

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعد دحلب البليدة (1)
Université SAAD DAHLEB-Blida 1



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master dans le domaine SNV

Filière : Sciences Biologiques

Option : Biodiversité et physiologie végétale

Thème :

Etude de la multiplication du *Paulownia* (*Paulownia spp*) par bouturage et évaluation de son comportement après irrigation des eaux usées : impact sur la croissance et la physiologie.

Présenté par :

Soutenu le : 30/06/2025

Nom et prénom : Ben Sassi Rayane.

Nom et prénom : Koulougli Yasmine.

Devant le jury :

Nom	Grade/Lieu	Qualité
Mme MOUAS Y.	MAA /USDB1	Présidente
Mr ROUIBI AH.	MCA/USDB1	Examineur
Mme El FERRAN. A.	MAA/USDB1	Promotrice

Année universitaire : 2024 /2025.

Remerciement

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à *Mme MOUAS Yamina*, Présidente du jury, et à *M. ROUBI Abdelhak*, Examineur, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en évaluant ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques pertinentes et enrichissantes.

Nos plus vifs remerciements vont à notre promotrice, *Mme EL FERRAN Ahlem*, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité, sa patience et la qualité de ses conseils tout au long de ce travail.

Nous remercions également *M. BOUMAHDI Abdelkrim*, Responsable de la pépinière de Mouzaïa, pour son accueil chaleureux, son accompagnement sur le terrain et le partage de son expérience et ces idées.

Nos remerciements s'adressent aussi à *Mme KHECHBA Rafika*, Chef du Département de la Direction Général à l'ONA à Beraki, pour son soutien.

Enfin, nous exprimons toute notre gratitude à *M. CHADOULI Mohamed*, Ingénieur de laboratoire à la STEP de Béni Mared, pour son assistance technique précieuse, sa réactivité et son professionnalisme.

À CHACUN D'ENTRE VOUS, MERCI POUR VOTRE PRÉCIEUSE CONTRIBUTION À LA RÉUSSITE DE CE MÉMOIRE.

Dédicace

À mon Père, Abdelghani, Pour ton amour sincère, ta patience et ton soutien constant. Tu as toujours été là pour moi, avec tes conseils et tes sacrifices. Merci d'avoir été ma force dans les moments difficiles et mon repère dans chaque étape de ma vie.

À ma Mère, GAYA Saadia, Merci pour ton amour sans fin, ta patience. Tu es toujours là pour moi, comme une lumière dans les moments difficiles et une présence douce quand tout va trop vite. Merci d'être toujours à mes côtés.

À ma Sœur, Hania, et son Mari, Lyes, et Ma Nièce Elina Pour votre gentillesse, vos encouragements et votre présence à mes côtés. Vous m'avez soutenue dans les moments difficiles comme dans les moments de joie. Merci pour votre amour qui compte énormément pour moi.

À mon Frère, Abderraouf, Merci pour ta bonne humeur, ton soutien silencieux mais important, et ta façon de me faire sourire même quand les choses sont difficiles. Merci d'être là, tout simplement.

À ma Tante Aicha, Merci pour ton écoute, tes paroles réconfortantes et ton affection vraie. Tu m'as toujours soutenue avec douceur et beaucoup de sagesse.

À mes grands-parents maternels, Votre absence me manque chaque jour, mais votre amour et ce que vous m'avez appris restent toujours avec moi. Que vos âmes reposent en paix.

À mes meilleurs amies HACEN Imane, FKAIR Imene, Merci pour vos sourires, vos encouragements et votre belle énergie. Grâce à vous, ce parcours a été plus léger, plus joyeux, et surtout, moins seul.

À mon ami, KEBI Youcef El Hocine, Merci pour ton écoute qui me réconforte, ton rire qui calme mes peines, et ta fidélité qui ne m'a jamais quittée. Tu as été un vrai soutien dans mes moments difficiles, et une présence précieuse dans mes moments heureux. T'avoir dans ma vie est un beau cadeau.

A Minou, mon petit Chat, Merci d'avoir été là pendant mes longues nuits de travail. Tu es resté à mes côtés, en silence mais toujours là, apaisant et fidèle. Ce mémoire, tu l'as veillé avec moi.

À toutes celles et ceux qui ont marqué mon chemin, merci. Ce travail vous est dédié avec gratitude et respect

Congratulations



Dédicace

C'est avec un profond respect et une immense gratitude que je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à mon parcours.

À mon père bien-aimé, **Bensassi Moustapha**, un homme de cœur et de sagesse, qui n'a jamais cessé de me soutenir par ses conseils, ses prières et ses sacrifices silencieux. Merci pour ta présence rassurante, ton exigence bienveillante et ton amour constant.

À ma chère mère, **Benmouffok Lila**, source inépuisable d'amour, de tendresse et de courage. Tes encouragements, ton écoute et ta confiance en moi ont été la lumière qui m'a guidé durant les moments les plus difficiles.

À mes sœurs **Ilham** et **Lina**, et à mes frères **Alaa**, **Sami** et **Adel**, mes complices de toujours. Merci pour vos mots, vos sourires, votre patience, et cette affection fraternelle qui a toujours été une source d'équilibre et de bonheur.

À mon amie **Elmokrefi Yamina**, pour ta présence constante, ton soutien moral inestimable, ta patience et ton écoute. Merci pour avoir cru en moi, même lorsque moi-même j'en doutais.

À toute ma grande et précieuse famille **Bensassi** et **Benmouffok**, pour votre amour collectif, vos encouragements, vos appels et vos prières. Ce succès est aussi le vôtre.



Congratulations



Résumé

Face à la raréfaction des ressources en eau et à la nécessité de développer des pratiques agricoles durables, cette étude a porté sur l'évaluation du comportement de *Paulownia sp.*, c'est une espèce ligneuse à croissance rapide, multipliée par bouturage, et soumise à une irrigation avec trois types d'eau : eaux usées non traitées, eaux usées traitées, et eau propre.

L'expérimentation s'est déroulée en deux phases principales. La première a consisté en la multiplication végétative par bouturage, permettant d'obtenir des plants viables avec un taux d'enracinement élevé. La seconde phase a porté sur l'application des traitements d'irrigation, suivie d'analyses morphométriques (longueur de la tige, diamètre au collet, longueur racinaire) et physiologiques (teneurs en chlorophylle, proline, sucres solubles) ainsi que l'étude du phosphore assimilable dans le sol.

Les résultats ont montré que les plants irrigués avec les eaux usées non traitées ont présenté les meilleures performances : longueur de tige de 7,5 cm, diamètre au collet de 0,45 cm, racine principale de 9 cm, chlorophylle de 1,74 mg/g MS, proline de 0,608 mg/g MS, sucres solubles de 1,945 mg/g MS, rendement total de 294,61 %. Ceux irrigués avec l'eau propre ont montré des valeurs intermédiaires : tige de 5,3 cm, chlorophylle de 1,43 mg/g MS, rendement de 192,3 %. Les plants sous eaux usées traitées ont eu les résultats les plus faibles : tige de 3,7 cm, chlorophylle de 1,25 mg/g MS, rendement de 100 %. Le sol irrigué par eaux usées non traitées a atteint une teneur en phosphore assimilable de 1153,3 mg/kg.

Ces données révèlent que *Paulownia sp.* Tolère bien les différents types d'eau, avec une croissance nettement meilleure sous eaux usées brutes, ce qui renforce son intérêt pour la phytoremédiation et la valorisation des eaux usées en zones semi-arides.

Mots clés : *Paulownia sp, Multiplication par Bouturage, Eaux Usées, Paramètres Morphométriques, Paramètres Physiologiques*

ملخص

في مواجهة ندرة الموارد المائية والحاجة إلى تطوير ممارسات زراعية مستدامة، تناولت هذه الدراسة تقييم سلوك نوع *Paulownia sp.*، وهو نوع خشبي سريع النمو، يتم تكاثره بالعقل، ويتعرض للري بثلاثة أنواع من المياه: مياه الصرف الصحي غير المعالجة، مياه الصرف الصحي المعالجة، والمياه النظيفة.

أجريت التجربة على مرحلتين رئيسيتين. الأولى كانت تتعلق بالتكاثر الخضري عن طريق العقل، مما سمح بالحصول على نباتات قابلة للحياة بمعدل تجذير مرتفع. المرحلة الثانية تناولت تطبيق علاجات الري، تلتها تحليلات مورفومترية (طول الساق، قطر العنق، طول الجذور) وفيزيولوجية (محتويات الكلوروفيل، البرولين، السكريات القابلة للذوبان) بالإضافة إلى دراسة الفوسفور القابل للامتصاص في التربة.

أظهرت النتائج أن النباتات التي تم ريها بمياه الصرف الصحي غير المعالجة أظهرت أفضل الأداءات: طول الساق 7.5 سم، قطر القاعدة 0.45 سم، الجذر الرئيسي 9 سم، الكلوروفيل 1.74 ملغ/غ من المادة الجافة، البرولين 0.608 ملغ/غ من المادة الجافة، السكريات القابلة للذوبان 1.945 ملغ/غ من المادة الجافة، والعائد الكلي 294.61 % الذين تم ريهم بالماء النظيف أظهروا قيمًا متوسطة: ساق بطول 5.3 سم، كلوروفيل بمقدار 1.43 ملغ/غ من المادة الجافة، وإنتاجية بنسبة 192.3 % النباتات التي تم ريها بالمياه العادمة المعالجة حققت أدنى النتائج: ساق بطول 3.7 سم، كلوروفيل بمقدار 1.25 ملغ/غ من المادة الجافة، وإنتاجية بنسبة 100 %. التربة المروية بمياه الصرف الصحي غير المعالجة وصلت إلى محتوى من الفوسفور القابل للامتصاص يبلغ 1153.3 ملغ/كغ.

تكشف هذه البيانات أن *Paulownia sp.* تتحمل أنواع المياه المختلفة بشكل جيد، مع نمو أفضل بكثير في مياه الصرف الصحي الخام، مما يعزز اهتمامها في المعالجة النباتية وإعادة استخدام مياه الصرف الصحي في المناطق شبه الجافة.

الكلمات المفتاحية: بولونيا، التكاثر بالعقل، مياه الصرف الصحي، المعلمات المورفومترية، المعلمات الفسيولوجية.

Abstract

In the face of dwindling water resources and the need to develop sustainable agricultural practices, this study focused on evaluating the behavior of *Paulownia* sp., a fast-growing woody species propagated by cuttings and subjected to irrigation with three types of water: untreated wastewater, treated wastewater, and clean water.

The experiment was conducted in two main phases. The first phase involved vegetative propagation through cuttings, allowing for the production of viable plants with a high rooting rate. The second phase focused on the application of irrigation treatments, followed by morphometric analyses (stem length, collar diameter, root length) and physiological analyses (chlorophyll, proline, soluble sugars content) as well as the study of available phosphorus in the soil.

The results showed that the plants irrigated with untreated wastewater exhibited the best performance: stem length of 7.5 cm, collar diameter of 0.45 cm, main root of 9 cm, chlorophyll of 1.74 mg/g DM, proline of 0.608 mg/g DM, soluble sugars of 1.945 mg/g DM, total yield of 294.61%. Those irrigated with clean water showed intermediate values: stem length of 5.3 cm, chlorophyll of 1.43 mg/g DM, yield of 192.3%. The plants under treated wastewater had the lowest results: stem of 3.7 cm, chlorophyll of 1.25 mg/g DM, yield of 100%. The soil irrigated with untreated wastewater reached an assimilable phosphorus content of 1153.3 mg/kg.

These data reveal that *Paulownia* sp. tolerates different types of water well, with significantly better growth under raw wastewater, which enhances its interest for phytoremediation and the valorization of wastewater in semi-arid areas

Keywords: *Paulownia* sp, Propagation by cuttings, Wastewater, Morphometric parameters, Physiological parameters.

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des Abréviations

Liste des Figures

Introduction	1
I. Généralités sur la famille de la plante	4
A. Généralité sur <i>paulownia Sp</i>	4
B. Historique de la plante	5
C. Répartition du <i>Paulownia Sp</i> dans le monde.....	5
D. L'intérêt du <i>Paulownia Sp</i>	6
1. Taxonomie de <i>Paulownia Sp</i>	7
2. Classification de paulownia	8
3. Caractéristiques botaniques	9
1. Habitat et taille	9
2. Cycle de vie.....	9
3. System Racinaire.....	9
4. Tige	10
5. Feuille	11
6. Fleurs.....	11
7. Fruit et grain	13
4. Composition chimique	13
5. Propriété écologique.....	14
II. Mode de reproduction du Paulownia	16
1. Reproduction sexuée du Paulownia.....	16
2. Reproduction asexuée du Paulownia.....	16
A. Méthode de multiplication	17
1. Méthode de multiplication par semis	17
2. Méthode de multiplication par bouturage	17
3. Méthode de multiplication par rejets de souche	17

4.	Méthode de multiplication par culture in vitro	17
B.	Condition de multiplication	18
1.	Viabilité des graines	18
2.	Diversité génétique	18
3.	Stratification	18
4.	Période de semis optimale	18
5.	Protection contre les ravageurs	19
6.	Technique de semis	19
7.	Application de fongicide	19
8.	Conditions d'arrosage et de germination	19
C.	Domaine d'Utilisation du Paulownia	19
1.	Domaine industriel	19
2.	Domaine médical	20
3.	Domaine cosmétique	20
D.	Domaine de l'agriculture et de l'écologie	20
1.	Écologie	20
III.	Généralité sur les Eaux usées	23
A.	Les Sources Des Eaux Usées	23
1.	Les eaux usées domestiques	23
2.	Les eaux pluviales	24
3.	Les eaux usées industrielles	24
B.	Les caractéristiques des eaux usées	25
1.	Les paramètres physiques chimiques	25
C.	Eau usée traité	26
D.	Eau usée non traite	27
E.	Les types de traitements des eaux usées	27
F.	L'effet des eaux usées sur les plantes	28
IV.	Matériels et méthodes	30
A.	Présentation des sites	30
1.	Pépinière De Lalla Khadija à Mouzaïa	30
2.	Présentation De La STEP De Beni Mered	31
B.	Matériel	31

1.	Matériel non biologique	31
2.	Le matériel biologique	31
3.	Matériels Végétale	32
C.	Préparation du lit de semence	33
1.	Plantation des Boutures	33
2.	Irrigation des boutures après l'implantation	34
D.	Paramètres Morphométriques	35
1.	Rapport entre la longueur de la racine principale et celle de la tige	35
2.	Détermination de la masse sèche	35
3.	Rapport de la masse sèche des racines sur celle des parties aériennes	36
E.	Paramètres physiologiques	36
A.	Pigment Foliaire	36
B.	Extraction et dosage de proline	37
C.	Extraction et dosage des Sucre Soluble	39
D.	Dosage de l'azote totale Méthode de « KJELDAHL ,1883 »	40
F.	Paramètre édaphique	42
1.	Mesure de phosphore assimilable dans le sol	42
V.	Résultat et discussion	44
A.	Résultat de bouturage	44
B.	Paramètres morphométriques	45
1.	Longueur de la tige	45
2.	Diamètre au collet	45
3.	Longueur de la racine principale	46
4.	Longueur de racine secondaire	46
5.	Rapport longueur de la racine principale sur la longueur de la tige	47
6.	Masse fraîche de la partie aérienne	48
7.	Masse fraîche de la partie racinaire	48
8.	Masse sèche de la partie aérienne	49
9.	La Masse sèche des racines	50
10.	Rapport de la masse fraîche des racines sur la masse fraîche de la partie aérienne	50
11.	Rendement totale des plantes	51

C. Paramètres physiologiques	52
1. Chlorophylle totale.....	52
2. Sucre soluble.....	53
3. Proline.....	53
4. L'azote	54
D. Paramètre Edaphique	55
1. Phosphore assimilable	55
VI. Discussion	56
VII. Conclusion	64
VIII. Référence Bibliographique	
IX. Annexe	

LISTE DES ABREVIATION

AFC : Académie Forestière Chinoise.

C₁₇H₂₄O₉ : Syringine.

C₁₈H₁₈O₅ : Mattecucinol.

C₂₀H₁₈O₇ : Paulownin.

C₃₀H₄₈O₃ : Acide ursolique.

CAFS: Chinese Academy of Forestry Sciences.

CH₃COOH : Acide Acétique.

CNPF-IDF : Centre National de la Propriété Forestière – Institut pour le Développement Forestier.

DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

DGE : Direction Générale de l'Environnement.

DO : Densité Optique.

EDTA : Ethylène Diamine Tétra Acétique.

ENSA : École Nationale Supérieure Agronomique.

EUT : Eaux Usées Traitées.

GBIF : Système Mondial d'Information sur la Biodiversité.

H₂BO₃ : Ion Borate Hydrogénocarbonate.

MES /M.E. S : Matières En Suspension.

Mf : Masse Fraiche.

MO : Matière Organique.

Ms : Masse Sèche.

NF ISO: Norme Francaise International Organization for Standardization.

NH⁴⁺: Ion Ammonium.

NH₄OH: Hydroxyde d'Ammonium.

ONA : Office National de l'Assainissement.

Se : Sélénium.

SPP : Species (utilisé pour désigner plusieurs espèces dans un genre botanique).

STEP : Station de Traitement des Eaux Polluées.

LISTE DES FIGURE

Figure 1: Structure de Paulownia (Tela Botanica, 2011).....	4
Figure 2 : Carte de la répartition mondiale des huit espèces de Paulownia(Young et Lundgern 2022).	6
Figure 3 : photo représente le système racinaire de paulownia (Paulownia Energy France 2023). ...	10
Figure 4: Morphologie foliaire juvénile de Paulownia (via Tela Botanica 2016).....	11
Figure 5: Morphologie florale du genre Paulownia.	12
Figure 6: Capsules et graines de Paulownia SPP. (Promesse de fleurs 2024).	13
Figure 7: les différentes étapes du traitement des eaux usées. (Aussel et al 2004).....	27
Figure 8 : Différent types morphologique des boutures de Paulownia utilisées pour les essais de multiplication.....	32
Figure 9: schéma expérimentale de l'essai de multiplication	33
Figure 10: Représentation des trois types d'eaux utilisées dans l'expérimentation.....	34
Figure 11: Étapes expérimentales de l'extraction des pigments chlorophylliens.	37
Figure 12: Étapes expérimentales du dosage de la proline dans le matériel végétal.....	38
Figure 13: Les principales étapes du dosage des sucres solubles.	39
Figure 14: Etapes de Dosage de l'azote totale Méthode de « KJELDAHL ,1883 ».	41
Figure 15: Etape de dosage de phosphore dans le sol.	42
Figure 16 : Représente les plantes après 2mois de la multiplication par Bouturage.....	44
Figure 17: Variation de la longueur de la tige selon le type d'eau d'irrigation.....	45
Figure 18: Variation du diamètre au collet des plants selon le type d'irrigation.....	45
Figure 19: Effet de la qualité de l'eau d'irrigation sur la longueur de la racine principale cm.	46
Figure 20: Longueur de la racine secondaire selon le type d'eau utilisée.	47
Figure 21: Effet du type d'eau d'irrigation sur rapport longueur de la racine principale sur la longueur de la tige (cm).	47
Figure 22: Comparaison de la masse fraîche sous différents régimes d'irrigation.	48
Figure 23: Effet du type d'eau d'irrigation sur la masse fraîche des racines.	49
Figure 24: Effet du type d'eau d'irrigation sur la masse sèche de la partie aérienne.....	49
Figure 25: Effet du type d'eau d'irrigation sur la masse sèche des racines.	50
Figure 26: Effet du type d'eau d'irrigation sur le rapport masse sèche racine/Masse fraîche racine par %.....	51
Figure 27: Effet du type d'eau d'irrigation sur les rendements total.....	51
Figure 28: Variation de la teneur en chlorophylle totale selon le type d'irrigation (mg/gMVf).	52
Figure 29: Effet du type d'eau d'irrigation sur la teneur en sucres solubles	53
Figure 30: Effet de l'irrigation par différents types d'eau sur la teneur en proline.....	54
Figure 31: Effet de la qualité de l'eau d'irrigation sur la teneur en azote total (%).	54
Figure 32: Effet du type d'eau d'irrigation sur la teneur en phosphore assimilable du sol.	55

INTRODUCTION

Introduction

Le *Paulownia sp.*, originaire d'Asie, est un arbre à croissance rapide reconnu pour sa capacité à s'adapter à des sols pauvres et à des conditions climatiques variées. Son système racinaire profond lui permet de stabiliser les sols, limitant ainsi les phénomènes d'érosion et contribuant à la lutte contre la désertification, notamment dans les zones arides et semi-arides. En plus de son rôle écologique, il présente un intérêt économique et environnemental notable : son bois léger et de haute qualité est utilisé dans la menuiserie fine, la fabrication d'instruments de musique et de meubles ; ses larges feuilles riches en protéines peuvent servir de fourrage pour le bétail ; enfin, sa capacité à absorber certains éléments polluants en fait une espèce prometteuse pour des projets de phytoremédiation et de restauration des sols dégradés.

Dans un contexte marqué par la rareté des ressources en eau, la gestion durable de cette ressource devient un enjeu majeur, notamment en Algérie où les précipitations sont faibles et irrégulières, alors que la demande en eau continue d'augmenter en raison de la croissance démographique et des besoins agricoles. Face à cette pression, l'utilisation d'eaux usées qu'elles soient traitées ou non pour l'irrigation agricole se présente comme une alternative intéressante permettant d'économiser l'eau douce et de préserver les ressources naturelles.

Cependant, cette pratique soulève plusieurs interrogations quant à ses effets sur la croissance, la physiologie et la santé des plantes, ainsi que sur la qualité des sols à long terme. Une évaluation rigoureuse de ces impacts est donc nécessaire, notamment sur des espèces végétales présentant des potentialités de valorisation et de résistance.

C'est dans cette optique que s'inscrit notre étude, qui s'intéresse à l'impact de l'irrigation par différents types d'eau sur le *Paulownia sp.*, une espèce peu exigeante et polyvalente. Nous avons procédé à sa multiplication par bouturage, une méthode végétative simple et économique, afin d'obtenir des jeunes plants homogènes. Ces plants ont été soumis à une irrigation selon trois traitements :

- Des eaux usées non traitées,
- Des eaux usées traitées,
- Et de l'eau propre, servant de témoin.

INTRODUCTION

Ce protocole a pour objectif d'analyser les réponses morphométriques, physiologiques et édaphique du *Paulownia sp.* Face à des conditions d'irrigation contrastées, et d'évaluer son potentiel de croissance en milieu utilisant des eaux non conventionnelles.

Face à ces enjeux environnementaux et aux potentialités du *Paulownia sp.*, il devient pertinent de s'interroger sur la capacité de cette espèce à s'adapter à des pratiques d'irrigation alternatives et à jouer un rôle écologique dans des milieux dégradés

Dès lors, une question centrale se pose :

- ❖ Le Paulownia, connu pour sa rapidité de croissance et sa résistance à la sécheresse, peut-il être multiplié efficacement par bouturage, et est-il capable de tolérer une irrigation à base d'eaux usées (traitées ou non) sans altération majeure de sa croissance morphologique et de son fonctionnement physiologique ?

- ❖ Peut-on considérer cette plante comme un outil potentiel de dépollution, jouant un rôle dans l'épuration des eaux usées ?

Afin de répondre à cette problématique, nous avons émis les hypothèses suivantes :

1. Le Paulownia peut être multiplié efficacement par bouturage, en donnant des plants viables et vigoureux.
2. L'irrigation avec des eaux usées (traitées et non traitées) influence le développement morphométrique et les paramètres physiologiques du Paulownia de manière différente selon la qualité de l'eau.
3. Les eaux usées non traitées, riches en éléments nutritifs, pourraient favoriser la croissance du Paulownia comparativement aux eaux traitées.
4. Le Paulownia possède une capacité d'absorption des polluants présents dans les eaux usées, ce qui en fait une plante potentiellement épuratrice.

PARTIE THEORIQUE.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA PLANTE.

I. Généralités sur la famille de la plante

Les Paulowniacées, également connues sous le nom de famille des jacinthes des bois, appelée autre fois scrophulariaceae, sont une famille distincte qui provient du genre *Paulownia* (Davis,2022). C'est une famille monogénique étayée par des données moléculaires et morphologiques. La famille se caractérise par un port d'arbres, à feuilles caduques. Des fruits ligneux et des traits de développement floral uniques (Zhi *et al.*,2018 ; Falasca et Bernabé 2010).

A. Généralité sur *paulownia Sp*

Le nombre d'espèces de *Paulownia* varie en fonction de la classification taxonomique. Les premières études suggèrent que le genre comprend entre 6 à 17 espèces (Liza et Aida, 2023 ; Sławińska *et al.*, 2023). Le genre est bien connu pour son importance économique en tant que source de bois à croissance rapide (Hu, 1959).

Les paulownias, sont des arbres à feuilles caduques qui croissent rapidement et sont réputés pour leur aptitude à générer une biomasse considérable en peu de temps (Figure 01) (Tusevhaan *et al.*, 2023).



Figure 2: Structure de *Paulownia* (Tela Botanica, 2011).

Nous retrouvons parmi les variétés fréquemment cultivées *P. tomentosa*, *P. elongata*, *P. fortunei*, *P. fargesii*, *P. galbrata* et *P. catalpifolia* (Jakubowski, 2022), ainsi que des hybrides Choisis pour leur rendement et leur capacité d'adaptation à l'environnement (**Lugli et al., 2023**), tels que (*P. elongata* × *P. fortunei*) ou encore (*P. fortunei* × *P. tomentosa*).

Parmi les hybrides les plus célèbres, on trouve les clones in vitro « 112 » (*P. elongata* × *P. fortunei*), « Cotevisa 2 » (*P. elongata* × *P. fortunei*), et « Shan Tong » (*P. fortunei* × *P. tomentosa*). Il existe aussi des hybrides naturels, comme le (*P. taiwaniana*), qui résulte d'un croisement entre le (*P. kawakami*) et le (*P. fortunei*) (**Rana et al., 2018**).

Les hybrides de *Paulownia* « Shan Tong » se distinguent par une croissance rapide, une bonne résistance au froid jusqu'à -27 °C et un bois léger. Ils sont largement utilisés dans la production de papier, de meubles et de biomasse, notamment en Pologne (**Ptach et al., 2017**).

B. Historique de la plante

L'arbre a reçu le nom « *paulownia* » en hommage à Anna Pavlovna Romanova, grande-duchesse de Russie, qui est devenue plus tard reine des Pays-Bas. Elle a soutenu la seconde expédition de **Philipp von Siebold** au Japon en 1861 (**Tusevhaan et al., 2023**).

En Chine, l'arbre *paulownia* est considéré comme une plante propre depuis au moins 2600 ans. Il pourrait bien contenir le record du plus vieil arbre de plantation de l'histoire. Dans les temps anciens (221-207 av. J.-C.), un livre intitulé « ' On Dynastie on Qin ' » indiquait que des milliers de Paulownias avaient été plantés autour de la ville d'Arfang en Chine (**Timothy, 2008**).

C. Répartition du *Paulownia Sp* dans le monde

Les paulownias sont répartis dans des zones tropicales aux zones tempérées. Les températures maximales absolues dans leur aire de répartition peuvent varier entre 31 et 47°C. On les retrouve à des altitudes allant du niveau de la mer jusqu'à environ 2400 m d'altitude (**Danciu et al., 2016**).

Les neuf espèces de ce genre sont confinées à la Chine, à l'exception de *P. fortunei* qui s'étend au Vietnam et au Laos, et de *P. tomentosa* qui pousse également en Corée et au Japon

(CAFS,1986). Des écologues chinois ont réalisé une étude sur l'aire de répartition de 3 espèces principales de paulownia en Chine (aire de répartition naturelle) mais aussi dans ses aires d'introduction pour *P. tomentosa* (Figure N° 02). (Fang et al., 2011).

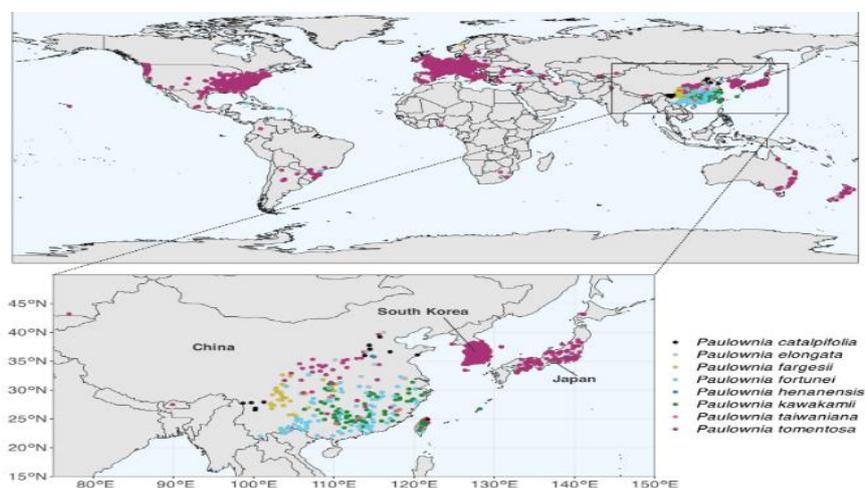


Figure 3 : Carte de la répartition mondiale des huit espèces de *Paulownia*. (Young et Lundgren 2022).

D. L'intérêt du *Paulownia Sp*

En Chine et dans plusieurs pays asiatiques, on utilise traditionnellement le bois de *paulownia* pour diverses applications : mobilier (tables, chaises, coffres, boîtes...), sabots, ustensiles de cuisine (casseroles à riz, seaux d'eau, bols, cuillères et baguettes), ainsi que pour la fabrication d'outils agricoles ou artisanaux (Akyildiz et Kol, 2010). Il est courant d'utiliser le paulownia pour la production d'instruments de musique, malgré le fait que son bois ne soit pas particulièrement efficace pour l'absorption sonore (Jakubowski, 2022).

Grâce à sa riche teneur en cellulose pouvant atteindre 440 g de cellulose par kg (Yadav et al., 2013), le bois de paulownia est approprié pour la production de pâte de cellulose (Ates et al., 2008).

Actuellement, les États-Unis cultivent le *paulownia* pour la production de pâte à papier (Tusevhaan et al., 2023). Toutefois, les scientifiques ont mis en évidence que les fibres de paulownia sont de courte longueur et ne sont adaptées qu'à certaines qualités de papier.

Actuellement, de nombreuses études sont menées pour encourager l'emploi du bois de *paulownia* dans la fabrication de plastiques et composites en bois ainsi que dans la production de biopolymères (Akyildiz et Kol, 2010).

Selon Al-Sagheer et al, (2019), les fleurs et les feuilles de *paulownia* constituent une source nutritive intéressante pour l'élevage, riches en graisses, en sucres et en protéines. Les feuilles de *paulownia* sont aussi employées comme engrais verts en tant que compost, selon Yadav et al., (2013).

Vue sa floraison généreuse le paulownia constitue une source notable de production de miel (Yadav et al., 2013). Des composés bénéfiques pour le foie, les reins, la vésicule biliaire et les poumons se trouvent dans les fleurs, les feuilles, les fruits et l'écorce de paulownia. Ils peuvent donc être employés comme traitements médicaux, possédant des propriétés anti-inflammatoires, antitussives, diurétiques et antihypertenseurs (Lugli et al., 2023).

Historiquement, l'écorce de sa tige a été employée dans la médecine traditionnelle chinoise comme ingrédient pour traiter des affections infectieuses comme la gonorrhée, l'érysipèle (Kolya et Kang, 2021) ou encore la bronchite, la dysenterie bactérienne et l'entérite aiguë. A parotidite aiguë et la conjonctivite (Liao et al., 2008).

Dernièrement, les feuilles et les fleurs ont trouvé leur place dans le secteur cosmétique pour la fabrication de parfums, crèmes, etc. (Danciu et al., 2016) C'est aussi un arbre décoratif (Asai et al., 2008) qui est couramment présent à travers le monde. Comme nous l'avons déjà observé, il serait approprié pour la réhabilitation des mines et la gestion des eaux résiduaires.

Les essais d'emploi des variétés de paulownia pour la phytoremédiation des métaux lourds présents dans les sols pollués ont montré une concentration importante de métaux comme le cuivre, le zinc et Cadmium, même si cela est attribué à leur forte productivité en biomasse plutôt qu'à leur capacité d'accumuler des métaux (Tusevhaan et al., 2023).

1. Taxonomie de *Paulownia Sp*

Le botaniste Thunberg, (1784) originaire de Suisse, a donné le nom latin *Paulownia* à ce genre. Lorsqu'il a partagé des informations à ce sujet dans un livre appelé Flore Japonaise. À l'origine, Thunberg avait placé *Paulownia* dans la famille des Bignoniacées, sous le nom *Bignonia tomentosa*, qui est aujourd'hui connu sous le nom de *Paulownia tomentosa*.

En 1835, les scientifiques néerlandais **Zuccarini et von Siebold** ont mené des recherches approfondies sur ce genre et l'ont réattribué à la famille des Scrophulariacées (Scrophulariaceae). Depuis lors, des botanistes chinois et étrangers ont identifié de nouveaux types en se basant sur des échantillons parfois incomplets, augmentant le nombre d'espèces reconnues à 23.

Malgré cela, l'emplacement taxonomique de la famille *Paulownia* est demeuré controversé. Quelques experts ont débattu de son placement parmi les familles de plantes, certains plaidant pour sa classification à part. Malgré cela, la plupart des scientifiques optent pour son inclusion dans une famille différente, selon un rapport de l'Académie chinoise des sciences forestières (CAFS, 1986). Position taxonomique contemporaine.

De nos jours, la catégorie *Paulownia* est placée dans la famille des Paulowniacées (Paulowniaceae), d'après la catégorisation récente définie par **Tela Botanica (2019)**. Ce changement indique l'identification du groupe comme faisant partie d'une famille spécifique, divergente des Scrophulariacées et des Bignoniacées.

2. Classification de paulownia

D'après : Les naturalistes **von Siebold (1796-1866)** et **Zuccarini (1797-1848)** ont décrit le genre en 1835.

Classification de Cronquist

(1981)

Règne : Plantae.

Sous-règne : Tracheobionta.

Division : Magnoliophyta.

Classe : Magnoliopsida.

Sous-classe : Asteridae.

Ordre : Scrophulariales.

Famille : Scrophulariaceae.

Genre : *Paulownia Siebold & Zucc., 1835*

Classification APG III

(2009)

Règne : Plantae.

Clade : Angiospermes.

Clade: Dicotylédones vraies.

Clade : Astéridées.

Clade : Lamiidées.

Ordre : Lamiales.

Famille : Paulowniaceae.

Genre : *Paulownia*.

Classification APG IV

2016 :

Règne : Plantae

Clade : Angiospermes

Clade : Eudicotylédones

Clade : Asterids

Ordre : Lamiales

Famille : Paulowniaceae.

Genre : *Paulownia*.

N.B : Selon la classification APG IV (Angiosperm Phylogeny Group. 2016) le genre *Paulownia* est rattaché à la famille Paulowniaceae incluse dans l'ordre des lamiales au sein du clade des Asterids.

3. Caractéristiques botaniques

1. Habitat et taille

Les espèces de *Paulownia* se trouvent principalement dans le sud-est de l'Asie, mais sont maintenant cultivées en Europe, en Amérique du Nord et en Australie (**Ślawińska et al., 2023**).

Les arbres adultes peuvent atteindre une hauteur de 4,3 à 9 mètres, avec des diamètres de tronc allant de 2,7 à 19,5 cm (**Kozhevnikov et al., 2024**).

2. Cycle de vie

Les paulownias sont thermophiles, démarrent leur saison de croissance tardivement et nécessitent des conditions spécifiques pour une croissance réussie (**Kozhevnikov et al., 2024**).

Ils se reproduisent par graines et par des méthodes végétatives, la floraison et la fructification se produisant dans des conditions optimales (**Kozhevnikov et al., 2024**).

3. System Racinaire

Le système racinaire est étendu, ce qui permet une absorption efficace des nutriments et une stabilité dans différents types de sol (**Woźniak et al., 2018**).

Selon **Timothy (2008)** Le système racinaire, bien que peu profond surtout chez les jeunes plants, se caractérise par une grande densité.

L'arbre *Paulownia* possède un système racinaire fortement ancré et bien structuré. Les racines supérieures sont fines, acérées, dichotomiquement ramifiées et présentent une densité de Croissance élevée. Les racines absorbantes ont une longueur qui peut atteindre plus de 60 cm et une épaisseur généralement comprise entre 1 et 5 mm Les poils absorbants se comparent à des fibres de coton. (**Zhao et al.,1986**) L'élaboration et la diffusion de la racine Ce mécanisme

est grandement déterminé par la hauteur de l'eau souterraine, les propriétés physiques du sol et les nutriments accessibles. Le *Paulownia* se prête tout particulièrement aux sols sablonneux légers et bien drainants. On observe généralement plusieurs racines latérales robustes et étendues, semblables à des griffes, qui s'étendent vers le bas. (Figure 03) (Zhao et al., 1986).



Figure 4 : photo représente le système racinaire de paulownia (*Paulownia* Energy France 2023).

4. Tige

La tige se caractérise par une croissance rapide, avec des pousses annuelles atteignant 120 cm (Kozhevnikov et al., 2024).

Si elle est cultivée à l'extérieur, le *Paulownia* a tendance à développer plusieurs branches. En revanche, lorsqu'elle pousse en forêt, elle est susceptible de produire un tronc droit. La couleur de l'écorce de *Paulownia* varie entre le brun et le noir, elle est lisse à première vue mais présente des lenticelles sur l'arbre jeune. Au fur et à mesure de sa croissance, des fissures verticales commencent à apparaître (Zhao-Hua et al., 1986 ; El-Showk et al., 2010).

Généralement, toutes les parties, sauf les branches plus âgées, sont recouvertes de poils glanduleux de mucigel, de poils fournis et de poils à ramification ou en forme d'étoile.

La Majorité des variétés de *Paulownia* possèdent une ramification pseudo-dikomote qui se dessèche suite à la phase de flétrissement (Zhao-Hua et al., 1986).

5. Feuille

Les feuilles sont larges, riches en protéines, en graisses et en sucres, et sont souvent utilisées comme engrais vert et comme alimentation animale (**Woźniak et al., 2018**).

Dans la phase juvénile chez les jeunes arbres, les feuilles sont grandes, dotées de longs pétioles, présentent une bordure dentée, (Figure 04, B) sont positionnées en opposition et parfois disposées en verticilles (Figure 04, A). Les feuilles d'arbres adultes sont de taille réduite, entières et présentent une bordure lisse ou ondulée. (Figure 04). (**Zhao et al 1986**) .



Figure 5: Morphologie foliaire juvénile de *Paulownia* (via Tela Botanica 2016).

A : Photographie de plusieurs feuilles juvéniles, montrant leur disposition opposée, leur limbe cordiforme et leur pubescence typique. (**Bertrand, 2011**).

B : Vue détaillée d'une feuille isolée, illustrant la nervation palmée, le limbe simple cordiforme et la pubescence. (**Roubaudi,2021**).

6. Fleurs

Les fleurs de *Paulownia* sont grandes et parfumées et fleurissent généralement au printemps (**Kozhevnikov et al., 2024**).

Zhao et al (1986) disent que « L'inflorescence est une cyme contenant de deux à cinq fleurs, qui peuvent être portées par un pédoncule ou être presque sessiles ». Ils se forment dans les aisselles de petites feuilles ou plus petites durant l'été et l'automne. Les fleurs possèdent des pédicelles articulés au bout apical.

Le calice présente une texture charnue, une forme en cloche et est doté de cinq lobes de taille inégale. Les lobes possèdent une forme triangulaire, le lobe supérieur central étant légèrement plus vaste, et ils sont généralement fortement garnis de poils. Pour certaines espèces, la chute des poils se produit lors de l'anthèse.

La corolle, de taille importante et teintée de violet à blanc, est bilabée avec un double lobe sur la lèvre supérieure et trois lobes allongés sur la lèvre inférieure. Le tube de la corolle en forme de cloche se courbe généralement vers l'avant sur une distance de 5 mm à partir de sa base, puis il s'élargit progressivement ou soudainement.

La corolle est aplatie par la pression exercée vers le bas de la lèvre supérieure, elle présente fréquemment à l'intérieur des marques ou des stries violettes, accompagnées de plis jaunes.

Les étamines sont didynamiques, mesurant approximativement la moitié de la longueur de la corolle. Le pistil a une longueur approximativement égale ou supérieure à celle des étamines. L'ovaire possède deux compartiments (Figure 05).



Figure 6: Morphologie florale du genre *Paulownia*.

A : Vues latérales et frontales des fleurs de cinq espèces de *Paulownia* (Barton et al., 2007)

B : Inflorescence terminale en panicule de *Paulownia*, composée de fleurs campanulées violettes, typiques de l'espèce. (Michel,2011).

7. Fruit et grain

Le fruit est une capsule contenant de nombreuses graines dispersées par le vent (Kozhevnikov et al., 2024), de couleur brune sèche divisée en quatre compartiments, renfermer des petites graines. Les capsules arrivent à maturité durant l'automne, période où elles s'ouvrent pour disperser leurs graines. Elles demeurent ensuite fixées tout au long de l'hiver, offrant un moyen facile d'identification. (Figure 06 (A)) (Remaley et al., 2005).

Les graines sont légères, ce qui facilite une propagation générale (Figure 06 (B)). (Kozhevnikov et al., 2024).

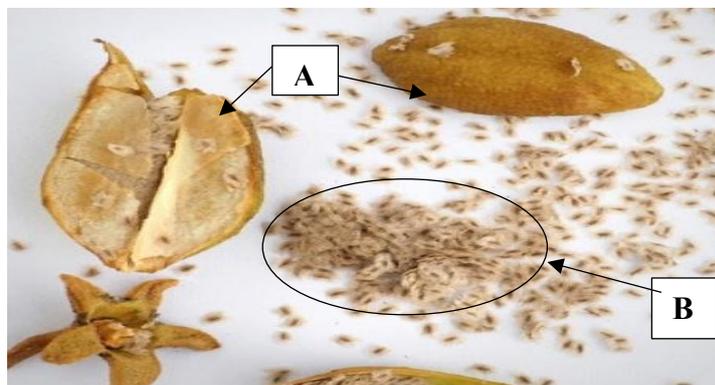


Figure 7: Capsules et graines de *Paulownia SP.* (Promesse de fleurs 2024).

4. Composition chimique

En 2007 Barton et al mentionnent que : Le *Paulownia* renferme plusieurs composés chimiques, parmi lesquels on retrouve :

- L'acide ursolique (C₃₀H₄₈O₃), présent dans les feuilles.
- Le matteucinol (C₁₈H₁₈O₅), également trouvé dans les feuilles.
- Le paulownin (C₂₀H₁₈O₇), qui se situe dans le xylème.
- La D-sésamine, présente dans le bois.
- La syringine (C₁₇H₂₄O₉), qui se trouve dans l'écorce.
- Le catalpinoside, un autre composé chimique également découvert dans l'écorce.
- Les fruits, quant à eux, contiennent divers acides, huiles grasses, flavonanes et alcaloïdes

5. Propriété écologique

Le *Paulownia*, présente un grand intérêt écologique comme dans le domaine de l'agroforesterie et la réhabilitation des sols où l'espèce est souvent plantée comme arbre d'ombre dans des systèmes de culture associée, comme la culture de thé et le bambou. **(Barton et al.,2007).**

Ce qui aide à mieux préserver les sols et à utiliser les terres agricoles de manière efficace.

En automne, ses feuilles et branches tombent, permettant ainsi un recyclage de nutriments dans le sol Pour la production de miel et l'enrichissement de la biodiversité ; Les fleurs de *Paulownia* attirent de nombreux pollinisateurs grâce à leur nectar, bien que peu d'études existent à ce sujet. Avec son bois léger et sa croissance rapide, le *Paulownia* est très efficace pour capter le carbone.

Ainsi Les plantations de *Paulownia* peuvent transformer favorablement les microclimats environnants, ce qui bénéficie aux cultures voisines.

Comme elle présente un intérêt économique telle que la valeur de son bois en raison de sa croissance rapide, de sa légèreté et de sa résistance, ce qui le rend idéal pour la production de meubles, de construction et de papier. **(Hassankhani et al.,2015).**

- Le bois est léger mais solide, avec des propriétés physiques qui le rendent idéal pour les meubles, les instruments de musique et les produits de décoration **(Barbu et al., 2022).**

Autre avantage de cette culture dans les domaine agricole et environnemental concerne les feuilles qui sont riches en azote, ce qui en fait une excellente source de fourrage et d'engrais vert **(Stewart et al., 2018).**

- L'intégration du *paulownia* dans les systèmes agroforestiers peut améliorer la biodiversité et fournir des sources de revenus supplémentaires aux agriculteurs **(Ghazzawy et al., 2024).**

Concernent les Composés bioactifs et applications pour la santé : Diverses espèces de *Paulownia* contiennent des composés bioactifs dotés de propriétés médicinales potentielles, telles que des effets antiradicalaires et anticoagulants **(Sławińska et al., 2023).**

Chapitre II

LA MULTIPLICATION

II. Mode de reproduction du Paulownia

D'après **Barton et al 2007** : Les paulownias se reproduisent principalement selon deux modes principaux : la reproduction sexuée par graines et la reproduction asexuée par voie végétative.

1. Reproduction sexuée du Paulownia

Le Paulownia se reproduit naturellement par voie sexuée à travers ses fleurs hermaphrodites, qui assurent l'autofécondation ou la pollinisation croisée, généralement via des insectes (pollinisation entomophile). Après la fécondation, l'arbre forme des capsules contenant un grand nombre de petites graines ailées, facilement dispersées par le vent (anémochorie). Ce mode assure une diversité génétique importante, utile pour la sélection variétale. Toutefois, la germination des graines est souvent faible et les plantules présentent une croissance lente au stade juvénile, ce qui limite son utilisation en pépinière. (**Zhang et al., 2013**).

2. Reproduction asexuée du Paulownia

Le Paulownia possède une capacité remarquable à se régénérer de manière végétative. Après la coupe, l'arbre émet spontanément des rejets à partir de la souche ou de drageons racinaires, ce qui constitue un moyen efficace de régénération naturelle. Cette reproduction asexuée permet d'obtenir des individus génétiquement identiques à la plante mère, donc des clones, ce qui est avantageux pour la conservation des caractères souhaités dans les plantations industrielles. (**Ali et al., 2018**).

A. Méthode de multiplication

La multiplication des arbres Paulownia peut être réalisée par plusieurs méthodes, chacune ayant ses avantages et ses applications : (Zhao-Hua et al., 1986)

1. Méthode de multiplication par semis

La multiplication par semis est basée sur la reproduction sexuée du Paulownia. Elle est principalement utilisée dans les études génétiques et les programmes d'amélioration, car elle permet de générer de la variabilité entre les individus. Toutefois, cette méthode reste peu utilisée en production commerciale, en raison du faible taux de germination et de la lenteur de croissance initiale des plantules issues de graines. (Shirmohammadi et al., 2012).

2. Méthode de multiplication par bouturage

Le bouturage est une méthode de multiplication végétative largement utilisée pour le Paulownia. Elle consiste à prélever des fragments de tige ou de racine, que l'on fait ensuite s'enraciner dans un substrat adapté. Les boutures racinaires présentent généralement un meilleur taux de reprise que les boutures de tige, car elles contiennent des tissus plus aptes à régénérer un nouveau système racinaire. Cette technique est simple, économique, et permet de conserver fidèlement les caractéristiques génétiques du pied mère. (Gökbayrak & Engin, 2017).

3. Méthode de multiplication par rejets de souche

Le Paulownia est capable d'émettre des rejets vigoureux à partir de la souche après l'abattage, ce qui constitue une méthode de multiplication naturelle, très efficace pour maintenir les plantations. Ce mécanisme est utilisé dans les cultures intensives pour renouveler rapidement les peuplements sans replanter. C'est une solution pratique et peu coûteuse, bien adaptée aux systèmes sylvicoles extensifs. (Ali et al., 2018).

4. Méthode de multiplication par culture in vitro

La micropropagation in vitro permet de produire rapidement un grand nombre de plants clonés de Paulownia, en particulier pour les hybrides comme *Paulownia 9501*. À partir de fragments

végétatifs stériles (apex, nœuds, feuilles), les explants sont cultivés sur un milieu nutritif contenant des régulateurs de croissance. Cette technique présente l'avantage de garantir une homogénéité génétique, une élimination des pathogènes, et une rapidité de production à grande échelle. Elle est particulièrement précieuse pour les programmes de reforestation ou de développement agricole. (Ahmad *et al.*, 2021).

B. Condition de multiplication

Selon Barton *et al* 2007, Pour réussir à multiplier Paulownia, des conditions spécifiques doivent être remplies.

1. Viabilité des graines

Les graines de paulownia ont un taux de viabilité élevé, ce qui signifie que seules quelques gousses sont nécessaires pour produire un grand nombre de plants. Cela fait de la collecte de graines une méthode de propagation efficace.

2. Diversité génétique

Il est crucial de récolter les graines d'une grande variété d'arbres. Cette pratique améliore la diversité génétique de la prochaine génération, ce qui est important pour l'adaptabilité et la résilience dans des conditions environnementales variables.

3. Stratification

Pour favoriser la germination et le développement initial, il est nécessaire de stratifier les graines. Cela consiste à les conserver dans de la tourbe humide ou du sable à environ 5 °C pendant une période de 4 à 6 semaines, reproduisant ainsi la phase de dormance hivernale. Cette étape est cruciale pour garantir une germination réussie.

4. Période de semis optimale

Les graines doivent être semées au début du printemps, lorsque les températures mensuelles moyennes atteignent environ 11 °C (avec des extrêmes de 16 °C et 6 °C). Cette fourchette de température est indispensable pour encourager la germination.

5. Protection contre les ravageurs

Les jeunes plants sont particulièrement sensibles aux limaces et aux escargots. Il est donc conseillé de mettre en place des mesures de protection pour les défendre durant leurs premières étapes de croissance.

6. Technique de semis

Lors de la semence, il convient de disperser les graines de manière fine sur un mélange de substrat standard dans des bacs, puis de les recouvrir légèrement avec un mélange de graines finement tamisé. La couche de couverture doit être minimale pour permettre une germination efficace des graines.

7. Application de fongicide

L'ajout d'un fongicide, tel que le thirame, à la couche supérieure du mélange peut aider à prévenir la formation de moisissure, un problème courant qui affecte les plantules.

8. Conditions d'arrosage et de germination

Après le semis, les plateaux doivent être placés dans une serre chaude. Le mélange de graines doit être maintenu humide mais pas trop humide pour éviter la pourriture. Dans ces conditions, on peut s'attendre à une germination en 2 à 3 semaines (**Barton et al., 2007**).

C. Domaine d'Utilisation du Paulownia

1. Domaine industriel

Dans des conditions naturelles, en 10 ans, le Paulownia développe un tronc d'un diamètre de 30 à 40 cm, mesuré à 1,2 mètre du sol, produisant un volume de 0,3 à 0,5 m³ (**Yadav et al.,**

2013 ; Ates et al., 2008). Selon **Ates et al., (2008) ; Angelov, (2010)**, chaque arbre âgé de 5 à 7 ans peut générer 1 m³ de bois sur une surface avec une densité de 2000 plants/ha, offrant une production totale de 330 t/ha. Dans les zones avec une densité plus faible, la production peut atteindre 150 t/ha.

2. Domaine médical

Le Paulownia se distingue par ses vertus médicinales reconnues, en particulier dans la médecine traditionnelle. Ses extraits sont utilisés pour leurs propriétés antibactériennes, antifongiques et anti-inflammatoires (**Li et al., 2015**). Certaines recherches ont révélé son potentiel dans le traitement de maladies respiratoires et dermatologiques (**Wang et al., 2017**). En raison de sa teneur élevée en flavonoïdes et en composés phénoliques, il est également étudié pour ses effets protecteurs contre le stress oxydatif et certaines maladies chroniques (**Chen et al., 2018**).

3. Domaine cosmétique

L'extraits de Paulownia sont utilisés dans l'industrie cosmétique en raison de leurs propriétés antioxydantes Ils sont incorporés dans des formules visant à combattre le vieillissement de la peau et à accroître son élasticité (**Kim et al., 2014**). L'huile dérivée des graines est également employée pour hydrater et protéger la peau, grâce à sa forte teneur en acides gras essentiels (**Zhao et al., 2016**).

D. Domaine de l'agriculture et de l'écologie

1. Écologie

Le Paulownia joue un rôle crucial dans la séquestration du carbone :

- Il absorbe environ 1250 tonnes de CO₂ par hectare et par an (**Bikfalvi, 2013**).
- Chaque arbre retient environ 22 kg de CO₂ et libère 6 kg d'O₂ annuellement, participant ainsi à la purification de l'air (**Angelov, 2010**).

Les cultures de Paulownia accroissent le carbone du sol grâce à l'accumulation de matière organique provenant des feuilles mortes. Son système racinaire étendu favorise la distribution continue du carbone dans le sol (**Lawrence, 2011**) et la conservation des eaux souterraines (**Bikfalvi, 2013**). Le Paulownia peut être coupé 4 à 5 fois, promouvant ainsi une exploitation durable. Sa croissance améliore la qualité du sol, ce qui le différencie des autres systèmes de biomasse (**Lawrence, 2011**).

2. Agriculture

Les fleurs et les feuilles de Paulownia sont riches en graisses, en sucres et en protéines, constituant ainsi une source alimentaire de choix pour le bétail. Elles sont comparables aux légumineuses en termes de composés azotés et ont une valeur nutritive similaire à la luzerne. Elles sont particulièrement bénéfiques pour l'alimentation des moutons et des chèvres, surtout en association avec de la paille de blé ou de l'ensilage (**Woods, 2008 ; Angelov, 2010**).

Les feuilles peuvent également servir d'engrais vert ou de compost (**Yadav et al., 2013**). Un arbre mature, vieux de 8 à 10 ans, produit environ 100 kg de feuilles, contenant entre 2,8 et 3 % d'azote et 0,4 % de potassium (**Woods, 2008**).

CHAPITRE III

LES EAUX USEES

III. Généralité sur les Eaux usées

Selon **Grosclaude (1999)** L'eau résiduaire est un terme équivalent à l'eau usée est couramment un mélange de substances polluantes appartenant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau ayant été utilisée pour des besoins domestiques ou industriels.

Les eaux usées se réfèrent aux eaux évacuées par les collectivités et les industries, qui sont conduites par les égouts vers une station d'épuration pour subir un traitement. Une fois traitées, elles sont désignées sous le terme d'eaux usées épurées. Dans le processus « classique » de purification de l'eau, ces eaux sont ensuite relâchées dans l'environnement naturel. **(Baumont et al., 2004).**

Les eaux usées proviennent d'origines diverses, englobant les secteurs domestique, industriel et agricole **(Etsuyankpa et al., 2024).**

A. Les Sources Des Eaux Usées

On distingue trois grandes catégories d'eaux usées : les eaux domestiques, les eaux pluviales et les eaux industrielles.

1. Les eaux usées domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Ce sont principalement des vecteurs de pollution organique. Elles sont divisées en eaux grises, qui proviennent des salles de bain et des cuisines, et sont généralement chargées en détergents, graisses, solvants, débris organiques, etc. et en eaux "d'égout" qui sont des déchets des toilettes, chargées de diverses matières organiques azotées et germes fécaux **(Baumont et al., 2004).**

2. Les eaux pluviales

Il s'agit des eaux de ruissellement (eau de pluie, eau d'arrosage des voies publiques, eau de lavage des gouttières, des marchés et des cours). L'eau qui coule sur les toits, les cours, les jardins, les espaces verts, les voies publiques générales et donc les marchés comportent tous types de déchets minéraux et organiques : terre, limons, déchets végétaux, etc., et de toutes sortes. Micropolluants (hydrocarbures, pesticides, détergents, etc. **(Desjardins, 1997)**).

Elles seront même l'explication d'une pollution importante des cours d'eau, notamment lors des périodes orageuses. Les eaux de pluie sont chargées d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles, particules de poussière), puis, par ruissellement, cette eau emporte les résidus déposés sur les toits et les routes des villes (huiles usagées, carburants également sous forme de pneus et résidus de métaux lourds.). De plus, lorsque le système d'assainissement est déclaré « unitaire », l'eau de pluie est mélangée aux eaux usées domestiques. En cas de fortes précipitations, les contraintes de préservation des installations d'épuration peuvent nécessiter le rejet de ce « mélange » très pollué dans le milieu naturel. Enfin, dans les zones urbaines, les surfaces bâties rendent le sol imperméable et y ajoutent un risque d'inondation de pollution. **(Audic, j-m., (2002)**).

3. Les eaux usées industrielles

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus des matières organiques, azotées ou phosphorées, elles contiendront également des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques et des hydrocarbures. Une variété d'entre eux doit être prétraitée par les industries avant d'être rejetés dans les réseaux de collecte. Ils sont mélangés à l'eau domestique seulement ils ne présentent pas de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des usines de dépollution. Les grandes entreprises disposent toutes d'installations de traitement en interne. **(Audic, j-m., (2002)**).

B. Les caractéristiques des eaux usées

1. Les paramètres physiques chimiques

Température

Il est essentiel de mesurer la température de l'eau avec exactitude. Car, celle-ci influence la solubilité des sels et des gaz, contribuer à la détermination du pH, permet de comprendre l'origine de l'eau ainsi que la présence de mélanges éventuels, etc. **(Rodier et al, 2005)**.

Le potentiel Hydrogène pH

Le pH est un indicateur qui peut être utilisé pour évaluer l'acidité, l'alcalinité ou la basicité de l'eau **(Rodier, 2009)**. Les eaux usées domestiques tendent à être neutres ou légèrement basiques, se situant entre 6 et 9, **(Rodier, 1996)**.

Turbidité

La turbidité représente l'opacité d'un environnement nuageux. C'est la réduction dans la transparence d'un liquide grâce à la présence de matière non dissoute. Elle est causée dans l'eau par la présence de fines matières en suspension (MES) comme les argiles, les grains de silice et les micro-organismes. Une petite partie de la turbidité peut également s'écouler de à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale. **(Rodier, 2009)**.

Conductivité

La conductivité désigne la capacité d'une eau à faciliter le passage d'un courant électrique. Cette propriété résulte de la présence d'ions mobiles dans un champ électrique. Elle varie en fonction de la nature des ions dissous ainsi que de leurs concentrations **(Rejsek, 2002)**.

Demande biologique en oxygène (DBO5)

Exprime le nombre d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation de la matière organique présente dans les eaux usées par les microorganismes présents dans l'environnement. Il se mesure par la consommation d'oxygène à 20 ° C dans l'obscurité pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablement inoculé, temps qui assure l'oxydation biologique de la matière organique carbonée. **(Rodier, 2009)**.

Demande chimique en oxygène (DCO)

C'est la mesure du nombre d'oxygène requis qui correspond au nombre de matériaux oxydables par l'oxygène contenus dans un effluent. Ils représentent la plupart des composés organiques (détergents, matières fécales). **(Rodier, 2009)**.

Oxygène dissous

La concentration en oxygène dissous est un paramètre important dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique et de photosynthèse. L'eau très aérée est généralement sursaturée en oxygène, tandis que l'eau chargée en matière organique dégradable par les micro-organismes est sous-saturée. En effet, la forte présence de matière organique dans l'eau permet aux microorganismes de se développer tout en consommant de l'oxygène. **(Rodier, 2009)**.

Matières en suspension (M.E.S)

Il s'agit de matières non solubilisées. Elles comportent des matières organiques et des matières minérales **(Gaid, 1984)**.

C. Eau usée traité

Les eaux usées traitées présentent des paramètres physicochimiques améliorés par rapport aux eaux non traitées, avec un pH (8,27 contre 8,10), de l'oxygène dissous (4,23 contre 2,05 mg/l) et des hydrocarbures totaux (34,00 contre 118,00 mg/l), mais les deux dépassaient les limites autorisées pour plusieurs paramètres **(Tudararo-Aherobo et al., 2023)**.

Les Eaux usées traitées sont de plus en plus utilisées dans l'agriculture et la construction, pour promouvoir une gestion durable de l'eau et remédier à la pénurie d'eau **(Das et al., 2024 ; Krisht et al., 2024)**.

D. Eau usée non traitée

L'eau usée non traitée présentait une conductivité électrique, une demande chimique en oxygène et des métaux plus élevés, ce qui a eu une incidence significative sur l'accumulation de nutriments chez les espèces (Ahsan et al., 2022).

Les Eaux usées non traitées, contiennent beaucoup de matières organiques, de sels et de charge microbienne, ce qui entraîne une pollution de l'environnement et des risques pour la santé (Al-Asheh et al., 2024).

E. Les types de traitements des eaux usées

Selon Aussel, et son groupe 2004 dit l'entrée de l'usine jusqu'au rejet dans le milieu naturel, les différentes étapes du traitement des eaux usées par boues activées qui nous utilisé dans notre cas et les principales tâches effectuées sont schématiquement les suivantes : (Figure 07)

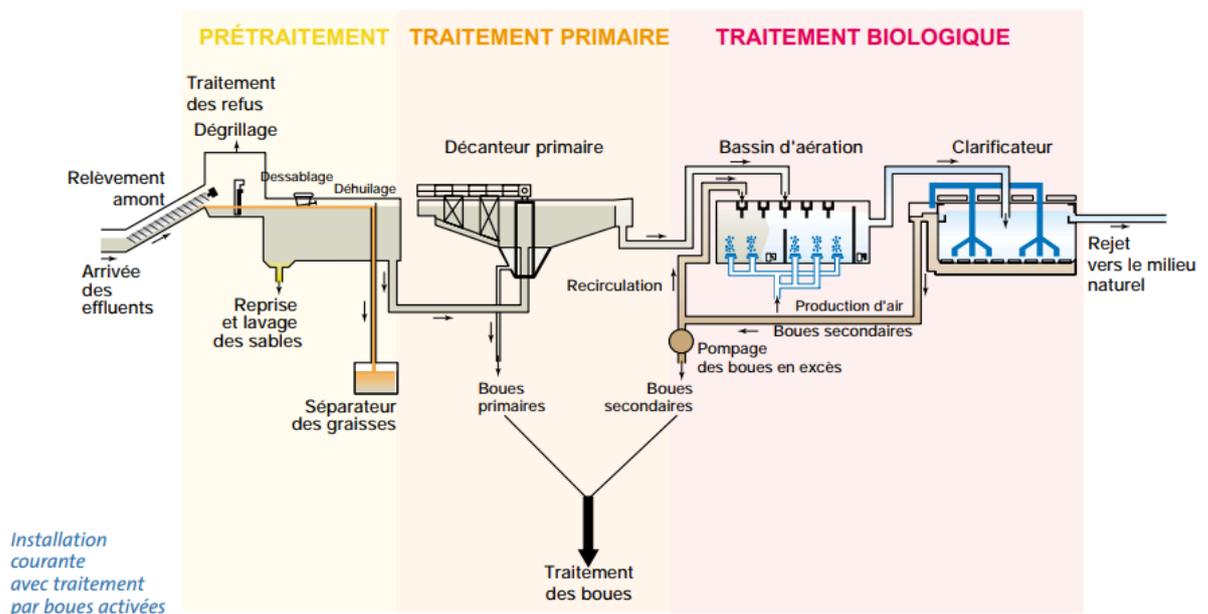


Figure 8: les différentes étapes du traitement des eaux usées. (Aussel et al., 2004)

F. L'effet des eaux usées sur les plantes

Selon l'étude de HANNACHI et son groupe de recherche en 2016 sur le Blé dur (*Triticum durum Desf.*) trouvent que les plantes irriguées par les eaux usées traitées présentent une précocité de levée, de montaison et d'épiaison, qui a dû à la charge importante de la matière organique (MO) ainsi les eaux usées ont permis une augmentation du rendement et un bon développement végétatif de la plante. Une bonne croissance et développement est en effet remarquée chez tous les paramètres phéno-morphologiques mesurés et qui ont été influencées la teneur des eaux usées traités en matière organique (MO). Ainsi, la précocité à l'épiaison est quand même considérable.

CHAPITRE IV
MATERIEL ET METHODE

IV. Matériels et méthodes

Notre étude qui s'étale sur une période de 4 mois allant du mois de février au mois de juin 2025 ; a été menée au niveau de la pépinière (Lalla Khadija) située à Mouzaia a fin de réaliser la multiplication et au laboratoire de Phytotechnie au niveau du Département de Reproduction végétale de L'école National Supérieur D'Agronomie El-Harrach (ENSA) pour la réalisation des paramètres physiologique

L'objectif du travail est d'étudier l'effet d'une Irrigation par différents types d'eaux (Eau pure, Eau usée, Eau traitée) appliquée sur des boutures de *Paulownia Sp* afin de tester leur comportement écophysologique.

A. Présentation des sites

1. Pépinière De Lalla Khadija à Mouzaïa

Une pépinière de production Située dans la commune de Mouzaïa, wilaya de Blida. Elle se trouve à environ 14 km à l'ouest de Blida et 59 km au sud-ouest d'Alger, dans la plaine de la Mitidja, une région réputée pour son sol fertile et son activité agricole. Les coordonnées géographiques de la pépinière sont 36°08'07.6" N, 2°43'00.0" E.

La température moyenne maximale à Mouzaïa est de 30°C et la minimale est de 5°C, rarement inférieure à 1°C ou supérieure à 35°C. La saison très chaude dure 3 mois, du 20 juin au 20 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale dépassant 27°C. Le mois le plus chaud de l'année est août, avec une température moyenne maximale de 32°C et minimale de 21°C.

La saison fraîche s'étend sur 4 mois, du 25 novembre au 25 mars, avec des températures plus basses mais rarement inférieures à 1°C. La période de précipitations dure environ 7,5 mois, du 20 septembre au 10 mai, avec une probabilité quotidienne de précipitations supérieure à 15%. Le mois le plus pluvieux est décembre, avec une moyenne de 65 mm de précipitations.

La saison la plus sèche dure 4 mois, du 10 mai au 20 septembre, avec juillet comme le mois le plus sec, enregistrant en moyenne 0,5 jour de précipitations d'au moins 1Mm. La période pluvieuse de l'année s'étend sur 9 mois, du 30 août au 5 juin, avec une accumulation de pluie d'au moins 12Mm sur une période de 31 jour glissante.

2. Présentation De La STEP De Beni Mered

La station traite les eaux usées de l'aire urbaine de BLIDA-BENI MERED, et des industries connectées. Elle est implantée sur (6) hectares, située à l'Est de la route nationale N°1 à proximité d'Oued Béni Azaa traversant les localités de Blida, Ouled Aiche et Beni Mered, sur une distance de 30 km, ou encore de l'oued Lekhel, oued Ftiss, oued El Harrach, oued Bouroumi et autres. Environ 5 km au nord-est de Blida et à environ 40 km au sud-ouest d'Alger et à environ 30 km au nord-est de Médéa. La station d'épuration de Beni Mered a commencé son fonctionnement en 1984 puis s'est arrêté en 1989. En 2014, le ministre des ressources en eau a validé le projet de la réhabilitation, extension, exploitation de la STEP. Elle est de nouveau opérationnelle le 02 janvier 2021.

Elle traite les eaux usées issue de grand Blida :

- Commune de Beni Mered.
- Commune de Blida.
- Commune d'Ouled yaiche.
- Commune de Bouarfa.

B. Matériel

Notre expérimentation a nécessité un matériel biologique et d'autre non biologique

1. Matériel non biologique

Le matériel est représenté par la verrerie et l'appareillage et ainsi qu'un appareillage de routine se trouve dans un laboratoire de physiologie végétale telle que les réactifs et quelque produits chimique (l'Annex).

2. Le matériel biologique

Le matériel biologique est représenté par l'espèce paulownia, le sol ainsi que les 3 types d'eaux utilisées dans l'irrigation.

3. Matériels Végétale

L'espèce étudiée est Le Paulownia issu de la société vitro-plant spécialisée dans la culture de plants in vitro (hybride non identifié), est présent dès la phase de multiplication par bouturage et ce jusqu'à l'âge de trois ans.

Ce genre d'arbre est reconnu pour sa croissance rapide, sa rusticité et sa capacité d'adaptation à différents types de sols

Pour l'essai de multiplication un total de 48 boutures a été utilisées leur choix est basé sur des caractères morphologiques distincts (figure N°08) à savoir :

1. **Bouture âgée** : prélevée sur des tiges plus lignifiées et rigides. Environ 1m50. (**Figure 08,1**).
2. **Bouture jeune** : issue de l'extrémité apicale de rameaux verts et tendres. (**Figure 08,2**).
3. **Bouture coupée au ras du sol** : correspondant à la base de la tige, au niveau de la zone de transition entre tige et racines. (**Figure 08,3**).
4. **Fragment de racine** : section de racine prélevée à quelques centimètres de profondeur. (**Figure 08,4**).



Figure 9 : Différent types morphologique des boutures de Paulownia utilisées pour les essais de multiplication.

Les boutures sont en nombre de 16 réparties en 4 pour chaque type d'eau et chaque type de bouture (**Figure 09**).

Eau pure (Témoin) :  Eau usée :  Eau Traitée : 

	Bouture âge		Bouture jeune		Bouture coupée au ras		Fragment de racine	
Eau pure (Témoin)								
								
Eau usée								
								
Eau traitée								
								

Figure 10: schéma expérimentale de l'essai de multiplication

C. Préparation du lit de semence

La zone de multiplication a été choisie sur un sol homogène afin d'assurer une bonne représentativité des résultats. Avant la mise en place des plants, plusieurs étapes de préparation ont été réalisées :

- Le sol a été désherbé et ameubli afin de favoriser l'enracinement.
- 16 trous par lot ont été creusés, espacés de 1 mètre les uns des autres, avec une profondeur uniforme de 30 cm, pour accueillir les plants dans des conditions comparables.

1. Plantation des Boutures

Les boutures de Paulownia ont été repiqués manuellement dans les trous préalablement préparés. Chaque trou a reçu un seul plant, soigneusement positionné de manière verticale, avec les racines bien étalées pour favoriser une bonne reprise. Le sol a ensuite été tassé légèrement autour des plants pour assurer leur stabilité, puis incorporer du fumier dans le sol pour augmenter la fertilité.

2. Irrigation des boutures après l'implantation

Un arrosage immédiat a été effectué après la plantation afin de limiter le stress hydrique et d'assurer un bon contact entre les racines et le sol. A reçu 1L d'eau différents sur chaque plant.

L'irrigation a été réalisée en utilisant trois types d'eau afin d'évaluer l'impact de la qualité de l'eau sur la croissance des boutures. Les bouture de *Paulownia* ont été répartis en trois groupes, chacun recevant un type d'eau différente :

Eau usée non traité (Brute) : eau domestique non traitée, prélevée directement avant tout processus d'assainissement a la STEP de Beni Mered. (**Figure 10, C**).

Eau usée Epurée (Traité) : eau domestique ayant subi un traitement dans une station d'épuration (Beni Mered) par boues actives, répondant à certains critères de réutilisation en irrigation (Ces critères incluent notamment une **faible salinité**, une **charge microbienne réduite**, une **teneur modérée en éléments nutritifs** (azote, phosphore, potassium) et une **absence de contaminants toxiques** tels que les métaux lourds ou les hydrocarbures) (**Figure 10, B**).

Eau Pur (Témoin) : eau claire, non polluée, utilisée comme référence pour évaluer les effets comparatifs des autres traitements. (**Figure 10, A**).

NOTE : L'irrigation a suivi un planning basé sur les besoins en eau du sol

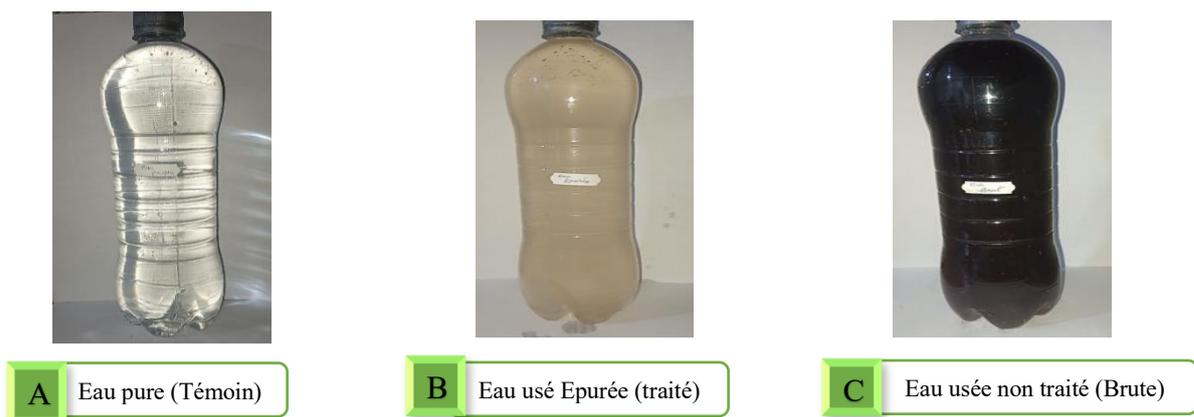


Figure 11: Représentation des trois types d'eaux utilisées dans l'expérimentation

D. Paramètres Morphométriques

Les paramètres morphométriques mesurés ont concerné principalement : la longueur de la tige, la longueur de la racine principale. Ainsi que le rapport entre la longueur de la racine principale et celle de la tige. Le diamètre au collet Les paramètres foliaires comprenaient le nombre de feuilles, la longueur et la largeur des feuilles, ainsi que la surface foliaire totale.

Les paramètres morphométriques en été mesure par un ruban mètre, sauf le diamètre au collet qui a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse.

La masse fraîche des parties aériennes et racinaires a été déterminée.

1. Rapport entre la longueur de la racine principale et celle de la tige

La longueur de la racine principale et celle de la tige ont été mesurées à l'aide d'une règle millimétrée. Le rapport racine/tige a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Rapport} = \text{Longueur de la tige} / \text{Longueur de la racine principale}$$

Ce rapport est utilisé comme indicateur de l'allocation relative de la croissance entre les parties souterraines et aériennes de la plante (Poorter *et al.*, 2012).

2. Détermination de la masse sèche

Les échantillons de chaque lot (chaque lot représente un type d'eau) ont été séchés à l'étuve pendant 48 heures à 80°C afin d'obtenir la masse sèche. Enfin, le rapport de la masse sèche des racines sur celle des parties aériennes a été calculé pour évaluer la répartition de la biomasse entre les deux compartiments de la plante

Masse Sèche % :

La teneur en matière sèche a été déterminée après séchage des échantillons végétaux à 70 °C jusqu'à masse constante. Elle a ensuite été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Masse sèche \%} = [\text{Ms(g)} / \text{Mf(g)}] * 100$$

Ms = Masse Sèche.

Mf= Masse Fraiche.

Cette méthode est couramment utilisée en physiologie végétale (Taiz *et al.*, 2015 ; AOAC, 2000).

3. Rapport de la masse sèche des racines sur celle des parties racinaires

Le rapport masse sèche racinaire/partie aérienne est un indicateur clé de la stratégie d'allocation des ressources chez les plantes (Poorter *et al.*, 2012).

$$\text{Rapport \%} = \text{Masse Sèche des racines} / \text{masse fraîche des Racine} * 100.$$

E. Paramètres physiologiques

Les paramètres physiologiques évaluent le fonctionnement interne des plantes face au stress. Parmi eux figurent la teneur en chlorophylle, la proline, les sucres solubles, l'azote. Ces indicateurs permettent d'analyser la réponse des plantes aux conditions environnementales, notamment la salinité, la sécheresse ou la pollution.

A. Pigment Foliaire

1. Principe des Pigments chlorophylliens

Les organismes chlorophylliens sont autotrophes pour le carbone, c'est à dire capable de synthétiser des substances organiques à partir de substances minérales. Cette synthèse nécessitant la lumière comme source d'Energie s'appelle donc photosynthèse. Chez les organismes photosynthétique, l'utilisation de l'Energie lumineuse est rendue possible par l'existence de pigments, molécules capables d'interagir spécifiquement avec certaines longueurs d'onde de lumière. Cette propriété conférée aux pigments une couleur déterminée due à l'absorption de certaines longueurs d'onde lorsqu'ils sont éclairés par de la lumière blanche.

Protocole expérimental des pigments foliaires

- Une masse de 0.1 g de matière végétale fraîche, Broyer à sec, est mise dans 10ml d'acétone à 80% (88 ml d'acétone 91% + 12 Eau distillée). (Figure 11 A, B, C)
- Le broyat obtenu est centrifugé à 4000tr/mn pendant 10min. (Figure 11 D)
- La surnageant contenant les pigments est récupère. (Figure 11 E)

Lecteur :

Les Densités optiques sont lues aux longueurs d'ondes à 663 et 645 nm respectivement pour la chlorophylle a et b (Figure 11).

- La teneur en chlorophylle est déterminée selon les équations d'**Arnon (1949)** :

$$\text{Chlorophyll a} = 12.7 \text{ DO } 663 - 2.69 \text{ DO } 645 \text{ (}\mu\text{g/ml)}.$$

$$\text{Chlorophyll b} = 22.9 \text{ DO } 645 - 4.68 \text{ DO } 663 \text{ (}\mu\text{g/ml)}.$$

$$\text{Chlorophylls (a+ b) Total} = 8.02 \text{ DO } 663 + 20.21 \text{ DO } 645 \text{ (}\mu\text{g/ml)}.$$

DO 663 : Densité optique lue à la longueur d'onde de 663nm.

DO 645 : Densité optique lue à la longueur d'onde de 645nm.

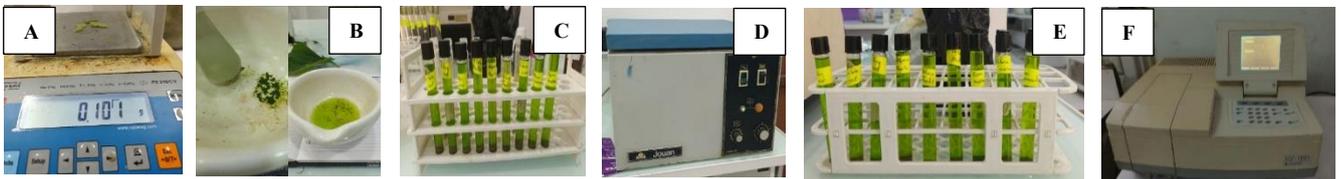


Figure 12: Étapes expérimentales de l'extraction des pigments chlorophylliens.

B. Extraction et dosage de proline

Principe

Au niveau cellulaire, le maintien d'une pression osmotique interne élevée est liée à la taille et à la viscosité protoplasmique de la cellule, à l'épaisseur des parois cellulaires et à l'accumulation de certains acides aminés ; parmi ceux-ci, la proline semble jouer un rôle de première importance : son accumulation rapide lors d'un déficit hydrique a été mise en évidence chez de nombreuses plantes.

La proline agit en tant que composé soluble compatible dans l'ajustement osmotique pouvant atteindre de fortes concentrations sans exercer d'effet toxique comme le cas des ions. Cet acide aminé cyclique peut constituer une source d'azote et de carbone.

Dosage

- Le dosage de la proline est réalisé à partir de 0.1g de matière végétale dans 2 ml de méthanol à 40%. (400ml Méthanol + 600ml Eau distillée) (Figure 12, A).

- Le mélange est chauffé au bain-marie à 85°C pendant une heure en prenant soin de recouvrir les tubes avec du papier aluminium ou des bouchons portant un joint pour éviter la volatilisation de l'alcool. (Figure 12, B)
- Après le refroidissement, 1 ml de l'extrait est prélevé, auquel sont ajoutés 1 ml d'acide acétique (CH_3COOH) puis 1 ml du réactif de ninhydrine : (1g ninhydrine + 60ml d'acide acétique + 16ml d'acide orthophosphorique à 85 % + 24ml eau distillée). (Figure 12, C)
- Les tubes sont alors homogénéisés et placés dans un bain-marie à 95°C pendant 30 minutes.
- Après virage au rouge de la solution, le tube contenant le milieu réactionnel est refroidi avant d'ajouter 5 ml de toluène. (Figure 12, D).
- Après agitation au vortex, deux phases se développent : (Figure 12, E)

Phase supérieure : Organique, colorée, contenant la proline (prélevée).

Phase inférieure : Aqueuse, sans proline (éliminée).

Du sulfate de sodium (Na_2SO_4) est ajouté à l'aide d'une spatule à la phase supérieure afin d'éliminer l'eau résiduelle.

Lecteur :

Les densités optiques des échantillons sont ensuite mesurées au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 520 nm. Les valeurs obtenues sont converties en concentration de proline à l'aide d'une Courbe étalon préalablement établie. (Figure 12, F).

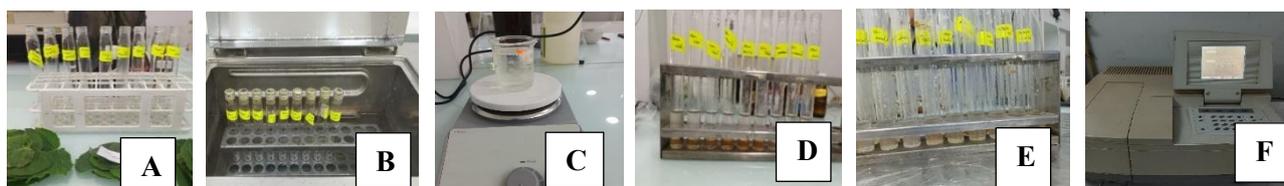


Figure 13: Étapes expérimentales du dosage de la proline dans le matériel végétal.

C. Extraction et dosage des Sucre Soluble

Principe

Les composés carbonés tels que les sucres solubles jouent un rôle crucial dans le développement et le fonctionnement des cellules vivantes. De plus, des situations de stress, telles que la sécheresse, les fortes salinités, les hautes températures ou un excès d'énergie conduisent à une forte accumulation de sucres solubles, généralement interprétée comme une réponse adaptative, où les sucres jouent un rôle de soluté compatible, intervenant dans la stabilisation des protéines et des membranes. Cependant, les sucres solubles sont également impliqués dans de nombreuses autres conditions de stress biotiques ou abiotiques.

Dosage

- L'extraction des sucres solubles est réalisée avec une masse de 0.1g de matières fraîches (Figure 13, A).
- Découpée en morceaux et mise à macérer pendant 48 heures dans un tube à essai rempli au 2/3 avec de l'éthanol à 80°C puis fermé hermétiquement (**Dubois *et al.*, 1956**). (Figure 13 B).
- Le surnageant obtenu après évaporation de l'éthanol est dilué avec 20ml d'eau distillée à partir duquel 2ml sont mis dans un tube à essai. Un volume égal de réactif d'anthrone est alors ajouté. (Figure 13, C).
- Après agitation, le tube est mis au bain Marie à 95°C pendant 8 minutes. (Figure 13, D)
- Au bout de ce temps, les tubes sont refroidis dans la glace pendant 30 minutes à l'obscurité. (Figure 13, E).

Lecteur :

La densité optique des sucres ainsi obtenus est lue à une longueur d'onde de 585 nm. La Concentration est déterminée à l'aide d'une courbe étalon. (Figure13, F).

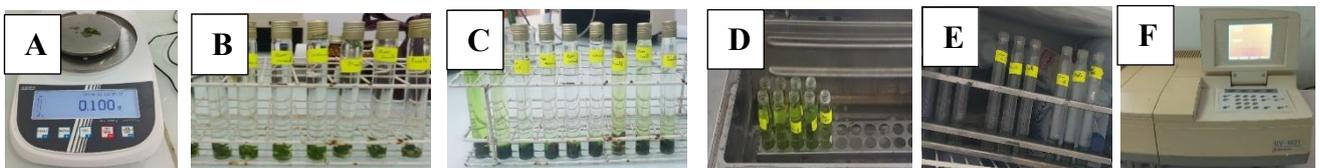


Figure 14: Les principales étapes du dosage des sucres solubles.

D. Dosage de l'azote totale Méthode de « KJELDAHL ,1883 »

Méthode de Kjeldahl (1883). Cette méthode est encore très utilisée en agronomie pour évaluer la teneur en azote organique des sols et matières végétales.

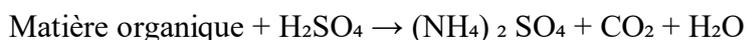
Principe

Le sol ou le matériel végétal est digéré par de l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4) en présence d'un catalyseur. Cette étape, appelée minéralisation, convertit l'azote organique en sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

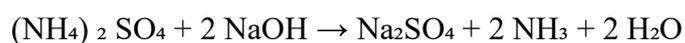
Pendant cette réaction

- Le carbone est éliminé sous forme de CO_2 .
- L'hydrogène est éliminé sous forme de H_2O .
- L'azote est retenu sous forme d'ion ammonium (NH_4^+).

Équation simplifiée



Ensuite, on effectue une distillation après neutralisation avec de la soude (NaOH) pour libérer l'ammonium sous forme gazeuse d'ammoniac (NH_3) :



L'ammoniac (NH_3) est entraîné par la vapeur d'eau, puis condensé et capturé dans une solution d'acide borique (H_3BO_3) contenant un indicateur coloré. Le NH_3 réagit avec l'acide borique :



Enfin, le complexe est titré par de l'acide sulfurique dilué jusqu'au virage de l'indicateur (du jaune/vert au rose).

Mode opératoire

1. Prise d'essai

- Tamiser le matériel végétal à 0,5 mm.

- 1 g matériel végétal (**Figure 14, A**).

Norme de référence : *NF ISO 11261 (juin 1995) *

2. Minéralisation : (Figure 14, B).

- Introduire la prise d'essai dans un matras Kjeldahl avec une bille de verre.

- Ajouter :

- 3 ml de H_2O_2 (facultatif pour sols riches, réduit la mousse).
- 1 ml d'EDTA (facilite la digestion).
- 1 g de catalyseur Kjeldahl (mélange généralement $CuSO_4 + K_2SO_4$ ou Se).
- 20 ml de H_2SO_4 concentré.
- Chauffer à 400 °C pendant :
 - 3 h pour les matières végétales.
 - Attendre un digestat clair. Laisser refroidir.
 - Préparer un témoin blanc (sans échantillon) de la même manière.

3. Distillation : (Figure 14 C, D)

- Verser le contenu du matras dans une fiole jaugée de 250 ml avec rinçage à l'eau distillée.
- Dans le matras de distillation :
 - Ajouter NaOH en excès (pour rendre basique et libérer NH_3).
 - Distiller et recueillir les vapeurs dans une solution d'acide borique + indicateur.
 - Condensation par réfrigérant.

4. Titrage : (Figure 14, E).

- Titrer le distillat par de Le H_2SO_4 dilué.
- Suivre le virage de l'indicateur (du jaune/vert clair au rose).

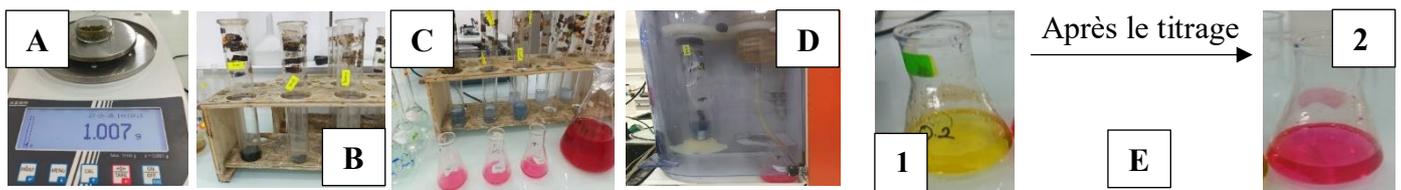


Figure 15: Etapes de Dosage de l'azote totale Méthode de « KJELDAHL ,1883 ».

F. Paramètre édaphique

Les paramètres édaphiques désignent les caractéristiques du sol influençant la croissance des plantes. Parmi eux, la teneur en phosphore assimilable est un indicateur clé de la fertilité, représentant la fraction de phosphore directement disponible pour l'absorption racinaire.

1. Mesure de phosphore assimilable dans le sol : (Figure 15)

Extraction : La méthode JORET – HEBERT a été mise au point pour les sols calcaires. L'acide phosphorique est extrait par l'oxalate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$. Le rapport terre/solution est de 1/25.

Colorimétrie : le dosage est basé sur la formation et la réduction d'un complexe acide phospho-molybdique-acide ascorbique. L'addition d'acide ascorbique et du réactif sulfo-molybdique à un milieu contenant des ions phosphates provoque par chauffage l'apparition d'une coloration bleue que l'on peut doser au colorimètre.

Mode opératoire

- Dans une bouteille d'agitation, mettre 4g de terre (Figure 15, A) et 100 ml de solution d'oxalate d'ammonium 0,2 N ; agiter pendant 2h. (Figure 15, B)
- Filtrer et ramener le filtrat dans une fiole de 100 ml (Figure 15, C). Dans un tube à essai en pyrex, mettre
 - 2 ml de la solution d'extraction
 - 2,5 ml du réactif sulfo-molybdique
 - 1 ml d'acide ascorbique

Passer les tubes au bain-marie bouillant à 95°C pendant 10 à 15 min. (Figure 15, D)

Lecteur : Colorimétrie à 650 nm. (Figure 15, E).

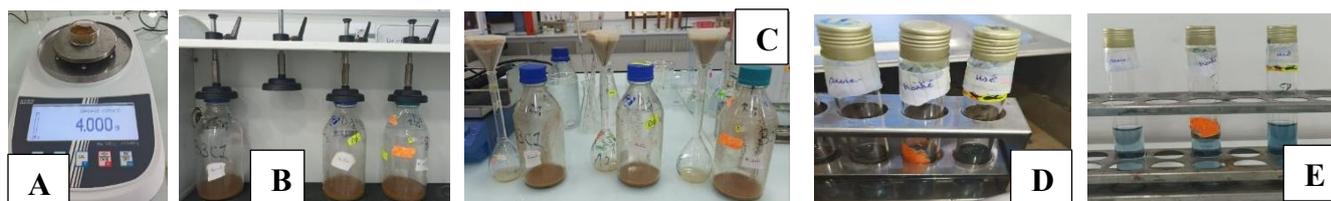


Figure 16: Etape de dosage de phosphore dans le sol.

CHAPITRE V
RESULTAT ET DISCUSSION

V. Résultat et discussion

Durant notre expérimentation, nous avons procédé à l'évaluation le résultat de bouturage et de différents paramètres morphométriques, physiologiques et édaphique afin d'analyser l'effet des conditions d'irrigation (Eau pure (Témoin), Eau usée traitée et Eau usée (Brute)) sur le développement des plants. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous sous forme de moyennes au paramètre morphométrique et moyennes accompagnées de leur écart-type pour les paramètre physiologiques et édaphique, permettant une interprétation statistique précise de l'impact de chaque traitement.

A. Résultat de bouturage

Parmi les quatre types de boutures évalués, celles coupées au ras du sol ainsi que les boutures âgées se sont révélées les plus performantes pour la multiplication du *Paulownia sp.* Leur capacité à bien s'enraciner, leur croissance vigoureuse et leur importante production foliaire en font des candidates idéales pour des projets de reboisement, de production en pépinière ou de valorisation à des fins écologiques.

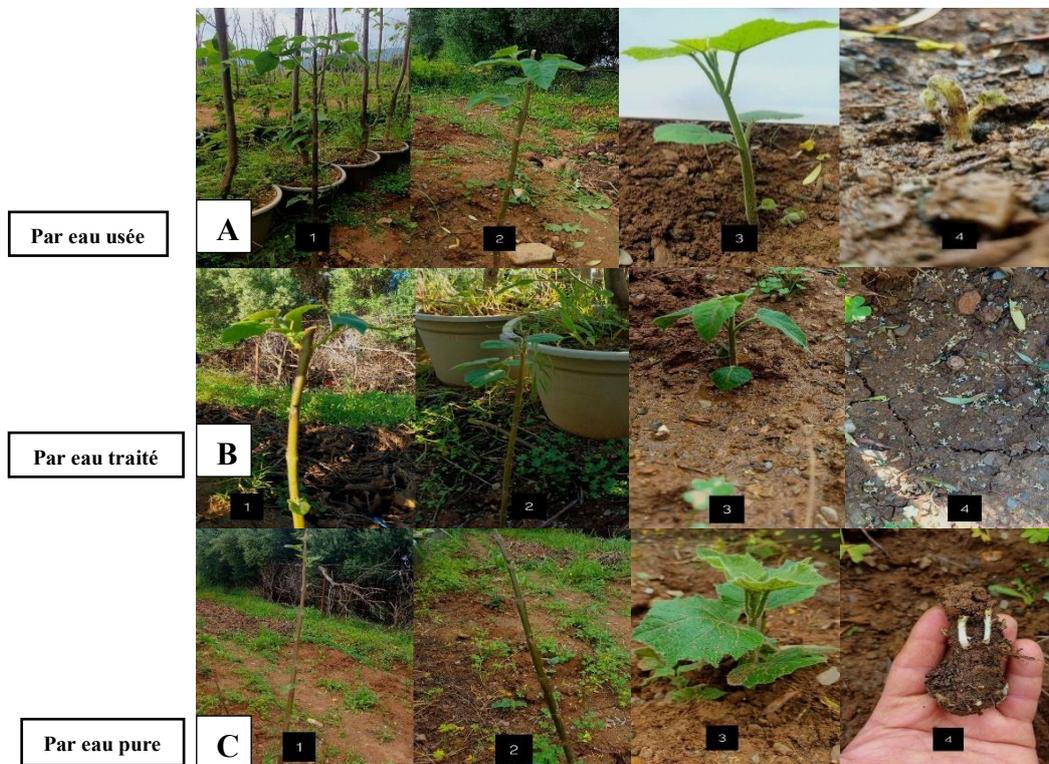


Figure 17 : Représente les plantes après 2 mois de la multiplication par Bouturage

B. Paramètres morphométriques

1. Longueur de la tige

Les plantes arrosées à l'Eau usée atteignent 7.5 cm de longueur et a 6.0 cm à l'Eau pure (Témoin) et 5.0 cm pour l'Eau traitée. Cela montre une croissance rapide des tiges stimulée par les nutriments de l'eau usée. (Figure 17).

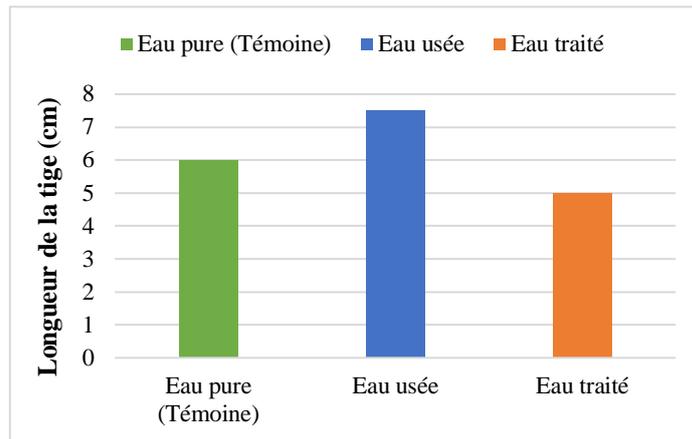


Figure 18: Variation de la longueur de la tige selon le type d'eau d'irrigation.

2. Diamètre au collet

Le diamètre au collet varie sensiblement en fonction du type d'irrigation. La valeur la plus élevée a été enregistrée chez les plants arrosés avec de l'eau usée brute (0,45 mm), traduisant une croissance plus robuste et un renforcement de la base de la tige. Les plants témoins, irrigués à l'eau pure, présentent un diamètre intermédiaire de 0,25 mm, tandis que les plants soumis à l'eau traitée affichent le diamètre le plus faible (0,20 mm). (Figure 18).

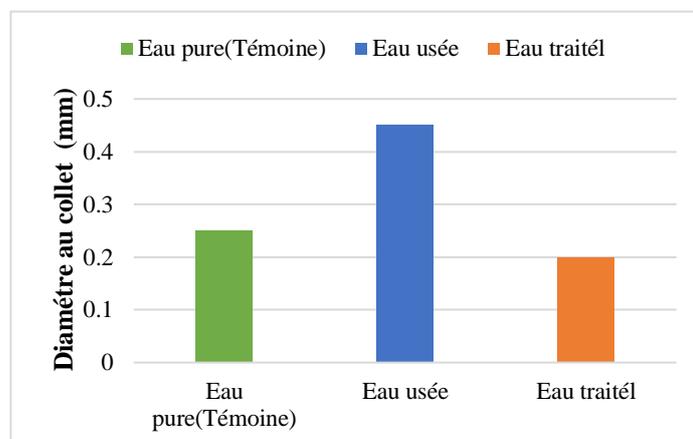


Figure 19 : Variation du diamètre au collet des plants selon le type d'irrigation.

3. Longueur de la racine principale

Les longueurs des racines principales sont restées relativement proches entre les trois types d'irrigation. La plus grande valeur (9 cm) a été observée avec l'eau usée brute, probablement en raison de sa richesse en nutriments favorisant la croissance racinaire. L'eau pure (8,5 cm) a permis une croissance normale, tandis que l'eau traitée a donné la longueur la plus faible (7,75 cm), possiblement à cause d'une moindre teneur en éléments nutritifs ou de résidus chimiques pouvant freiner l'élongation des racines. (Figure 19).

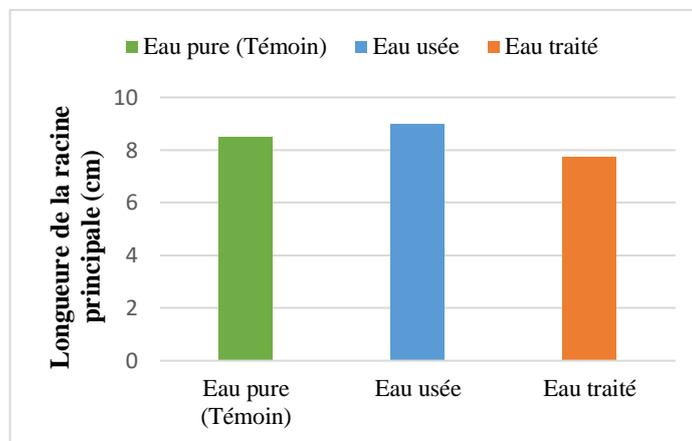


Figure 20: Effet de la qualité de l'eau d'irrigation sur la longueur de la racine principale (cm).

4. Longueur de racine secondaire

La longueur de la racine secondaire varie en fonction du type d'eau d'irrigation. Les plantes irriguées avec de l'eau usée brute présentent la plus grande longueur racinaire (11 cm), suggérant une stimulation due à la richesse en nutriments. Le témoin (eau pure) montre un développement modéré (8 cm), tandis que l'eau traitée entraîne une réduction remarquable de la croissance (4 cm), probablement en raison de la perte de nutriments ou de la présence de résidus du traitement. Ces résultats mettent en évidence l'impact direct de la qualité de l'eau sur le développement racinaire. (Figure 21).

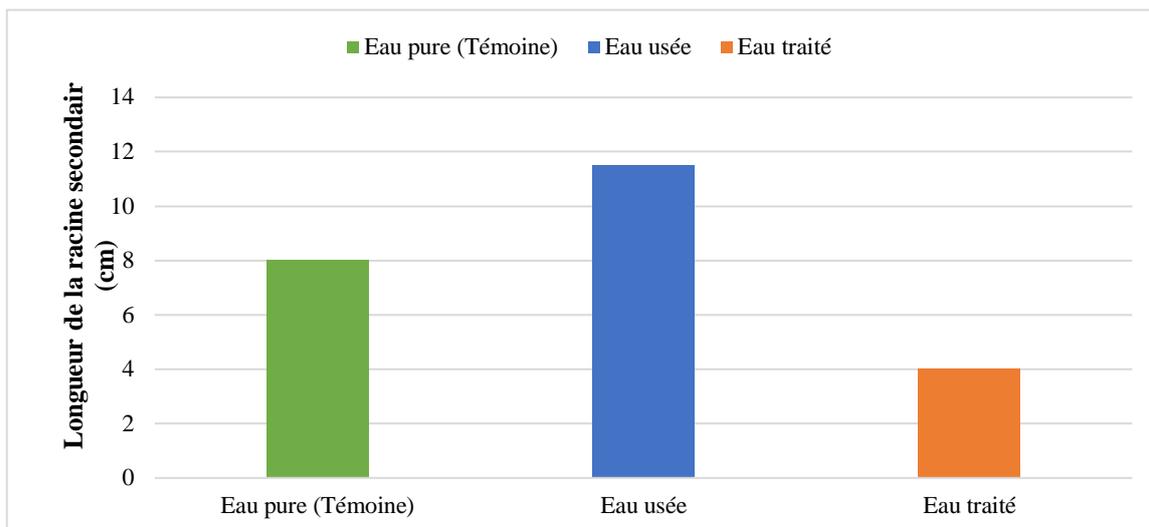


Figure 21: Longueur de la racine secondaire selon le type d'eau utilisée.

5. Rapport longueur de la racine principale sur la longueur de la tige

Le rapport racine/tige permet d'évaluer la répartition des ressources de la plante entre la partie souterraine et la partie aérienne. Le rapport racine/tige le plus élevé (1,55) a été observé chez les plantes arrosées avec de l'eau traitée, traduisant un développement racinaire renforcé, probablement en réponse à un stress ou à une faible disponibilité en nutriments. Le témoin (1,42) montre une répartition équilibrée entre racines et tiges. En revanche, le rapport le plus faible (1,20) sous eau usée suggère une croissance privilégiée des parties aériennes, favorisée par la richesse en éléments nutritifs de cette eau. (Figure 20).

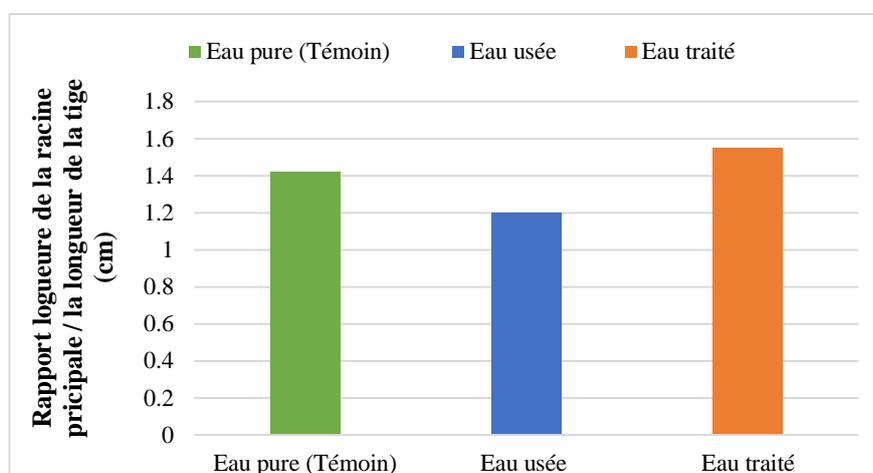


Figure 22: Effet du type d'eau d'irrigation sur rapport longueur de la racine principale sur la longueur de la tige (cm).

6. Masse fraîche de la partie aérienne

Les plantes irriguées avec de l'eau usée ont atteint une biomasse moyenne de 22,37 g, soit près du deux fois de celle obtenue sous irrigation à l'eau pure (11,24 g) et nettement supérieure à celle observée avec l'eau traitée (4,46 g). Ces résultats mettent en évidence une accumulation significative de biomasse sous l'effet de l'irrigation par eau usée, suggérant une stimulation de la croissance végétative dans ces conditions. (Figure 22).

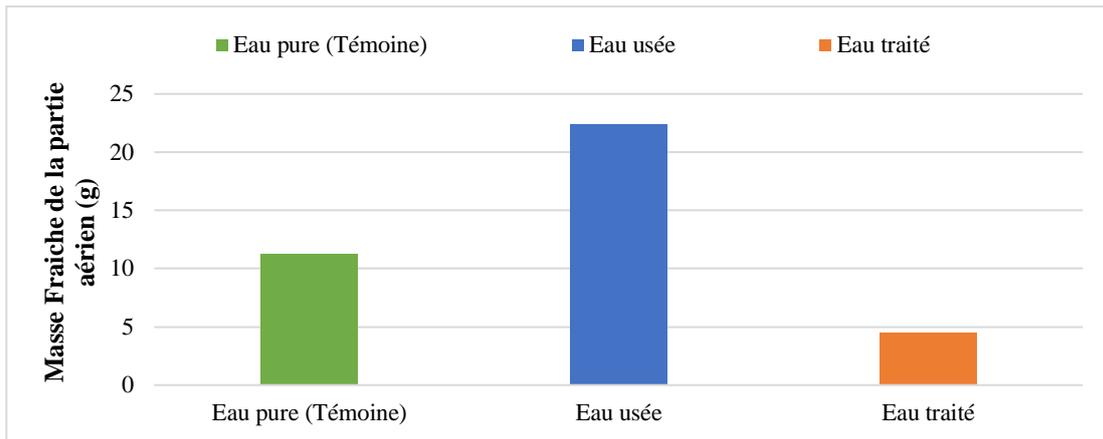


Figure 23: Comparaison de la masse fraîche sous différents régimes d'irrigation.

7. Masse fraîche de la partie racinaire

L'analyse de la masse fraîche des racines montre une variation considérable selon le type d'eau utilisée. L'irrigation à l'eau usée brute a permis d'obtenir la masse racinaire la plus élevée (11 g), suggérant un apport nutritif favorable. Le témoin (eau pure) a montré un développement racinaire modéré (9 g), tandis que l'eau traitée a induit la plus faible masse (6,5 g), traduisant une possible limitation liée à la qualité physico-chimique de l'eau traitée. Ces résultats soulignent l'importance de la composition de l'eau d'irrigation sur la biomasse racinaire. (Figure 23).

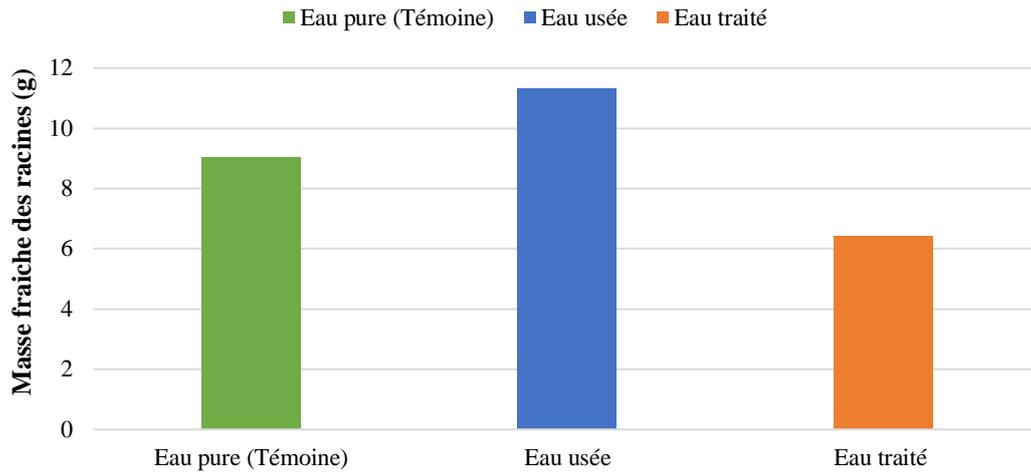


Figure 24 : Effet du type d'eau d'irrigation sur la masse fraîche des racines.

8. Masse sèche de la partie aérienne

La masse la plus élevée est obtenue avec l'eau traitée (0.2408 g), malgré une masse fraîche plus faible. Cela peut indiquer une concentration en matière sèche plus élevée, potentiellement due à un stress modéré qui limite la rétention d'eau (Figure 24).

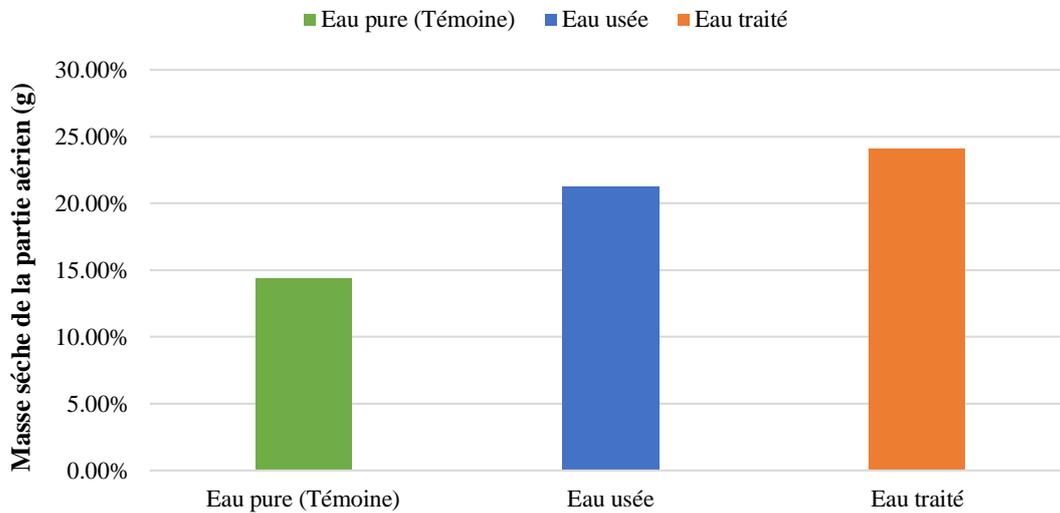


Figure 25: Effet du type d'eau d'irrigation sur la masse sèche de la partie aérienne.

9. La Masse sèche des racines

La teneur en matière sèche des racines varie selon le type d'irrigation. Elle est plus élevée avec l'eau usée (56,20 %), suivie de l'eau traitée (48,90 %), et la plus faible avec l'eau pure (42,60 %). Cela suggère que l'eau usée, probablement enrichie en éléments nutritifs, favorise davantage le développement racinaire. (Figure 25).

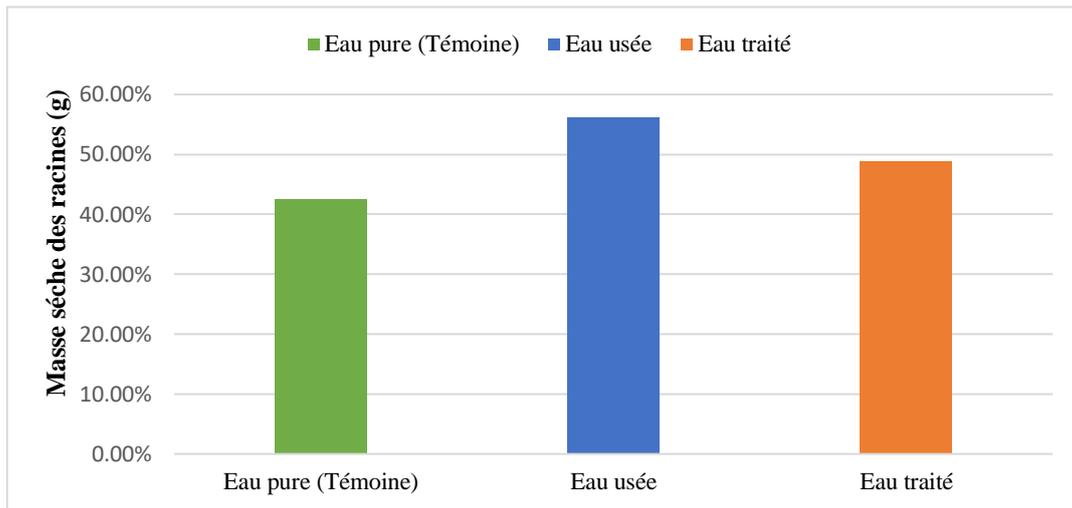


Figure 26: Effet du type d'eau d'irrigation sur la masse sèche des racines.

10. Rapport de la masse fraîche des racines sur la masse fraîche de la partie aérienne

Dans notre étude, ce rapport est le plus élevé chez les plantes irriguées avec de l'eau usée (81,81 %), suivi de celles irriguées avec de l'eau traitée (46,15 %), puis de l'eau pure (33,33 %). Une valeur élevée du rapport, comme observée avec l'eau usée, indique une forte concentration en matière sèche, traduisant souvent un stress hydrique ou environnemental. Cela peut être dû à une salinité excessive, à une présence de polluants ou à un déséquilibre nutritionnel. Les racines ont tendance à accumuler plus de matière sèche et à retenir moins d'eau dans de telles conditions. A l'inverse, un rapport plus faible, comme avec l'eau pure, montre que les racines sont mieux hydratées, ce qui reflète une meilleure qualité d'eau et un confort physiologique pour la plante. Ainsi, l'eau pure favorise une croissance racinaire plus équilibrée, tandis que l'eau usée induit un stress, se manifestant par une densification des tissus racinaire (Figure 26).

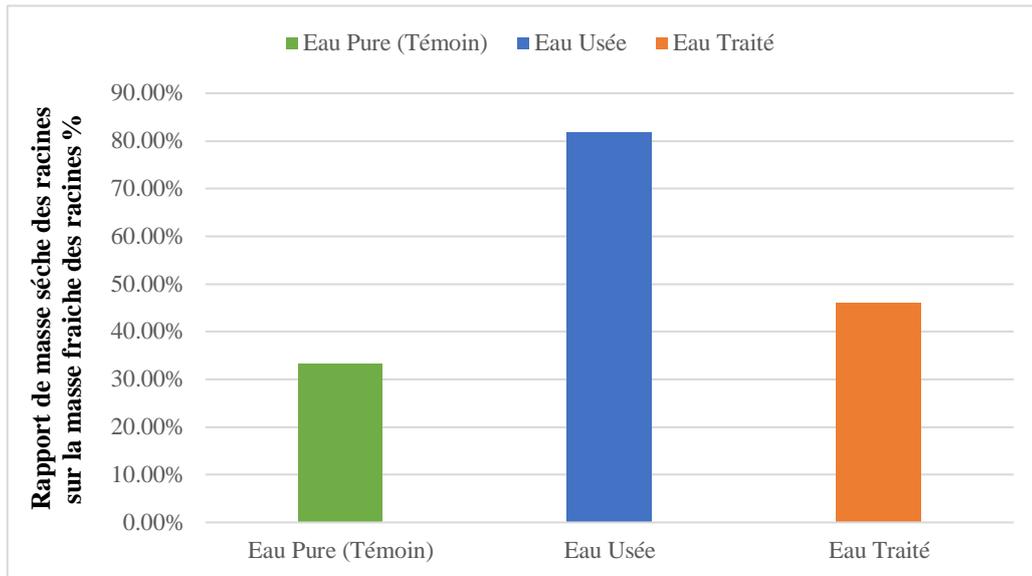


Figure 27: Effet du type d'eau d'irrigation sur le rapport masse sèche racine/Masse fraîche racine par %.

11. Rendement totale des plantes

Le rendement le plus élevé a été enregistré chez les plantes irriguées avec de l'eau usée, atteignant 294,61 % par rapport au témoin (eau pure, fixé à 100 %), tandis que l'eau traitée a induit un rendement inférieur, de 66,58 %. Cette différence marquée suggère que l'eau usée, riche en composés organiques et éléments nutritifs, a favorisé la croissance végétale, expliquant ainsi la performance supérieure observée par rapport aux autres modalités d'irrigation. (Figure 27).

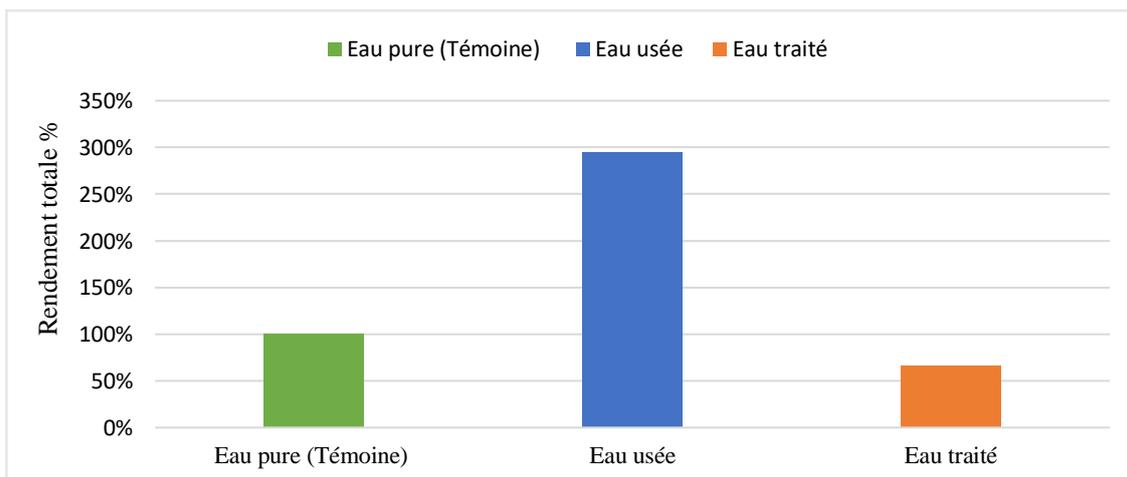


Figure 28: Effet du type d'eau d'irrigation sur les rendements total.

C. Paramètres physiologiques

1. Chlorophylle totale

Les teneurs en chlorophylle totale présentent des valeurs très rapprochées entre les trois types d'irrigation, traduisant une faible influence de la qualité de l'eau sur ce paramètre. Les plants irrigués avec l'eau pure affichent la valeur la plus élevée ($1,75 \pm 0,07$ mg/g MVF), suivis de près par ceux arrosés avec l'eau usée brute ($1,74 \pm 0,19$ mg/g MVF). Les plants traités à l'eau usée épurée présentent une teneur légèrement inférieure ($1,70 \pm 0,28$ mg/g MVF). Cette légère variation, malgré des écarts-types différents, indique que la synthèse de chlorophylle reste globalement stable, même sous l'effet de stress liés à la qualité de l'eau. Cela suggère une bonne tolérance de la plante face aux conditions d'irrigation moins favorables. (Figure 28).

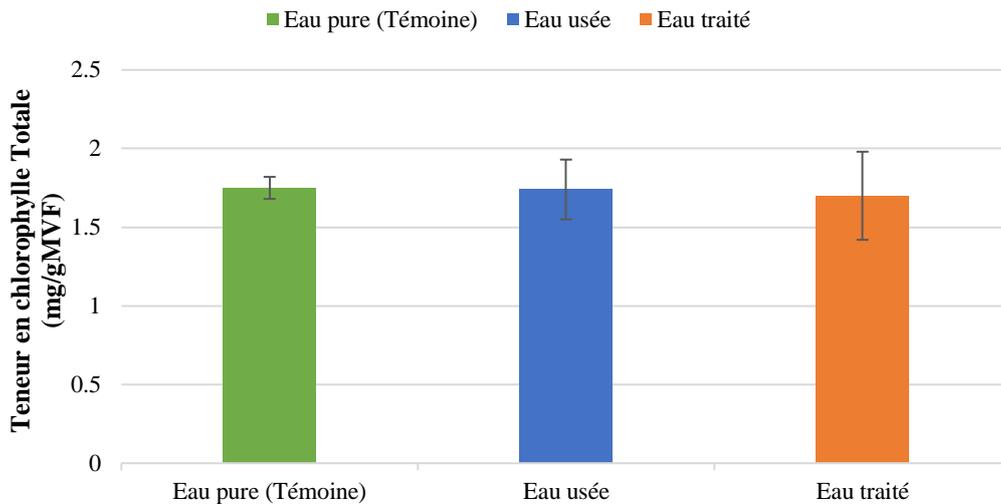


Figure 29: Variation de la teneur en chlorophylle totale selon le type d'irrigation (mg/g MVF).

2. Sucre soluble

La teneur en sucres solubles varie considérablement selon le type d'eau d'irrigation. L'accumulation la plus importante est observée chez les plantes irriguées à l'eau usée $1,945 \pm 0,052$ mg/g MVF, suivies de celles irriguées à l'eau traitée $1,683 \pm 0,055$ mg/g MVF, indiquant une réponse adaptative au stress osmotique ou à la salinité. En revanche, les plantes témoins (eau pure) présentent la plus faible teneur $0,458 \text{ g} \pm 0,005$ mg/g MVF, traduisant une absence de stress. Ces résultats suggèrent que les sucres solubles jouent un rôle important dans la régulation osmotique et la tolérance au stress hydrique ou chimique induit par l'eau d'irrigation. (Figure 29).

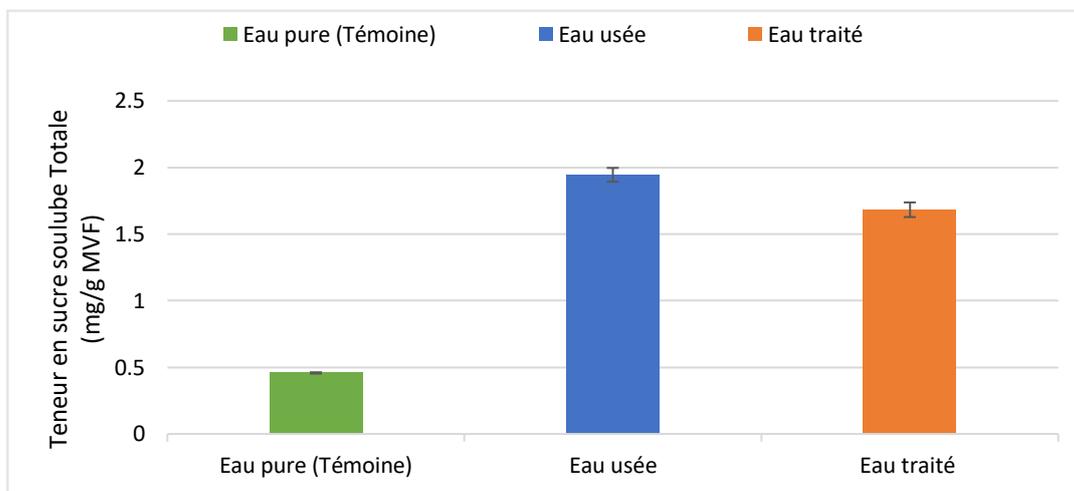


Figure 30: Effet du type d'eau d'irrigation sur la teneur en sucres solubles

3. Proline

L'analyse de la teneur en proline montre que les plantes irriguées avec l'eau usée accumulent des quantités très élevées de cet osmo-protecteur $0,608 \pm 0,002$ mg/g MVF, traduisant une réponse marquée à un stress abiotique important, probablement d'origine saline ou toxique. L'eau traitée entraîne une accumulation modérée $0,144 \pm 0,005$ mg/gMVF, suggérant une réduction partielle du stress. Les plantes témoins (eau pure) présentent la plus faible teneur en proline $0,030 \pm 0,008$ mg/gMVF, indiquant un état physiologique stable sans contrainte environnementale. Ces résultats confirment le rôle crucial de la proline dans les mécanismes d'adaptation au stress hydrique et salin chez les végétaux. (Figure 30).

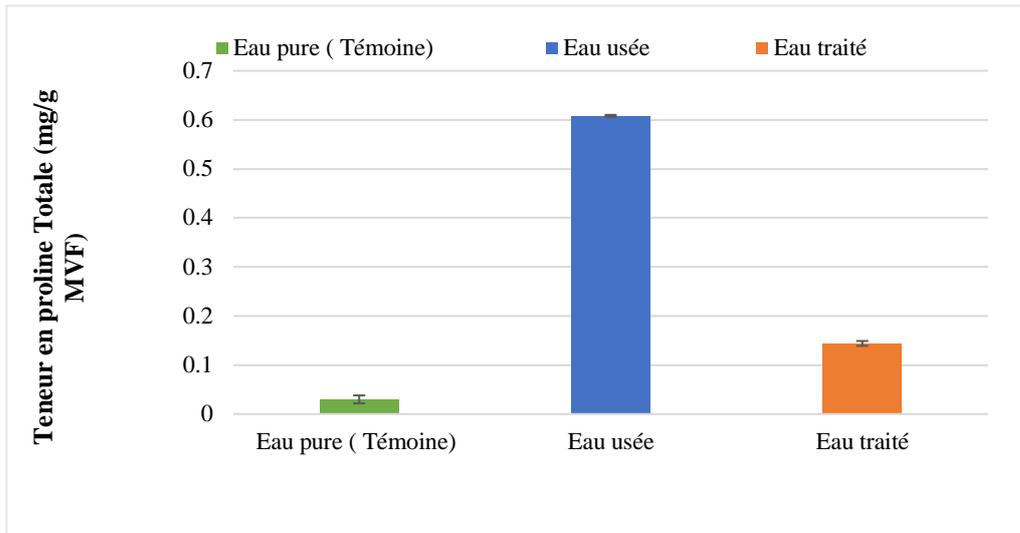


Figure 31: Effet de l'irrigation par différents types d'eau sur la teneur en proline.

4. L'azote

Les plantes arrosées à l'eau usée $0,0338\% \pm 0,0007\%$ et à l'eau traitée $0,0278\% \pm 0,0004\%$ présentent une teneur en azote plus élevée que celles à l'eau pure $0,0236\% \pm 0,0011\%$. Ceci révèle un apport nutritif en azote via les eaux usée et traitée (sous forme de NO_3^- , NH_4^+ , etc.), bénéfique pour la croissance végétale. (Figure 31).

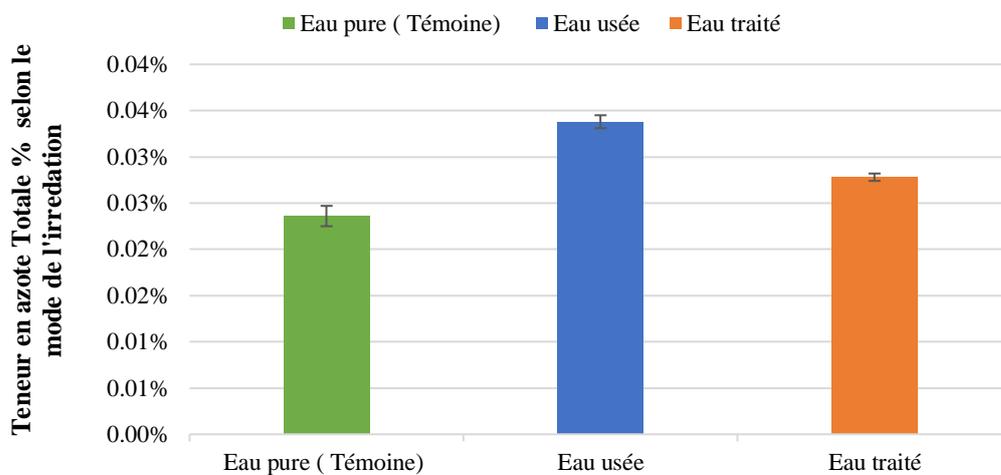


Figure 32: Effet de la qualité de l'eau d'irrigation sur la teneur en azote total (%).

D. Paramètre Edaphique

1. Phosphore assimilable

La teneur en phosphore assimilable dans le sol varie significativement selon le type d'eau d'irrigation. Le sol irrigué avec de l'eau usée présente la concentration la plus élevée ($1153,3 \pm 3,39$ mg/kg), suivi de celui irrigué avec de l'eau traitée ($916,4 \pm 3,67$ mg/kg), tandis que le sol témoin, arrosé à l'eau pure, montre une teneur nettement plus faible ($459,6 \pm 3,69$ mg/kg). Ces résultats indiquent que les eaux usées, même après traitement, conservent une charge importante en phosphore assimilable, favorisant ainsi la disponibilité de ce nutriment essentiel dans le sol. Cela met en lumière le potentiel de réutilisation des eaux usées traitées comme source alternative de fertilisation, dans une démarche de gestion durable des ressources hydriques et nutritives. (Figure 32).

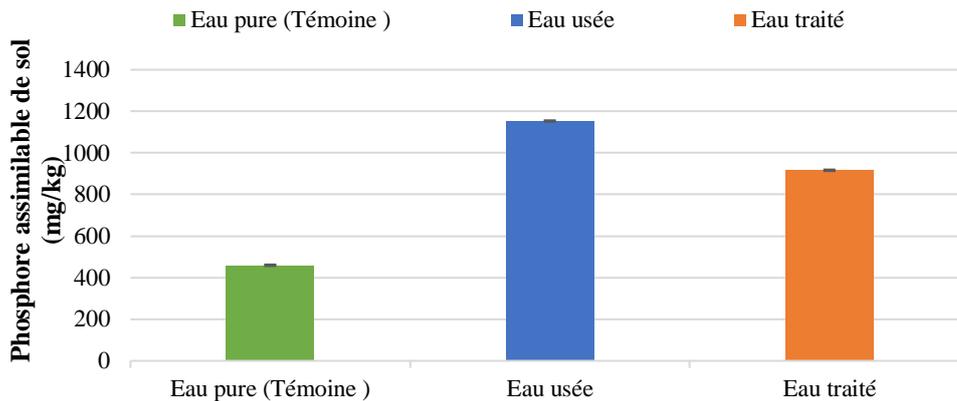


Figure 33: Effet du type d'eau d'irrigation sur la teneur en phosphore assimilable du sol.

VI. Discussion

L'analyse comparative des résultats obtenus au cours de cette étude met en lumière l'impact différencié des types de bouturage et des régimes d'irrigation sur le développement du *Paulownia Sp.* En effet, les observations morphométriques et physiologiques réalisées révèlent des variations notables selon le type d'eau utilisée (eau usée brute, eau usée traitée, eau pure) ainsi que selon l'origine des boutures (racinaires, jeunes, âgées). Ces résultats traduisent la sensibilité de cette espèce aux conditions environnementales, mais aussi sa capacité d'adaptation et de régénération dans des contextes hydriques contrastés.

Pour mieux interpréter ces données, il est essentiel de les replacer dans le cadre des travaux antérieurs menés sur le genre *Paulownia* et d'autres espèces ligneuses. Cette confrontation permet de mieux comprendre les mécanismes physiologiques sous-jacents, de confirmer certaines tendances, ou au contraire, de souligner des divergences propres à notre protocole expérimental.

Contrairement à certaines données de la littérature, nos résultats expérimentaux ont révélé que les boutures âgées, prélevées sur du bois mature, ont donné les meilleurs résultats, en particulier sous irrigation avec des eaux usées brutes. Trois de ces boutures ont présenté un développement remarquable de racines secondaires, témoignant d'un enracinement solide et bien structuré.

Ce constat va à l'encontre de plusieurs études qui rapportent une supériorité des boutures racinaires. Par exemple, **Wu et al. (2014)** ; **Antwi-Wiredu et al. (2021)** avaient observé une meilleure reprise chez *Paulownia fortunei* et *P. elongata* avec des boutures racinaires, souvent attribuée à la richesse en réserves des tissus souterrains. Cependant, dans notre étude, les boutures racinaires ont montré une performance correcte, sans pour autant surpasser les boutures âgées.

La longueur de la tige s'est avérée significativement plus élevée chez les plants de *Paulownia* irrigués avec de l'eau usée brute (7,5 cm), par rapport au témoin (6,0 cm) et à l'eau traitée (5,0 cm). Cette croissance accentuée peut être attribuée à la richesse de l'eau usée en nutriments

essentiels, tels que l'azote, le phosphore et la matière organique, qui favorisent l'élongation cellulaire et la division rapide des tissus méristématiques. Des résultats similaires ont été rapportés par **Akrour et al. (2016)**, qui ont observé une amélioration de la croissance végétative du maïs irrigué à l'eau usée dans les régions semi-arides d'Algérie. De même, **Bouarroudj et al. (2014)** ont constaté une élévation de la longueur des tiges chez le pois chiche arrosé à l'eau usée. En revanche, certains auteurs, comme **Djebbar et al. (2018)**, ont souligné que des concentrations excessives de certains composés peuvent avoir un effet toxique. Dans notre cas, l'effet reste globalement positif, ce qui montre que l'eau usée utilisée ne dépassait pas les seuils de toxicité.

Le diamètre au collet a atteint 0,45 cm sous irrigation à l'eau usée, contre 0,25 cm à l'eau pure et seulement 0,20 cm à l'eau traitée. Ce paramètre, indicateur de robustesse de la tige et de résistance mécanique de la plante, traduit une réponse positive du Paulownia à l'apport en nutriments organiques contenus dans l'eau usée brute. Selon **Khelifi et al. (2015)**, l'augmentation du diamètre au collet chez les plantes traitées à l'eau usée est souvent liée à une meilleure disponibilité du potassium et du calcium, éléments impliqués dans la lignification et la rigidité des tissus végétaux. Ces observations sont cohérentes avec nos résultats, montrant que l'eau usée, en plus de stimuler la croissance en longueur, renforce également la structure des tiges.

La longueur racinaire maximale (9 cm) a été enregistrée sous irrigation à l'eau usée, contre 8,5 cm à l'eau pure et 7,75 cm à l'eau traitée. Ce résultat suggère que l'eau usée, en plus de favoriser la croissance aérienne, soutient aussi le développement racinaire, notamment grâce à sa teneur en matière organique biodégradable, en azote ammoniacal et en microéléments. Ces résultats rejoignent ceux de **Zerroug et al. (2013)**, qui ont observé une augmentation de la longueur racinaire du blé irrigué par des effluents domestiques. Toutefois, **Debab et al. (2011)** ont mentionné une inhibition racinaire chez certaines espèces lorsque l'eau traitée contenait des résidus chimiques issus du traitement, ce qui pourrait expliquer la diminution de la croissance observée dans notre modalité à l'eau épurée.

Le rapport racine/tige le plus élevé a été observé chez les plantes irriguées avec de l'eau traitée (1,55), suivi du témoin (1,42), alors que le plus faible rapport (1,20) a été enregistré sous eau usée brute. Ce rapport permet d'apprécier la stratégie d'allocation des ressources par la plante : un rapport élevé suggère un investissement plus important dans le système racinaire, souvent en réponse à un stress ou à une faible disponibilité en nutriments dans le sol. Ces résultats rejoignent ceux de **Benabdeli et al. (2012)**, qui ont montré que des plantes soumises à un stress hydrique ou nutritionnel renforcent la croissance racinaire au détriment de la partie aérienne, ce qui explique les valeurs plus élevées sous eau traitée. À l'inverse, un faible rapport racine/tige, comme observé ici sous eau usée, peut refléter un environnement riche en nutriments, permettant à la plante de développer prioritairement sa biomasse aérienne, comme l'ont rapporté **Choukr-Allah et al. (2000)** dans leurs travaux sur des effluents urbains.

Les racines secondaires ont atteint une longueur maximale de 11 cm sous irrigation à l'eau usée, contre 8 cm pour l'eau pure et seulement 4 cm pour l'eau traitée. Cela traduit une meilleure ramification du système racinaire en présence d'éléments nutritifs disponibles dans l'eau usée brute, notamment le phosphore et les acides aminés qui stimulent la croissance latérale des racines. Cette tendance est en accord avec les travaux de **Bouchaala et al. (2015)**, qui ont démontré que l'irrigation par eaux usées domestiques améliore significativement la longueur et le nombre de racines secondaires chez le haricot. La faible croissance observée sous eau traitée pourrait, quant à elle, être liée à des résidus chimiques inhibiteurs, comme l'ont noté **Boudjema et al. (2010)** en testant des effluents épurés contenant des traces de chlore ou de métaux.

La masse fraîche de la partie aérienne a atteint 22,37 g sous eau usée, comparée à 11,24 g sous eau pure et à seulement 4,46 g sous eau traitée. Cette différence significative traduit l'impact positif des eaux usées brutes sur la biomasse végétative, grâce à leur teneur élevée en azote assimilable et autres nutriments stimulants. Ces résultats sont conformes aux observations de **Belhadj et al. (2011)** sur le sorgho, dont la biomasse a doublé sous irrigation avec des eaux usées non traitées. De manière similaire, **Achour et al. (2009)** ont rapporté une accumulation importante de matière fraîche sous effluents organiques. La performance plus faible avec l'eau

traitée peut être due à la perte d'éléments nutritifs lors du processus d'épuration, ou à des facteurs limitants résiduels.

La masse fraîche des racines suit la même tendance que celle de la partie aérienne : 11 g sous eau usée, contre 9 g (eau pure) et 6,5 g (eau traitée). Cela confirme l'effet bénéfique de l'eau usée brute sur la croissance racinaire, en raison de sa richesse en éléments fertilisants, en particulier l'azote ammoniacal et les acides organiques. **Djerroud et al. (2015)** ont rapporté que l'augmentation de la biomasse racinaire chez les plantes arrosées avec des effluents domestiques s'explique par une meilleure minéralisation des matières organiques dans le sol. En revanche, l'eau traitée pourrait contenir des sous-produits de désinfection ou des sels résiduels limitant la croissance, comme le suggèrent les conclusions de **Ould Rouis et al. (2014)** sur des cultures maraîchères.

La masse sèche la plus élevée a été obtenue avec l'eau traitée (0,2408 g), malgré une masse fraîche plus faible. Cela peut s'expliquer par une concentration plus importante en matière sèche, résultant d'une moindre rétention hydrique, souvent due à un stress modéré. Selon **Toumi et al. (2017)**, un stress hydrique ou nutritionnel peut entraîner une réduction de la turgescence des tissus, mais favoriser une accumulation relative de composés structuraux (lignine, fibres), ce qui augmente le rapport matière sèche/matière fraîche. Ainsi, l'eau traitée, en induisant un léger stress (manque de nutriments ou présence de résidus), pourrait stimuler une accumulation plus importante de matière sèche. En comparaison, l'eau usée, bien que plus favorable à la croissance globale, pourrait favoriser une plus grande accumulation d'eau dans les tissus, ce qui diminue la proportion de matière sèche.

La masse sèche racinaire est la plus élevée sous irrigation à l'eau usée (56,20 %), suivie de l'eau traitée (48,90 %) et enfin de l'eau pure (42,60 %). Ces résultats montrent que l'eau usée améliore à la fois la biomasse et la densité tissulaire des racines, grâce à sa richesse en éléments nutritifs essentiels au développement souterrain. Ces résultats sont cohérents avec ceux de **Amara et al. (2013)**, qui ont constaté une amélioration significative de la matière sèche racinaire du blé irrigué avec des eaux usées domestiques. Cela est principalement dû à la présence d'azote, de phosphore, de potassium et de carbone organique, qui stimulent l'activité

métabolique racinaire. À l'inverse, **Bouchaour et al. (2010)** ont noté une faible matière sèche sous eau pure, due à une nutrition minérale limitée.

Le rapport élevé obtenu chez les plantes irriguées à l'eau usée (81,81 %) traduit une accumulation marquée de matière sèche dans les racines, souvent associée à un stress environnemental, qu'il soit hydrique, salin ou chimique. Ce type de stress, causé par la salinité, les polluants ou un déséquilibre en nutriments, pousse la plante à concentrer sa croissance sur le système racinaire, au détriment des parties aériennes (**Kiziloglu et al., 2007 ; Rusan et al., 2007**).

En revanche, le faible rapport observé avec l'eau pure (33,33 %) indique une bonne hydratation et une croissance équilibrée, reflet d'une eau de qualité et d'un environnement favorable au développement de la plante (**Singh et al., 2012**). L'eau traitée, avec une valeur intermédiaire (46,15 %), suggère un stress modéré, probablement dû à des résidus salins ou organiques encore présents malgré le traitement (**Toze, 2006**).

Le rendement global est largement supérieur avec l'eau usée (294,61 %), suivi du témoin (100 %) et enfin de l'eau traitée (66,58 %). Cela reflète l'effet positif de l'eau usée sur l'ensemble des composantes de la croissance (biomasse, longueur, diamètre), grâce à une forte disponibilité en nutriments et en matière organique. Ce résultat rejoint les conclusions de **Saidi et al. (2016)**, qui rapportent une hausse significative du rendement chez le maïs et la tomate irrigués avec des eaux usées non traitées. Cette supériorité est souvent liée à la présence de composés fertilisants biodisponibles qui agissent comme des engrais naturels. Par contre, les eaux traitées, bien que plus sûres d'un point de vue sanitaire, présentent une composition souvent appauvrie, ce qui se traduit par une baisse de productivité, comme observé également par **Dahmoune et al. (2014)** sur les cultures de blé.

La chlorophylle totale est restée relativement stable entre les modalités, avec une légère supériorité pour l'eau pure (1,75 mg/g MVF) suivie de l'eau usée brute (1,74 mg/g MVF), et une valeur légèrement inférieure sous eau traitée (1,70 mg/g MVF). Ces résultats confirment les travaux de **Belhadi et al. (2012)**, qui ont montré que la synthèse de chlorophylle peut être

maintenue même en présence de stress modéré, tant que les éléments nutritifs (notamment l'azote et le magnésium) sont disponibles. En revanche, la baisse observée avec l'eau traitée peut être expliquée, comme l'indiquent **Toumi et al. (2016)**, par la présence de résidus chimiques (désinfectants, sels minéraux résiduels) susceptibles d'inhiber la biosynthèse des pigments. Malgré tout, l'écart reste faible, ce qui suggère une bonne résilience de *Paulownia* face à une éventuelle contrainte environnementale.

La teneur en sucres solubles augmente nettement avec l'eau usée (1,945 mg/g MVF), suivie de l'eau traitée (1,683 mg/g MVF), alors qu'elle est très faible dans le témoin (0,458 mg/g MVF). Cela indique que les plantes réagissent à un stress en accumulant des osmo-protecteurs. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de **Benmahioul et al. (2014)**, qui rapportent une accumulation accrue de sucres solubles chez les plantes soumises à un stress salin ou osmotique. Cette accumulation permet de maintenir la turgescence cellulaire, en équilibrant le potentiel hydrique. Le fait que l'eau traitée montre également une valeur élevée suggère que, malgré le traitement, un certain niveau de stress persiste.

La teneur en proline est fortement augmentée sous eau usée (0,608 mg/g MVF), modérée avec l'eau traitée (0,144 mg/g MVF) et très faible avec l'eau pure (0,030 mg/g MVF). Cela confirme que la proline est un marqueur clé de stress. Cette observation rejoint les études de **Smaoui et al. (2015)**, qui ont démontré que l'accumulation de proline chez les plantes soumises à un stress salin ou chimique est une réponse adaptative majeure. La proline stabilise les membranes, protège les enzymes et agit comme piègeur de radicaux libres. Son accumulation élevée chez *Paulownia* sous eau usée montre que bien que cette eau stimule la croissance, elle impose aussi un stress important, probablement dû à la salinité ou à des éléments toxiques.

L'azote foliaire est plus élevé sous eau usée (0,0338 %), suivi de l'eau traitée (0,0278 %) et enfin de l'eau pure (0,0236 %). Ces valeurs reflètent l'apport azoté contenu dans les eaux usées. Ce résultat est cohérent avec les travaux de **Zekri et al. (2011)**, qui indiquent que les eaux usées contiennent souvent de l'azote sous forme biodisponible (NO_3^- et NH_4^+), facilement assimilable par les plantes. Cela contribue à améliorer la synthèse protéique, la photosynthèse

et la croissance globale. En revanche, l'eau pure, sans apport externe, limite l'accumulation de cet élément clé.

Le phosphore assimilable est le plus élevé dans le sol irrigué à l'eau usée (1153,3 mg/kg), suivi de l'eau traitée (916,4 mg/kg) et de l'eau pure (459,6 mg/kg). Cela montre l'effet enrichissant des eaux usées, même après traitement. Des études comme celle **de Aissani et al. (2013)** confirment que l'irrigation avec des eaux usées augmente significativement la teneur en phosphore du sol, rendant cet élément plus disponible pour les plantes. Le phosphore est essentiel pour la croissance racinaire et la production d'énergie (ATP). La capacité de l'eau traitée à enrichir également le sol, bien que dans une moindre mesure, montre son potentiel pour l'agriculture durable.

CONCLUSION

CONCLUSION

CONCLUSION

VII. Conclusion

À l'issue de cette étude, il a été démontré que *Paulownia sp.* Représente une espèce végétale particulièrement prometteuse pour les initiatives d'agriculture durable et de phytoremédiation. La méthode de multiplication par bouturage s'est révélée non seulement simple à mettre en œuvre, mais aussi très efficace pour la production de jeunes plants viables.

Les résultats ont mis en évidence que l'irrigation par les eaux usées non traitées favorise significativement la croissance morphologique et améliore certains paramètres physiologiques, grâce à l'apport enrichi en nutriments. Toutefois, une vigilance s'impose quant aux effets cumulatifs à long terme, afin de prévenir tout risque potentiel de toxicité.

Par ailleurs, le Paulownia a fait preuve d'une grande capacité de résilience face aux conditions de stress hydrique induites par les eaux usées, renforçant ainsi son potentiel en tant qu'agent de dépollution naturelle et comme solution pour la réhabilitation des sols dégradés.

Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour l'intégration du Paulownia dans des projets agro-environnementaux en Algérie, en conciliant valorisation des eaux usées, production végétale rentable et préservation des ressources en eau

VIII. Référence Bibliographique

- **ACADÉMIE FORESTIÈRE CHINOISE (AFC). (1985)**— Paulownia in China: cultivation and utilization / Zhu Zhaohua, Chao Ching-Ju, Lu Xin-Yu and Xiong Yao Gao Ed. — Beijing, — 65 p
- **Achour, Z., Khammar, F., & Ould Ahmed, M. (2009).** Effet des effluents organiques sur la croissance et la production de biomasse chez les cultures maraîchères. Bulletin de la Recherche Agronomique, 22(1), 59–66.
- **Aissani, N., Meziani, M., & Ferrah, S. (2013).** Influence des eaux usées traitées sur les propriétés du sol et la croissance des plantes. Revue des Sciences et Technologie, 20, 55–63.
- **Ahmad, M., Zahir, A., & Khan, T. (2021).** Micropropagation and conservation of *Paulownia spp.*: A review. Plant Cell, Tissue and Organ Culture.
- **Akrour, M., Benali, M., & Bensalem, H. (2016).** Effets de l'irrigation par les eaux usées sur la croissance du maïs (*Zea mays L.*) en zones semi-arides d'Algérie. Revue des Sciences de l'Eau, 29(4), 331–340. <https://doi.org/10.7202/1040594ar>
- **Akyildiz, M.H., Kol, H.S., 2010.** Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood Journal of Environmental Biology, 31(3), 351-355. BioResources.Turkey.
- **Al-Asheh, S. Neetu, B., Bin-Hammad, M. (2024).**, Removal of Pharmaceutical Waste Materials from Wastewater using Treated and Untreated Eggshells as Biosorbent., American-university-of-Sharjah., United Arab Emirates.
- **Ali, M., Younis, A., & Riaz, A. (2018).** Vegetative propagation of Paulownia: Methods and application. Journal of Forestry Research.
- **Al-Sagheer, A.A., Abd El-Hack, M.E., Alagawany, M., Naiel, M.A., Mahgoub, S.A., Badr, M.M., Hussein, E.O.S., Alowaimier, A.N., Swelum, A.A., 2019.** Paulownia Leaves as A New Feed Resource: Chemical Composition and Effects on Growth, Carcasses, Digestibility, Blood Biochemistry, and Intestinal Bacterial Populations of Growing Rabbits. Animals (Basel) 9, 95. <https://doi.org/10.3390/ani9030095>.

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Amara, S., Zerrouk, K., & Boukhelkhal, A. (2013).** Influence des eaux usées sur la croissance et la matière sèche racinaire chez le blé (*Triticum aestivum*). *Revue Algérienne d'Agronomie*, 7(1), 21–29.
- **Angelov, M. (2010).** Paulownia – A fast-growing tree. *Journal of Forestry Research*, 21(3), 329-332. Bulgaria.
- **Angiosperm Phylogeny Group (2009).** An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 105–121. <https://doi.org/10.1111/j.10958339.2009.00996.x>
- **Angiosperm Phylogeny Group IV. (2016).** *An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV.* *Botanical Journal of the Linnean Society*, **181(1)**, 1–20. DOI : 10.1111/boj.12385.
- **Antwi-Wiredu, A., Gakpetor, P. M., Guuroh, R. T., Ofori, E., & Ofori, D. A. (2021).** Vegetative propagation technologies using stem and root cuttings of Paulownia (*P. fortunei* and *P. elongata*) tree species for mass production. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 18(4), 67–76.
- **AOAC (2000).** Official Methods of Analysis, 17^e édition, Method 934.01 – Moisture in Animal Feed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- **Asai, T., Hara, N., Kobayashi, S., Kohshima, S., Fujimoto, Y., 2008.** Geranylated flavanones from the secretion on the surface of the immature fruits of Paulownia tomentosa. *Phytochemistry* 69, 1234– 1241. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.11.011>
- **Ates, S., Ni, Y., Akgul, M., & Tozluoglu, A. (2008).** Characterization and evaluation of Paulownia elongata as a raw material for paper production. *African Journal of Biotechnology*, 7(22), 4153-4158. ResearchGate., Turkey
- **AUDIC, J-M., (2002).** Guide de traitement des eaux usées urbaines, édition Lyonnaise des eaux, 428p.
- **Aussel, H Colette Le Bâcle avec Graziella Dornier (2004) LE POINT DES CONNAISSANCES SUR Le traitement des eaux usées ;** Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, France.
- **Barbu, Marius Cătălin. Katharina Buresova, Eugenia Mariana Tudor., Petutschnigg., A (2022).**, Physical and Mechanical Properties of Paulownia tomentosa x elongata Sawn Wood from Spanish, Bulgarian and Serbian Plantations., Academic Editor: Ian D. Hartley., Switzerland.

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Barton, I. L. I. D. Nicholas and C. E. Ecroyd (2007)** Paulownia FOREST RESEARCH BULLETIN No. 231 Ensis, Private Bag 3020, Rotorua, New Zealand.
- **BAUMONT, S., CAMARD J-P., LEFRANC, A., & FRANCONI, A., (2004)** Réutilisation des eaux usées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS, pp 220.
- **Belhadi, A., Aït-Amir, B., & Messaoudi, M. (2012).** Utilisation des eaux usées domestiques en irrigation : effet sur la croissance de quelques plantes fourragères. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 15(2), 95–104.
- **Belhadj, S., Benyoucef, M., & Bouslama, M. (2011).** Influence des eaux usées sur la biomasse et le rendement du sorgho (*Sorghum bicolor*). *Revue d'Agronomie et d'Environnement*, 13(2), 47–54.
- **Benabdeli, K., Hacene, M., & Lamri, A. (2012).** Effets du stress hydrique sur la croissance racinaire et la biomasse aérienne chez *Triticum aestivum*. *Revue Algérienne de Physiologie Végétale*, 4(2), 125–134.
- **Benmahioul, B., Daguin, F., & Kaid-Harche, M. (2014).** Réponse physiologique et biochimique du pistachier à l'irrigation par des eaux usées traitées. *Cahiers Agricultures*, 23(5), 324–332.
- **Bertrand BUI [CC BY-SA 2.0 FR], via Tela Botanica 2016.,** *Paulownia tomentosa* 2615P2.jpg., 24/04/2011., <https://api.tela-botanica.org/img:0000279670.jpg>.
- **Bikfalvi, A. (2013).** Analysis of briquettes and pellets obtained from two types of Paulownias (*Paulownia tomentosa* and *Paulownia elongata*) sawdust. *BioResources*, 8(2), 2456-2465. Hungary.
- **BONIGEN J, CANO B. (2024)** Etat des connaissances sur le Paulownia Un engouement récent en France sur un genre peu connu : Paulownia Synthèse_CNPF-IDF Centre National de la Propriété Forestière – Institut pour le Développement Forestier France page (37-42).
- **Bouarroudj, F., Bensalem, S., & Ouchenane, N. (2014).** Impact de l'irrigation avec des eaux usées sur la croissance et le rendement du pois chiche (*Cicer arietinum L.*). *Bulletin de la Société Botanique de France*, 161(3), 197–204. <https://doi.org/10.1080/00378941.2014.906822>
- **Bouchaala, S., Guezoul, A., & Benyoucef, M. (2015).** Effet de l'irrigation par eaux usées sur la ramification racinaire du haricot (*Phaseolus vulgaris L.*). *Journal des Sciences de l'Agriculture Algérienne*, 10(1), 89–95.

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Bouchaour, N., Hacene, M., & Djerad, S. (2010).** Étude comparative de la croissance racinaire sous différentes sources d'irrigation chez *Zea mays*. *Bulletin de la Recherche Agricole Algérienne*, 12(3), 110–117.
- **Boudjema, H., Zerrouk, K., & Amrani, N. (2010).** Analyse des effets des effluents épurés sur la croissance des racines de différentes espèces cultivées. *Revue de Biologie et Ecologie*, 15(3), 210–218.
- **CALVET G. et VELEMIN,** Vol. 186. *Interprétation des analyses de terre*. Paris. 387 p.
- **Chen, H., & Li, Y. (2018).** Protective effects of *Paulownia tomentosa* flower extract against oxidative stress in human skin cells. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 17(3), 454-461.China.
- **Choukr-Allah, R., Boukhari, A., & El Hafidi, M. (2000).** Impact des effluents urbains sur la croissance et la productivité des cultures dans les zones arides. *Journal of Arid Environments*, 44(4), 391–399.
<https://doi.org/10.1006/jare.1999.0617>.
- **Clement M, Peltier F.** *Analyse chimique des sols* (Ed. ICARO, eds. Ed. La Voix Paysanne, Prix Norme NF ISO 1155), journal 1951, Annexe 9 du texte total du sol.
- **Cristina E. Davis.,2022.,** Risques et chances des *Paulownia-Anbaus* sous des conditions moyennes.
- **Dahmoune, F., Khelifi, S., & Benyoucef, M. (2014).** Effet des eaux traitées sur la productivité et la qualité du blé dur dans les zones semi-arides. *Revue de l'Environnement et de l'Agriculture*, 20(1), 45–53.
- **Danciu, A., Cernat, R., & Bălăceanu, C. (2016).** Considerations on the importance of the *Paulownia* trees planting. *International Journal of Engineering*, 14(4), 74–75.
- **Debab, A., Benyoucef, M., & Maouche, N. (2011).** Effet des résidus chimiques dans les eaux traitées sur la croissance racinaire de diverses espèces cultivées. *Journal des Sciences Agricoles d'Algérie*, 5(3), 45–51.
- **Desjardins (1997)** -Le traitement des eaux, Edition de l'école polytechnique de Montréal.
- **Djebbar, A., Boudjenane, M., & Khelifi, A. (2018).** Toxicité potentielle des eaux usées sur la croissance de plantes cultivées : étude expérimentale. *Journal Algérien de Protection de l'Environnement*, 10(2), 45–53.
- **Djerroud, L., Benabdelli, M., & Saidi, B. (2015).** Effets des effluents domestiques sur la biomasse racinaire et l'activité microbienne du sol. *Journal des Sciences Agronomiques*, 18(2), 101–108.

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Drvodelić, D. (2018).** Propagation of Paulownia by root cuttings. *Šumarski list*, 142(5–6), 297–306. <https://doi.org/10.31298/sl.142.5-6.5>
- **DUBOIS M., GILLESK L., HAMITLON J., REBERG A et SMITH F. (1956)** Colorimetric.
- **Eardhuis.G, Red.S and Ryan,J 2013.** *Methods of Soil Plants and Water Analysis: A survey on the World War II and North Africa region.* Ed. ICARO.
- **El-Showk, S., & El-Showk, N. (2010).** Paulownia: Tree for the future. *American Journal of Plant Sciences*, 1(2), 207-212., USA.
- **Etsuyankpa, M. B., Yusuf, M. B. S., & Adewumi, J. R. (2024).** An overview of wastewater characteristics, treatment and disposal: A review. *Nigerian Journal of Environmental Sciences and Technology*, 8(1), 1–12..
- **Falasca, S, María Angélica Bernabé., (2010).**, Aptitude agroclimatique argentine pour l'implantation de forêts énergétiques de Paulownia spp
- **Fang, J., Wang, Z., Tang, Z., 2011.** Atlas of Woody Plants in China: Distribution and Climate. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15017-3>.
- **GAID A. (1984)** - Epuration biologique des eaux usées urbaines. Tome I, édition OPU, Alger, 261p.
- **Ghazzawy H, s, Ahmed Bakr, Tageldein Mansour A, Ashour M., (2024).**, Les arbres de paulownia comme solution durable pour la réduction des émissions de CO2 : évaluation des progrès vers les objectifs climatiques à l'horizon 2050., Égypte (cairo).
- **Krisht, G., Halalsheh, M., & Mahmoud, N. (2024).** Irrigating with treated wastewater. In **A. Zaidi, P. Pardha-Saradhi, & T. El-Esawi (Eds.),** *Wastewater treatment and reuse for sustainable agriculture* (pp. 635–651). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95147-2.00028-3>.
- **Gökbayrak, Z., & Engin, H. (2017).** Effect of cutting type and IBA dose on the rooting of *Paulownia elongata*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*.
- **Grimard, A., Guay, R., Benoît, D., & Rochon, J. (1997).** *Méthodes de laboratoire pour l'analyse des tissus végétaux.* Centre de recherche en horticulture, Université Laval, Québec.
- **Grosclaude, g. (1999).** Tome II : l'eau usage et polluant. Paris : INRA Paris 218 page.
- **Hannachi. A, khelfi.s et souileh. N 2016** Effet de l'irrigation par des eaux usées traitées (EUT) sur une culture de blé dur (*Triticum durum* Desf.) (Effect of irrigation by treated wastewater (TWW) on a durum wheat crop (*Triticum durum* Desf.)) Université Ferhat Abbas Sétif 1 Algérie.

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Hassankhani, M. Behzad Kord, Mohammad Mehdi Pourpasha., (2015).**, EMPIRICAL STATISTICAL MODEL FOR PREDICTING WOOD PROPERTIES OF Paulownia fortunei., PART 1: PHYSICAL AND BIOMETRICAL PROPERTIES., Iran.
- **Hong, D.-Y., Yang, H.-B., Jin, C.-L., and Holmgren, N. H. (1998).** “Scrophulariaceae,” in Flora of China Editorial Committee, Vol. 18, eds Z. Y. Wu and P. H. Raven (Beijing: Missouri Botanical Garden Press.
- **Hu, S.-Y. (1959).** A monograph of the genus Paulownia. Quart. J. Taiwan Mus. 12, 1–54.
- **Hua Zheng, Zhi-Hua Duan, & Jian-Guo Bai. (1986).** Paulownia in China: Cultivation and Utilization. Chinese Academy of Forestry, Beijing, China.
- **Icka, P., Damo, R., & Icka, E. (2016).** Paulownia tomentosa, a fast-growing timber. The Annals of “Valahia” University of Targoviste. DOI : 10.1515/agr-2016-0003
- **Info floa 2014** DIRECTION GENERALE DE L’ENVIRONNEMENT (DGE), - Division Biodiversité et Paysage, Paulownia F3-32 PAULOWNIA TOMENTOSA (THUNB.) STEUD. 2page.
- **Jakubowski, M., 2022.** Cultivation Potential and Uses of Paulownia Wood: A Review. Forests 13, 668. <https://doi.org/10.3390/f13050668>.
- **Jensen, J. B. (2016).** An investigation into the suitability of Paulownia as an agroforestry species for UK & NW European farming systems (Master’s thesis, Coventry University).
- **Khamit Liza, Y. Aida 2023.**, Paulownia au Kazakhstan., S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana/ KAZAKHSTAN.
- **Khelifi, S., Madani, K., & Benyoucef, M. (2015).** Influence de l’irrigation par eaux usées sur le diamètre au collet et la lignification des tiges chez le tournesol (*Helianthus annuus L.*). Annales de l’Université de Batna, Série Sciences, 25(1), 77–85.
- **Kim, S. J., & Kim, J. H. (2014).** Antioxidant and anti-inflammatory activities of Paulownia tomentosa Steud. Flower extracts. Journal of Medicinal Plants Research, 8(18), 681-685.
- **Kiziloglu, F. M., Turan, M., Sahin, U., Kuslu, Y., & Dursun, A. (2007).** Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea*) and red cabbage (*Brassica oleracea rubra*). Agricultural Water Management, 95(1), 85–93.
- **Klein Y-P, Jean Ottmann, 1960.** *Dossier du laboratoire : État d’azote organique dans les éléments naturels.* Trans. IRMO UNI, Paris, 1967. *Interprétation des analyses de terre.* Ed. SCPA-24 P.

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Kolya, H., Kang, C.-W., 2021.** Hygrothermal treated paulownia hardwood reveals enhanced sound absorption coefficient: An effective and facile approach. *Applied Acoustics* 174, 107758. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107758>.
- **Kozhevnikov, Vladimir I. Alexander F. Koltsov, Eugenia N. Grishchenko, Natalya V. Shchegrinets., (2024).** Интродукция павловнии войлочной (*Paulownia tomentosa* Steud.) и перспективность ее использования в условиях г. Ставрополя ; (The introduction of *Paulownia* (*Paulownia tomentosa* Steud.) and the prospects of its use in the conditions of Stavropol)., North Caucasus Federal Agricultural Research Center, Mikhailovsk, Stavropol, Territory, Russia.
- **Shirmohammadi, E., Hashemabadi, D., Zarchini, M., & Kaviani, B. (2012).** Effects of seed source and sowing depth on germination of *Paulownia*. *African Journal of Agricultural Research*, 7(2), 265–272.
- **Lawrence, R. (2011).** *Paulownia* as a medicinal tree: Traditional uses and current advances. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(11), 2251-2255.
- **Li, P., Lou, G., Cai, X., Zhang, B., Cheng, Y., et Wang, H. (2020).** Comparaison des plastomes complets et analyse phylogénétique des espèces de *Paulownia*. *Sci. Rep.* 10, 2225. Doi :10.1038/s41598-020-59204-y.
- **Li, Y., & Wang, Y. (2015).** Antibacterial activity and mechanism of *Paulownia tomentosa* flower extract against selected food-borne pathogens. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5403-5409.
- **Liao, L., Mei, H., Li, J., Li, Z., 2008.** Estimation and prediction on retention times of components from essential oil of *Paulownia tomentosa* flowers by molecular electronegativity-distance vector (MEDV). *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM* 850, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.theochem.2007.10.008>.
- **Lugli, L., Mezzalana, G., Lambardi, M., Zhang, H., La Porta, N., 2023.** *Paulownia* spp.: A Bibliometric Trend Analysis of a Global Multi-Use Tree. *Horticulturae* 9, 1352. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121352>.
- **Mathieu C. et Peltier F., 2003.** *Analyse chimique des sols*. Ed. IEC & DOC. Paris. 387 p.
- **Monneveux P. & Nemmar M, 1986.** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.) : étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie*. 6 : 583-590.
- **Muhammad, F., Ali, S., Rizwan, M., Abbas, F., Adrees, M., & Ibrahim, M. (2022).** Nutrients uptake and accumulation in plant parts of fragrant *Rosa* species irrigated with

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- treated and untreated wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(5), 6922–6933. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16010-1>
- **Natalia Sławińska, Joanna Zając and Beata Olas., (2023).**, Paulownia Organs as Interesting New Sources of Bioactive Compounds., University of Lodz,Pomorska.,Department of General Biochemistry, Faculty of Biology and Environmental Protection,Poland.
 - **Nicholas, I., & Ecroyd, C. (s.d).**. Données de catalogage en cours de publication de la Bibliothèque nationale de Nouvelle-Zélande.
 - **Ould Rouis, H., Khelifi, S., & Benyoucef, M. (2014).** Effets des sous-produits de désinfection dans les eaux traitées sur la croissance des légumes. *Revue de l'Environnement et de la Santé*, 9(4), 335–342.
 - **Paulownia.Energy France 2023.**, Taille d'un plant de paulownia avant plantation
Источник: <https://paulownia.energy/fr/article/> .,France.
 - **Pépinières VAN DEN BERK, 2019** Toute la connaissance. Presque tous les arbres, PAULOWNIA TOMENTOSA, 5492 DONDERDONK 4 5492VJ SINT-OEDENRODE PAYS-BAS.
 - **Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012).** Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30–50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
 - **Pourchet.m [cc by-sa 2.0 fr] 2011,** via Tela Botanica <https://api.tela-botanica.org/img:000037478O.jpg>.
 - **Promesse de fleurs 2024, Alexandra.,** <https://www.promessedefleurs.com/conseil-plantes-jardin/tutoriel/comment-multiplier-le-paulownia/>.,consulté le 30/04/2025 à 18:31.
 - **Ptach, W., Łangowski, A., Rolbiecki, R., Rolbiecki, S., Jagosz, B., Grybauskienė, V., Kokoszewski, M., 2017.** THE INFLUENCE OF IRRIGATION ON THE GROWTH OF PAULOWNIA TREES AT THE FIRST YEAR OF CULTIVATION IN A LIGHT SOIL. International scientific conference RURAL DEVELOPMENT 2017 763–768.
 - **Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P. S. (2010).** The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management*, 97(4), 561–568

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Rana, N., Uniyal, S. K., Chauhan, D. S., & Todaria, N. P. (2018).** Total biomass carbon sequestration ability under the changing climatic condition by *Paulownia tomentosa* Steud. *International Journal of Chemical Studies*, 6(3), 2994–2998...
- **Rejsek f. (2002)** - Analyse des eaux ; aspect réglementaire et techniques, Tome I. Edition Scrérén CRDPA quitaine, Bordeaux. 71, 144p.
- **Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (1996).** *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer* (8^e éd.). Paris : Dunod, pp. 557–570 et 968–1079.
- **Rodier j, bazin c, broutin j. P, chambon p, champsaur h et rolil. (2005)** – L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^{ème} Edit. Dunode, Paris. 1383p.
- **Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009).** *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer* (9^e éd.). Paris : Dunod. 1579 pages.
- **Roubaudi Liliane.,2021.,** *Paulownia tomentosa-481.jpg.*, CC-BY-SA 2.0 FR.,via Tela Botanica., <https://api.tela-botanica.org/img:0024990800.jpg>.
- **Rusan, M. J. M., Hinnawi, S., & Rousan, L. (2007).** Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, 215(1-3), 143–152.
- **Saidi, B., Zerroug, K., & Benhamou, M. (2016).** Effet des eaux usées domestiques sur le rendement du maïs (*Zea mays*) et de la tomate (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 8(2), 134–142.
- **Singh, A., Agrawal, M., & Agrawal, S. B. (2012).** Use of wastewater for irrigation: A review of impacts on soil and crop health. *Agricultural Reviews*, 33(2), 144–159.
- **Ślawińska N, Joanna Zając and Beata Olas., (2023).**, *Paulownia Organs as Interesting New Sources of Bioactive Compounds.*, University of Lodz,Pomorska.,Department of General Biochemistry, Faculty of Biology and Environmental Protection.,Poland.
- **Smaoui, A., Debez, A., & Abdelly, C. (2015).** Réactions morfo-physiologiques de plantes halophytes soumises à un stress hydrique et salin. *Revue des Sciences Biologiques*, 21(3), 89–98.
- **Sophie N. R. Young, Marjorie R. Lundgren (2022).**, *C4 photosynthesis in Paulownia? a case of inaccurate citation UK (resharch articl)*.
- **Stewart, W.M., Vaidya, B.N., Mahapatra, A.K., Terrill, T.H. and Joshee, N. (2018)** Potential Use of Multipurpose *Paulownia elongata* Tree as an Animal Feed Resource. *American Journal of Plant Sciences*, 9, 1212-1227. USA.

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Sunanda Das,K. Lal,Raushan Kumar,Anil Kumar Shukla (2024)** Treated waste water use in construction industries., india.
- **Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015).** *Plant Physiology and Development* (6^e éd.). Sinauer Associates.
- the Linnean Society, 181(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>.
- **Thunberg, C. P. (1784).** *Flora Japonica: sistens plantas insularum Japonicarum, secundum systema sexuale emendatum, redactas ad XX classes, ordines, genera et species, cum differentiis specificis, synonymis paucis, descriptionibus concinnis et XXXIX iconibus adjectis.* Leipzig: M. G. Müller, 370 p.
- **Timothy hall President of Eco Ranchos, 2008.** Paulownia: an agroforestry gem
- **Tom remaley.,2005** GREAT SMOKY MOUNTAINS NATIONAL PARK, GATLINBURG, TN 2005: FACT SHEET: PRINCESS TREE, Mai. (3 page) Washington.
- **Toumi, N., Ouerghi, Z., & Zoghلامي, N. (2016).** Effet de l'irrigation avec des eaux usées sur la croissance et la composition biochimique de plantes médicinales. *Revue des Bioressources*, 12(1), 43–52.
- **Toumi, S., Khelifi, S., & Benhamou, M. (2017).** Effet du stress hydrique sur la composition en matière sèche des tissus végétaux : étude comparative chez *Vitis vinifera*. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 116, 55–62.
- **Tudararo-Aherobo, L. E., A. J. Egieya.,2023.,** Physicochemical and Microbial Characterization of Treated and Untreated Produced Water., Department of Environmental Management and Toxicology, Federal University of Petroleum Resources, Effurun, Delta State, P.M.B-1221, Nigeria.
- **Tusevhaan, N., Mambetov, B., Abayeva, K., 2023.** Paulownia. Scientific Collection « InterConf » 93–107.
- **Toze, S. (2006).** Reuse of effluent water—benefits and risks. *Agricultural Water Management*, 80(1-3), 147–159.
- **Wang, Y., & Li, Y. (2017).** Antifungal activity of Paulownia tomentosa flower extract against *Candida* species. *Journal of Ethnopharmacology*, 209, 30-34.
- **Wekepidia.**
- **Woods, J. (2008).** Nutritive value of paulownia (*Paulownia* spp.) hybrid tree leaves. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 7(11), 1306-1310.
- **Woźniak M, anna gałązka, Magdalena Frąc., (2018).**, PAULOWNIA – SZYBKO ROSNĄCE, WIELOFUNKCYJNE DRZEWO BIOENERGETYCZNE., Instytut Uprawy

REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy., Czartoryskich 8, 24-100 Puławy., Pologne.
- **Wu, J., Zhang, H., Liu, Y., & Wang, H. (2014).** Study on regeneration capacity of root cuttings in *Paulownia fortunei*. *Journal of Forestry Research*, 25(3), 473–478. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0493-3>
 - **Yadav, N. K., Grewal, A., Mishra, S. N., & Singh, P. (2013).** A review of *Paulownia* biotechnology: A short rotation, fast growing multipurpose bioenergy tree. *American Journal of Plant Sciences*, 4(11), 2070–2075. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.411259>
 - **Young Sophie N. R., Marjorie R. Lundgren., 2022,** C4 photosynthesis in *Paulownia*? A case of inaccurate citations., Lancaster Environment Centre, Lancaster University, Lancaster, UK., *Plants People Planet*. 2022 ;1–12.
 - **Zekri, M., Benhiba, L., & Wahbi, S. (2011).** Impact de l'utilisation des eaux usées domestiques sur la productivité et la composition minérale des cultures maraîchères. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1(1), 25–32. 6.
 - **Zerroug, A., Haddad, O., & Boukhelkhal, M. (2013).** Effet des eaux usées domestiques sur la croissance racinaire du blé (*Triticum aestivum L.*) en région semi-aride. *Revue des Sciences et Technologies*, 8(2), 103–110.
 - **Zhang, Y., Liu, M., & Guo, X. (2013).** *Paulownia*: A fast-growing tree for ecological and economic restoration in China. *Ecological Engineering*, 52, 373–378.
 - **Zhao, J., & Wang, Y. (2016).** Chemical composition and antioxidant activity of essential oil from the leaves of *Paulownia tomentosa*. *Molecules*, 21(9), 1202.
 - **Zhi Xia, Jun Wen, Zhiming Gao., (2018).**, L'énigmatique *Wightia* appartient-elle aux *Paulowniaceae* (Lamiales)., *Frontières de la science végétale.*, Chine .
 - **Zhu Zhao Hua and Lu Xin Yu. 1973.** On multiple effects of intercropping with *Paulownia*. Academy of Forestry, Beijing.
 - **Zhu zhao-hua, chao ching- ju, lu xin-yu, xiong yao gao - 1986** *Paulownia* in china cultivation and utilization 2p 29 31p 51 54p 63p 64p.
 - **Zuccarini Joseph Gerhard et Siebold, Philipp Franz von ; 1845-1846** 18385 *Florae Japonicae familiae naturales : adjectis generum et specierum exemplis selectis.*, Munich, Akademie der Wissenschaften, 1845-1846].

IX. Annexe

A. Matériels utilisés pour Paramètre physiologique

1. La chlorophylle totale



Eprouvette graduée
10ml



Mortier



Tube à essai



Cuve en plastique



Pissette



Acétone 99 %



Centrifugeuse



Balance



Spectrophotomètr

ANNEXE

2. Sucre soluble



Cuve en plastique



Tube à essai



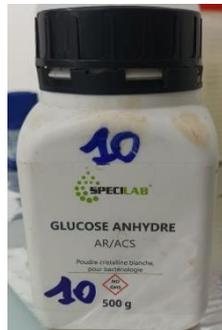
Éthanol 96 %



Pissette a eau distillée



Anthrone ($C_{14}H_{10}O$)



Glucose



Balance



Spectrophotomètre



Bain Marie

3. Proline



Tube à essai



Bécher



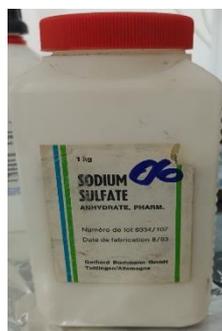
Eprouvette graduée 20ml



Cuve en Verre



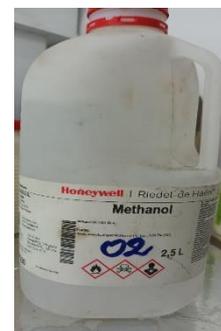
Spatule



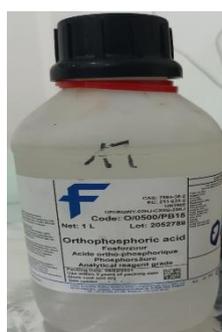
Sulfate de Sodium (Na_2SO_4)



Acide Acétique Glacial ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$)



Méthanol



Acide Ortho-phosphorique



Pissette a eau distillée



Ninhydrine



Toluol (C_7H_8)

ANNEXE



Vortex



Balance



Bain Marie



Spectrophotomètre

ANNEXE

4. L'azote



Matras



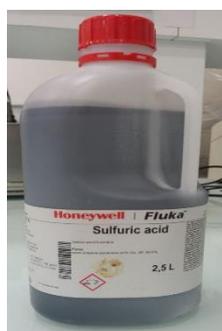
Erlenmeyrs 100ml



Fiole jaugée 250ml



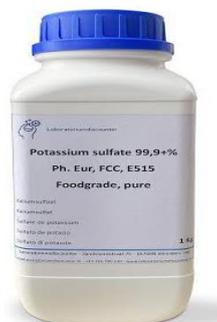
Entonnoir liquide



Acide Sulfurique
(H_2SO_4)



Sélénium noir



Sulfate de potassium
(K_2SO_4)



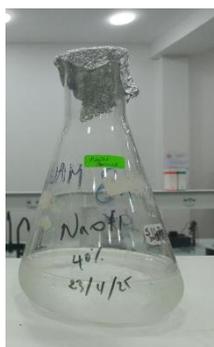
Sulfate de cuivre
($CuSO_4$)



Acide borique
(H_3BO_3)



Acide Sulfurique 0.05N



Soude NaOH 40%



Pissette a eau distillée

ANNEXE



Minéralisateur



**Appareille de
distillation**



**Burette a robinet
+ support**

B. Paramètre édaphique

1. Phosphore assimilable de sol



Flacon en verre



Entonnoir liquide



Cuve en plastique



Tube a essai



Eprouvette graduée
10ml



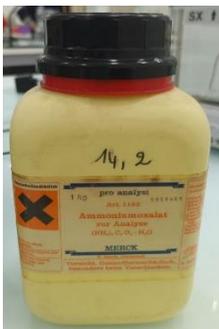
Pipete gradué



Papier filtre
0.00013gr/15cm



Pompe de pipette



Ammoniu-moxalat
(NH₄) C₂O₄. H₂O



Acide Ascorbique



Acide Borique



Bain Marie

ANNEXE



Agitateur



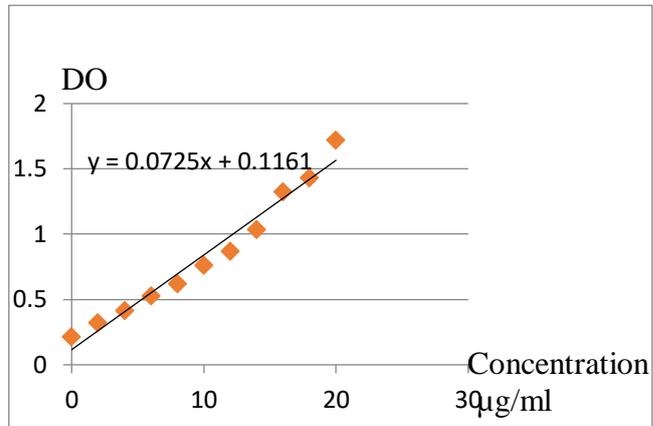
Spectrophotomètre



Balance

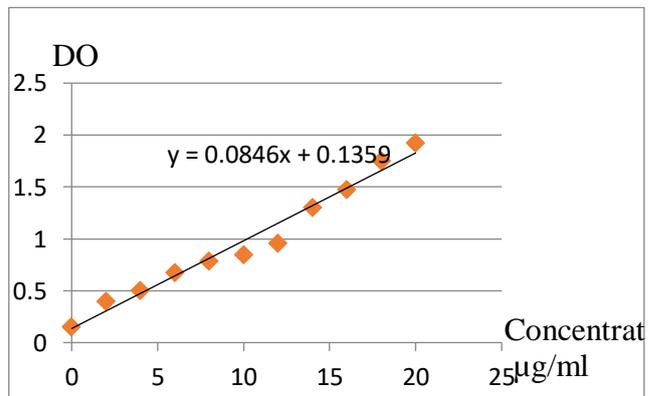
C. Les Courbe D'étalonnage

1. Sucre soluble



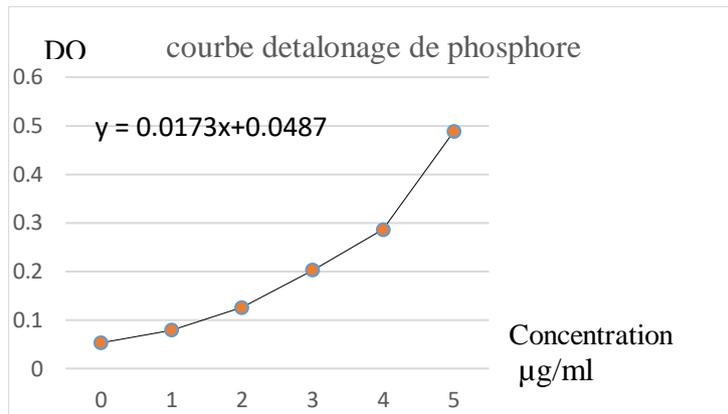
Solution mère : 2000 µg/ml
Solution fille : 20 µg/ml

2. Proline



Solution mère : 2000 µg/ml
Solution fille : 20 µg/ml

3. Phosphore assimilable



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعد دحلب البلدية (1)
Université SAAD DAHLEB-BIida 1



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master dans le domaine SNV

Filière : Sciences Biologiques

Option : Biodiversité et physiologie végétale

Thème :

Etude de la multiplication du *Paulownia* (*Paulownia spp*) par bouturage et évaluation de son comportement après irrigation des eaux usées : impact sur la croissance et la physiologie.

Présenté par :

Soutenu le : 30/06/2025

Nom et prénom : Ben Sassi Rayane.

Nom et prénom : Koulougli Yasmine.

Devant le jury :

Nom	Grade/Lieu	Qualité
Mme MOUAS Y.	MAA /USDB1	Présidente
Mr ROUIBI AH.	MCA/USDB1	Examineur
Mme El FERRAN. A.	MAA/USDB1	Promotrice

Pr. Rouibi A

Année universitaire : 2024 /2025.

REFERENCE BIBIOGRAPHIQUE
