Épaisseur	Poids. Frais	Poids. Sec	Surface	SLA	LDMC
Longueur	—	0.787	0.055 ns	0.301	0.346	0.287	0.081 ns	-0.053 ns
Largeur	0.787	—	-0.054 ns	0.230	0.256	0.223	0.047 ns	-0.025 ns
Épaisseur	0.055 ns	-0.054 ns	—	0.180 ns	0.172 ns	0.102 ns	0.028 ns	-0.169
Poids. Frais	0.301	0.230	0.180 ns	—	0.530	0.808	0.368	-0.545
Poids. Sec	0.346	0.256	0.172 ns	0.530	—	0.473	-0.193	0.235
Surface	0.287	0.223	0.102 ns	0.808	0.473	—	0.661	-0.362
SLA	0.081 ns	0.047 ns	0.028 ns	0.368	-0.193	0.661	—	-0.581
LDMC	-0.053 ns	-0.025 ns	-0.169 ns	-0.545	0.235	-0.362	-0.581	—

II.3.1. Corrélation entre la SLA et le LDMC ($\rho = -0,581$; $p < 0,001$).

La corrélation négative significative observée entre la surface foliaire spécifique (SLA) et la teneur en matière sèche foliaire (LDMC) met en évidence un compromis fonctionnel classique entre deux stratégies écologiques contrastées. Les individus présentant des valeurs élevées de SLA possèdent généralement des feuilles plus fines et moins denses, caractéristiques d'une stratégie d'acquisition rapide des ressources. À l'inverse, les individus à forte LDMC développent des feuilles plus denses et plus résistantes, associées à une stratégie conservatrice favorisant la tolérance aux contraintes environnementales. Chez les espèces xérophytes, une LDMC élevée est généralement liée à une meilleure résistance mécanique des tissus et à une limitation des pertes hydriques. Les valeurs observées dans cette étude, notamment la médiane du LDMC (159,6 mg/g) et la prédominance d'individus présentant un LDMC supérieur à 140 mg/g, indiquent que *P. tomentosa* adopte principalement une stratégie conservatrice, adaptée aux conditions arides du milieu étudié.

II.3.2. Corrélation entre la SLA et la surface foliaire ($\rho = +0,661$; $p < 0,001$).

La relation positive significative entre la SLA et la surface foliaire suggère que les individus possédant une plus grande surface foliaire développent également une surface photosynthétique plus importante par unité de biomasse investie. Cette tendance traduit un investissement relativement faible en matière sèche par unité de surface, ce qui est caractéristique des feuilles à forte efficacité d'acquisition des ressources. Cette relation est

cohérente avec les principes de l'écologie fonctionnelle décrivant les variations du spectre économique foliaire.

II.3.3. Corrélation entre la surface foliaire et le poids frais ($\rho = +0,808$; $p < 0,001$).

La forte corrélation positive observée entre la surface foliaire et le poids frais indique que l'augmentation de la taille des feuilles s'accompagne d'une augmentation proportionnelle de leur biomasse fraîche. Cette relation reflète le lien étroit existant entre le développement foliaire et la quantité d'eau contenue dans les tissus, et s'inscrit dans les relations allométriques couramment décrites chez les plantes adaptées aux environnements arides.

II.3.4. Corrélation entre le LDMC et le poids frais ($\rho = -0,545$; $p < 0,001$).

La corrélation négative entre le LDMC et le poids frais montre que les feuilles les plus riches en matière sèche tendent à contenir proportionnellement moins d'eau. Ainsi, les individus présentant des valeurs élevées de LDMC possèdent des tissus plus denses et moins hydratés, ce qui constitue une adaptation efficace à la sécheresse. Cette caractéristique est généralement associée à la sclérophylle et à une meilleure conservation des ressources hydriques dans les milieux contraignants.

II.3.5. Corrélation entre la longueur et la largeur des feuilles ($\rho = +0,787$; $p < 0,001$)

La forte corrélation positive entre la longueur et la largeur foliaires traduit une croissance proportionnelle des dimensions de la feuille. Les individus possédant des feuilles plus longues présentent également des feuilles plus larges, ce qui suggère une relative stabilité de la forme foliaire au sein de la population étudiée. Cette relation témoigne d'une croissance isométrique des feuilles, sans modification importante du rapport longueur/largeur entre les individus.

II.4. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les 8 traits fonctionnels foliaires de *P. tomentosa* ($n = 240$ observations, 24 individus $\times$ 10 feuilles), après standardisation des variables (centrage-réduction). Le Critère de Kaiser ($\lambda > 1$) est considéré produisant quatre composantes retenues : $PC1+PC2+PC3+PC4 = 89.6$ % de variance totale. Ces résultats sont organisés selon une progression logique : structure globale de la variance (éboulis), qualité de représentation des variables (loadings) puis des individus.

Selon le critère de Kaiser, 4 composantes sont retenues (valeurs propres > 1). Cependant, les deux premières composantes ($PC1 + PC2 = 58,2 \%$) suffisent pour une interprétation graphique via le biplot.

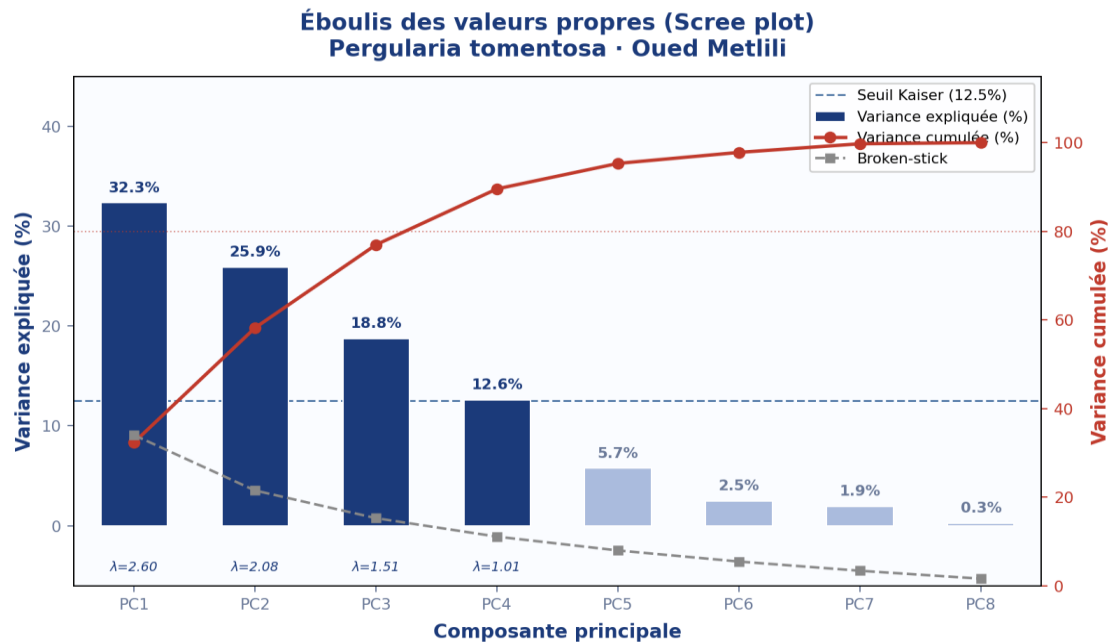


Figure 6. Variance expliquée par composante (barres bleues), variance cumulé (courbe coral), modèle broken-stick (pointillés gris) et seuil de Kaiser (ligne bleue à 12.5 %).

Le scree plot (ou éboulis des valeurs propres), représenté dans la Figure 1, constitue le premier élément d'interprétation dans une analyse en composantes principales (ACP). Il permet de visualiser, pour chaque composante principale, plusieurs informations complémentaires. Les barres bleues, associées à l'axe de gauche, indiquent le pourcentage de variance totale expliqué par chaque composante. La courbe de couleur corail, liée à l'axe de droite, représente la variance cumulée au fur et à mesure de l'ajout des composantes. Les pointillés gris correspondent au modèle du *broken-stick*, utilisé comme critère alternatif à celui de Kaiser pour déterminer le nombre optimal de composantes à retenir. Enfin, la ligne horizontale bleue, fixée à 12,5 %, représente le seuil de Kaiser : toute composante expliquant plus de 1/8 de la variance totale possède une valeur propre supérieure à 1.

Tableau 5. Résultats des valeurs propres par composante principale.

Composante	Valeur propre λ	Variance (%)	Cumul (%)	Kaiser ($\lambda > 1$)	Interprétation
PC1	2.597	32.33	32.33	✓ Retenu	Taille/eau foliaire
PC2	2.078	25.87	58.20	✓ Retenu	Matière sèche
PC3	1.507	18.76	76.95	✓ Retenu	Dimensions foliaires
PC4	1.013	12.61	89.56	✓ Retenu	Épaisseur isolée
PC5	0.462	5.75	95.31	✗ Rejeté	—
PC6	0.200	2.49	97.80	✗ Rejeté	—
PC7	0.156	1.94	99.75	✗ Rejeté	—
PC8	0.020	0.25	100.00	✗ Rejeté	—

L'analyse en composantes principales met en évidence une structuration importante de la variabilité des traits foliaires étudiés. Selon le critère de Kaiser ($\lambda > 1$), quatre composantes principales ont été retenues, indiquant qu'elles apportent chacune une quantité d'information supérieure à celle d'une variable standardisée isolée. Ces quatre axes expliquent à eux seuls 89,56 % de la variance totale, ce qui traduit une très forte capacité de synthèse de l'analyse par rapport aux huit variables initiales.

La première composante (PC1), avec une valeur propre de 2,597 et 32,33 % de variance expliquée, constitue l'axe dominant de structuration des données. Elle reflète principalement un gradient lié à la taille et au statut hydrique des feuilles. La deuxième composante (PC2), expliquant 25,87 % de la variance, représente un axe indépendant du premier et semble davantage associé aux traits liés à la matière sèche, traduisant une stratégie de densité tissulaire. La troisième composante (PC3), qui explique 18,76 % de la variance, reste également fortement informative et correspond principalement aux dimensions foliaires, notamment les variations de longueur, de largeur et de surface. Enfin, la quatrième composante (PC4), bien que proche du seuil de Kaiser ($\lambda = 1,013$), est conservée car elle contribue encore 12,61 % de la variance totale et semble représenter une variation spécifique liée à l'épaisseur foliaire.

Les composantes suivantes (PC5 à PC8), dont les valeurs propres sont inférieures à 1, sont considérées comme non significatives selon le critère de Kaiser et n'apportent qu'une contribution marginale à l'explication de la variance totale. Ainsi, la structure des données peut être résumée efficacement par les quatre premières composantes, qui traduisent les principaux axes fonctionnels des traits foliaires étudiés.

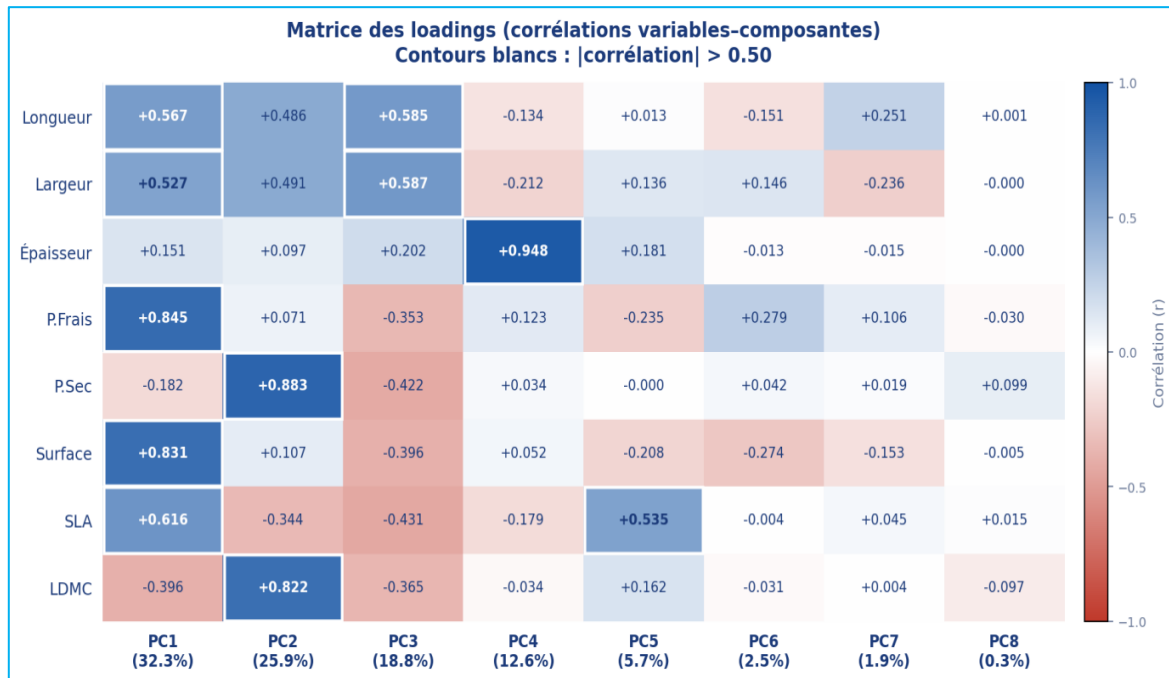
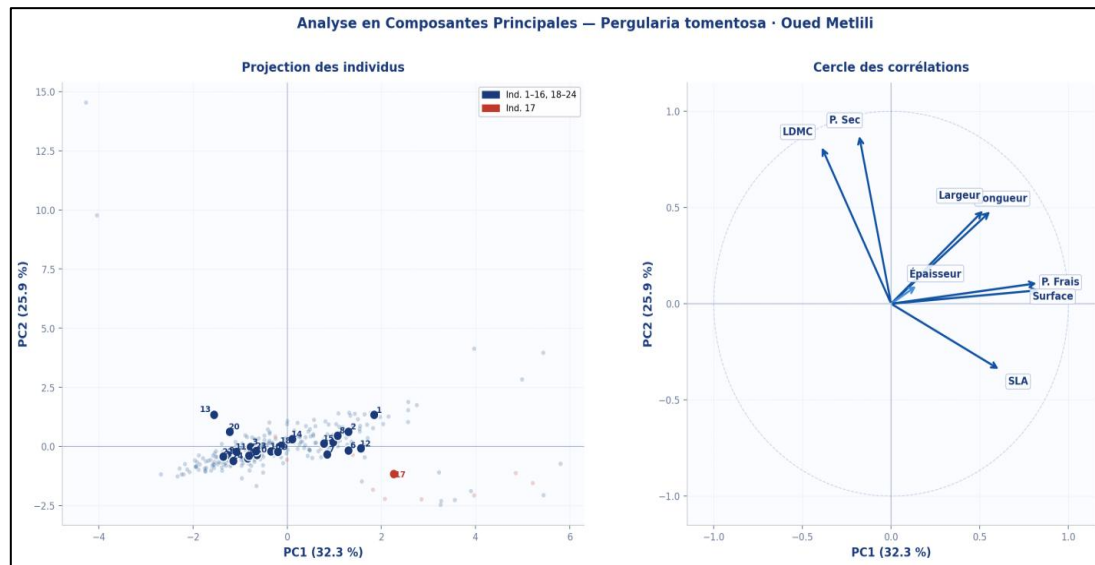


Figure 7 : Matrice des loadings : corrélations de chaque variable avec chaque composante principale. Rouge = corrélation positive forte ; bleu = corrélation négative forte ; contours blancs = $|r| > 0.50$.

Afin d'identifier la structure sous-jacente des relations entre les différents traits morphologiques et fonctionnels foliaires de *P. tomentosa*, les coefficients de corrélation (loadings) associés aux quatre premières composantes principales ont été analysés. Ces loadings permettent de déterminer la contribution de chaque variable à la formation des axes factoriels et d'interpréter leur signification écologique. Le tableau présente ainsi la contribution des variables aux composantes PC1 à PC4, mettant en évidence les associations fortes ainsi que les oppositions entre traits. Cette analyse permet de distinguer les principaux gradients fonctionnels structurant la variabilité des données, notamment ceux liés aux dimensions foliaires, à la biomasse, à la teneur en matière sèche et aux stratégies d'utilisation des ressources.

Tableau 6. Résultats des loadings des variables par rapport aux premières composantes principales considérées.

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	Interprétation
Longueur	+0.567	+0.486	+0.585	-0.134	Longueur et largeur corrélées positivement sur PC1–PC3
Largeur	+0.527	+0.491	+0.587	-0.212	Corrélée aux dimensions sur PC1–PC3
Épaisseur	+0.151	+0.097	+0.202	+0.948	Isolée sur PC4 ($\cos^2=0.898$) — axe exclusif
Poids frais	+0.845	+0.071	-0.353	+0.123	Détermine PC1 avec Surface ($\cos^2=0.714$)
Poids sec	-0.182	+0.883	-0.422	+0.034	Détermine PC2 avec LDMC ($\cos^2=0.780$)
Surface	+0.831	+0.107	0.396	+0.052	Co-détermine PC1 avec P.Frais ($\cos^2=0.691$)
SLA	+0.616	-0.344	-0.431	-0.179	Contribue à PC1 et PC3 — trade-off SLA
LDMC	-0.396	+0.822	-0.365	-0.034	Co-détermine PC2 avec P.Sec ($\cos^2=0.676$)

**Figure 8.** ACP-Projection des 24 individus (gauche) et cercle des corrélations des 8 traits foliaires (droite). PC1 = 32,3 %, PC2 = 25,9 % de variance. L'individu 17 (orange) est biologiquement distinct. Flèches foncées : variables à forte contribution ($r > 0,55$)

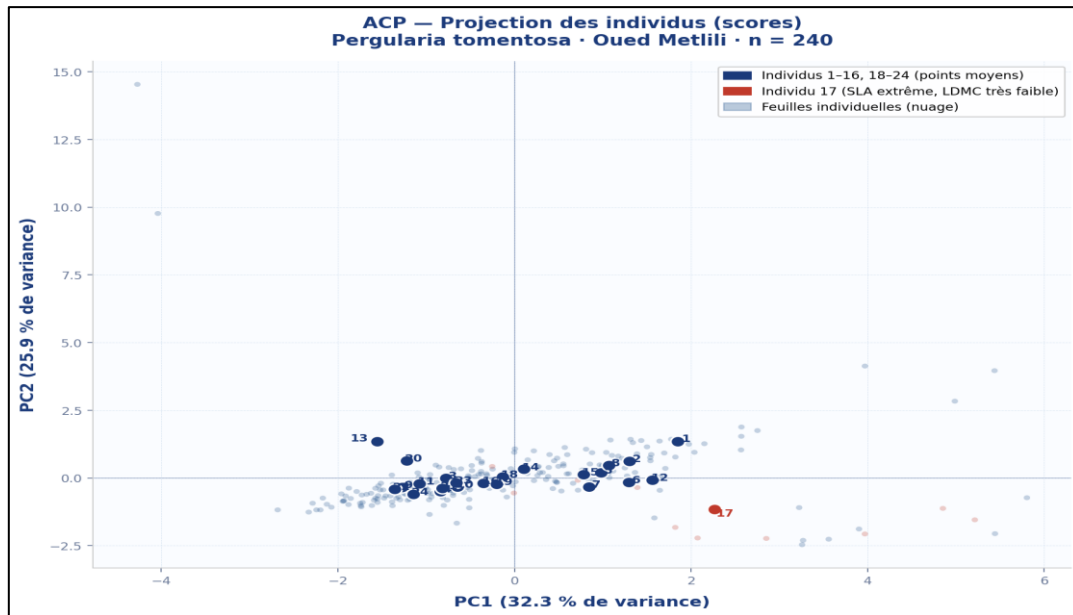


Figure 9. Projection des 24 individus sur les plans PC1–PC2. Les points petits représentent les 10 feuilles de chaque individu ; les grands points sont les moyennes individuelles. L'individu 17 (orange) présente un profil fonctionnel exceptionnel (SLA élevée, LDMC faible). PC1 + PC2 = 58,2 % de la variance totale.

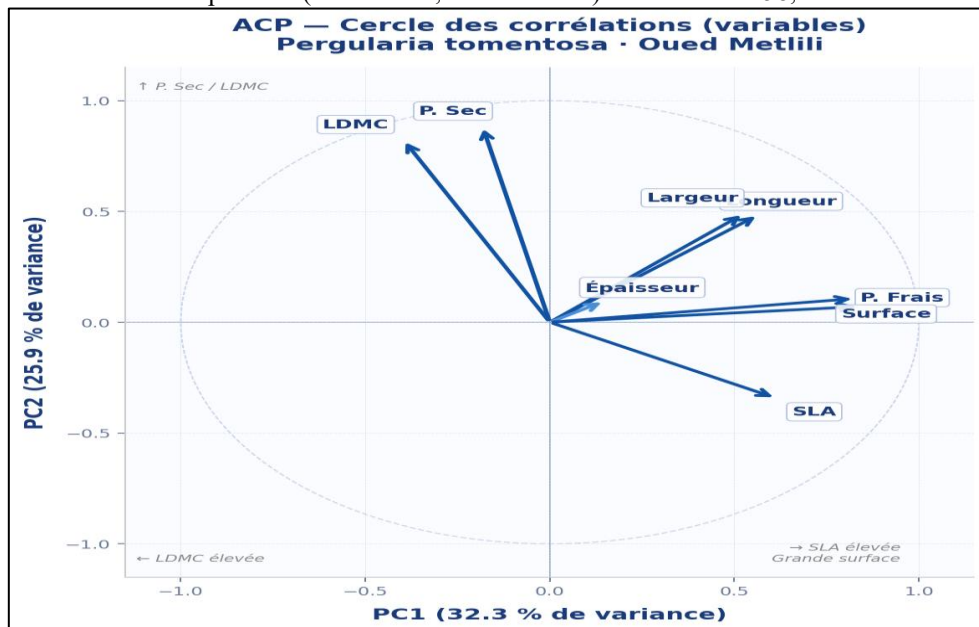


Figure 10. Cercle des corrélations des 8 traits foliaires sur les plans PC1–PC2. La longueur des vecteurs est proportionnelle à la contribution de la variable à l'axe. Les flèches de couleur foncée (bleu royal) indiquent les variables les mieux représentées (contribution $\geq 55\%$). Le cercle de référence représente la corrélation maximale ($r = 1$).

La première composante principale (PC1) est fortement corrélée positivement avec le poids frais ($r = +0,845$), la surface foliaire ($r = +0,831$), la surface foliaire spécifique (SLA ; $r = +0,616$), ainsi qu'avec les dimensions foliaires, notamment la longueur ($r = +0,567$) et la largeur ($r = +0,527$). Elle présente également une corrélation négative avec la teneur en matière sèche (LDMC ; $r = -0,396$). Cet axe traduit ainsi un gradient fonctionnel opposant deux profils contrastés d'individus : d'une part, des individus à scores élevés sur PC1,

caractérisés par de grandes feuilles riches en eau et à forte SLA, correspondant à une stratégie d'acquisition rapide des ressources ; d'autre part, des individus à scores faibles, présentant des feuilles plus petites, plus denses et à forte LDMC, traduisant une stratégie conservatrice typique des espèces xérophytes. Le poids sec présente une faible contribution à cet axe ($r = -0,182$), indiquant que la matière sèche structurale est peu associée à la variation de taille foliaire et semble davantage structurée par la deuxième composante.

La deuxième composante principale (PC2) est principalement déterminée par le poids sec ($r = +0,883$) et la LDMC ($r = +0,822$), avec des contributions positives modérées de la longueur ($r = +0,486$) et de la largeur ($r = +0,491$). La SLA est, quant à elle, modérément corrélée négativement ($r = -0,344$). PC2 représente ainsi un gradient de densité et de teneur en matière sèche des tissus foliaires, relativement indépendant de la taille des feuilles décrite par PC1. Les individus présentant des scores élevés sur cet axe se caractérisent par une forte accumulation de matière sèche, traduisant des tissus plus sclérophylles, généralement associés à une meilleure résistance mécanique et à une limitation des pertes hydriques en conditions arides.

La troisième composante principale (PC3) est dominée positivement par la longueur ($r = +0,585$) et la largeur ($r = +0,587$), tandis que les variables liées à la biomasse et à la physiologie foliaire, telles que le poids frais ($r = -0,353$), le poids sec ($r = -0,422$), la SLA ($r = -0,431$) et la LDMC ($r = -0,365$), y contribuent négativement. PC3 reflète ainsi principalement une variation de la forme foliaire et des proportions dimensionnelles, indépendante des caractéristiques de biomasse. Cet axe oppose des feuilles relativement grandes en dimensions mais à faible investissement en biomasse à des feuilles plus denses et plus riches en matière sèche.

Enfin, la quatrième composante principale (PC4) est quasi exclusivement déterminée par l'épaisseur foliaire ($r = +0,948$), tandis que les autres variables présentent des contributions négligeables ($|r| < 0,22$). Cette forte spécificité indique que l'épaisseur foliaire constitue un trait indépendant des autres dimensions et propriétés fonctionnelles mesurées. Sur le plan écologique, ce trait peut être associé à des mécanismes d'adaptation spécifiques tels que la succulence ou le développement de tissus foliaires spécialisés, distincts des stratégies liées à la surface, à la biomasse ou à la teneur en matière sèche.

En ce qui concerne la variabilité intra-populationnelle, les analyses statistiques révèlent une forte hétérogénéité des traits foliaires entre individus. Cette variabilité

significative traduit une plasticité phénotypique importante, permettant à l'espèce de s'adapter à des micro-variations environnementales au sein du même habitat. La SLA, en particulier, apparaît comme le trait le plus plastique, ce qui confirme son rôle central dans la réponse aux contraintes hydriques.

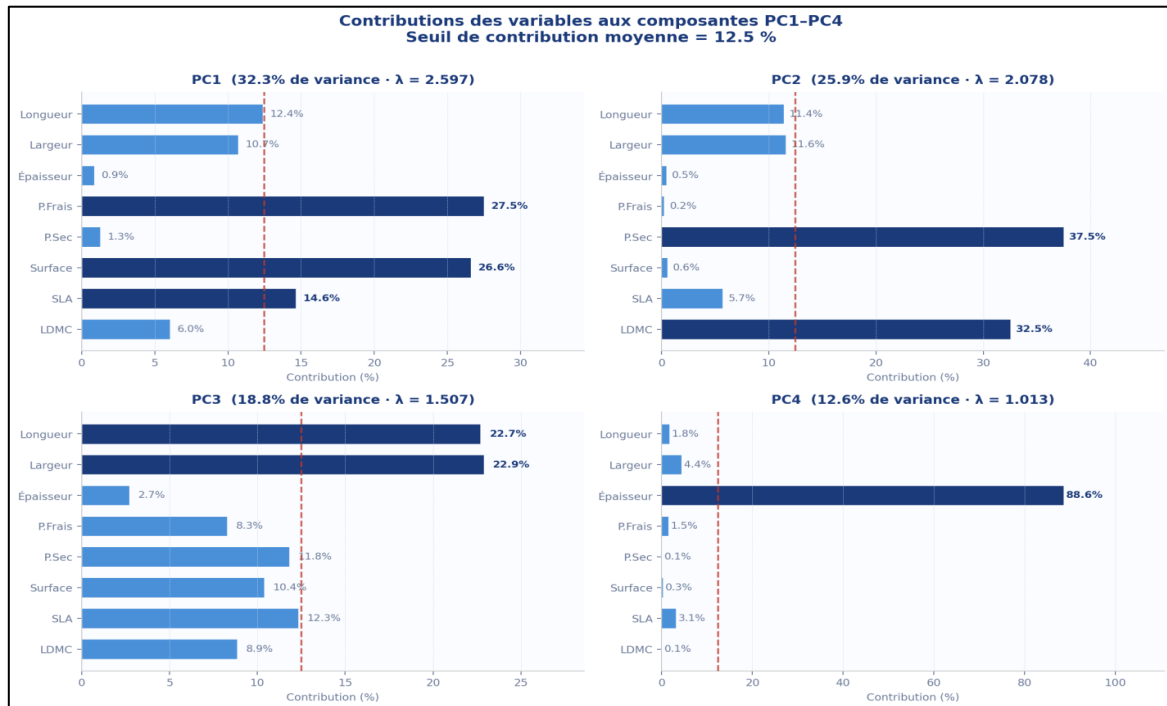


Figure 11 : Contributions des 8 variables aux composantes PC1, PC2, PC3 et PC4. La ligne verticale corail matérialise le seuil moyen (12.5 %). Les barres bleu foncé dépassent ce seuil ; les barres claires restent en dessous.

La figure 11 présente les contributions des différentes variables morphologiques et fonctionnelles aux quatre premières composantes principales (PC1 à PC4) issues de l'analyse en composantes principales (ACP). Elle permet d'identifier les traits les plus déterminants dans la structuration de la variabilité des données, ainsi que de mettre en évidence les principaux gradients fonctionnels au sein de la population de *Pergularia tomentosa*.

Chaque axe factoriel traduit un gradient écologique spécifique, construit à partir de la contribution relative des variables étudiées. L'analyse révèle ainsi une organisation hiérarchisée des traits foliaires, allant des variables liées à la taille et à la biomasse hydrique (poids frais, surface foliaire), aux traits associés aux stratégies d'économie d'eau et de résistance à la sécheresse, tels que la SLA et la teneur en matière sèche.

Ces résultats mettent en évidence les principaux compromis fonctionnels qui structurent les stratégies adaptatives de l'espèce dans les conditions arides du milieu étudié, où coexistent optimisation de la croissance foliaire et limitation des pertes hydriques.

II.5. Discussion.

Les résultats obtenus montrent que *P. tomentosa* est une espèce particulièrement adaptée aux conditions arides de l'Oued Metlili. Elle adopte une stratégie de gestion conservatrice des ressources, caractérisée par l'optimisation de l'utilisation de l'eau et de la biomasse foliaire. Malgré une certaine modification de quelques traits fonctionnels en réponse aux variations de disponibilité hydrique, l'espèce conserve une organisation morphologique globalement stable. L'analyse fonctionnelle met clairement en évidence une stratégie adaptative dominée par la conservation des ressources, typique des espèces xérophytes.

Par ailleurs, la relation négative significative entre SLA et LDMC met en évidence un compromis fonctionnel fondamental entre acquisition rapide des ressources et résistance structurelle. Ce trade-off s'inscrit pleinement dans le cadre du *Leaf Economics Spectrum* décrit par Wright et al., (2004). Dans ce contexte, *P. tomentosa* adopte une position conservatrice stable, cohérente avec les modèles globaux d'écologie fonctionnelle. Il est également important de souligner que, contrairement à certaines études ayant montré un affaiblissement de cette relation sous stress extrême, aucun relâchement du trade-off n'a été observé ici, ce qui suggère une forte stabilité adaptative de l'espèce dans les conditions sahariennes.

Concernant les relations morphométriques, les résultats montrent une corrélation positive entre la SLA et la surface foliaire. Cela signifie que les feuilles de plus grande surface tendent à présenter une meilleure capacité d'échange et une structure plus fine. De même, la relation très forte entre la surface foliaire et le poids frais confirme que ces deux variables sont étroitement liées au volume foliaire et à l'hydratation des tissus. À l'inverse, la corrélation négative entre LDMC et poids frais traduit logiquement le fait qu'une augmentation de la densité tissulaire s'accompagne d'une diminution de la teneur en eau.

Des résultats similaires ont été rapportés par Kdyem et Lounici (2025) dans leur étude portant sur l'adaptation de *Ziziphus lotus* (L.) Desf. à la sécheresse dans différents milieux algériens. Les auteurs ont mis en évidence une variabilité significative des traits fonctionnels en fonction des conditions écologiques. Dans les environnements les plus arides, *Z. lotus* adopte une stratégie de conservation de l'eau se traduisant par une réduction de la surface foliaire, une augmentation de l'épaisseur des feuilles et une teneur élevée en matière sèche.

Ces observations confirment le rôle des traits fonctionnels comme indicateurs pertinents de l'adaptation des espèces végétales au stress hydrique.

La comparaison entre les deux études révèle plusieurs convergences. Dans les deux cas, l'analyse des traits morphologiques et fonctionnels foliaires a permis de mettre en évidence des mécanismes d'adaptation à l'aridité. Les deux approches reposent également sur des observations de terrain associées à des analyses statistiques destinées à caractériser les relations entre les différents traits étudiés.

Cependant, certaines différences méthodologiques doivent être soulignées. L'étude de Kdyem et Lounici (2025) a été réalisée sur huit stations couvrant un large gradient climatique, permettant une analyse comparative à l'échelle régionale. À l'inverse, la présente étude s'est concentrée sur une seule station localisée dans la région de l'Oued Metlili (Ghardaïa), offrant ainsi une analyse plus détaillée des stratégies adaptatives de *P. tomentosa* dans un environnement relativement homogène.

Les résultats obtenus s'inscrivent dans le cadre du modèle du « Leaf Economics Spectrum » proposé par Wright et *al.*, (2004). La valeur médiane de la surface foliaire spécifique (SLA) est de 29,5 mm²/mg, tandis que celle de la teneur en matière sèche foliaire (LDMC) atteint 159,6 mg/g. La corrélation négative significative observée entre ces deux paramètres traduit le compromis classique entre l'acquisition rapide des ressources et leur conservation à long terme. De plus, la forte corrélation positive entre la longueur et la largeur des feuilles témoigne d'une cohérence morphologique importante au sein de la population étudiée.

Une variabilité intra-populationnelle marquée de la SLA a également été observée chez *P. tomentosa*, suggérant une importante plasticité phénotypique individuelle. Cette capacité d'ajustement pourrait constituer un mécanisme adaptatif permettant à l'espèce de répondre aux fluctuations locales de la disponibilité en eau. À titre comparatif, *Ziziphus lotus* présente des valeurs de SLA nettement plus faibles (7,1 à 13,4 mm²/mg) et des valeurs de LDMC beaucoup plus élevées (349 à 411 mg/g), traduisant des feuilles plus épaisses, plus denses et davantage sclérifiées. Malgré ces différences, les deux espèces présentent une corrélation positive entre la longueur et la largeur des feuilles, indiquant une coordination morphologique similaire.

Des divergences apparaissent toutefois dans les relations entre certains traits. Chez *P. tomentosa*, aucune relation significative n'a été observée entre la longueur et l'épaisseur des feuilles, alors que chez *Z. lotus*, cette relation varie selon les stations étudiées, reflétant une plasticité structurelle plus fortement influencée par les conditions environnementales. Ainsi, *P. tomentosa* semble privilégier une stratégie adaptative reposant principalement sur la réduction de la taille foliaire afin de limiter les pertes d'eau par transpiration. En revanche, *Z. lotus* combine plusieurs mécanismes complémentaires, notamment une forte sclérification foliaire, une teneur élevée en matière sèche ainsi qu'un système racinaire profond favorisant l'accès aux réserves hydriques souterraines.

Enfin, la forte corrélation positive observée entre la longueur et la largeur des feuilles de *P. tomentosa* traduit une croissance proportionnelle des organes foliaires et le maintien d'un rapport longueur/largeur relativement constant. Cette stabilité morphologique suggère une croissance isométrique conservée malgré les contraintes imposées par l'environnement désertique. Contrairement à certaines espèces qui modifient profondément leur architecture foliaire sous l'effet du stress hydrique, *P. tomentosa* semble maintenir une organisation structurale stable, témoignant d'une adaptation durable aux conditions arides de son habitat.

Conclusion

Conclusion

Dans le cadre du changement climatique et de l'aggravation de la sécheresse, en particulier dans le nord du Sahara algérien, la compréhension des réponses des plantes affectées est devenue une priorité d'un point de vue écologique et scientifique. Cette étude s'est appuyée sur l'espèce *P.tomentosa*, une plante vivace caractéristique du nord du Sahara algérien et des environnements arides, afin de mettre en évidence comment la modification de ses traits fonctionnels détermine sa capacité d'adaptation à la sécheresse. Ce choix a été effectué sur la base de critères clairement établis. En effet, cette plante revêt une importance et un rôle écologiques notables, tels que la fixation du sol et sa protection contre l'érosion, et elle interagit fortement avec la diversité des plantes locales.

Les résultats de cette étude montrent que l'espèce adopte une stratégie adaptative complexe et intégrée face au stress hydrique en milieu aride. L'analyse des traits morphologiques et fonctionnels, incluant la surface foliaire spécifique (SLA), la teneur en matière sèche (LDMC), le volume du couvert végétal, la densité, la hauteur et la largeur, met en évidence une variabilité importante entre les individus au sein d'un même site. Cette variabilité reflète une capacité d'adaptation marquée aux conditions de sécheresse, certains individus présentant des traits conservateurs caractérisés par des feuilles plus petites, plus épaisses et plus rigides, une densité tissulaire plus élevée ainsi qu'une hauteur réduite, contribuant ainsi à limiter les pertes en eau et à maintenir les fonctions physiologiques essentielles dans un environnement contraignant.

Par ailleurs, les résultats révèlent l'existence d'une stratégie adaptative double, combinant une réduction de la perte hydrique grâce à des caractéristiques foliaires rigides et une forte hétérogénéité intra-populationnelle. L'analyse multivariée met également en évidence trois dimensions fonctionnelles indépendantes (taille/teneur en eau, matière sèche et forme des feuilles), ainsi qu'une quatrième dimension distincte correspondant à l'épaisseur foliaire. Cette organisation fonctionnelle traduit un équilibre précis entre la surface foliaire exposée au rayonnement solaire et la rigidité structurelle, la diminution de la surface étant associée à une augmentation de la rigidité.

Le présent travail n'a pas seulement fourni des statistiques chiffrées, mais il a également offert une meilleure compréhension de la manière d'améliorer une espèce végétale pérenne des paysages arides du nord du Sahara algérien, dotée de caractéristiques efficaces pour s'adapter à un déficit hydrique croissant. Il confirme la nécessité d'utiliser les traits fonctionnels comme indicateurs écologiques fiables, facilement accessibles lors du travail de terrain. De plus, il met en évidence le rôle majeur de *P.tomentosa* dans la compréhension de la nature des environnements arides, en tant que régulateur écologique, et son utilité dans plusieurs domaines, notamment la médecine et, surtout, l'importance fourragère. Par conséquent, cette étude ajoute une contribution essentielle à la connaissance des stratégies d'adaptation des végétaux dans les conditions arides du nord du Sahara.

Néanmoins, il est nécessaire de reconnaître certaines limites. Cette étude s'est appuyée sur une seule période de collecte des échantillons, coïncidant avec une phase de feuillaison de *P.tomentosa*, ce qui constitue la seule méthode disponible pour étudier les caractéristiques foliaires. Cependant, cette approche temporelle restreinte ne permet pas d'explorer les variations interannuelles ni les conséquences d'événements climatiques rares. Par ailleurs, l'étude s'est limitée à un seul site pour *P.tomentosa* ce qui réduit considérablement la portée de toute généralisation. De plus, l'analyse a été circonscrite aux seuls traits morphologiques et fonctionnels, sans inclure d'analyses physiologiques, génétiques ou microbiotes. Malgré ces obstacles, il serait nécessaire de compléter cette étude par un suivi temporel afin de mieux appréhender les variations annuelles des traits morphologiques. De plus, une analyse plus approfondie de l'adaptation de la plante aux facteurs biotiques et abiotiques, tels que les interactions avec le sol ou avec d'autres organismes vivants, permettrait de mieux comprendre l'influence des caractéristiques étudiées et l'émergence d'autres formes de traits adaptatifs.

L'étude fonctionnelle seule ne suffit pas à fournir des résultats plus précis ; il est donc nécessaire de mener une étude plus complète ou complémentaire, par exemple une analyse génétique, afin d'obtenir des résultats plus exacts. Enfin, les résultats de ce travail encouragent l'utilisation de *P.tomentosa* pour la conservation des sols et la lutte contre la désertification, tout en contribuant à un paysage plus agréable dans les environnements désertiques arides.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. **A.N.R.H., 2012.-** Note relative aux ressources en eau souterraines de la wilaya de Ghardaïa. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques Ghardaïa, 19 p.
2. **A.N.R.H.,2023.-** Les nouveaux piézomètres captant la nappe du CI. Ghardaïa, Algérie.
3. **A.P.C., Metlili, 2015.-** Document administratif communal. Document interne.
4. **Abdollahi J., Naderi H., Mirjalili M.R. et Tabatabaezadeh M.S., 2013.-** Effets de certains facteurs environnementaux sur les caractéristiques de croissance de l'espèce *Stipa barbata* dans les steppes de Nodoushan-Yazd. *Journal of Rangeland and Desert Research*, 20 (1), pp. 130-144.
5. **Achour M., 2003.-** Étude hydrogéologique de la nappe phréatique de la vallée de Metlili (Ghardaïa). Thèse de Doctorat, Université de Ghardaïa, 36 p.
6. **Addoun T., 2018.-** Dynamiques spatiales des agglomérations du Sahara nord-central algérien (Wilaya de Ghardaïa). Thèse de Doctorat, Université d'Oran, 30 p.
7. **Al-Farraj A.S. et Al-Wabel M.I., 2007.-** Accumulation de métaux lourds par certaines espèces végétales poussant sur une zone minière à Mahad AD'Dahab, Arabie Saoudite .Heavy metals accumulation of some plant species grown on mining area at Mahad AD'Dahab, Saudi Arabia. *Journal of Applied Sciences*,7 (8), pp.1170-1175.
8. **Al-Said M.S.,Abu-Jayyab A. et Hifnawy M.S.,1989.-** Études biochimiques de la ghalakinosite, un possible agent antitumoral de *Pergularia tomentosa* *Journal of Ethnopharmacology* , 27 (1), pp. 235-240.
9. **Andereg 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),pp.674 683.
10. **Ashrafzadeh M., Erfanzadeh R. & Hoseini Kahnouj S. H. 2015.-** Effets des propriétés chimiques du sol sur la qualité du fourrage dans les parcours secs du sud de la province de Fars. *Journal of Rangeland and Desert Research*, 22(2), pp. 383-391.
11. **Baameur M., 2021.-** Étude écologique de la flore spontanée du Sahara septentrional est-algérien. Thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2 p.
12. **Bagnouls F. et Gaussen H., 1953.-**Saison sèche xérothermique. Vol. 1, Toulouse.
13. **Benbrahim F., 2006.-** Évolution de la durabilité de la céréaliculture sous pivot par l'étude de la salinisation du sol dans la région d'Ouargla (Cas de Hassi Ben Abdallah). Thèse de Magister Université Kasdi Merbah Ouargla, 111 p.
14. **Benchelah A.C., Bouziane H., Maka M. et Ouahès C.,2011.-** Fleurs du Sahara et Voyage ethnobotanique avec les Touaregs du Tassili. Ibis Press, 40 p.

15. **Benkhetou A., 2010.-** Méthodes d'étude des peuplements végétaux. Support de cours, 3^{ème} année Écologie végétale. Document pédagogique non publié, 40 p.
16. **Bensamoun Y., 2008.-** Les parcours sahariens dans la nouvelle dynamique spatiale : Contribution à la mise en place d'un schéma d'aménagement et de gestion de l'espace (S.A.G.E.). Cas de la région de Ghardaïa. Thèse de Doctorat, Université de Ouargla, 10-28 p.
17. **Benseghier F., 2018.-** Contribution à l'étude de la biodiversité de la flore saharienne (Ouargla) : protection, conservation et application dans les domaines des parcours et de l'ethnobotanique. Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 3 p.
18. **Benslama A., 2021.-** Qualité des eaux d'irrigation et salinisation des sols dans une palmeraie de la région de Ghardaïa (Cas de Zelfana). Thèse de Doctorat, Université de Ghardaïa, 32 p.
19. **Berrazoum H. et Seddiali A., 2024.-** The Algerian desert tourism : Between valorization of the destination and achieving sustainable development goals. Journal of Development Research and Studies, 11 (1), pp. 57–78.
20. **Bouazza M., 1995.-** Étude phytoécologique des *steppes* à *Stipa tenacissima* L. et à *Lygeum spartum* L. au sud de Sebdou, Oranie, Algérie. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, 275 p.
21. **Chehma A., 2006.-** Catalogue des plantes spontanées du Sahara septentrional algérien. Thèse de Doctorat, Université de Ouargla, 140 p.
22. **Cheikhi A. et Adjila M., 2025.-** Impact de l'irrigation sur la distribution spatiale du carbone organique dans les sols d'une palmeraie dans la région de Ghardaïa (Cas d'El-Atteuf). Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 7 p.
23. **Christie A.P., Chiaravalloti R.M., Irvine R. et al., 2022.-** Combiner et évaluer les preuves mondiales et locales pour améliorer la prise de décision. OSF. <https://osf.io/wpa4t/>
24. **Conover W. J., 1999.-** Statistiques non paramétriques pratiques Practical nonparametric statistics 3^{ème} éd., Wiley.
25. **Cornelissen J.H.C., Lavorel S., Garnier E., Diaz S., Buchmann N., Gurvich D.E., Reich P.B., Ter Steege H., Morgan H.D.G., Van der Heijden M.G.A., Pausas J.G. et Poorter H., 2003.-** Handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany, 51, pp. 335–380.
26. **Cornwell W.K., Cornelissen J.H.C. et al., 2008.-** Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. Ecology Letters, 11, pp. 1065–1071.
27. **Coyne A., 1989.-** Le M'Zab. Adolphe Jourdan, Algérie, 41 p.
28. **D.P.A.T., 2009.-** Atlas de Wilaya de Ghardaïa, 164 p.
29. **D.P.S.B., 2020.-** Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaires. Annuaire statistique de la wilaya de Ghardaïa. Wilaya de Ghardaïa.

30. **Darwin C., 1859.**- De l'origine des espèces par le moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie London, 60-79 p.
31. **Díaz S., Noy-Meir I. et Cabido M., 2001.**-Can grazing response of herbaceous plants be predicted from simple vegetative traits]. *Journal of Applied Ecology*, 38, pp. 497-508
32. **Dobignard A. et Chatelain, C., 2013.**- Index synonymique de la flore d'Afrique du Nord. Dicotyledoneae, Oleaceae à Zygophyllaceae. Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève, 54 p
33. **Erfanzadeh R. et Hosseini Kahnuij S.H., 2015.**- Caractéristiques du stock de graines du sol en fonction de la distance par rapport aux points d'eau dans les écosystèmes arides (étude de cas : Kahnuij, province de Kerman) *Ecopersia*, 3, pp. 975-986.
34. **Erfanzadeh R., Hosseini Kahnuij S.H. et Pétilion J., 2014.**- La teneur en protéines brutes ne détermine pas la valeur de préférence des espèces végétales pour la chèvre Raini (*Capra aegagrus hircus* L.) dans les parcours secs. *Desert*, 19, pp. 35-43.
35. **Field A., 2009.**- Découvrir les statistiques avec SPSS .3ème éd., Sage Publications.
36. **Frontier S., Pichod-Viale D., 1999.**- Écosystèmes : Structure, fonctionnement, évolution. 2e éd., Dunod, Paris.
37. **Fukuyama Y., Ochi M., Kasai H. et Kodama M., 1993.**- Hétérosides cardénolides inhibiteurs de la croissance des insectes provenant d'*Anodendron affine* *Phytochemistry*, 32, pp. 297-301.
38. **Garnier E., Navas M.-L., 2012.**- A trait-based approach to comparative functional plant ecology: concepts, methods and applications for agroecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, pp. 365-399
39. **Gohar A., El-Olemy M.M., Essam A.S., Said M.E. et Niwa, M., 2000.**- Cardénolides et glucoside de β -sitostérol de *Pergularia tomentosa* L. *Natural Sciences*, 6(3), pp. 142-146.
40. **Grubb P.J., 2016.**- Compromis dans les comparaisons interspécifiques en écologie végétale et comment les plantes surmontent les contraintes proposées , 9, pp. 3-33.
41. **Hamel A. et Hanichi H., 2020.**- Étude hydrogéologique de l'ensemble aquifère ancien de la région de Metlili (Wilaya de Ghardaïa). Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 5 p.
42. **Hamel I., 2023.**- Caractérisation et cartographie des propriétés physico-chimiques des sols de la région de Ghardaïa (Cas de la palmeraie de Zelfana). Thèse de Doctorat, Université de Ghardaïa. 6-12 p.
43. **Heneidak S., Grayer R.J., Kite G.C. et Simmonds M.S.J., 2006.**- Flavonoid glycosides from Egyptian species of the tribe Asclepiadeae (Apocynaceae , Asclepiadoideae). *Biochemical Systematics and Ecology*, 34, pp. 575-584.

44. **Herouini A., 2021.-** Évaluation du pouvoir biocide des huiles de graines de *Citrullus colocynthis* Schard., *Pergularia tomentosa* L. et *Datura stramonium* L. récoltées dans la région de Ghardaïa. Thèse de Doctorat, Université de Ghardaïa, 15 p.
45. **Hodgson J. G., Wilson P. J., Hunt R. et Grime, J. P.,1999.-** Attribution des types fonctionnels CSR des plantes : une approche « douce » pour un problème difficile. *Oikos*, 85, pp. 282-294.
46. **Hosseini F. S.,2016.-** Effet de la canopée de *Pteroporum aucheri* sur la richesse spécifique et la densité du stock de graines du sol de *Pergularia tomentosa* Mémoire de master, Tarbiat Modares University,Iran, 35 p
47. **Hosseini Kahnouj S. H., Ayyari M., Azarnivand H., Piacente S. & Chahouki, Z.,2017.-** *Pergularia tomentosa* L. From traditional uses to ecology and phytochemistry. *Journal of Medicinal Plants*, 16 (63), pp. 108–118
48. **Houari E., Chehma A. et Zerria A.,2012.-** Étude de quelques paramètres d'adaptation anatomique des principales plantes vivaces spontanées dans la région d'Ouargla (Algérie). *Sécheresse*, 23, pp. 284-288.
49. **Huang X. et Renwick J. A. A.,1994 .-** Cardenolides as oviposition deterrents to two *Pieris* species: structure-activity relationships. *Journal of Chemical Ecology*, 20, pp. 1039-1051.
50. **Huang X. P. & Renwick J. A. A.,1995.-** Habituation croisée aux substances dissuasives alimentaires et acceptation d'une plante hôte marginale par les larves de *Pieris rapae* .*Entomologia Experimentalis et Applicata*, 76, pp. 295-302.
51. **Huang X., Renwick, J. A. A. & Sachdev-Gupta, K.,1993.-** Base chimique de l'acceptation différentielle d'*Erysimum cheiranthoides* par deux espèces de *Pieris*. *Journal of Chemical Ecology*, 19, pp. 195-210.
52. **Iozia L. M., Crisafulli V. & Varone, L.,2022.-** Les variations climatiques le long d'un gradient d'aridité entraînent une importante variabilité intraspécifique des traits chez les espèces méditerranéennes. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.08.21.504686>
53. **Jolliffe I.T., 2002.-**Principal Component Analysis 2ème éd., Springer. New York.
54. **Kattge J., Díaz S., Lavorel S., Prentice I. C., Leadley P., Bönsch G. & autres. 2011 .-** TRY – une base de données mondiale sur les traits des plantes. *Global Change Biology*, 17 :2905-2935.
55. **Kraïmat M., 2019.-** Réponses adaptatives de quelques populations d'*Arachis hypogaea* L. à la déficience en phosphore : approches agro-morphologique, physiologique et biochimique. Thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 189 p.

56. **Krintza N., Dener E. & Seifan M. , 2024.-** Stress Induces Trait Variability across Multiple Spatial Scales in the Arid Annual Plant *Anastatica hierochuntica*. *Plants*, 13(2), Article 256. <https://doi.org/10.3390/plants13020256>
57. **Lavorel S. & Garnier E., 2002.-** Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16, pp. 545-556.
58. **Lavorel S., Díaz S., Cornelissen J.H.C., Garnier E., Harrison S.P., McIntyre S., Pausas J.G., Pérez-Harguindeguy N., Roumet C. et Urcelay C., 2007.-** Plant Functional Types : Are We Getting Any Closer to the Holy Grail In Pataki D.E. et Pitelka L.F. (Eds.), *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*, Springer-Verlag, pp.149-164 .
59. **Lavorel S., McIntyre S., Landsberg J. & Forbes, T. D. A., 1997.-** Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology & Evolution*, 12, pp. 474-478.
60. **Liu B., Zhang J., Lau, M. K., Wang, X., Liang, Y. & Ma, T., 2022.-** Diversification and phylogenetic correlation of functional traits for co-occurring understory species in the Chinese boreal forest. *Journal of Systematics and Evolution*. <https://doi.org/10.1111/jse.12840>
61. **Mabry C. M. & Fraterrigo, J. M., 2009.-** Species traits as generalized predictors of forest community response to human disturbance. *Forest Ecology and Management*, 257, pp.723-730.
62. **Madani N., Kimball J. S., Ballantyne A. P., Affleck, D. L. R., van Bodegom, P. M., Reich, P. B. & autres., 2018.-** Future global productivity will be affected by plant trait response to climate. *Scientific Reports*, 8, pp.2870 .
63. **Maraghni M., Gorai M. & Neffati M., 2011.-** L'influence du stress hydrique sur la croissance, les relations hydriques et l'accumulation de solutés chez le jujubier sauvage (*Ziziphus lotus*). *Journal of Ornamental Plants*, 2(1), pp. 63-72.
64. **Maraghni M., Gorai M., Steppe K., Neffati M. & Van Labeke M. C., 2019.-** Changements coordonnés des performances de l'appareil photosynthétique et des relations hydriques de l'arbuste xérophyte *Ziziphus lotus* (L.) Lam. (Rhamnaceae) après un assèchement du sol, 57(1), pp. 113-120. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.025>
65. **McGill B. J., Enquist B. J., Weiher E. & Westoby M., 2006.-** Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology & Evolution*, 21, pp. 178-185.
66. **Moles A. T., Perkins S. E., Laffan S. W. & autres., 2014.-** Qu'est-ce qui prédit le mieux les traits des plantes : la température ou les précipitations. *Journal of Vegetation Science*, 25, pp. 1167-1180.
67. **Monod T., 1992.-** Du désert. *Sécheresse*, 3(1), pp. 7-24.
68. **Navas M.-L. & Violle, C., 2009.-** Plant traits related to competition: how do they shape the functional diversity of communities. *Community Ecology*, 10, pp. 131-137.

69. **Ouledmir.,2000.-** Étude physico-chimique de l'eau du bassin versant de Metlili.Rapport technique, 34 p.
70. **Ozenda P., 1982.-** Les végétaux dans la biosphère. Paris: Doin , 431 p.
71. **Ozenda P.,1958.-** Flore du Sahara septentrional et central. CNRS, 279-280 p.
72. **Ozenda P.,1983.-** Flore du Sahara 2^{ème} éd.CNRS, 16 p.
73. **Panchal N. S. & Pandey A. N.,2002.-** Study on soil properties and their influence on vegetation in western region of Gujarat State, India. In Proceedings of the 12th ISCO Conference Beijing,pp. 610-615.
74. **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. Australian Journal of Botany,61(3),pp. 167-234. <https://hdl.handle.net/11299/177647>
75. **Pérez-Harguindeguy N., Díaz S., Garnier E., Lavorel S., Poorter H., Jaureguiberry P. & autres., 2016 .-** Corrigendum to New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany, 64,pp. 715-716.
76. **Phillips S. J., Anderson R. P. & Schapire R. E., 2006.-** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling,190, pp. 231-259.
77. **Pierce S., Negreiros D., Cerabolini B. E. L. & autres.,2017.-** A global method for calculating plant CSR ecological strategies applied across biomes world-wide. Functional Ecology, 31:444-457.
78. **Pilania P. K. & Panchal N. S.,2014.-** and plant relation at Little Rann of Kutch, Gujarat, western India]. International Journal of Advanced Research, 7, pp. 1-10.
79. **Pontes L. da S., Soussana J.-F., Louault F., Andueza D. & Carrère, P.,2007.-** Leaf traits affect the above-ground productivity and quality of pasture grasses]. Functional Ecology, 21, pp.844-853.
80. **Poorter H., Niinemets U., Poorter, L., Wright I.J. & Villar R.,2009.-** Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. New Phytologist, 182(3), pp. 565–588.
81. **Pouget M.,1980.-** Les relations sol-végétation dans les steppes sud algéroises. ORSTOM, pp. 134-135 p
82. **Quézel P. & Santa S., 1962.-** Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. C.N.R.S., Paris, 196 p.
83. **Quézel P.,& Santa S.,1963.-**Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales, 748 p
84. **Quézel P.,1965.-** La végétation du Sahara du Tchad à la Mauritanie. Stuttgart, 333 p

85. **Ramade F.,2003.-** Éléments d'écologie : Écologie fondamentale 3^{ème} éd.Dunod, 578 p.
86. **Razali N. M. & Wah, Y. B.,2011.-** Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. Journal of Statistical Modeling and Analytics, 2(1), pp. 21-33.
87. **Reich P. B., Ellsworth D. S., Walters M. B. & autres.,1999.-** Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes. Ecology, 80, pp. 1955-1969.
88. **Renwick J.A.A., 1996.-** Diversity and dynamics of crucifer defenses against adults and larvae of cabbage butterflies. In Romeo J.T., Saunders J.A. et Barbosa P. (Eds.), Recent Advances in Phytochemistry. Plenum Press.,30, pp.57-79
89. **Roger P., 2004.-** Adaptations des plantes aux climats secs. Futura-Sciences, 15 p
90. **Schmelzer G.H. et Gurib-Fakim A., 2013.-** Ressources végétales de l'Afrique tropicale. Vol. 11, Partie 2 : Plantes médicinales 2. Fondation PROTA, 218 p.
91. **Shabala S., Shabala L. et Volkenburgh E.V., 2003.-** Effect of calcium on root development and root ion fluxes in salinised barley seedlings. Functional Plant Biology, 30, pp.507–514.
92. **Shipley B., Lechowicz M.J., Wright I. et Reich P.B., 2006.-** Fundamental trade-offs generating the worldwide leaf economics spectrum. Ecology, 87, pp. 535–541.
93. **Tlili M.L., 2015.-** Contribution à la caractérisation physico-chimique et biologique des extraits de *Pergularia tomentosa* issue de quatre sites sahariens différents (Sahara septentrional). Thèse de Doctorat, Université de Ouargla, 120 p.
94. **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), pp. 554–566.
95. **Tutiempo.,2026.-**Climat Ghardaï Données climatiques. Consulté le 20 février 2026.<https://fr.tutiempo.net/climat/ws-605660.html>
96. **UNESCO, 1960.-** Les plantes médicinales des régions arides : Recherches sur les zones arides, 99 p.
97. **Vaillaud M., 2011.-** Adaptations à la sécheresse des végétaux des garrigues méditerranéennes. Document pédagogique,13 p.
98. **Vandewalle M., de Bello F., Berg M.P. et al., 2010.-** Functional traits as indicators of biodiversity response to land use changes across ecosystems and organisms. Biodiversity and Conservation, 19, pp. 2921–2947
99. **Violle C., Navas M.L., Vile D., Kazakou E., Fortunel C., Hummel I. et Garnier E., 2007.-** Let the concept of trait be functional .Oikos, 116, pp. 882–892.

100. **Vitasse Y., Delzon S., Bresson C.C., Michalet R. et Kremer A., 2009.-** Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Canadian Journal of Forest Research*
101. **Vogiatzakis I.N., Griffiths G.H. et Mannion A.M., 2003.-** Environmental factors and vegetation composition, Lefka Ori Massif, Crete, South Aegean. *Global Ecology and Biogeography*, 12, pp. 131–146.
102. **Weiher E., Clarke G.D.P. et Keddy P.A., 1998.-** Community assembly rules, morphological dispersion, and the coexistence of plant species. *Oikos*, 81, pp. 309–322.
103. **Westoby M., 1998.-** A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. *Plant and Soil*, 199, pp. 213–227.
104. **Westoby M., Falster D.S., Moles A.T., Vesk P.A. et Wright I.J., 2002.-** Stratégies écologique des plantes : quelques dimensions majeures de variation entre les espèces *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, pp. 125–159.
105. **Wright I.J., Reich P.B., Westoby M., Ackerly D.D., Baruch Z., Bongers F. et al., 2004.-** The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428 (6985), pp. 821–827.
106. **Yakubu R., Musa F., Lukman A. et Sheikh F., 2015.-** Activity guided fractionation with antimicrobial evaluation of *Pergularia tomentosa* L. whole plant. *British Microbiology Research Journal*, 8 (5), pp. 567–576.

Faculté des sciences de la nature et
de la vie et sciences de la terre

Département de Biologie

جامعة غرداية



Université de Ghardaïa

كلية علوم الطبيعة والحياة
وعلوم الأرض

قسم البيولوجيا

Ghardaïa le : 19/07/2026

Rapport : Correction du mémoire

Enseignant (e) (s) Chargé (e) de la correction :

Nom et prénom l'examineur 1 et Signature	Nom et prénom de l'examineur 2 et Signature	Nom et prénom de président et Signature
CHERIF Reikia 	/	HAMEL Imane 

Thème :

Contribution à l'étude de l'adaptation des plantes aux environnements arides :
caractérisation des traits fonctionnels de *Pergularia tomentosa* L. dans la région de
Ghardaïa.

Après les corrections apportées au mémoire, L (es) 'étudiant (s) (es) :

HADEF Imane
OULAD HAMMADI Meriem

Est (sont) autorisé (es) à déposer le manuscrit au niveau du département.

Signature

