

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.



Université Dr Moulay Tahar de Saïda
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de l'Agronomie et Sciences de la Nutrition
Spécialité de Protection des écosystèmes
Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

Thème :

**Test de techniques basées sur la nature pour la
restauration et l'amélioration de la réussite des
plantations des zones arides et semi-arides**

Présenté par :

- ❖ BOUTALBI Meriem
- ❖ DAHMANI Achwak Khadidja

Soutenu le : 21/06/2026

Devant le jury composé de :

- | | |
|------------------|-----------------------|
| ➤ Président : | Dr : KEFIFA Abdelkrim |
| ➤ Examineur: | Dr: SAIDI Abdelmoumen |
| ➤ Encadreur : | Pr : NASRAELLAH Yahia |
| ➤ CO- encadreur: | Dr BENKHETTOU Mohamed |

Année universitaire : 2025 / 2026



Remerciements :

Tout d'abord, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour réaliser ce travail.

*Nous tenons à remercier vivement et profondément notre encadreur, **Mr. Nasrallah Yahia**, pour son aide précieuse, sa disponibilité constante ainsi que ses*

Encouragements tout au long des différentes étapes de l'élaboration de ce travail.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail :

❖ **Mr KEFIFA. A** en qualité de président de jury.

❖ **Mr SAIDIA** entant qu'examineur.

Nos remerciements à tous nos enseignants qui nous ont permis d'acquérir des connaissances et qui ont contribués à notre formation.

*Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à Monsieur le Directeur **de l'IRNF BENKHETTOU MOHAMED**.*

Ainsi qu'à l'ensemble du personnel d'INRF pour leur aide précieuse, de la réalisation de ce travail.



Dédicace :

Nous dédions ce modeste travail à :

À nos très chers parents,

En témoignage de notre amour et de notre profonde gratitude,

Pour leur soutien constant tout au long de notre parcours académique,

Et pour avoir été pour nous un appui et une source de force à chaque étape.

À nos frères et sœurs,

Qui ont partagé avec nous les moments de difficulté et de réussite,

Et qui ont toujours été une source d'encouragement.

À notre grande famille,

Pour leur affection et leur présence bienveillante.

À nos amis et collègues,

Qui nous a accompagnés tout au long de cette aventure, et avec qui nous
avons partagé de précieux souvenirs.

À tous ceux qui nous ont soutenus, de près ou de loin,

Et à tous ceux qui occupent une place chère dans nos cœurs



Résumé :

Les zones arides et semi-arides sont particulièrement vulnérables à la sécheresse, à la désertification, au surpâturage ainsi qu'à la dégradation des terres causée par l'érosion et les activités humaines, phénomènes aggravés par les changements climatiques. Malgré les efforts de restauration entrepris dans ces milieux, la réussite des plantations demeure souvent limitée en raison des conditions écologiques défavorables et de la faible disponibilité en eau. Dans ce contexte, le recours aux solutions fondées sur la nature constitue un enjeu majeur pour améliorer la restauration des sols et assurer une meilleure reprise des plants.

Pour répondre à ce défi, ce travail vise à évaluer l'efficacité de certaines techniques basées sur la nature pour améliorer la restauration des sols et la réussite des plantations en zones arides et semi-arides.

Un dispositif expérimental a été mis en place en testant plusieurs traitements : la variation de la profondeur des potets (PR), l'apport de matière organique (MO), l'utilisation du compost et l'incorporation du bois raméal fragmenté (BRF). Les performances des traitements ont été évaluées à travers le taux de reprise et les paramètres de croissance des plants.

Les résultats obtenus montrent que *Fraxinus* sp. Présente les meilleures performances de croissance parmi les espèces étudiées. Les traitements PR et MO ont favorisé une amélioration significative de la croissance des plants, tandis que le traitement PR apparaît comme la solution la plus prometteuse en raison de son efficacité et de sa durabilité dans les conditions écologiques de la zone d'étude. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt des solutions fondées sur la nature pour renforcer la réussite des plantations et contribuer à la restauration durable des écosystèmes dégradés.

Mots-clés :

- Zones arides et semi-arides ; Restauration des sols ; Solutions fondées sur la nature ; Dégradation des terres ; Taux de reprise des plants.

المخلص

تشهد المناطق الجافة وشبه الجافة تدهوراً حاداً في أراضيها نتيجة التصحر والتغيرات المناخية ورغم المشاريع المنفذة لإعادة التأهيل، إلا أن عمليات التشجير تعاني من انخفاض ملحوظ في نسبة النجاح، بسبب قلة خصوبة التربة ونقص المياه. يمثل هذا الواقع تحدياً حقيقياً يستدعي البحث عن بدائل بيئية فعال

من هذا المنطلق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جدوى بعض الحلول القائمة على الطبيعة لتحسين خواص التربة وضمان نجاح الغرسات. ولتحقيق ذلك، تم إعداد تجربة تعتمد على تطبيق عدة معاملات، تشمل: التحكم في عمق حفر الغرس، إضافة المادة العضوية، استخدام السماد العضوي (الكمبوست)، وإيضاً الخشب المتفتت

كشفت النتائج عن دور فعال لهذه التقنيات في تحسين بنية التربة، حيث برزت تقنية "التحكم في عمق حفر الغرس" كأكثر هذه الوسائل استدامة لرفع نسبة نجاح الغرس في الظروف البيئية القاسية للمنطقة المدروسة، مما يؤكد أهمية تبني هذه الحلول البيئية لمواجهة تدهور الأراضي

الكلمات المفتاحية:

المناطق الجافة وشبه الجافة؛ استصلاح التربة؛ الحلول القائمة على الطبيعة؛ تدهور الأراضي؛ نسبة نجاح الغرس.

Abstract

Arid and semi-arid zones, severely affected by desertification and climate change, suffer from advanced land degradation. Despite restoration efforts, the success of plantations remains limited there by unfavorable edaphic conditions and water stress. This limitation represents a major obstacle, making it essential to evaluate nature-based solutions.

This study thus aims to test the effectiveness of ecological techniques (variation of planting pit depth-PR, organic matter input-MO, compost, and fragmented ramial wood-BRF) to improve soil restoration and plant survival rates. Performances were measured through survival rates and growth parameters.

The results show that *Fraxinus sp.* exhibits the best growth. PR and MO treatments significantly improve this success, with a clear predominance of the PR treatment, proving to be the most effective and sustainable. This study confirms the value of these solutions for combating the degradation of arid ecosystems.

Keywords:

- Arid and semi-arid zones; Soil restoration; Nature-based solutions; Land degradation; Plant survival rate.

Liste des figures :

Chapitre 01 : Cadre théorique et revue bibliographique

Figure 1 : Répartition des milieux arides à l'échelle mondiale selon l'indice d'aridité (P/ETP).

Figure 2 : Carte bioclimatique de l'Algérie (source ANAT, 2004).

Figure 3 : Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie (FAO 2005).

Figure 4 : Localisation et extension du Barrage Vert prévu en Algérie.

Chapitre 02 : Zone d'étude et méthodologie

Figure 5 : Limites géographiques de la commune d'Aïn Skhouna (APC de Aïn Skhouna 2012).

Figure 6 : a) Situation de Aïn Skhouna par rapport au chef-lieu Saida ; b) localisation de la parcelle expérimentale.

Figure 7 : Carte géomorphologique et coupe topographique SO-NE de la zone d'Aïn Skhouna

Figure 8 : a) Faux Poivrier plante jeune ; b) arbre.

Figure 9 : a) Arbre d'Olivier de Bohême ; b) Olivier de Bohême plante jeune.

Figure 10 : a) Arbre de Frêne ; b) Le Frêne plante jeune.

Figure 11 : La tarière (foreuse de plantation).

Figure 12 : La pelle à main.

Figure 13 : Une citerne d'eau.

Figure 14 : Le Seau de l'INRF (15L).

Figure 15 : Ruban de mesure (Mètre ruban).

Figure 16 : Mesure de l'humidité avec l'hygromètre.

Figure 17 : Un pied à coulisse numérique.

Figure 18 : Préparation du sol et traçage des lignes de plantation.

Figure 19 : Creusement des potets.

Figure 20 : Profondeur de 60 cm.

Figure 21 : a) Technique d'incorporation de bois (BRF) dans la fosse de plantation ; b) la stratification du sol (terre – bois raméal fragmenté – terre).

Figure 22 : a) Technique d'incorporation de matière organique la fosse de plantation ; b) la stratification du sol (terre – matière organique – terre).

Figure 23 : a) la stratification du sol (terre – compost – terre) ; b) de compost.

Figure 24 : Mesure de la fosse de plantation 40 cm et installation du jeune plant pour le témoin.

Figure 25 : Recouvrement des racines par une couche de sol d'environ 10cm.

Chapitre 03 : Résultats et discussion

Figure 26 : Brûlure par le gel de Frêne.

Figure 27 : Brûlure par le gel de faux poivrier.

Figure 28 : Récupération foliaire du faux poivrier après un épisode de gel.

Figure 29 : a) Dessèchement des feuilles d'Olivier de Bohême ; b) indicateur de l'humidimètre révélant la sécheresse du sol.

Figure 30: a) Dessèchement des feuilles de frêne ; b) indicateur de l'humidimètre révélant la sécheresse du sol.

Figure 31 : Evolution du taux de survie par espèce (E1, E2, E3), le 1 Mars 2026.

Figure 32 : Evolution du taux de survie par espèce (E1, E2, E3), le 30 Juin 2026.

Figure 33 : Évolution du diamètre des espèces (E1, E2, E3), le 1 Mars 2026.

Figure 34 : Evolution du diamètre des espèces (E1, E2, E3), le 30 juin 2026.

Figure 35 : Evolution de la hauteur par espèce (E1, E2, E3), le 1 Mars 2026.

Figure 36 : Evolution de la hauteur par espèce (E1, E2, E3), le 30 Juin 2026.

Figure 37 : Taux de survie par traitement le 1 Mars 2026.

Figure 38 : Taux de survie par traitement le 30 Juin 2026.

Figure 39 : Diamètre au collet des plants des traitements des trois espèces 1 Mars 2026.

Figure 40 : Diamètre au collet des plants des traitements des trois espèces le 30 Juin 2026.

Figure 41 : Hauteur des Cinq traitements des trois espèces le 1 Mars 2026.

Figure 42 : Hauteur des Cinq traitements des trois espèces le 30 Juin 2026.

Liste des tableaux :

Chapitre 01 : Cadre théorique et revue bibliographique

Tableau 1 : Zones d'aridité, végétation et utilisation des sols dans les milieux arides.

Tableau 2 : Répartition des superficies (S) et pourcentages (%) des zones arides et désertiques dans les pays du Maghreb.

Tableau 3 : Superficies des zones arides d'Algérie en 10^3 km^2 (Le Houérou, 1995, modifié).

Chapitre 02 : Zone d'étude et méthodologie

Tableau 4 : Coordonnées géographiques de la zone d'étude.

Tableau 5 : Suivi des jours de pluie.

Chapitre 03 : Résultats et discussion

Tableau 6 : Résultat de l'analyse inter-arbres de la variance des taux de survie des arbres.

Tableau 7 : Évolution des moyennes des taux de survie des trois espèces entre le 1er Mars et le 30 juin 2026.

Tableau 8 : Résultat de l'analyse inter-arbres de la variance des diamètres de collet des arbres.

Tableau 9 : Évolution des moyennes des diamètres des trois espèces entre le 1er Mars et le 30 juin 2026.

Tableau 10 : Résultat de l'analyse inter-arbres de la variance des hauteurs des arbres.

Tableau 11 : Évolution des moyennes des hauteurs des trois espèces entre le 1er Mars et le 30 juin 2026.

Tableau 12 : Taux de survie des plants de Schinus molle, Elaeagnus angustifolia et Fraxinus sp, en fonction des cinq traitements.

Tableau 13 : Évolution des moyennes des taux de survie des cinq traitements entre le 1er Mars et le 30 juin 2026.

Tableau 14 : Diamètre au collet des plants de Schinus molle, Elaeagnus angustifolia et Fraxinus sp. En fonction des cinq traitements.

Tableau 15 : Évolution des moyennes des diamètres des cinq traitements entre le 1er Mars et le 30 juin 2026.

Tableau 16 : Hauteur totale des plants de Schinus molle, Elaeagnus angustifolia et Fraxinus sp, en fonction des cinq traitements.

Tableau 17 : Évolution des moyennes des hauteurs des cinq traitements entre le 1er Mars et le 30 juin 2026.

Liste des abréviations :

- ✦ ANAT : Agence Nationale des Aménagements du Territoire
- ✦ BO : Bois Raméal Fragmenté
- ✦ BRF : Bois Raméal Fragmenté
- ✦ BVP : Bonne Valeur Pastorale
- ✦ CO : Compost
- ✦ D : Diamètre au collet (mm)
- ✦ E1 : *Elaeagnus angustifolia*
- ✦ E2 : *Schinus molle*
- ✦ E3 : *Fraxinus* sp
- ✦ FAO : Food and Agriculture Organization
- ✦ FVP : Faible Valeur Pastorale
- ✦ H : Hauteur totale (cm)
- ✦ INRF : Institut National de Recherche Forestière
- ✦ IPBES : Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
- ✦ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
- ✦ IUCN : International Union for Conservation of Nature
- ✦ MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
- ✦ MO : Matière Organique
- ✦ MVP : Moyenne Valeur Pastorale
- ✦ NBS : Nature-Based Solutions
- ✦ NE - SO : Nord-Est - Sud-Ouest
- ✦ NS : Non Significatif
- ✦ PR : Profondeur de Potet des plantations
- ✦ S : Taux de survie
- ✦ SVP : Sans Valeur Pastorale
- ✦ STID : Statistique et Traitement Informatique des Données
- ✦ TE : Témoin
- ✦ UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature
- ✦ UNCCD: United Nations Convention to Combat Desertification
- ✦ UNEP : United Nations Environment Programme

Table des matières

Remerciements.....	2
Dédicace	3
Résumé	4
Liste des figures	7
Liste des tableaux.....	9
Liste des abréviations :.....	10
Table des matières	12
Introduction générale.....	14
Chapitre (01) :Cadre théorique et revue bibliographique.....	16
Les zones arides et semi-arides	17
1. Définition et classification de l'aridité	18
2. Aridité climatique et aridité édaphique	19
3. Caractéristiques physiques des zones arides et semi-arides.....	20
4. Caractères biotiques et adaptations.....	20
5. La dégradation des zones arides et semi-arides.....	21
6. Répartition des zones arides	21
6.1. Les zones arides et semi-arides à l'échelle mondiale	22
6.2. Les zones arides et semi-arides en Algérie	22
7. Les facteurs de dégradation des zones aride et semi arides	23
8. Échec des plantations en zones arides et semi-aride	24
9. Techniques basées sur la nature (NBS).....	24
Chapitre (02) : Zone d'étude et méthodologie	25
Introduction.....	26
1. Localisation géographique et cadre administratif	26
2. Caractéristiques générales de la zone d'étude.....	30
3. Présentation des espèces étudiées.....	35

4. Matériel et Méthodes.....	38
5. Préparation du site	44
6. Creusement des potets.....	45
7. Dispositif expérimental.....	46
8. Procédure de plantation	51
10. Logiciel et méthodes statistiques utilisés.....	53
Chapitre (03) : Résultats et discussions	55
Résultats de l'analyse univariée du développement de la plantation.....	56
1. Résultats de l'analyse univariée du développement des Trois espèces.....	58
1.1. Taux de survie des plants de <i>Schinus molle</i>, <i>Elaeagnus angustifolia</i> et <i>Fraxinus sp.</i>	58
1.2. Diamètre au collet des plants de <i>Schinus molle</i>, <i>Elaeagnus</i> <i>angustifolia</i> et <i>Fraxinus sp.</i>.....	61
1.3. Hauteur totale des plants de <i>Schinus molle</i>, <i>Elaeagnus angustifolia</i> et <i>Fraxinus sp.</i>	63
2. Résultats de l'analyse univariée du développement des trois espèces en fonction des cinq traitements	65
2.1. Taux de survie des plants en fonction des cinq traitements.....	65
2.2. Diamètre au collet des plants en fonction des cinq traitements.....	67
2.3. Hauteur totale des plants en fonction des cinq traitements.....	70
2. Dscussion des résultats de l'analyse univariée.....	72
Comparaison avec les travaux antérieurs	75
Conclusion générale	80
Références Bibliographiques.....	83

Introduction générale

Introduction générale :

Les zones arides et semi-arides couvrent une part importante des terres émergées à l'échelle mondiale et occupent une large portion du bassin méditerranéen, notamment en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Elles se caractérisent par des précipitations faibles et irrégulières ainsi que par une forte évapotranspiration, entraînant un déficit hydrique important., ainsi que par des étés longs, chauds et secs (Le Houérou, 1974).

Ces écosystèmes abritent une population importante qui dépend fortement des ressources naturelles, en particulier pour les activités agricoles et pastorales. Toutefois, en raison de la fragilité de leurs conditions écologiques, les zones arides et semi-arides sont particulièrement vulnérables aux processus de dégradation et de désertification, sous l'effet combiné des facteurs climatiques et des pressions anthropiques (FAO, 2017 ; IPBES, 2018).

En Algérie, les zones steppiques représentent un cas particulier des zones semi-arides. Elles jouent un rôle écologique et socio-économique majeur, notamment en tant que zones de parcours pour l'élevage. Cependant, ces écosystèmes connaissent une dégradation progressive caractérisée par la régression du couvert végétal, la diminution de la fertilité des sols et la perte de biodiversité (Nedjraoui & Bedrani, 2008).

Face à cette situation, plusieurs programmes de restauration écologique et de reboisement ont été mis en œuvre. Néanmoins, les taux de réussite des plantations demeurent souvent limités en raison du stress hydrique, de la dégradation des sols et de l'inadaptation des techniques utilisées.

Dès lors, une question centrale se pose : dans quelle mesure les techniques basées sur la nature peuvent-elles constituer une alternative efficace pour pallier les limites des méthodes conventionnelles ? Plus précisément, comment l'intégration de processus naturels peut-elle renforcer la résilience des jeunes plants et favoriser la restauration durable des sols dans des milieux soumis à une forte aridité ?

C'est dans cette perspective que les techniques basées sur la nature (NBS) apparaissent comme une approche pertinente et durable. Elles reposent sur l'utilisation de processus naturels afin d'améliorer la résilience des écosystèmes et d'augmenter le succès des plantations, tout en respectant les équilibres écologiques (Cohen-Shacham et al., 2016).

Ainsi, l'objectif de ce travail est d'évaluer l'efficacité de certaines techniques en termes de survie, croissance et amélioration de la réussite des plantations dans les zones arides. L'expérimentation a été menée à la station de l'INRF située dans la commune d'Aïn Skhouna (wilaya de Saïda).

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en trois chapitres : le premier est consacré au cadre théorique et à la revue bibliographique, le deuxième présente la zone d'étude et la méthodologie adoptée, et le troisième expose les résultats obtenus ainsi que leur discussion.

Chapitre (01) :

*Cadre théorique et revue
bibliographique*

Les zones arides et semi-arides

1. Définition et classification de l'aridité

Les milieux arides présentent une grande hétérogénéité, que ce soit au niveau des formes du relief, des sols, de la faune, de la flore, des bilans hydriques ou encore des activités humaines qui s'y développent. En raison de cette diversité, il est difficile de proposer une définition unique et opérationnelle des environnements arides. Néanmoins, le point commun à toutes ces régions reste le phénomène d'aridité.

Celui-ci est généralement évalué à partir des précipitations et de la température. Une manière courante de l'exprimer est l'indice d'aridité climatique, défini par le rapport suivant : **P / ETP**

Où P représente les précipitations et ETP l'évapotranspiration potentielle, estimée notamment à partir de la méthode de Penman, qui prend en compte l'humidité de l'air, le rayonnement solaire ainsi que la vitesse du vent.

Cet indice permet de distinguer trois grandes catégories de zones arides : hyperarides, arides et semi-arides. À l'échelle mondiale, les zones hyperarides couvrent environ 4,2 % des terres émergées, les zones arides 14,6 % et les zones semi-arides 12,2 %. Ainsi, près d'un tiers des surfaces terrestres correspond à des milieux arides.

Les zones hyperarides (indice d'aridité $\leq 0,03$) sont caractérisées par une absence quasi totale de végétation, à l'exception de quelques arbustes dispersés. On y rencontre souvent un pastoralisme nomade. Les précipitations y sont très faibles, généralement inférieures à 100 mm par an, et peuvent être absentes durant de longues périodes.

Les zones arides (indice compris entre 0,03 et 0,20) sont dominées par l'élevage pastoral, tandis que l'agriculture n'est possible que dans les zones irriguées. La végétation naturelle y est clairsemée, composée principalement de graminées annuelles et vivaces, de plantes herbacées, ainsi que de quelques arbustes et petits arbres. Les précipitations annuelles sont très irrégulières et varient généralement entre 100 et 300 mm

Les zones semi-arides (indice entre 0,20 et 0,50) permettent la pratique de l'agriculture pluviale avec des rendements variables. L'élevage sédentaire peut également y être observé. La végétation y est plus diversifiée, comprenant des graminées, des herbacées

non graminéennes, ainsi que des arbustes, arbrisseaux et arbres. Les précipitations annuelles varient généralement de 300 à 600 mm selon les régimes climatiques saisonniers.

Enfin, des conditions d'aridité peuvent également être observées dans les zones subhumides (indice entre 0,50 et 0,75). Dans ce contexte, le terme « zones arides » est parfois utilisé au sens large pour regrouper les zones hyperarides, arides, semi-arides et subhumides secs (FAO, 1992).

2. Aridité climatique et aridité édaphique

L'aridité climatique : C'est un phénomène climatique conséquence d'une installation d'un climat sur une région de la planète, ce climat caractérisé par la faiblesse des précipitations moyennes annuelles et par le fort déficit des précipitations par rapport à l'évapotranspiration potentielle, on parle ici d'un concept climatique à référence spatiale (Floret et Pontanier, 1984).

Il ne faut pas confondre l'aridité avec la sécheresse. La sécheresse concerne une caractéristique météorologique temporelle d'une région donnée, caractérisée par le manque de précipitations pendant des épisodes limités dans le temps. Ainsi, la sécheresse est un phénomène qui s'applique à des périodes de l'année et non à des régions à caractéristiques climatiques permanentes (Floret et Pontanier, 1984).

L'aridité édaphique : Phénomène très fréquent dans les régions sèches, où le recouvrement végétal ne dépasse pas 30 à 40 %. Ce phénomène se produit lorsque le sol présente des caractéristiques provoquant la réduction de sa capacité potentielle d'emménagement de l'eau. Il s'agit donc d'un stress hydrique qui favorise la dégradation de la couverture végétale et, par conséquent, la dégradation de la biodiversité (Floret et Pontanier, 1984).

3. Caractéristiques physiques des zones arides et semi-arides

3.1. Le contexte climatique

Les régions sèches se caractérisent fondamentalement par une pénurie d'eau conjuguée à une forte instabilité des précipitations d'une année à l'autre. Ces territoires subissent l'influence de cellules de haute pression atmosphérique qui font obstacle aux perturbations humides. Les pluies, en plus d'être sporadiques, se manifestent fréquemment sous forme d'averses orageuses brèves mais particulièrement violentes (Viers, 1975).

Sur le plan thermique, ces écosystèmes sont soumis à des amplitudes de température extrêmes, qu'elles soient journalières ou saisonnières. Les phases diurnes se distinguent par une insolation intense générant de fortes chaleurs, tandis que les nuits subissent un refroidissement marqué, notamment durant la période hivernale (UICN, 2004).

3.2. La dynamique éolienne et la qualité de l'air :

La qualité de l'atmosphère dans les zones arides et semi-arides demeure tributaire des processus d'érosion éolienne. Le déficit ou la dégradation de la couverture végétale expose directement la surface du sol, facilitant ainsi l'envol de particules sédimentaires fines issues de la désagrégation des roches. Ce transport de poussière sur de grandes distances engendre fréquemment des tempêtes de sable de forte intensité (UICN, 2004).

3.3. Diversité paysagère et géomorphologique

Loin d'être uniformes, les reliefs des zones arides offrent une diversité paysagère remarquable, combinant des structures telles que les plateaux, les massifs montagneux, les formations dunaires, les plaines d'alluvions et les réseaux d'oueds intermittents. Ces configurations topographiques régulent les flux hydriques et dictent la distribution spatiale des peuplements végétaux.

Dans les zones de transition recevant un cumul pluviométrique légèrement supérieur, on assiste à l'émergence de formations de type steppe ou savane, marquant le passage vers des conditions bioclimatiques plus clémentes (UICN, 2004).

3.4 Caractéristiques pédologiques

Bien que présentant une grande hétérogénéité, les sols de ces milieux souffrent généralement d'une carence structurelle en matière organique et d'une rétention d'eau extrêmement limitée, ce qui restreint drastiquement leur potentiel productif.

Selon la FAO (2006, 2011), les sols des zones arides et semi-arides sont particulièrement sensibles à différents processus de dégradation qui affectent leur structure, leur fertilité et leur fonctionnement écologique. Parmi ces processus, on distingue principalement l'érosion, la compaction et la salinisation :

- ✦ L'érosion constitue l'un des phénomènes les plus importants. Elle peut être hydrique ou éolienne. L'érosion hydrique intervient lors d'épisodes pluvieux intenses et entraîne le ruissellement des eaux de surface, provoquant l'entraînement des particules fines et la perte de l'horizon superficiel fertile. L'érosion éolienne,

favorisée par la sécheresse et la faible couverture végétale, entraîne le transport de particules fines sur de longues distances (UNEP, 1997 ; Lal, 2001).

- ✦ La compaction des sols, souvent liée au surpâturage ou au passage répété d'animaux et d'engins, entraîne une diminution de la porosité, réduisant l'infiltration de l'eau et limitant le développement racinaire.
- ✦ La salinisation est fréquente là où l'évaporation potentielle dépasse largement les précipitations. L'eau du sol s'évaporant rapidement, les sels dissous remontent vers la surface par capillarité, dégradant les propriétés physico-chimiques du sol et limitant la germination (FAO, 2011 ; Oldman et al., 1991).

À long terme, ces processus combinés contribuent à une diminution importante de la productivité des terres et constituent l'un des principaux facteurs de désertification dans les régions arides.

3.5. Hydrographie et ressources en eau

La contrainte hydrique est une constante dans ces environnements où les ressources en eau de surface demeurent éphémères et strictement dépendantes des épisodes pluvieux. Par conséquent, les aquifères souterrains représentent la ressource stratégique majeure, bien qu'ils soient souvent constitués de nappes fossiles non renouvelables.

La pérennité de cette ressource est régie par une interaction complexe entre la pluviométrie, les propriétés physiques du sol, le relief et la densité du couvert végétal. Bien que localisées, les zones humides de ces régions jouent un rôle écologique et socio-économique de premier plan (UICN, 2004).

3.6. Modes d'occupation des terres et structures foncières

Les zones arides et semi-arides septentrionales sont caractérisées par une occupation des terres dominée par des parcours pastoraux extensifs, associés à des cultures pluviales ou irriguées (tableau 1). Dans ces milieux, les systèmes traditionnels de gestion foncière reposent sur une grande flexibilité et des droits d'usage adaptés, favorisant la mobilité des troupeaux (UICN, 2004).

Tableau 1 : Zones d'aridité, végétation et utilisation des sols dans les milieux arides.

Zone	Végétation	Utilisation des sols
Hyperaride	Accidentelle	Très limitée
Aride	Buissons et arbustes ligneux, quelques graminées pérennes et de nombreuses graminées annuelles	Pâturage
Semi-aride	Prairies, arbustes tropicaux et quelques savanes.	Pâturage pastoral, agriculture pluviale.
Subhumide sèche	Prairies, zones boisées et savanes, maquis, steppes	Pâturage et élevage, agriculture pluviale, agriculture irriguée, sylviculture

Source : Adapté de (FAO,1992 ;Floret et Pontanier,1984 et Le Houérou,1995).

4. Caractères biotiques et adaptations

4.1. Composante végétale

Du fait que les zones arides et semi-arides sont caractérisées par une rareté des précipitations et une forte variabilité spatio-temporelle, ces zones renferment une biodiversité végétale spécifique, figurée principalement sous trois formes (Barbault, 1983 ; Le Houérou, 1995) :

4.1.1. Végétation annuelle éphémère : Ces plantes apparaissent pendant la saison humide. Leur croissance se déroule sur une période très brève (la courte saison humide). Elles diffèrent des plantes pérennes par l'absence de caractéristiques xéro-morphiques prononcées. Leur croissance est accélérée, avec des racines superficielles et une taille réduite, formant des prairies denses temporaires. Elles passent la saison sèche sous forme de graines.

4.1.2. Végétation pérenne grasse (ou succulentes) : Ce sont des plantes de milieux très secs qui ont une capacité de stockage d'eau dans leurs tissus aquifères à faible transpiration pour une utilisation ultérieure pendant les saisons sèches.

4.1.3. Végétation pérenne non succulente : Elle regroupe le reste des plantes des régions arides et semi-arides : des plantes rustiques constituées principalement de buissons, d'arbres persistants, de graminées et de plantes ligneuses, On distingue :

- I. Les plantes vertes toute l'année appelées « Plantes persistantes ».
- II. Les plantes ayant une phase de dormance pendant la période froide (plantes caduques du froid).
- III. Les plantes ayant une phase de dormance pendant la période chaude (plantes caduques de sécheresse).

4.2. Caractères bromatologiques des espèces :

Dans le cadre des techniques de restauration basées sur la nature, le choix des espèces végétales est clé. Les caractères bromatologiques permettent d'identifier les espèces les plus adaptées et leur valeur pastorale (Daget et Poissonet, 1971) :

Valeur énergétique : Qualités nutritionnelles permettant l'assimilation par les organismes.

Appétibilité : Degré de préférence des animaux pour une plante (odeur, goût, structure, teneur en matière sèche).

Indice de qualité spécifique : Prend en compte la composition floristique et la qualité (échelle de 0 à 10) :

- Bonne valeur pastorale (BVP) : indice spécifique égal à 3.
- Moyenne valeur pastorale (MVP) : indice spécifique égal à 2.
- Faible valeur pastorale (FVP) : indice spécifique égal à 1.
- Sans valeur pastorale (SVP) : indice spécifique égal à 0.

4.3 Structure et stratégies adaptatives

La stratégie adaptative la plus pertinente que les plantes peuvent adopter est de limiter les pertes d'eau et d'obtenir autant d'eau que l'environnement puisse leur fournir. De ce fait, les zones arides et semi-arides sont dominées par les plantes les plus aptes à supporter le manque d'eau, appelées « xérophytes » (xeros : sécheresse et phytos : plante), et les plantes adaptées aux concentrations élevées de sels, les « halophytes », présentes dans les sols salés des dépressions et les sebkhas. (Le Houérou, 1995).

4.3.1. Le xérophytisme est la capacité des plantes à s'adapter ou à subsister sous des conditions de faible humidité. L'adaptation consiste à faire face au double problème de l'absorption et de la rétention d'eau.

4.3.2. L'absorption :

L'adaptation des plantes se présentent sous différentes formes :

- Accélération de la croissance des racines pour atteindre la nappe phréatique en profondeur (plusieurs mètres).
- Développement de racines latérales en largeur pour explorer le maximum d'espace.
- Persistance d'organes de survie dans le sous-sol (bulbes ou rhizomes) permettant le retour de la plante lors de la saison humide (Raven et al., 2014).

4.3.3. La rétention de l'eau : Les plantes développent plusieurs caractères pour réduire la perte d'eau par transpiration :

- a) **La microphyllie** : réduction de la surface des feuilles (feuilles très petites comme chez les genêts, en écailles chez le Tamarix, ou en épines chez les Cactacées).
- b) **L'aphyllie** : absence de feuilles, la chlorophylle se trouvant au niveau des tiges (ex : *Retama retam*).
- c) Chute des feuilles pendant la saison chaude.
- d) Développement d'une cuticule épaisse.
- e) La succulence (stockage de l'eau dans les tissus).
- f) Partie aérienne en forme de boule ou en coussinets (Raven et al., 2014)

4.4. Composante animale

Dans les zones arides et semi-arides, les animaux doivent survivre en affrontant deux facteurs limitants : le manque d'eau et les températures élevées, et par conséquent, le manque de ressources alimentaires. Ces animaux présentent des adaptations remarquables (Cloudsley-Thompson, 1996).

Parmi les animaux des zones sèches on note comme exemple :

- Camélidés : dromadaire (Afrique du Nord, Moyen-Orient), chameau (Asie centrale).
- Canidés : Fennec (Afrique du Nord).
- Félin : Chat des sables (Afrique du Nord, Asie).
- Bovidés : Oryx (Antilope du désert).
- Reptiles.

4.4.1. Les adaptations morphologiques :

On trouve :

- Organes surdimensionnés : oreilles riches en vaisseaux sanguins (Fennec) pour la thermorégulation, pattes longues pour éloigner le corps du sol chaud.
- Pelage adapté limitant l'échauffement.
- Écailles et téguments imperméables limitant la perte d'eau (reptiles, arthropodes).

4.4.2. Les adaptations physiologiques :

Les animaux ont des mécanismes physiologiques pour résister à la déshydratation dans les zones arides (Cloudsley-Thompson, 1996) :

- ✓ Restitution rapide de l'équilibre hydrique en buvant de grandes quantités d'eau (Dromadaire).
- ✓ Capacité d'élever la température corporelle pour éviter la transpiration.
- ✓ Refroidissement circulatoire pour protéger le cerveau.
- ✓ Estivation (sommeil estival) pour échapper aux conditions climatiques sévères.

4.4.3 Les adaptations comportementales :

- Le perchage (exemple : l'Agame des Hamadas sur les sommets des blocs pendant les heures chaudes).
- Recherche de microclimats (sous les plantes touffes ou dans des terriers), (Cloudsley-Thompson, 1996).

5. La dégradation des zones arides et semi-arides :

La dégradation des milieux naturels dans les zones arides et semi-arides a considérablement augmenté ces dernières décennies, principalement en raison de la surexploitation des ressources, liée à une croissance démographique rapide et à des changements socio-économiques. L'augmentation du cheptel et l'utilisation excessive des ressources entraînent divers processus de dégradation, tels que le défrichement et le surpâturage (Mohous, 2005 ; Nedjimi et Guit, 2012).

En Algérie, ce phénomène menace d'immenses espaces. La végétation, surtout dans les régions semi-arides, a subi des modifications physiologiques et floristiques profondes dues à des actions d'origine anthropozoogènes : incendies, coupes illicites et surpâturage.

6. Répartition des zones arides

6.1. Les zones arides et semi-arides à l'échelle mondiale

À l'échelle planétaire, les zones arides et semi-arides (figure 1) représentent une part majeure des terres émergées, couvrant entre 41 % et 47 % des surfaces continentales (UICN, 2004 ; UNCCD, 2011). Si se distingue par la proportion la plus élevée de ces milieux par rapport à son territoire, l'Afrique abrite les superficies arides les plus vastes, l'Australie (UICN, 2004). Au-delà de leur immensité géographique, ces espaces soutiennent des activités pastorales et agricoles vitales. Ils constituent ainsi une source essentielle de subsistance pour près de deux milliards de personnes, principalement dans les pays en développement où la dépendance directe aux ressources naturelles demeure extrêmement forte (UNCCD, 2011).

D'un point de vue scientifique, les zones arides sont définies à partir de l'indice d'aridité (P/ETP), correspondant au rapport entre les précipitations annuelles et l'évapotranspiration potentielle. Cet indice varie selon un gradient climatique permettant de distinguer les milieux hyperarides, arides, semi-arides et subhumides secs (UICN, 2004).

Malgré des conditions environnementales contraignantes, ces écosystèmes présentent une diversité biologique remarquable. De nombreuses espèces végétales et animales y ont développé des mécanismes d'adaptation spécifiques leur permettant de survivre dans des conditions de stress hydrique et thermique. Par ailleurs, plusieurs cultures agricoles importantes, telles que le blé, l'orge ou le millet, trouvent leur origine dans ces milieux (UICN, 2004).

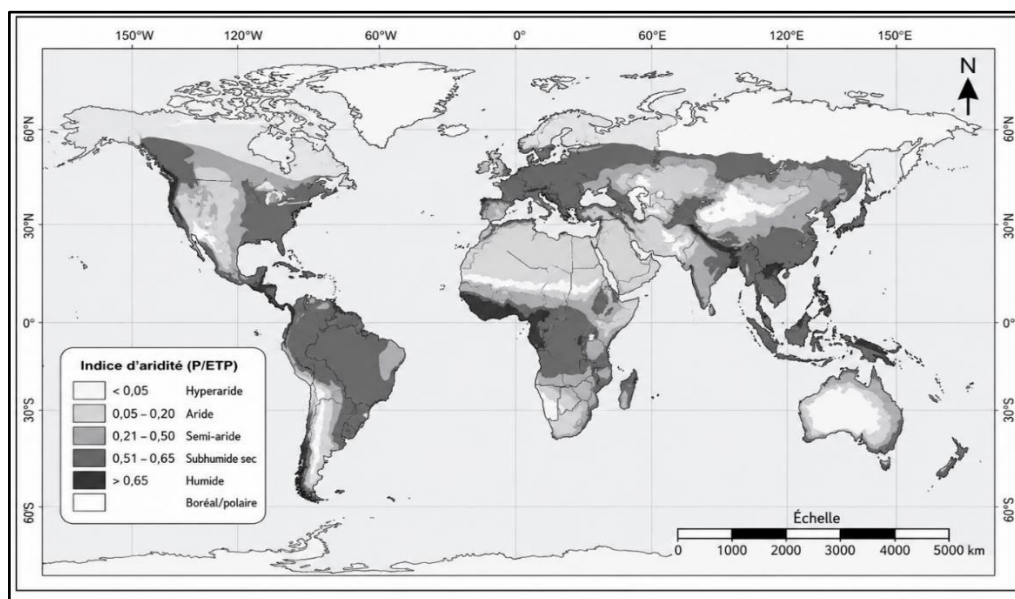


Figure 1 : Répartition des milieux arides à l'échelle mondiale selon l'indice d'aridité (P/ETP)), (FAO/AGLL/GIS (SDRN), 2002).

6.2. Les zones arides et semi-arides en Algérie :

En Algérie, les zones arides et semi arides occupent une superficie très importante par rapport à la surface totale du pays en représentant près de 84% de la superficie totale nationale. (Tableau 2).

Tableau 2 : Répartition des superficies S (10^3 km^2) et pourcentages (%) des zones arides et désertiques dans les pays du Maghreb.

Pays	Maroc (3)		Algérie (4)		Tunisie (1)		Libye (2)		Total	
Zones	S	%	S	%	S	%	S	%	S	%
Aride . . .	120	26,8	200	8,4	55	35,4	90	5,1	465	9,8
Désertique.	130	29,0	2 000	84,0	63	40,7	1 167	94,7	3 860	81,1
Total aride + désertiq.	250	55,8	2 200	92,4	118	76,1	1 257	99,8	4 325	90,9
Total Pays.	447		2 381		155		1 260		4 743	

(1) Le Houérou, 1969; (2) Le Houérou, 1965; (3) Ionesco, 1965; (4) Le Houérou, 1970.

Source : Données compilées d'après Ionesco (1965) et Le Houérou (1965, 1969, 1970).

En partant du Sud de l'Atlas tellien, qui est considéré comme la limite Nord des régions arides et semi-arides dans sa partie Est, on trouve un enchaînement de ces zones, en commençant par : les plaines et hauts plateaux semi-arides, limités au Sud par les chaînes de l'Atlas Saharien. Tandis qu'au niveau de l'Ouest du pays, ce domaine se trouve en contact direct avec le système littoral, suivies par les zones à climat aride au Sud de l'Atlas Saharien. Toutes ces zones sont limitées au Sud par le Sahara, un désert d'environ 2 millions de km², l'un des plus grands déserts du monde (Le Houérou 1995).

6.2.1. État de la désertification en Algérie

L'Algérie couvre une superficie de 2.381.741 km² caractérisée par trois écosystèmes distincts ; un écosystème montagneux localisé dans la zone tellienne, steppique compris entre l'isohyète 400 mm au Nord et 100 mm au Sud, s'étend sur 20 millions d'hectares et saharien représentant 80 % de la superficie totale partagé par de grandes unités morphologiques, les ergs sableux, les hamadas (plateaux caillouteux) et le Hoggar.

La répartition bioclimatique de l'Algérie constitue un élément essentiel pour comprendre la vulnérabilité des différents territoires au phénomène de désertification. En effet, les zones arides et semi-arides, caractérisées par une faible pluviométrie et une forte évapotranspiration, sont les plus exposées à la dégradation des terres. La figure 2 illustre cette répartition bioclimatique et met en évidence les régions les plus sensibles à ces processus.

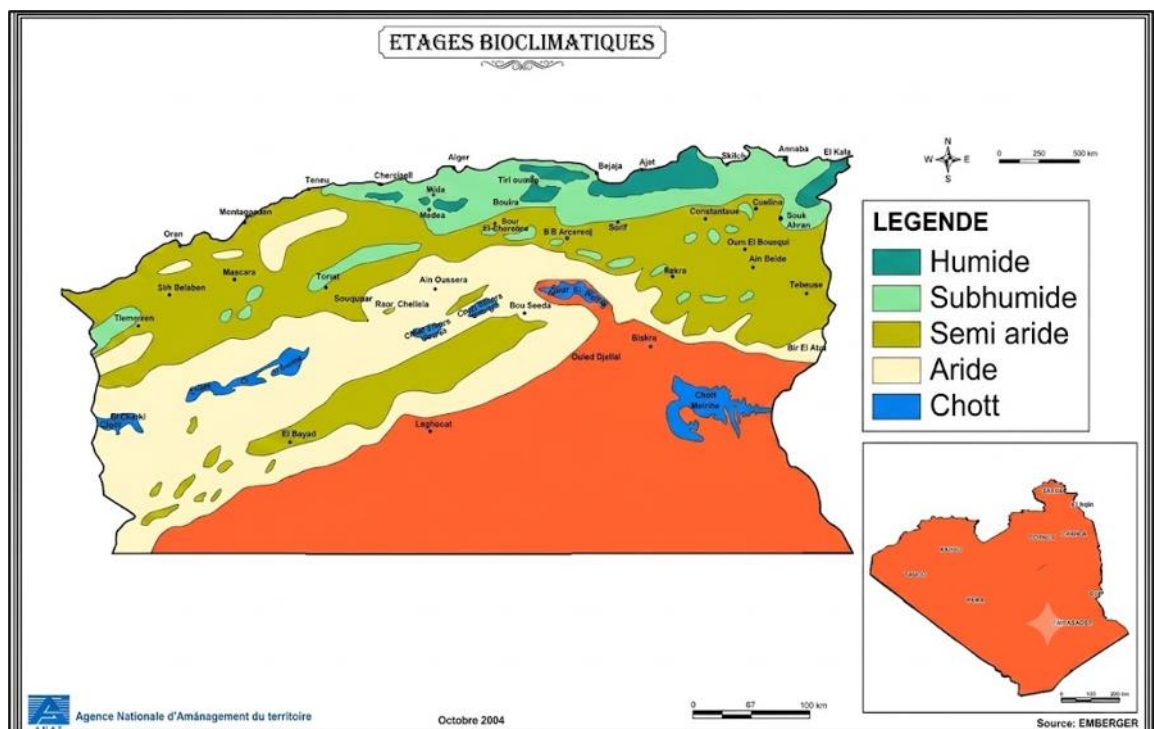


Figure 2 : Carte bioclimatique de l'Algérie (source ANAT, 2004).

Le processus de désertification affecte de grandes étendues et il est d'autant plus prononcé quand le climat est aride. Selon le rapport annuel de 2002 du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), l'Algérie connaît actuellement des problèmes environnementaux majeurs dus à plusieurs facteurs.

Plus de 12 millions d'hectares sont soumis à l'érosion hydrique qui provoque des pertes en sol importantes entraînant l'envasement des barrages. De plus, les 20 millions d'hectares que constitue la zone steppique sont menacés par la désertification, entraînant la perte des éléments fins du sol (120 millions de tonnes de sédiments par an) et des glissements de terrain. La superficie totale menacée par l'érosion hydrique est estimée à près de 10 millions d'hectares.

La précarité des conditions de vie des populations rurales les pousse à surexploiter les ressources naturelles pour satisfaire leurs besoins croissants, ce qui accentue davantage la dégradation des milieux. La perte des ressources en eau, provoquée par l'insuffisance d'alimentation des nappes phréatiques suite à la diminution de l'infiltration et l'envasement des barrages dont certains ont atteint un taux de sédimentation avoisinant les 100 %, aggrave la situation (Ghazi, 2004).

Par ailleurs, l'évolution climatique récente montre une diminution progressive des précipitations dans les Hauts Plateaux algériens depuis les années 1970 (Figure3). Les données pluviométriques de la station de Mécherai révèlent une baisse significative des précipitations moyennes annuelles, traduisant l'accentuation des conditions de sécheresse dans les régions semi-arides. Cette régression pluviométrique contribue directement à l'intensification des phénomènes de désertification et de dégradation des sols (Belaroui, 2012).

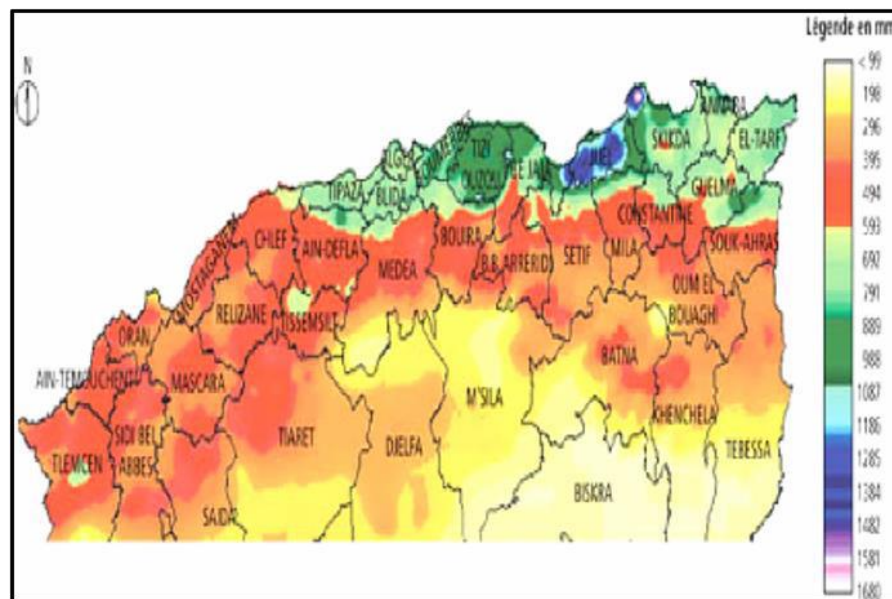


Figure3 : Répartition des précipitations dans le nord de L'Algérie (FAO 2005).

Face à cette dégradation, plusieurs stratégies nationales de lutte contre la désertification ont été mises en œuvre, notamment le projet du Barrage Vert (figure 4) lancé dans les années 1970.

Ce programme vise la création d'une ceinture forestière de protection contre l'ensablement et l'avancée du désert à travers les Hauts Plateaux algériens. Selon Dakiche (2006), ce projet s'étend sur environ 1500 km de longueur avec une largeur moyenne de 20 km.

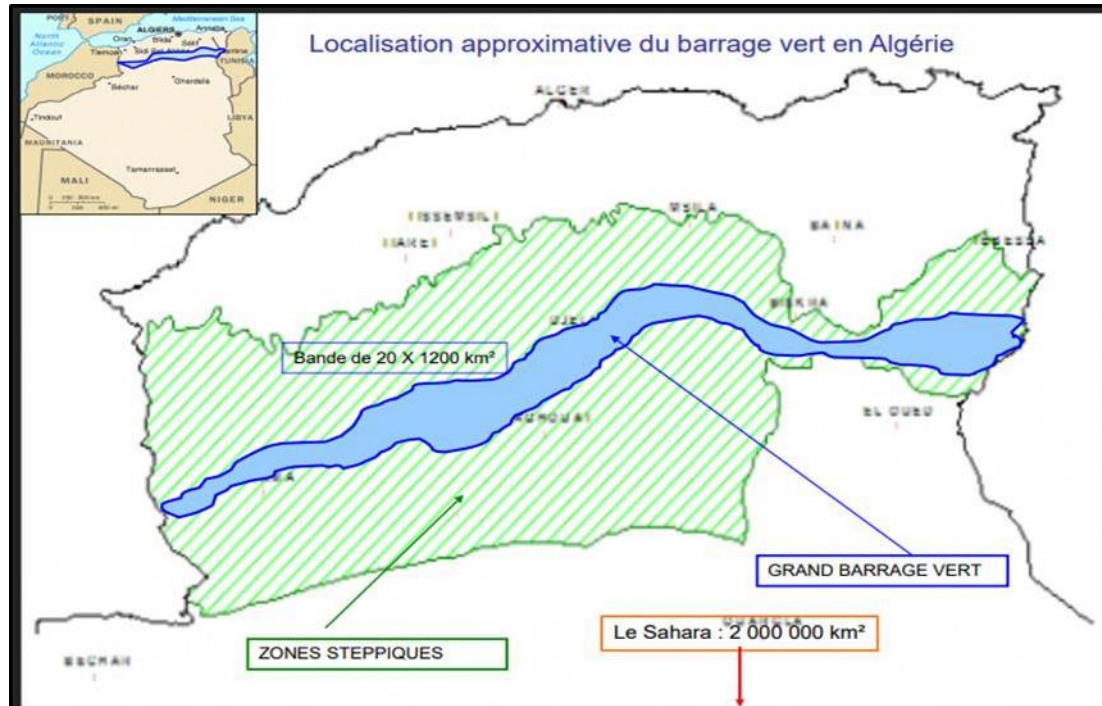


Figure 4 : Localisation et extension du Barrage Vert prévu en Algérie

Les travaux réalisés dans le cadre du Barrage Vert reposent sur le reboisement, la fixation des dunes, la restauration des parcours steppiques et l'amélioration des conditions socio-économiques des populations locales.

Sur le plan quantitatif, Nedjraoui (2003) classifie les étages climatiques en Algérie selon le cumul pluviométrique annuel moyen :

- Semi-aride : 300 à 600 mm/an.
- Aride : 100 à 300 mm/an.
- Saharien < 100 mm/an (occupant 89,5 % de la superficie totale de l'Algérie selon certaines classifications).

Selon Le Houérou (1995), la superficie des zones arides est de 216 000 km², et celle des zones hyperarides supérieures est de 386 000 km² (Tableau 3).

Tableau 3 : Superficies des zones arides d'Algérie en 10^3 km^2 (Le Houérou, 1995, modifié)

Pluviosité moyenne	La superficie
Semi- aride à humide $P > 400$	181
Aride supérieur $400 > P > 300$	59
Aride moyenne $300 > P > 200$	70
Aride inférieur $200 > P > 100$	87
Zone aride total	216
Hyper aride supérieur	386

7. Les facteurs de dégradation des zones aride et semi arides :

7.1. Les facteurs naturels :

Les zones arides et semi-arides constituent des systèmes écologiques fragiles, caractérisés par un équilibre instable. Selon l'UNCCD (1994), cette vulnérabilité est liée à la forte variabilité climatique et à la faible capacité de régénération.

7.1.1. Le climat aride et semi-aride :

La faiblesse et l'irrégularité des précipitations ($< 400 \text{ mm/an}$ en semi-aride, $< 200 \text{ mm/an}$ en aride), ainsi que leur intensité brutale, limitent la croissance et la régénération végétale (Middleton & Thomas, 1997).

7.1.2. Températures élevées et évapotranspiration :

À ces contraintes climatiques s'ajoutent des températures élevées, particulièrement marquées durant la saison estivale. La chaleur estivale intense entraîne une forte évapotranspiration, réduisant rapidement l'humidité du sol et augmentant le stress hydrique (UNEP, 2006 ; FAO, 2015).

7.1.3. Les processus d'érosion naturelle :

Dans ces milieux déjà fragiles, l'érosion joue un rôle important dans la dégradation des sols. Elle est d'autant plus active que le couvert végétal est faible ou discontinu.

L'érosion éolienne, causée par l'action du vent, entraîne le déplacement des particules fines du sol. Avec le temps, cela appauvrit progressivement les sols en éléments nutritifs et favorise l'apparition de surfaces de plus en plus désertifiées.

De son côté, l'érosion hydrique intervient lors d'épisodes pluvieux souvent intenses. L'eau de ruissellement emporte alors la couche superficielle du sol, qui est pourtant la plus fertile. Ce phénomène peut également conduire à la formation de ravines, modifiant durablement le paysage (FAO 2011 ; Lal 2001).

7.1.4. Fragilité de la couverture végétale :

La végétation des zones arides et semi-arides est généralement peu dense et composée d'espèces adaptées aux conditions de sécheresse. Ces plantes, bien qu'adaptées, présentent une croissance lente et une capacité de régénération relativement limitée.

Dans la pratique, cela signifie que le couvert végétal met beaucoup de temps à se reconstituer après une perturbation. Ainsi, lorsqu'une sécheresse prolongée ou un épisode d'érosion survient, la végétation recule rapidement, laissant le sol exposé aux agents climatiques (Le Houérou 2001 ; FAO 2015) .

7.2. Les facteurs anthropiques :

7.2.1. Le surpâturage :

Le surpâturage est généralement considéré comme l'un des principaux facteurs de dégradation des zones arides et semi-arides. Il apparaît lorsque la pression exercée par le cheptel dépasse la capacité naturelle de régénération des parcours.

Dans ce cas, la végétation est consommée de manière excessive et répétée, sans laisser le temps aux espèces de se régénérer. Progressivement, on observe une diminution de la biomasse végétale ainsi qu'une disparition des espèces les plus sensibles et les plus appréciées. Le milieu devient alors de plus en plus ouvert, laissant le sol directement exposé aux agents d'érosion (Le Houérou 2001 ; FAO 2011).

7.2.2. Défrichement et perte du couvert végétal :

Les activités humaines, notamment l'extension des terres agricoles, la collecte du bois de chauffage et l'urbanisation, contribuent également à la réduction progressive du couvert végétal naturel.

La suppression de cette couverture végétale protectrice a des conséquences directes sur la stabilité du milieu. En effet, le sol se retrouve exposé à l'action combinée du vent et des précipitations, ce qui favorise l'érosion. À cela s'ajoute une diminution progressive de la fertilité, ainsi qu'une perturbation de l'équilibre écologique global (FAO 2001 ; UNEP 2006).

7.2.3. Les incendies :

Les incendies représentent également un facteur non négligeable dans la dégradation des milieux arides et semi-arides, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine.

Ils entraînent une destruction rapide de la couverture végétale ainsi qu'une perte importante de la biomasse et des semences présentes dans le sol ou sur les plantes. Après un incendie, le sol reste généralement nu pendant une période plus ou moins longue, ce qui le rend particulièrement vulnérable à l'érosion. De plus, la reconstitution de la végétation est souvent lente dans ces environnements contraignants (IPCC 2019 ; FAO 2015).

7.2.4. L'agriculture non durable :

Dans les zones arides et semi-arides, certaines pratiques agricoles non adaptées aux conditions locales contribuent fortement à la dégradation des sols. L'absence de mesures de conservation et de gestion rationnelle de l'eau accentue l'épuisement progressif des ressources naturelles.

Lorsque les terres sont exploitées de manière intensive et continue, sans période de repos ni protection suffisante, cela conduit à une diminution de la fertilité, une dégradation de la structure du sol et, à long terme, à une baisse notable de la productivité agricole (FAO 2015 ; Lal 2001)

7.2.5. Pression démographique et mutations socio-économiques :

La croissance démographique, associée aux transformations socio-économiques, exerce une pression croissante sur les ressources naturelles dans les zones arides et semi-arides. Les besoins en eau, en terres agricoles et en énergie augmentent continuellement, ce qui entraîne une intensification de l'exploitation des écosystèmes.

Dans plusieurs cas, cette situation conduit à une extension des activités agricoles et pastorales vers des zones fragiles, initialement peu adaptées à une exploitation intensive. Cela provoque progressivement un déséquilibre écologique et une accélération des processus de dégradation (Reynolds et al. 2007 ; UNCCD 1994).

8. Échec des plantations en zones arides et semi-aride :

Les programmes de plantation et de reboisement dans les zones arides et semi-arides sont considérés comme des outils essentiels dans les stratégies de lutte contre la désertification et la dégradation des terres. Cependant, leur efficacité reste souvent limitée, voire insuffisante, en raison des conditions écologiques particulièrement contraignantes qui caractérisent ces milieux.

En Algérie, cette réalité est clairement observable dans les Hauts Plateaux ainsi que dans le périmètre du Barrage Vert, où de nombreux programmes de reboisement ont connu des résultats contrastés et des taux de mortalité élevés (Boudjadja et al., 2003). Plusieurs études mettent en évidence que l'échec des plantations n'est généralement pas dû à une cause unique, mais à l'interaction de plusieurs facteurs limitants (Le Houérou, 2005) :

8.1 Les contraintes climatiques :

Le facteur déterminant de l'échec reste le déficit hydrique chronique. Les faibles précipitations (souvent inférieures à 300 mm/an), leur irrégularité spatio-temporelle ainsi que la fréquence des années de sécheresse limitent drastiquement l'apport en eau nécessaire à l'établissement des jeunes plants (Nedjraoui & Bedrani, 2008). De plus, une forte évapotranspiration potentielle, surtout en été, impose un stress hydrique que les jeunes plants à système racinaire peu développé ne peuvent supporter, entraînant un dessèchement rapide (Boudjadja et al., 2003).

8.2. Les contraintes édaphiques (pédologiques) :

Les sols des zones arides présentent souvent des caractéristiques physiques et chimiques défavorables. La faible teneur en matière organique réduit la capacité de rétention d'eau et la structure du sol. La formation d'une croûte superficielle (encroûtement) suite aux pluies violentes empêche l'infiltration de l'eau et bloque la levée des semis ou l'installation des racines (Valentin et al., 2005). Par ailleurs, la compaction du sol et l'érosion éolienne exposent souvent les racines superficielles des jeunes plants, causant leur mortalité (FAO, 2015).

8.3. Les contraintes techniques et anthropiques :

Le manque de suivi technique après la plantation est une cause majeure d'échec. Souvent, les opérations de plantation s'arrêtent après la mise en terre, sans apport d'eau complémentaire, sans protection contre le pâturage et sans entretien (désherbage). De plus, le choix d'espèces forestières mal adaptées aux conditions locales (par exemple, l'utilisation intensive de pins dans des zones trop sèches) a conduit à des échecs coûteux (Boudjadja et al., 2003).

Enfin, le surpâturage empêche toute régénération naturelle et détruit les plants nouvellement installés.

Face à ces limites des méthodes conventionnelles, les approches fondées sur la nature (NBS) apparaissent comme une alternative pertinente pour améliorer la résilience des plantations (Cohen-Shacham et al., 2016).

9. Techniques basées sur la nature (NBS) :

9.1. Définition et approches :

Les techniques basées sur la nature (Nature-Based Solutions, NBS) constituent une approche durable et innovante pour restaurer les écosystèmes dégradés. Selon l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN), les NBS sont définies comme des « actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les défis de la société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (IUCN, 2016).

Contrairement aux approches conventionnelles de restauration, souvent fondées sur des interventions lourdes (terrassements mécaniques massifs) et l'utilisation d'intrants externes (engrais chimiques, irrigation intensive), les NBS privilégient des actions à faible impact environnemental et se basent sur les dynamiques naturelles des écosystèmes (Maes et Jacobs, 2017).

Dans le contexte des zones steppiques et arides, les NBS se matérialisent par :

La restauration hydrologique : L'utilisation de techniques de collecte des eaux de ruissellement, telles que les banquettes, les demi-lunes ou les cuvettes, pour capter l'eau de surface et la diriger vers les racines des plantes, imitant ainsi les processus naturels d'infiltration (Ouessar et al., 2006).

La gestion des sols : L'utilisation de paillis organiques ou l'introduction d'espèces légumineuses pour améliorer la structure du sol, augmenter la matière organique et stimuler l'activité microbienne, ce qui améliore la rétention hydrique (FAO, 2017).

La facilitation écologique : L'utilisation de plantes « nourrices » pour créer un microclimat favorable (réduction de la température, augmentation de l'ombre) permettant l'installation de jeunes plants plus fragiles (Padilla & Pugnaire, 2006).

Ces techniques contribuent à la conservation de l'eau, à la stabilisation des sols et à la réduction des processus d'érosion, tout en favorisant la régénération naturelle de la végétation et l'amélioration durable des services éco systémiques (FAO, 2017 ; IPBES, 2018).

9.2 Importance de la restauration écologique

La restauration écologique ne se limite pas à la simple plantation d'arbres ; elle constitue un processus délibéré visant à rétablir l'intégrité des écosystèmes dégradés, y compris leur structure, leurs fonctions écologiques et leur productivité à long terme (SER, 2004 ; FAO, 2019). Dans le contexte fragile des zones arides et semi-arides, cette approche revêt une importance capitale pour plusieurs raisons interdépendantes. Premièrement, elle joue un rôle déterminant dans l'amélioration de la qualité des sols. En favorisant l'apport de matière organique et en stimulant l'activité biologique, la restauration permet de reconstituer la structure du sol, d'augmenter sa capacité de rétention hydrique et de lutter contre les processus d'érosion éolienne et hydrique (Lal, 2015 ; FAO, 2017).

Deuxièmement, la restauration écologique agit comme un frein efficace à l'avancée de la désertification. En rétablissant un couvert végétal continu et fonctionnel, elle protège le sol de l'impact direct des rayons solaires et du vent, brisant ainsi le cycle vicieux de la dégradation (UNCCD, 1994 ; Le Houérou, 1995). Parallèlement, l'augmentation de la couverture végétale contribue à l'enrichissement de la biodiversité locale, offrant des habitats et des ressources alimentaires pour la faune sauvage. Enfin, ces actions améliorent globalement les conditions environnementales en créant des microclimats plus favorables, en régulant le cycle de l'eau et en augmentant la résilience de l'écosystème face aux perturbations climatiques futures (Maes & Jacobs, 2017 ; IPBES, 2018).

9.3. Amélioration de la réussite des plantations

La réussite des projets de reboisement dans les zones arides est conditionnée par une synergie complexe de facteurs clés. Parmi ceux-ci, la disponibilité en eau constitue la variable la plus limitante, dictant les périodes optimales de plantation et la survie des plants (Nedjraoui & Bedrani, 2008). La qualité du sol, sa profondeur et sa structure chimique déterminent quant à elles la capacité d'enracinement des jeunes plants (Valentin et al., 2005). Par ailleurs, le choix des espèces végétales doit être rigoureusement adapté aux contraintes bioclimatiques locales, privilégiant les espèces xérophiles indigènes. Enfin, les techniques de plantation employées, notamment la gestion de l'espace et la préparation du sol, influencent directement l'établissement de la végétation (Boudjadja et al., 2003).

Dans cette optique, l'utilisation des techniques basées sur la nature (NBS) modifie positivement cette équation en optimisant ces différents facteurs. Ces solutions permettent d'améliorer significativement le taux de survie des plants, notamment par la création de micro-bassins de réception d'eau qui garantissent un approvisionnement hydrique suffisant durant les phases critiques de croissance (Ouassar et al., 2006). De plus, en favorisant les interactions positives entre les plantes et leur environnement, les NBS stimulent la croissance végétale et accélèrent la biomasse produite (Padilla & Pugnaire, 2006). Enfin, elles renforcent la résistance au stress hydrique des peuplements, leur permettant de survivre et de se développer même lors d'épisodes de sécheresse prolongés où les méthodes conventionnelles échoueraient (Cohen-Shacham et al., 2016).

9.4. Travaux antérieurs :

Plusieurs études menées à l'échelle internationale, régionale et locale ont mis en évidence l'efficacité des techniques basées sur la nature (NBS) dans la restauration des écosystèmes arides et semi-arides.

À l'échelle internationale, Cohen-Shacham et al. (2016) ont démontré, à travers une revue bibliographique exhaustive, que l'intégration de processus naturels permet d'améliorer significativement la résilience des écosystèmes face aux changements climatiques. L'étude souligne que les solutions inspirées de la nature sont souvent plus rentables économiquement à long terme que les infrastructures « en dur » (IUCN, 2020).

Dans le bassin méditerranéen et l'Afrique du Nord, les travaux de Ouassar et al. (2006) dans les zones arides de Tunisie ont prouvé l'efficacité des techniques de collecte des eaux (banquettes). Leurs résultats ont montré que ces techniques peuvent multiplier par 5 à 10 le

taux de survie des plants d'olivier et d'arbres fruitiers en zones sèches, tout en augmentant significativement les rendements agricoles.

En Algérie, plusieurs recherches ont été menées pour évaluer la restauration des parcours et du Barrage Vert. Benabderrahmane et al. (2006) ont travaillé sur la réhabilitation des steppes dégradées dans la région de Naâma (Sud-Ouest algérien). Leurs travaux ont montré que l'association d'espèces locales adaptées (comme *Atriplex halimus*) avec des techniques de protection contre l'érosion permet de restaurer rapidement le couvert végétal et de diminuer l'érosion éolienne.

De même, une étude menée par Nedjraoui (2003) sur la dynamique de la végétation steppique a souligné que la régénération naturelle assistée (protéger une zone pour laisser la nature agir) est souvent plus efficace que les reboisements artificiels intensifs, à condition de maîtriser la pression anthropique (notamment le pâturage).

Ces travaux confirment que les approches fondées sur la nature constituent une voie prometteuse pour améliorer la réussite des plantations et assurer la durabilité des actions de restauration dans les milieux arides et semi arides.

Chapitre (02) :

Zone d'étude et méthodologie

Introduction :

La compréhension du fonctionnement des écosystèmes des zones arides et semi-arides ainsi que l'évaluation de l'efficacité des techniques basées sur la nature nécessitent une connaissance approfondie du contexte biophysique et socio-environnemental du site d'étude. Le présent chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, de ses caractéristiques géographiques, climatiques, pédologiques et écologiques, ainsi qu'à la méthodologie adoptée.

L'étude a été menée dans la commune d'Aïn Skhouna, située dans la wilaya de Saïda, au sein des zones arides et semi-arides de l'Algérie. Ce site se caractérise par des conditions climatiques contraignantes, marquées par une faible pluviométrie, une forte variabilité interannuelle des précipitations et une fragilité importante des sols, ce qui en fait un terrain pertinent pour l'évaluation des techniques de restauration écologique.

Ce chapitre présente également la méthodologie adoptée afin d'analyser les pratiques de plantation et d'évaluer les techniques basées sur la nature mises en œuvre dans la zone d'étude. Il vise ainsi à fournir le cadre nécessaire à l'interprétation des résultats et à l'analyse de la pertinence de ces techniques dans l'amélioration de la réussite des plantations dans les zones arides et semi-arides, cette méthodologie vise à :

- Améliorer les conditions d'installation des plantes,
- Augmenter la capacité de rétention en eau du sol,
- Comparer l'efficacité des différentes techniques de plantation,
- Identifier la ou les techniques les plus adaptées aux conditions arides et semi-arides.

1. Localisation géographique et cadre administratif :**1.1 Présentation de la Commune d'Aïn Skhouna (Wilaya de Saïda)**

La commune d'Aïn Skhouna est située sur les hautes plaines steppiques de la région ouest. Elle couvre une superficie de 44,04 km² et compte environ 7500 habitants (Tabet Aoul, Benmahdi, 2018).

1.2. Limites administratives :

La commune est limitée au nord par la commune de Roggassa (wilaya d'El Bayadh), tandis qu'elle est bordée à l'est ainsi qu'au nord par la wilaya de Tiaret. À l'ouest et au nord, elle est également limitrophe de la commune de Mâamora, relevant de la wilaya de Saïda (figures 5).

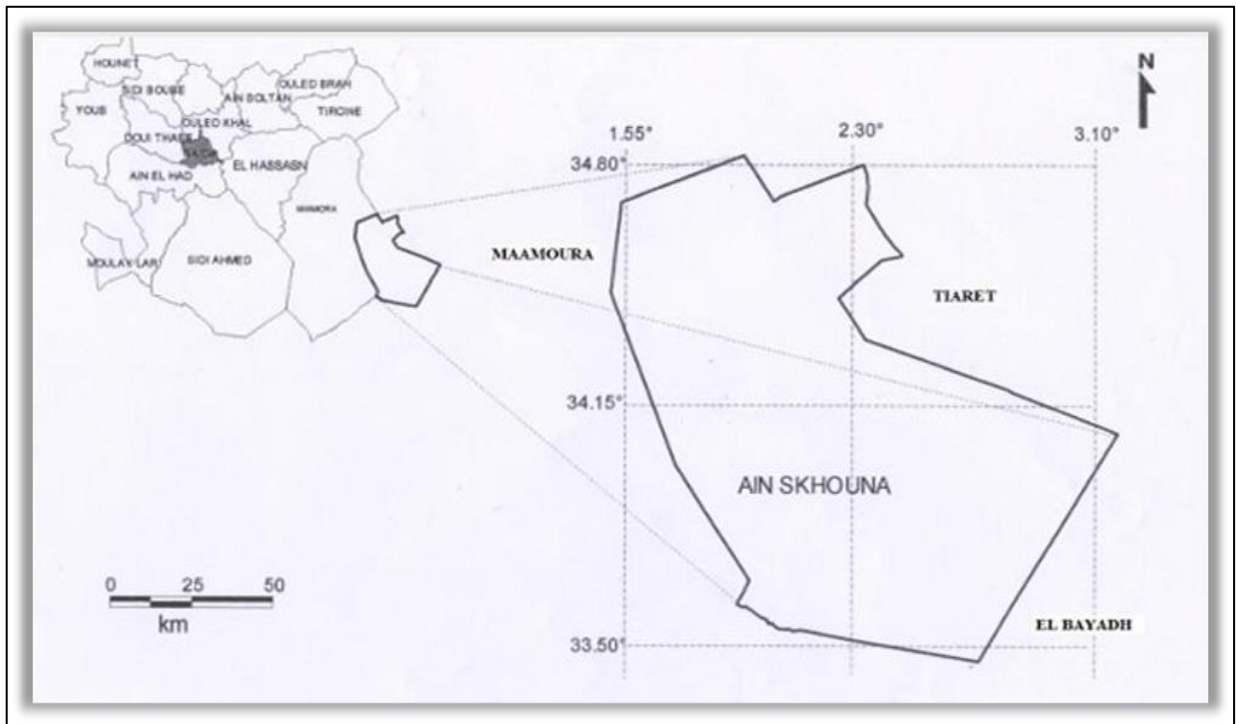


Figure 5 : Limites géographiques de la commune d'Aïn Skhouna (APC de Aïn Skhouna 2012).

La partie sud de la commune, est occupée sur environ 12 000 ha, par le bassin versant du Chott El Chergui, caractérisé par des eaux saumâtres en surface et une biodiversité remarquable. Vue du ciel, la commune présente l'allure d'une île. La zone d'épandage d'Aïn Skhouna s'étend sur le vaste bassin du Chott El Chergui, couvrant un peu plus de 2000 km², bordé au nord par les pieds-monts de l'Atlas tellien et au sud par l'Atlas saharien (Tabet Aoul, 2018).

1.3. Coordonnées géographiques de la commune :

Tableau 4 : Coordonnées géographiques de la zone d'étude

Coordonnées	Point 1	Point 2
Latitude	34.50446°	34°30'16''N
Longitude	0.84412°	0°50'39'' E

1.4. Localisation de la parcelle expérimentale « Station de Faïd Rmel » : par rapport à Ain Sekhouna :

La station de recherche scientifique de l'Institut National de Recherche Forestière (INRF) est localisée au niveau du chef-lieu communal d'Aïn Skhouna. Les expériences sont menées dans la zone de Faïd Rmel, située à environ 5 km au nord- Est de l'agglomération communale. Plusieurs essais y ont été conduits concernant le développement de plantations fourragères et la diversification des essences du barrage vert (Figure 6).

2. Caractéristiques générales de la zone d'étude

La zone d'étude est située à Aïn Skhouna sur les parcours du plateau occidental , Ce sont des plaines semi-arides à typologie agro-pastorale, caractérisées par de vastes étendues, occupées par une végétation steppique dégradée (Moulay, 2022).

Selon un rapport de l'INRF)2006(, la majeure partie du territoire de la commune d'Aïn Skhouna, soit 288 kilomètres carrés, est constituée de prairies, les terres cultivées ne représentant que 28,7 km² soit 7,09% du territoire de la commune, qui se situe principalement dans Dait Zeraguet (irrigation projetée) dans le nord.

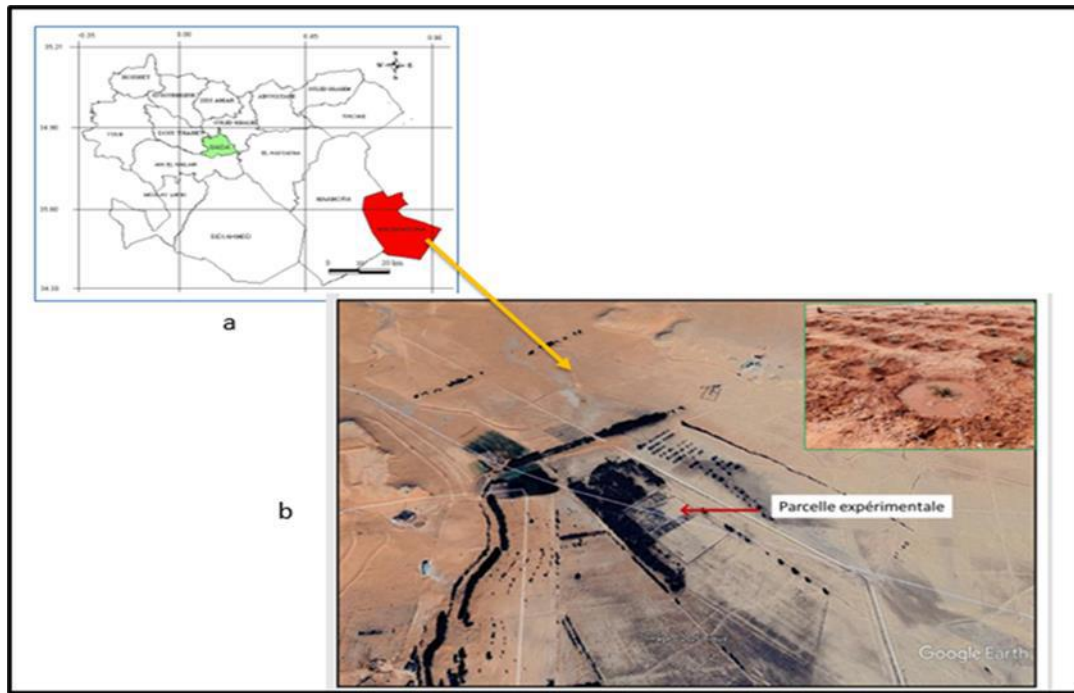


Figure 6 : a) Situation de Aïn Skhouna par rapport au chef-lieu Saida ; b) localisation de la parcelle expérimentale.

2.1. Caractéristiques naturelles de la zone d'étude

L'analyse du cadre climatique repose sur l'étude des variations des températures et des précipitations collectées par l'Institut National de Recherche Forestière (INRF).

2.1.1. Cadre climatique

La zone d'étude est située dans l'étage bioclimatique aride supérieur caractérisé par un hiver froid et un été chaud.

2.1.1.1 Les températures :

La température moyenne annuelle est d'environ $18,05^{\circ}\text{C}$, le mois le plus chaud est juillet avec $37,23^{\circ}\text{C}$, la température moyenne est de $26,3^{\circ}\text{C}$. Janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de $7,22^{\circ}\text{C}$ et une température minimale moyenne de $1,48^{\circ}\text{C}$. La région enregistre un total de 48 jours de gelées hivernales et printanières par an (Benkhettou et al., 2022).

2.1.1.2 Les précipitations :

La pluviométrie annuelle moyenne de la région est de 255,9 mm, ce qui traduit un régime pluviométrique relativement faible, caractéristique des zones semi-arides. La répartition saisonnière des précipitations influence fortement la disponibilité en eau et le développement de la végétation (Benkhettou et al., 2022).

2.1.1.3. L'humidité relative de l'air :

L'humidité relative moyenne de l'air présente une importante variation saisonnière. Elle atteint sa valeur maximale en décembre avec 74,5 %, tandis qu'elle diminue jusqu'à 37 % en juillet. Les valeurs extrêmes enregistrées varient entre 14,6 % durant les périodes les plus sèches et 94,7 % pendant les périodes les plus humides (RAMSAR, 2019).

2.1.1.4. Le régime des vents :

La région est souvent soumise à des vents violents qui soufflent du nord-ouest en hiver et du sud en été. Les vents chauds sont fréquents et durent en moyenne 22 jours par an (RAMSAR, 2019).

2.1.1.5. La relation climat-végétation :

L'étude de la relation climat-végétation repose efficacement sur l'analyse des diagrammes ombrothermiques selon Gaussen et Bagnouls. Ces diagrammes permettent de déterminer la durée et l'intensité de la saison sèche. Selon ce bioclimatogramme, un mois est considéré comme sec lorsque les précipitations (P) sont inférieures ou égales au double de la température ($2 T$) ($P \leq 2 T$). Par ailleurs, Emberger (1942) souligne la nuance entre climat méditerranéen, météorologique et écologique ; un climat peut en effet présenter des caractéristiques méditerranéennes sur le plan météorologique sans l'être écologiquement si la sécheresse estivale n'est pas suffisamment accentuée (Bagnouls & Gaussen, 1957 ; Emberger, 1942).

2.2.2. Cadre géologique :

La géologie de la région est caractérisée par une prédominance de :

- Calcaires et dolomies marno-calcaires.
- Marnes argileuses et gypseuses.

2.2.3. Cadre pédologique :

Le sol est majoritairement inculte et dénudé avec des affleurements de roche calcaire. L'évolution pédogénétique de la dépression d'Aïn Skhoua est influencée par un SAR (Sodium Adsorption Ratio) supérieur à 15.

2.2.3.1 Organisation lithostratigraphique :

▪ Le quaternaire récent :

Il est constitué de dépôts limono-sableux récents sur lesquels s'installe la végétation actuelle. Ce système épouse les formes actuelles des sols et des cours d'eau (Clinckx, 1969)

▪ Le tertiaire continental :

Il est formé à la base par des formations calcaires, des argiles grises gypseuses dans lequel s'est constituée la nappe de l'albien ou du crétacé continental.

▪ Le sénonien (crétacé supérieur) :

Le Sénonien correspond à des formations du Crétacé supérieur composées principalement de calcaires, de calcaires marneux et parfois de niveaux dolomitiques. Ces formations affleurent localement à proximité de la zone de captage d'Aïn Skhouna et participent à la structuration géologique régionale.

Les calcaires sénoniens présentent souvent une fracturation importante favorisant la circulation et le stockage des eaux souterraines. Cette propriété explique leur intérêt hydrogéologique dans plusieurs régions des Hautes Plaines occidentales. Les niveaux marneux intercalés jouent quant à eux un rôle semi-imperméable contrôlant localement l'écoulement des eaux.

D'un point de vue morphologique, les formations sénoniennes donnent naissance à des reliefs tabulaires et à des corniches calcaires relativement résistantes à l'érosion (Clinckx, 1969 ; Vila, 1980 ; Boudjadi, 2010).

▪ Le Bajo-Bathonien (Jurassique moyen) :

. Le Bajo-Bathonien, appartenant au Jurassique moyen, est constitué principalement de calcaires compacts, de dolomies et d'argiles gris-vert. Ces formations traduisent un environnement de dépôt marin relativement peu profond ayant dominé la région durant le Jurassique (Laffitte, 1939).

Les calcaires et dolomies présentent fréquemment une fissuration et une karstification qui favorisent l'infiltration des eaux météoriques. Ces formations constituent ainsi des réservoirs hydrogéologiques potentiels dans plusieurs secteurs de l'Atlas saharien et des Hautes Plaines. Les niveaux argileux intercalés influencent localement la perméabilité et le comportement mécanique des terrains.

Du point de vue structural, ces formations jurassiques participent à l'ossature géologique profonde de la région et apparaissent généralement sous forme d'affleurements localisés dans les zones de relief (Clair, 1955 ; Clinckx, 1969 ; Guiraud, 1973).

2.2.4. Cadre géomorphologique

La zone d'épandage de Aïn Skhouna est une dépression bordant le Chott El Chergui (orienté NE-SO). Les bords de cette dépression correspondent aux cotes 1000 m et le fond aux cotes 985-990 m. C'est une dépression alluvionnaire constituée d'éléments fins (limons et sables fins), (Figure7).

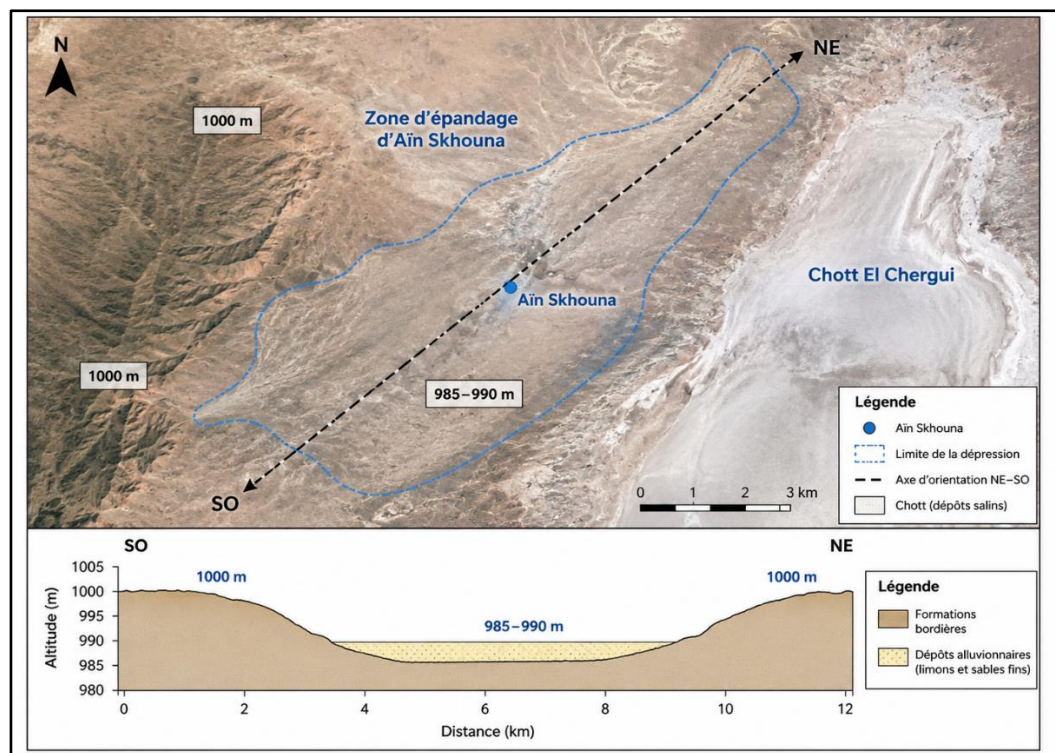


Figure 7 : Schéma géomorphologique simplifié de la dépression d'Aïn Skhouna et coupe topographique SO-NE.

La coupe illustre l'organisation du relief avec les sédiments fins accumulés dans le fond de la dépression, encadrés par des formations plus élevées aux extrémités.

2.2.5. Cadre hydrogéologique

Le Chott El Chergui est un bassin fermé. La hauteur moyenne des eaux est d'environ 250 mm. Les terrains argilo-sableux surmontant les calcaires créent un obstacle à la sortie des eaux. On y distingue des

sources permanentes et le Chott renferme trois nappes importantes.

Plusieurs forages ont été réalisés dans l'Albien entre 1948 et 1960.

Le Chott El Chergui joue un rôle hydrogéologique important : il maîtrise les crues, permet la rétention saisonnière de l'eau et la recharge des nappes aquifères. C'est un des rares Chotts culminant à plus de 1000 mètres d'altitude.

2.2.6. La végétation :

La végétation de la région est caractérisée par des formations steppiques dominées par l'Alfa (*Stipa tenacissima*), l'Armoise blanche (*Artemisia herba-alba*) et le Sparte (*Lygeum spartum*), ainsi que par des formations halophiles localisées dans les zones humides. Les espèces médicinales sont particulièrement abondantes dans les faciès à Armoise blanche, Alfa et Sparte. La composition floristique et le recouvrement végétal varient selon les conditions écologiques, notamment la nature du sol, la disponibilité en eau et les caractéristiques bioclimatiques. Cette diversité floristique traduit la richesse écologique du site d'étude et constitue un indicateur important de son état de conservation (Moulay, 2022).

3. Présentation des espèces étudiées :

Dans le cadre de cette étude expérimentale menée dans la commune de Aïn Skhouana, le choix des espèces s'est porté sur des essences forestières et ornementales dont l'adaptation spontanée aux zones arides et steppiques n'est pas habituelle. L'objectif principal est d'évaluer, à travers un test de reboisement, l'efficacité des Techniques Basées sur la Nature (NBS) à améliorer la résilience de ces espèces et à assurer leur survie dans un milieu contraignant.

Nous avons sélectionné trois espèces pour tester leur tolérance au stress hydrique et pédologique :

2.3.1. Le Faux Poivrier (*Schinus molle*)

- **Famille :** *Anacardiaceae*.
- **Description morphologique :** Arbre à feuillage persistant, pouvant atteindre 10 mètres. Ses feuilles sont composées et ressemblent à celles de laurier, il produit des baies rouges roses (d'où le nom "Poivrier rose" pour *Schinus terebinthifolius*) (figure8).

- **Exigences écologiques :**

Originnaire d'Amérique du Sud, cette espèce s'est naturalisée dans plusieurs régions méditerranéennes. Elle est connue pour sa rusticité et sa capacité à pousser sur des sols pauvres et secs, offrant souvent un ombrage dense.

- **Intérêt dans l'étude (Test NBS) :**

L'expérimentation avec le Faux Poivrier vise à évaluer son potentiel comme essence ornementale et de protection dans les aménagements urbains ou péri-forestiers de la wilaya de Saïda.

Le test consiste à observer son agressivité de croissance face à l'aridité et son impact sur la microfaune du sol, tout en vérifiant que les techniques NBS permettent de contrôler sa demande en eau.



Figures 8 : a) Faux Poivrier plante jeune / b) arbre de faux Poivrier plante (Boutalbi, Dahmani, 2026).

2.3.2. L'Olivier de Bohême (*Elaeagnus angustifolia*)

- **Famille :** *Elaeagnaceae*.

- **Appellation commune :** Olivier de Bohême, Chalef d'angleterre.

- **Description morphologique :** C'est un arbuste ou petit arbre pouvant atteindre 3 à 7 mètres de haut. Il se caractérise par un port dressé et des feuilles étroites, lancéolées, vert-grisâtre dessus et argentées dessous en raison de la présence de poils (tomenteuses), ce qui lui confère une capacité de réflexion de la lumière.

- **Exigences écologiques :**

- Bien qu'originale de régions tempérées, cette espèce est réputée pour sa grande rusticité et sa tolérance au froid comme au chaud.
- Elle possède la capacité de fixer l'azote atmosphérique grâce à une symbiose racinaire (actinorhizes), ce qui lui permet de se développer sur des sols pauvres, dégradés et même salins (Figure 10).

- **Intérêt dans l'étude (Test NBS) :**

- L'introduction de l'Olivier de Bohême à Aïn Skhoune vise à tester son rôle comme "espèce améliorante du sol". Sa capacité à survivre en milieu aride en fait un candidat intéressant pour créer des brise-vent et stabiliser les sols avant l'introduction d'espèces plus exigeantes (figure 9).



Figures 9 : a) arbre d'Olivier de Bohême, / b) Olivier de Bohême plante jeune (Boutalbi, Dahmani, 2026).

2.3.3 Le Frêne (*Fraxinus* sp.)

- **Famille :** *Oleaceae*.
- **Description morphologique :** Le Frêne est un arbre de taille moyenne à grande, à feuilles caduques composées de plusieurs folioles. Il possède un système racinaire puissant et traçant.

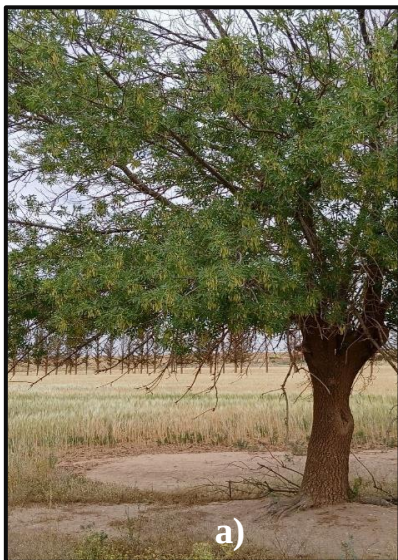
- **Exigences écologiques :**

Le genre *Fraxinus* comprend des espèces variées. Certaines, comme le Frêne oxyphylle (*Fraxinus oxyphylla*), sont méditerranéennes et présentent une certaine résistance à la sécheresse édaphique, tandis que d'autres préfèrent des sols plus profonds et frais.

Dans notre cas (Aïn Skhouana), il s'agit d'une expérience aux limites de l'aire de répartition habituelle de l'espèce.

Intérêt dans l'étude (Test NBS) :

L'objectif est de tester la capacité des techniques NBS (comme l'utilisation du broyat de bois, du composte ainsi que la profondeur de plantation) à compenser les besoins hydriques importants du Frêne. Si le test est concluant, cela ouvrirait la voie à l'introduction d'essences forestières à forte valeur dans les zones steppiques (Figure10).



Figures 10 : a) arbre de Frêne / b) le Frêne plante jeune (Boutalbi, Dahmani, 2026).

4. Matériel et Méthodes :

4.1. Matériel végétal utilisé :

Trois espèces végétales ont été sélectionnées pour cette étude en raison de leur capacité d'adaptation aux conditions arides :

- Olivier de Bohême (*Elaeagnus angustifolia*)
- Frêne (*Fraxinus sp*)
- Faux poivrier (*Schinus molle*)

Les plants utilisés sont d'âge homogène (un an) et proviennent d'une pépinière forestière, garantissant une bonne qualité et une uniformité du matériel végétal utilisé dans l'expérimentation.

4.2. Matériel et équipements de terrain :

Pour la collecte des données sur le terrain, plusieurs équipements ont été utilisés afin d'assurer la précision et la fiabilité des observations réalisées dans la zone d'étude. Parmi ces outils, nous avons utilisé :

Concernant les opérations mécanisées, **la tarière (foreuse de plantation)** a été utilisée pour réaliser des potets de plantation réguliers et homogènes, facilitant ainsi la mise en place des plants (Figure 11).



Figure 11 : la tarière (foreuse de plantation), (Boutalbi, Dahmani, 2026).

- **La pelle à main :** est utilisée pour ameublir le sol autour des plantes et y ajouter de petites quantités d'engrais (Figure 12).



Figure 12 : La pelle à main (Boutalbi, Dahmani, 2026).

Tracteur équipé d'une citerne d'eau :

Le tracteur muni d'une citerne d'eau est utilisé pour assurer l'irrigation des plantations, notamment dans les zones steppiques caractérisées par un déficit hydrique. Il permet le transport et la distribution de l'eau directement sur le site de plantation, facilitant ainsi l'arrosage des jeunes plants et améliorant leur taux de survie. Cet équipement est particulièrement utile lors des premières phases d'installation des végétaux, où les besoins en eau sont critiques pour leur enracinement et leur développement. (Figure 13).



Figure 13 : une citerne d'eau (Boutalbi, Dahmani, 2026).

- **Le Seau :**

Le seau (15L) est utilisé pour transporter de petites quantités d'eau destinées à l'irrigation des plants, en particulier dans les zones difficilement accessibles aux équipements mécanisés. (figure14).



Figures 14 : a) Irrigation d'une jeune plantation après la mise en terre, b) Le Seau de l'INRF (15L), (Boutalbi, Dahmani, 2026).

Ruban de mesure (Mètre -ruban) :

Le ruban de mesure est un instrument utilisé pour effectuer des mesures linéaires avec précision sur le terrain. Il permet de déterminer les distances entre les plants, les dimensions des fosses de plantation ainsi que les espacements adoptés dans les dispositifs expérimentaux. Son utilisation est essentielle pour assurer la rigueur des relevés et la reproductibilité des mesures dans le cadre de l'étude (Figure 15).



Figure 15 : Ruban de mesure (Mètre ruban), (Boutalbi, Dahmani, 2026).

En outre, **un carnet de terrain** : a été utilisé pour noter les observations directes, les caractéristiques du milieu, ainsi que les informations relatives aux espèces végétales observées.

- **Documentation photographique :**

La documentation photographique a été réalisée au cours des différentes étapes du travail de terrain à l'aide d'un téléphone mobile. Elle a permis de prendre des photographies des sites d'étude, des conditions environnementales ainsi que des différentes opérations effectuées sur le terrain. Cette documentation constitue un support visuel important, permettant d'archiver les travaux réalisés et de faciliter l'analyse et l'interprétation des données collectées.

- **Un humidimètre du sol (Soil Moisture Meter) :**

A été utilisé pour mesurer le taux d'humidité du sol directement sur le terrain. Cet appareil permet d'obtenir des indications rapides sur l'état hydrique du sol (sec, humide ou très humide), ce qui est essentiel pour évaluer la disponibilité en eau pour les plants, notamment dans les zones arides et semi-arides (Figure16).



Figures 16 : Mesure de l'humidité avec l'hygromètre, (Boutalbi, Dahmani, 2026).

🌈 Interprétation des mesures d'humidité.

Wet / Humide	
Moist / Légèrement humide	
Dry / Sec	

- **Un pied à coulisse numérique :**

Un pied à coulisse numérique a été utilisé pour mesurer avec précision le diamètre au collet des plants. Cet instrument offre une grande précision de mesure, ce qui permet de suivre l'évolution de l'accroissement des plants et d'analyser l'effet des différents traitements appliqués (Figure 17).



Figures 17 : a) Un pied à coulisse numérique, **b)** mesure du diamètre au collet d'un jeune plant à l'aide d'un pied à coulisse numérique. (Boutalbi, Dahmani, 2026).

L'ensemble de ces équipements a permis de garantir une collecte de données fiable, précise et reproductible, conformément aux approches méthodologiques recommandées dans les études écologiques et les projets de restauration basés sur la nature.

5. Préparation du site :

Avant la plantation, une préparation du terrain a été réalisée afin d'assurer de bonnes conditions d'installation des plants. Cette étape a consisté principalement au nettoyage du site et le repérage des emplacements destinés à la plantation. (Figure 18).



Figure 18 : Préparation du sol et traçage des lignes de plantation (Boutalbi, Dahmani, 2026).

6. Creusement des potets :

Un total de 150 potets a été creusé à l'aide d'une tarière. Ces potets ont été répartis équitablement entre les trois espèces étudiées, soit 50 potets par espèce. (Figure 19).



Figure 19 : Creusement des potets (Boutalbi, Dahmani, 2026).

7. Dispositif expérimental :

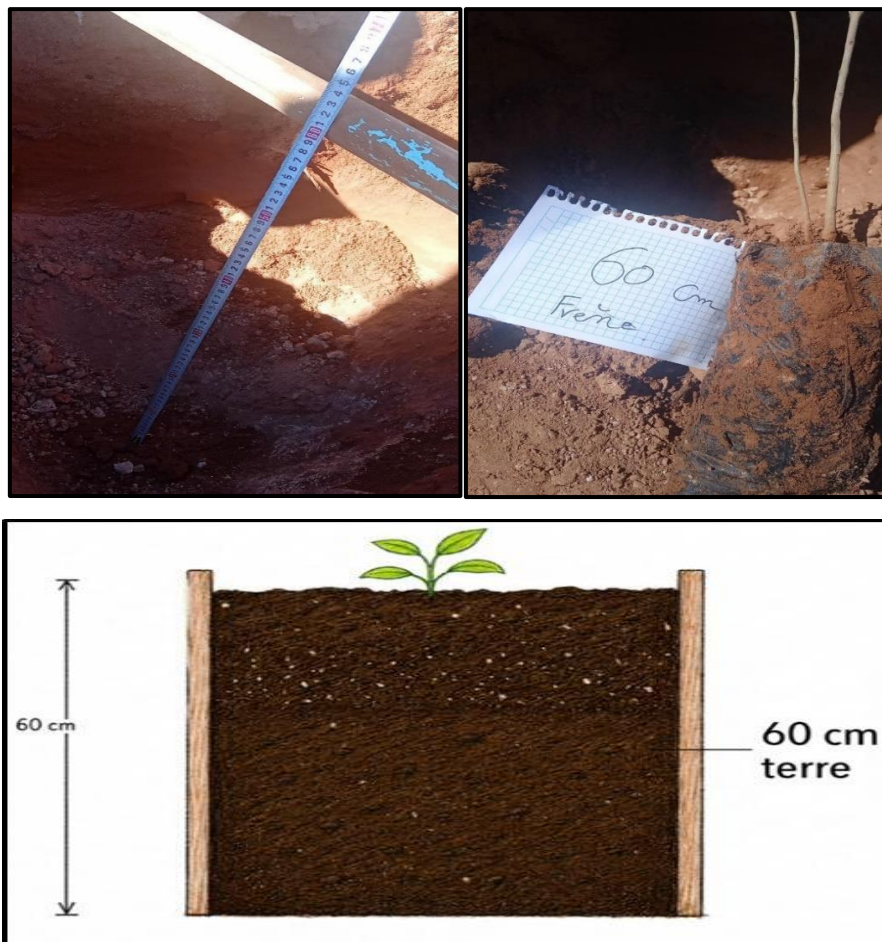
Le dispositif expérimental adopté est un dispositif en lignes. Chaque ligne comporte 10 potets. Cinq techniques de plantation ont été testées :

- **Technique 1 : 1ère ligne** : potets d'une profondeur de 60cm (figures20).

Une pofondeur de 60 cm est utilisée afin de tester l'amélioration des conditions de développement des racines dans les zones arides et semi-arides.

Cette profondeur permet :

- d'augmenter la capacité de stockage de l'eau dans le sol ;
- de favoriser le développement racinaire en profondeur ;
- d'améliorer l'aération du sol ;
- de faciliter l'infiltration de l'eau ;
- de réduire le stress hydrique des plants.



Figures 20 : profondeur de 60 cm (Boutalbi, Dahmani, 2026).

La Figure 20 illustre les étapes de contrôle métrique et de modélisation de la fosse de plantation, creusée à une profondeur de 60cm pour les jeunes plants, on voit bien le contrôle qu'on a fait sur le terrain : on a mesuré la fosse avec un ruban métrique pour être sûr d'atteindre exactement 60cm de profondeur, ce qui est indispensable pour casser la croûte du sol et faciliter la pénétration des racines, La figure 20c, résume le profil idéal qu'on a cherché à obtenir après le remblayage. En gros, ce volume de 60cm de terre meuble, c'est notre technique pour maximiser la rétention d'eau autour des racines et donner au plant les meilleures chances de reprise dans les conditions difficiles des zones arides et semi-arides.

➤ **Technique 2 : 2ème ligne : ajout de copeaux de bois**

❖ **Le Bois Raméal Fragmenté (BRF) :**

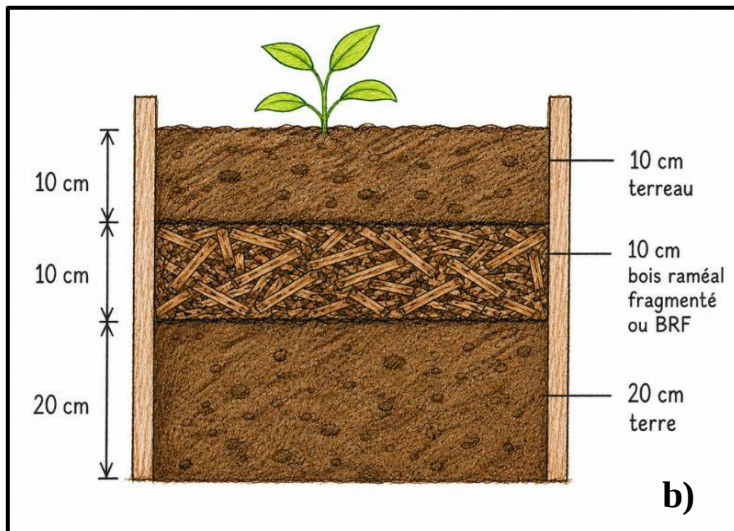
Le BRF est constitué de fragments de jeunes rameaux de bois utilisés comme amendement organique (Figure 21).

Le BRF contribue à :

- ❖ Protéger le sol contre l'évaporation ;
- ❖ Améliorer la structure du sol ;
- ❖ Augmenter la matière organique ;
- ❖ Maintenir l'humidité.



Figure 21 : a) Technique d'incorporation de bois (BRF) dans la fosse de plantation.



- la stratification du sol (terre – bois raméal fragmenté – terre), (Boutalbi, Dahmani, 2026).
- **Technique 3 : 3ème ligne : ajout de matière organique**

❖ Matière organique :

La matière organique est l'ensemble des résidus d'origine végétale ou animale présents dans le sol en cours de décomposition (Figure 22).

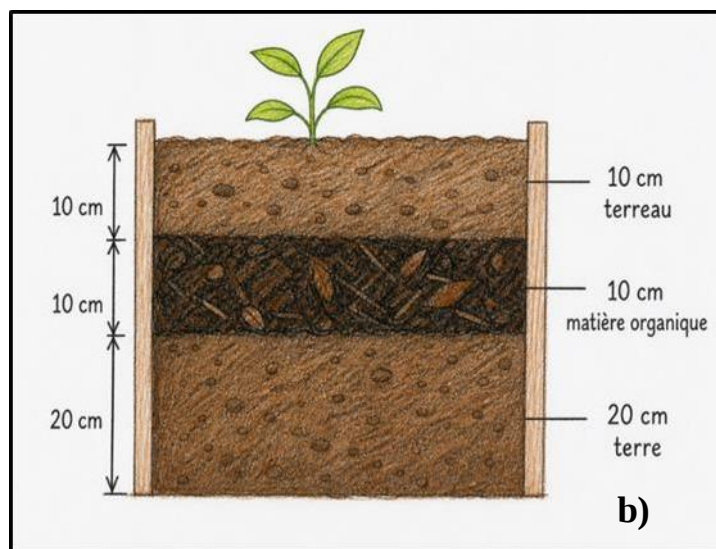
La matière organique améliore :

- La structure du sol ;
- L'infiltration de l'eau ;
- La capacité de rétention hydrique ;
- L'activité biologique du sol.

Dans les zones arides, les sols sont souvent pauvres en matière organique, ce qui réduit leur fertilité et leur capacité à retenir l'eau.



Figures 22 : a) Technique d'incorporation de matière organique la fosse de plantation.



b) la stratification du sol (terre – matière organique – terre), (Boutalbi, Dahmani, 2026).

➤ **Technique 4 : 4ème ligne : ajout de fumier (engrais organique)**

❖ **Le compost**

Le compost est une matière organique issue de la décomposition des déchets organiques. (Figure 23).

Il permet :

- D'enrichir le sol ;
- D'améliorer la structure ;
- D'augmenter la capacité de rétention en eau ;
- De stimuler l'activité microbienne.

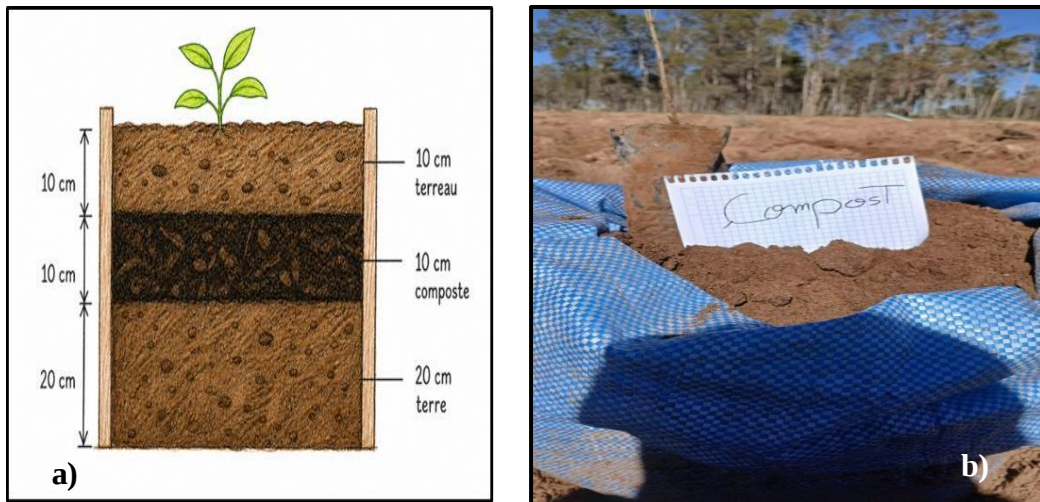


Figure 23 : a) la stratification du sol (terre – compost– terre), **b)** compost (Boutalbi, Dahmani, 2026).

- **Technique 5 : 5ème ligne (témoin)** : potets d'une profondeur de 40 cm sans ajout (Figure 24).



Figures 24 : a) Mesure de la fosse de plantation 40 cm, **b)** installation du jeune plant pour le témoin (Boutalbi, Dahmani, 2026).

Chaque traitement est appliqué aux différentes espèces végétales, permettant d'évaluer :

- L'effet des techniques de plantation
- L'effet des espèces
- L'interaction entre ces deux facteurs

8. Procédure de plantation :

Pour les traitements avec ajout de matériaux (copeaux de bois, matière organique et fumier), la procédure suivante a été adoptée :

- a) Dépôt d'une couche de sol de 20 cm au fond du trou
- b) Ajout d'une couche de matériau organique de 10 cm
- c) Installation du plant en assurant un contact direct entre les racines et la couche organique
- d) Recouvrement des racines par une couche de sol d'environ 10cm (figure 25).



Figure 25: Recouvrement des racines par une couche de sol d'environ 10cm. (Boutalbi, Dahmani, 2026).

Pour les traitements sans ajout (60 cm et témoin), les plants ont été installés directement dans les potets.

2.8.1. Mise en place des plants :

Une seule plante a été installée par trou, en veillant à sa position verticale. Le remblayage a été effectué progressivement avec un léger tassement du sol afin d'assurer un bon contact entre les racines et le sol.

2.8.2. Irrigation :

Un arrosage a été réalisé immédiatement après la plantation afin de :

- Humidifier le sol
 - Favoriser l'adhésion sol-racines
 - Réduire le stress de transplantation.
- Dans le cadre de cette expérimentation, aucun apport d'irrigation artificielle n'a été réalisé. Les plantations ont été arrosées uniquement par les précipitations naturelles (tableau 5) enregistrées durant la période d'étude. Ce choix vise à évaluer l'efficacité des techniques testées dans des conditions réelles des zones arides et semi-arides.

Tableau 5 : suivi des jours de pluie de la plantation expérimentale à Faïd Rmal (Skhouna) :

La Date	La Pluie (Oui/ Non)	Le Gellée (Oui/ No)	Observations
8/9/10/11 mars	Non	Oui	Brûlure par le gel (Frêne/faux poivrier)
15 mars	Oui	Non	Feuilles saines ((Olivier de Bohême)
21/23/26mars	Oui	Non	Feuilles saines ((Olivier de Bohême)
29 /30 mars	Oui	Non	Feuilles saines ((Olivier de Bohême)
11/12/13 Avril	Oui	Non	Feuilles saines ((Olivier de Bohême)
25/26 avril	Oui	Non	Feuilles saines ((Olivier de Bohême)
06 mai	Oui	Non	Feuilles saines (frêne /faux poivrier /olivier de Bohême
07 juin	Non	Non	Feuilles sèches (Olivier de Bohême/ frêne)

2.9. Paramètres mesurés et suivis :

Afin d'évaluer l'efficacité des différentes techniques de plantation appliquées sur le terrain, un suivi rigoureux a été mené sur les jeunes plants. Les paramètres morphologiques et physiologiques mesurés sont décrits comme suit :

- ✦ **Le taux de survie (%)** : Ce paramètre qualitatif permet d'évaluer la capacité d'adaptation et de reprise des plants face au stress hydrique et thermique. Il est calculé comme le rapport entre le nombre de plants vivants et le nombre total de plants initialement installés, exprimé en pourcentage :

$$\text{Le taux de survie (\%)} = \frac{\text{Nombre de plants vivants}}{\text{Nombre total de plants plantés}} * 100$$

- ✦ **La hauteur totale du plant (cm)** : Il s'agit de la distance verticale mesurée entre la surface du sol (collet) et le bourgeon terminal de la tige principale. Ce paramètre traduit la croissance longitudinale et la vigueur aérienne du plant. Les mesures ont été prises à l'aide d'une règle graduée ou d'un ruban métrique.

- ✦ **Le diamètre au collet (mm)** : C'est le diamètre de la tige mesuré précisément au niveau de la zone de transition entre la racine et la tige (le collet). C'est un indicateur clé de la robustesse et de la résistance mécanique du jeune plant. Ce paramètre a été mesuré avec précision à l'aide d'un pied à coulisse électronique (ou numérique).

➤ Les mesures des différents paramètres étudiés (hauteur, diamètre et taux de survie) ont été réalisées à intervalles réguliers de 15 jours après la plantation. Les relevés ont été effectués aux dates suivantes : le 1er mars, le 16 mars, le 31 mars, le 14 avril, le 27 avril, le 13 mai et 7 juin. Ce suivi périodique a permis d'évaluer l'évolution de la croissance et de la survie des plants au cours de la période d'étude.

10. Logiciel et méthodes statistiques utilisés :

Les données collectées au cours du suivi expérimental ont été traitées à l'aide du logiciel XLSTAT.

XLSTAT est une extension qui enrichit Microsoft Excel en lui intégrant un large éventail de fonctionnalités statistiques indispensables (statistique descriptive et inférentielle, régressions OLS/PLS, ANOVA, séries chronologiques). Selon Grégoire et al. (2012), cet outil est particulièrement adapté aux exigences pédagogiques des départements STID, où les étudiants apprécient autant son interface intuitive que la lisibilité de ses graphiques et résultats.

Ce logiciel a permis de réaliser une analyse de variance (ANOVA) afin d'évaluer l'effet des espèces, des traitements et des interactions sur les paramètres étudiés, notamment :

- La hauteur des plants ;
- Le diamètre des plants ;
- Le taux de survie.

L'analyse univariée a été appliquée séparément pour chaque variable étudiée (S, D, H). Les différences entre les moyennes ont été considérées comme significatives lorsque la probabilité p était inférieure à 0,05.

Les résultats obtenus ont ensuite été représentés sous forme de tableaux et de graphiques afin de faciliter leur interprétation.

Chapitre (03) :

Résultats et discussions

1. Résultats de l'analyse univariée du développement de la plantation :

Le suivi des conditions climatiques durant la période d'étude ainsi que leurs effets observés sur l'état des feuilles des différentes espèces étudiées montrent que :

- a) Lors des périodes de gel, certaines feuilles ont présenté des symptômes de brûlure. Ce phénomène est dû à la formation de cristaux de glace à l'intérieur des cellules végétales, entraînant leur éclatement et une déshydratation des tissus. Cela se traduit par un dessèchement et un brunissement des feuilles.

Le gel provoque des symptômes de brûlure, avec des feuilles qui se fanent. Les plus atteintes sont généralement les feuilles supérieures et celles situées sur la périphérie. Sur de jeunes plantes (5-10 cm), un gel important peut provoquer un fanage complet des parties vertes. La croissance redémarre des parties non touchées.



Figure 26 : Brûlure par le gel de Frêne

Figure 27: Brûlure par le gel de faux poivrier.

- b) Les feuilles du faux poivrier, affectées par le gel au début de la période d'étude, ont montré une récupération progressive après l'amélioration des conditions climatiques, retrouvant progressivement un aspect sain.



Figure 28 : Récupération foliaire du faux poivrier après un épisode de gel. (Boutalbi, Dahmani, 2026).

Le dessèchement des feuilles observé durant la période estivale est principalement lié aux conditions climatiques défavorables caractérisées par des températures élevées et une faible disponibilité en eau dans le sol. Ces conditions entraînent un stress hydrique qui réduit l'absorption de l'eau par les racines et augmente les pertes par transpiration. En réponse à ce stress, les feuilles se dessèchent progressivement, jaunissent puis peuvent tomber afin de limiter les pertes d'eau et d'assurer la survie de la plante.



Figure 29 : **a)** dessèchement des feuilles d'Olivier de Bohême, **b)** indicateur de l'humidimètre révélant la sécheresse du sol (Boutalbi, Dahmani, 2026).



Figure 30 : a) dessèchement des feuilles de frêne, b) indicateur de l'humidimètre révélant la sécheresse du sol (Boutalbi, Dahmani, 2026).

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse univariée concernant le développement de la plantation. L'objectif est d'évaluer l'effet de deux facteurs principaux : l'effet de l'espèce et l'effet des traitements (solutions basées sur la nature). Les paramètres analysés sont le taux de survie, le diamètre au collet et la hauteur totale des plants de *Schinus molle*, *Elaeagnus angustifolia* et *Fraxinus sp.*

1.1. Résultats de l'analyse univariée du développement des Trois espèces

Cette section analyse la variabilité des paramètres de croissance et de survie entre les trois espèces étudiées, indépendamment des traitements appliqués.

1.1.1. Taux de survie des plants de *Schinus molle*, *Elaeagnus angustifolia* et *Fraxinus sp.*

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) n'ont pas montré d'effet significatif de l'espèce sur le taux de survie (tableau 6 ; $F = 0,313$; $p = 0,732$). Cela indique que les différentes espèces présentent des taux de survie relativement comparables au sein de la plantation (figure 31). En revanche, l'effet des répétitions (temps) est significatif ($F = 4,26$; $p < 0,001$), montrant une variation du taux de survie au cours du temps, comme illustré dans les figures 31 et 32 le tableau 7. Par ailleurs, le taux de survie global enregistré pour l'ensemble des trois espèces a atteint 93 % au 30 juin, traduisant une bonne adaptation des plants aux conditions du site et une réussite satisfaisante de la plantation.

Tableau 6: Résultat de l'analyse inter- arbres de la variance des taux de survie des arbres.

Caractère	Espèces	Aanalyse de la variance	Résultats
Taux de survie	<i>Schinus molle</i> (E2), <i>Elaeagnus angustifolia</i> (E1) et <i>Fraxinus sp</i> (E3)	ddl= 2 F=0,313 P=0,732	NS

NS : non significative, * : significative, ** : hautement significative, *** : très hautement significative

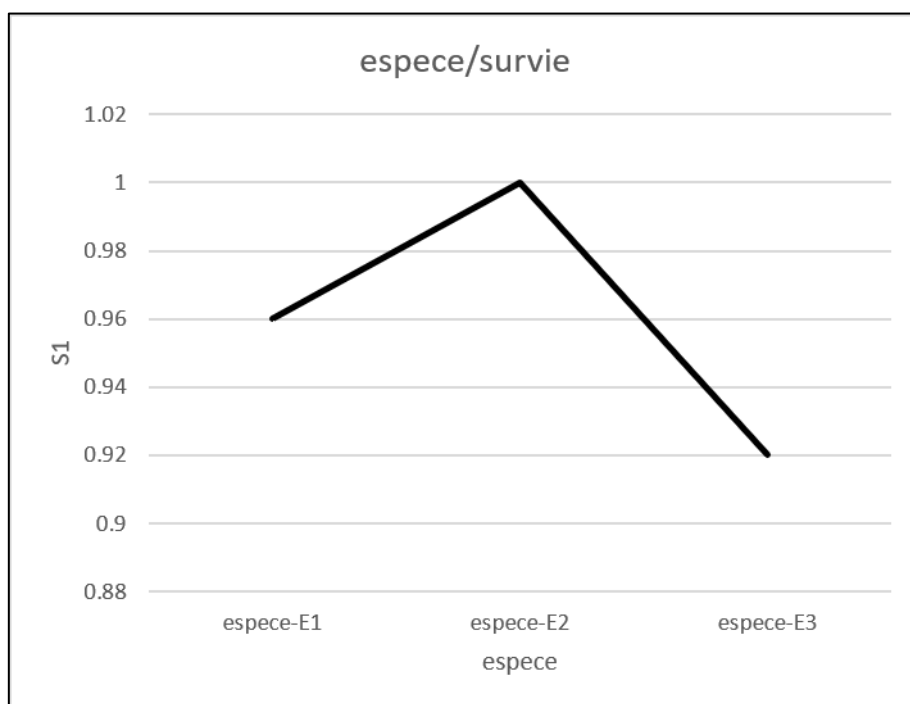


Figure 31 : Evolution du taux de survie par espèce : E1(*Elaeagnus angustifolia*), E2(*Schinus molle*), E3(*Fraxinus sp*), le 1 Mars 2026



Figure 32 : Evolution du taux de survie par espèce : E1(*Elaeagnus angustifolia*), E2(*Schinus molle*), E3(*Fraxinus sp*), le 30 Juin 2026

tableau 7 : évolution des moyennes des taux de survie des trois espèces entre le 1er Mars et le 30 juin 2026

Répétition	Analyse de la variance	Taux de survie moyenne	Date de mesure
S1	ddl= 2; F= 2.100 et P =0.126	0,96	01Mars
S2	ddl= 2; F= 0.422 et P=0.656	0,93	16Mars
S3	ddl= 2; F= 0.422 et P=0.656	0,93	31Mars
S4	ddl= 2; F= 0.422 et P=0.656	0,93	14Avril
S5	ddl= 2; F= 0.422 et P=0.656	0,93	27Avril
S6	ddl= 2; F= 0.422 et P=0.656	0,93	13Mai
S7	Ddl =2; F=2 ,051 et p=0 ,132	0,93	7juin

1.1.2. Diamètre au collet des plants de *Schinus molle*, *Elaeagnus angustifolia* et *Fraxinus sp.*

L'analyse statistique a révélé un effet significatif de l'espèce sur le diamètre au collet des plants (Tableau 8 ; $F = 4,200$; $p = 0,017$). Les différences observées traduisent une variabilité de développement radial entre les espèces étudiées. L'effet des répétitions est hautement significatif (sauf pour D6), indiquant une augmentation progressive du diamètre au cours des mesures successives (Tableau 9). Cependant, aucune interaction significative espèce $\times$ répétition n'a été enregistrée ($p > 0,05$).

Tableau 8 : Résultat de l'analyse inter- espèces de la variance des diamètres de collet des arbres.

Caractère	Espèces	Analyse de la variance	Résultats
Diamètre	<i>Schinus molle</i> (E2), <i>Elaeagnus angustifolia</i> (E1) et <i>Fraxinus sp</i> (E3)	ddl= 2 $F=4,200$ $P=0,017$	**

NS : non significative, * : significative, ** : hautement significative, *** : très hautement significative.

Tableau 9 : évolution des moyennes des diamètres des trois espèces entre le 1^{er} Mars et le 30 juin 2026.

Répétition	Analyse de la variance	Diamètre moyenne (mm)	Date de mesure
D1	ddl= 2; $F= 3,998$ et $P =0,021$	3,242	01Mars
D2	ddl= 2; $F= 3,811$ et $P =0,025$	4,426	16Mars
D3	ddl= 2; $F= 4,010$ et $P =0,020$	4,560	31Mars
D4	ddl= 2; $F= 4,474$ et $P =0,013$	4,782	14Avril
D5	ddl= 2; $F= 3,556$ et $P =0,031$	5,128	27Avril
D6	ddl= 2; $F= 2,782$ et $P =0,065$	5,370	13Mai
D7	ddl= 2; $F= 3,572$ et $P =0,031$	4,920	7juin

✚ Identification des espèces par leur forme d'histogramme et code correspondant.

Nom d'espèce	Forme d'histogramme	Code
L'Olivier de Bohême (<i>Elaeagnus angustifolia</i>)		E1
Le Faux Poivrier (<i>Schinus molle</i>)		E2
Le Frêne (<i>Fraxinus sp</i>)		E3

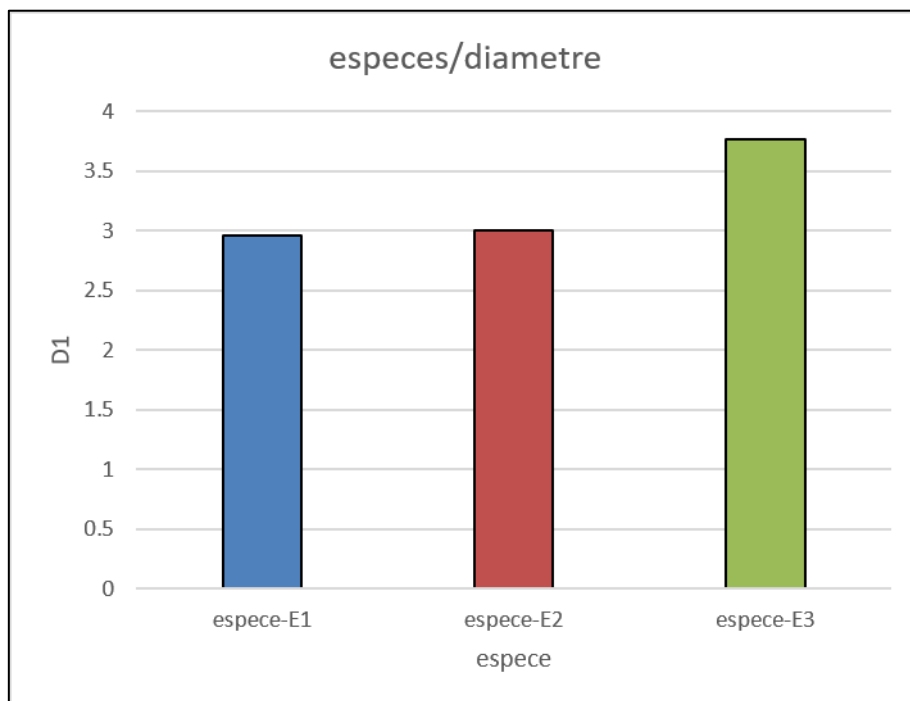


Figure 33 : évolution du diamètre des espèces : E1(*Elaeagnus angustifolia*), E2(*Schinus molle*), E3(*Fraxinus sp*), le 1 Mars 2026

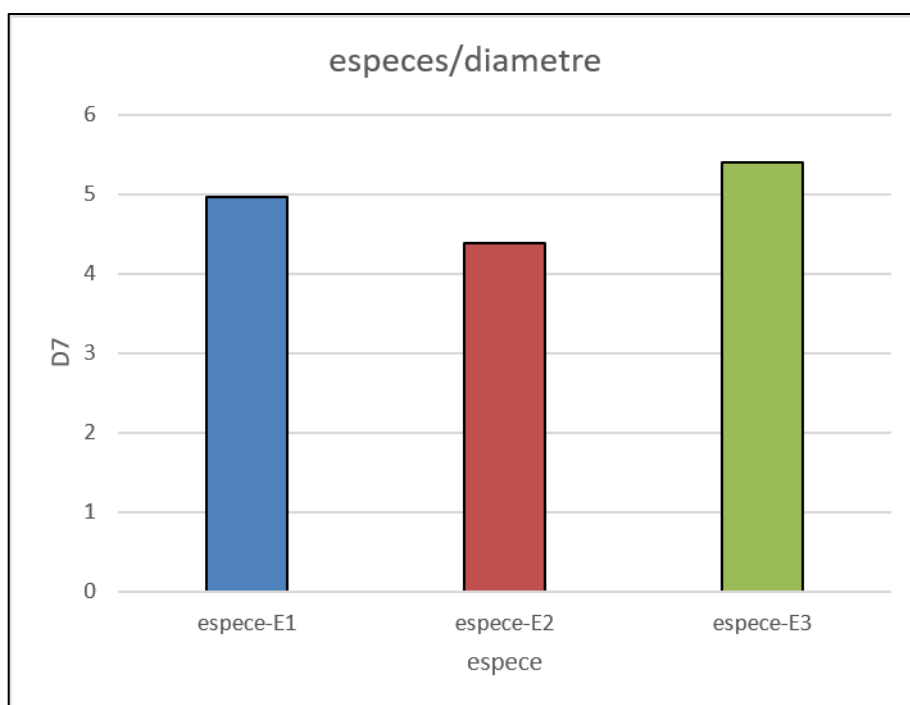


Figure 34 : Evolution du diamètre des espèces : E1(*Elaeagnus angustifolia*), E2(*Schinus molle*), E3(*Fraxinus sp.*), 30 juin 2026

1.1.3. Hauteur totale des plants de *Schinus molle*, *Elaeagnus angustifolia* et *Fraxinus sp.*

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) ont montré un effet très hautement significatif entre les hauteurs des espèces (Tableau 10 ; $F = 38,723$; $p < 0,001$). Cette différence indique que les espèces végétales étudiées présentent des comportements de croissance en hauteur différents vis-à-vis des conditions du milieu. Le frêne enregistre la plus grande hauteur, alors que le *Schinus molle* enregistre la plus faible (figure 35 et 36). Par ailleurs, l'effet des répétitions est également significatif, traduisant une variation temporelle de la croissance (Tableau 11). En revanche, l'interaction espèce $\times$ répétition n'a montré aucun effet significatif ($p > 0,05$).

Tableau 10 : Résultat de l'analyse inter- arbres de la variance des hauteurs des arbres.

Caractère	Espèces	Analyse de la variance	Résultats
Hauteur (cm)	<i>Schinus molle</i> (E2), <i>Elaeagnus angustifolia</i> (E1) et <i>Fraxinus sp</i> (E3)	ddl=2 $F=38,723$ $P=0,0001$	***

NS : non significative, * : significative, ** : hautement significative, *** : très hautement significative

Tableau 11 : évolution des moyennes des hauteur des trois espèces entre le 1^{er} Mars et le 30 juin 2026.

Répétition	Analyse de la variance	Hauteur moyenne (cm)	Date de mesure
H1	ddl= 2; F= 24,611 et P =0,0001	28,671	01Mars
H2	ddl= 2; F= 17,592 et P =0,0001	26,954	16Mars
H3	ddl= 2; F= 37,716 et P =0,0001	30,054	31Mars
H4	ddl= 2; F=22,875 et P =0,0001	31,329	14Avril
H5	ddl= 2; F= 14,371 et P =0,0001	31,282	27Avril
H6	ddl= 2; F= 18,451 et P =0,0001	33,364	13Mai
H7	ddl= 2; F= 18,843 et P =0,0001	32,536	7juin

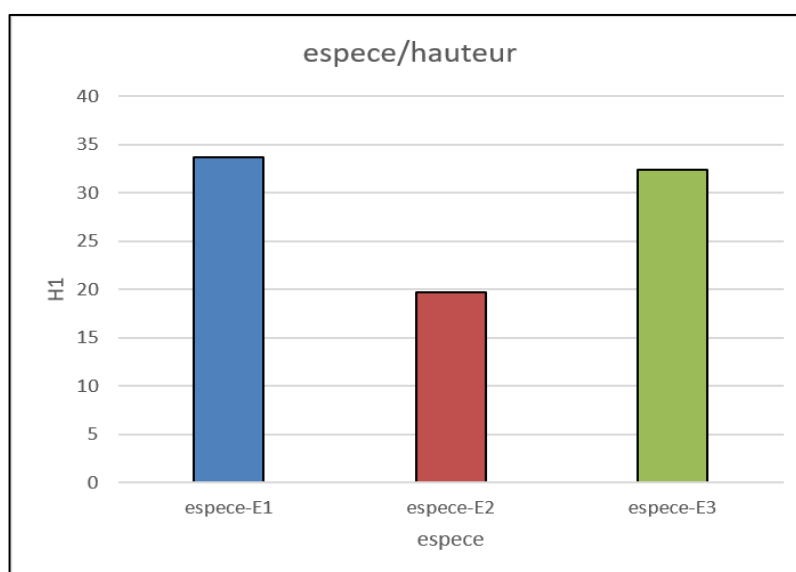


Figure 35 : Evolution de la hauteur par espèce : E1(*Elaeagnus angustifolia*), E2(*Schinus molle*), E3(*Fraxinus sp.*), le 1 Mars 2026

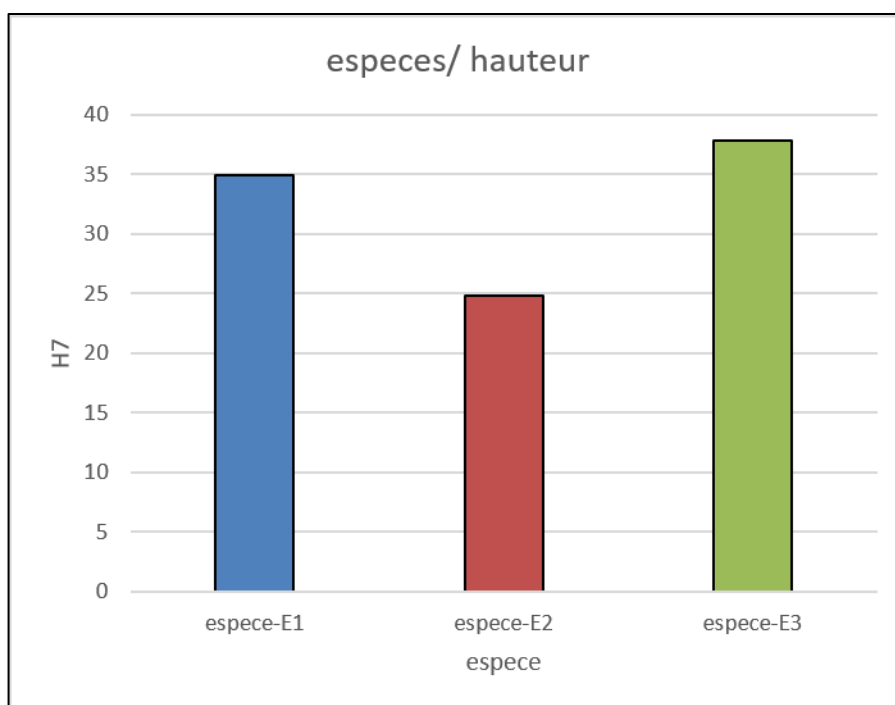


Figure 36 : Evolution de la hauteur par espèce : E1(*Elaeagnus angustifolia*), E2(*Schinus molle*), E3(*Fraxinus sp*), le 30 Juin 2026

2. Résultats de l'analyse univariée du développement des trois espèces en fonction des cinq traitements

Cette section analyse l'effet des cinq traitements (Témoin TE, Broyat de bois BO, Compost CO, Matière organique MO, Profondeur de plantation PR) sur les paramètres de croissance.

2.1. Taux de survie des plants en fonction des cinq traitements

L'analyse statistique montre que les traitements n'ont pas eu d'effet significatif sur le taux de survie des plants (Tableau 12 ; $p = 0,302$). Malgré des différences apparentes entre les moyennes observées, les taux de survie élevés enregistrés pour l'ensemble des traitements montrent que les espèces étudiées présentent une bonne capacité d'adaptation. L'évolution au cours du temps (Tableau 13, figures 37 et 38) montre une stabilité du taux de survie après la première mesure.

Tableau 12 : Taux de survie des plants de *Schinus molle*, *Elaeagnus angustifolia* et *Fraxinus sp*, en fonction des cinq traitements

Caractère	Espèces	Analyse de la variance	Résultats
Cinq traitements	<i>Schinus molle</i> (E2), <i>Elaeagnus angustifolia</i> (E1) et <i>Fraxinus sp</i> (E3)	ddl= 4 F=1,227 P=0 ,302	NS

NS : non significative, * : significative, ** : hautement significative, *** : très hautement significative.

Tableau 13 : Evolution des moyennes des taux de survie des cinq traitements entre le 1^{er} Mars et le 30 juin 2026.

Répétition	Analyse de la variance	Taux de survie moyenne	Date de mesure
S1	ddl= 4; F= 0,697 et P =0.665	0,96	01Mars
S2	ddl= 4; F= 1,343 et P =0.257	0,93	16Mars
S3	ddl= 4; F= 1,343 et P =0.257	0,93	31Mars
S4	ddl= 4; F= 1,343 et P =0.257	0,93	14Avril
S5	ddl= 4; F= 1,343 et P =0.257	0,93	27Avril
S6	ddl= 4; F= 1,343 et P =0.257	0,93	13Mai
S7	ddl= 4; F= 0,794 et P =0.531	0,93	7juin

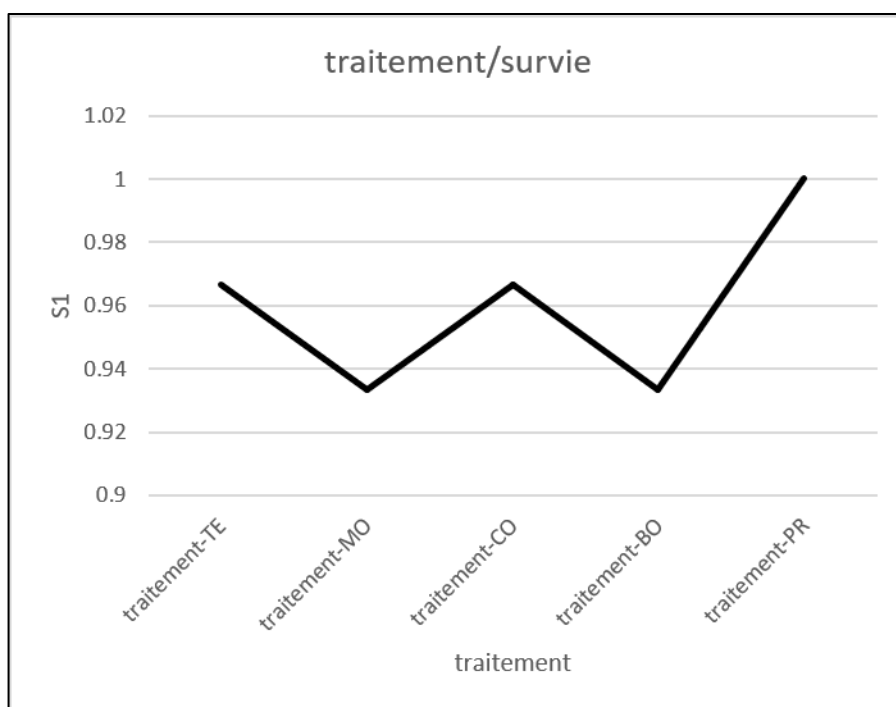


Figure 37 : Taux de survie par traitement le 1 Mars 2026

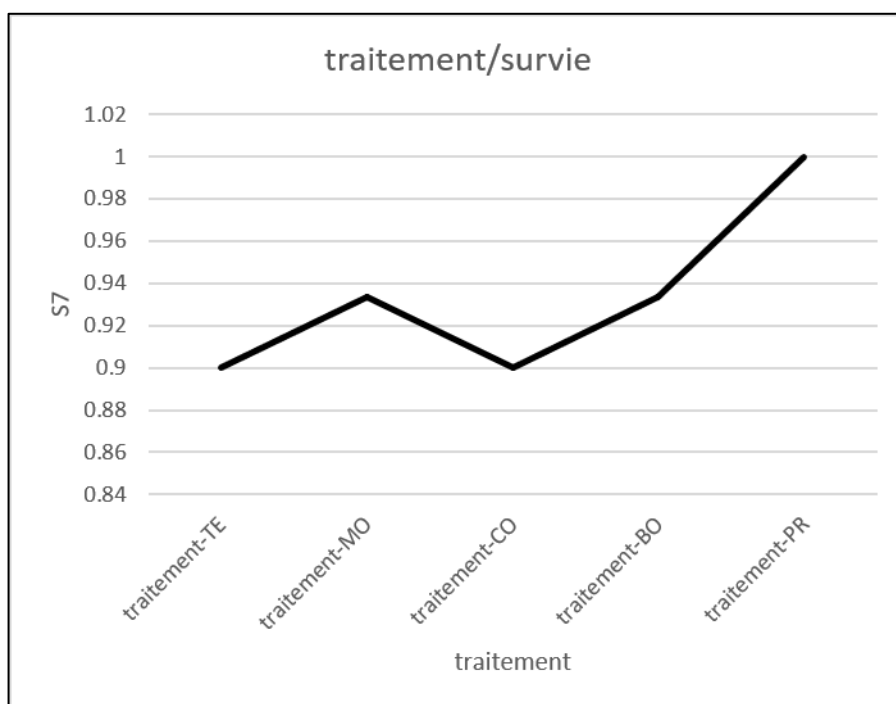


Figure 38 : Taux de survie par traitement le 30 Juin 2026

2.2. Diamètre au collet des plants en fonction des cinq traitements

Contrairement au taux de survie, le diamètre des plants a été significativement influencé par les traitements (Tableau 14 ; $p = 0,010$). Les résultats suggèrent que l'apport de matière organique et la profondeur de plantation améliorent les propriétés du sol, favorisant ainsi le

développement radial. L'évolution dans le temps (Tableau 15, figures 39 et 40) confirme cet effet significatif notamment lors des dernières mesures.

Tableau 14: Diamètre au collet des plants de *Schinus molle*, *Elaeagnus angustifolia* et *Fraxinus* sp. En fonction des cinq traitements

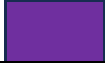
Caractère	Espèces	Analyse de la variance	Résultats
Cinq traitements	<i>Schinus molle</i> (E2), <i>Elaeagnus angustifolia</i> (E1) et <i>Fraxinus</i> sp(E3)	ddl= 4 F= 3,477 P=0,010	**

NS : non significative, * : significative, ** : hautement significative, *** : très hautement significative

Tableau 15 : permet d'observer l'évolution des moyennes des diamètres des cinq traitements entre le 1^{er} Mars et le 30 juin 2026.

Répétition	Analyse de la variance	Diamètre moyenne (mm)	Date de mesure
D1	ddl= 4; F= 2,753 et P =0,031	3,242	01Mars
D2	ddl= 4; F= 3,017 et P =0,020	4,426	16Mars
D3	ddl= 4; F= 2,692 et P =0,034	4,560	31Mars
D4	ddl= 4; F= 2,546 et P =0,042	4,782	14Avril
D5	ddl= 4; F= 2,900 et P =0,024	5,128	27Avril
D6	ddl= 4; F= 1,542 et P =0,194	5,370	13Mai
D7	ddl= 4; F= 5,346 et P =0,001	4,920	7juin

✚ Identification des techniques utilisées par forme d'histogramme et code.

Nom d'espèce	Forme d'histogramme	Code
Témoin 40cm		Te
Matiere organique		Mo
Compost		Co
Bois.R. F		Bo
Profondeur 60cm		Pr

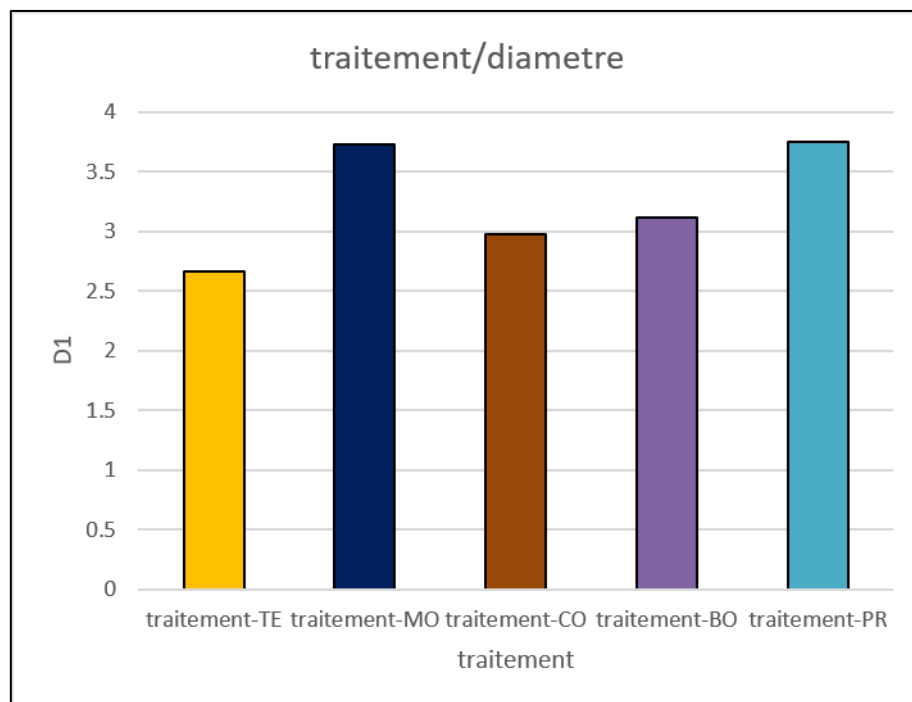


Figure 39 : Diamètre au collet des plants des traitements des trois espèces 1 Mars 2026

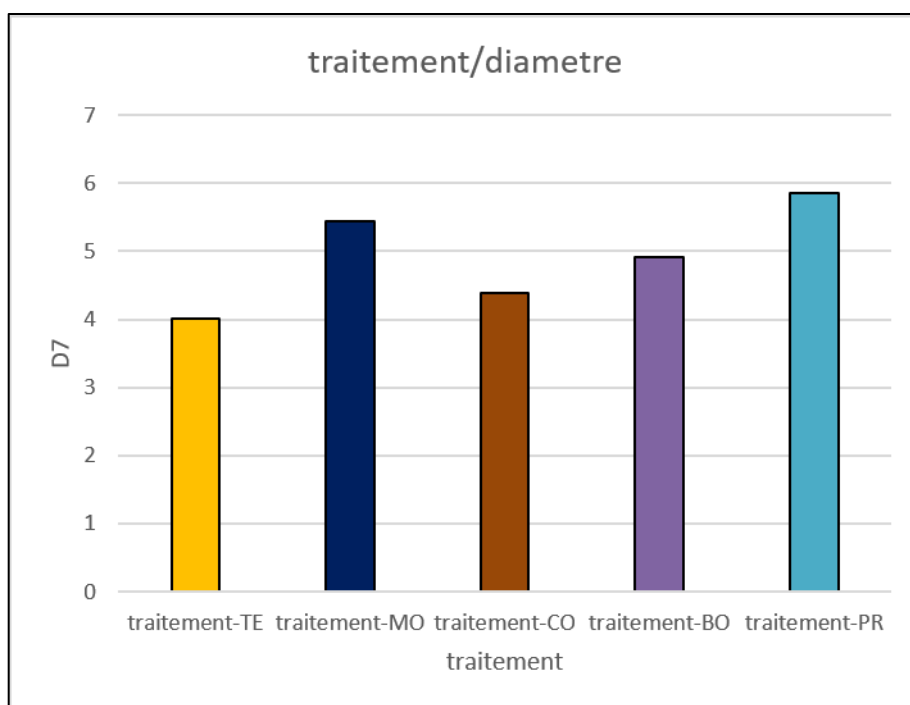


Figure 40 : Diamètre au collet des plants des traitements des trois espèces le 30 Juin 2026

2.3. Hauteur totale des plants en fonction des cinq traitements

Bien que les traitements appliqués aient montré des différences au niveau des hauteurs moyennes, l'analyse statistique n'a révélé aucun effet significatif (Tableau 16 ; $p = 0,879$). Les traitements basés sur la profondeur de plantation (PR), le broyat de bois (BO) et la matière organique (MO) ont présenté des valeurs moyennes supérieures à celles du témoin, mais la variabilité entre les répétitions n'a pas permis de valider statistiquement cet effet (Tableau 17, figures 41 et 42.). Néanmoins le traitement de la profondeur du sol et la M.O semblent influencer la croissance des plants, plus que les autres traitements.

Tableau16 : Hauteur totale des plants de *Schinus molle*, *Elaeagnus angustifolia* et *Fraxinus sp*, en fonction des cinq traitements

Caractère	Espèces	Analyse de la variance	Résultats
Cinq traitements	<i>Schinus molle</i> (E2), <i>Elaeagnus angustifolia</i> (E1) et <i>Fraxinus sp</i> (E3)	ddl= 4 F= 0,297 P=0,879	NS

NS : non significative, * : significative, ** : hautement significative, *** : très hautement significative

Tableau 17 : Evolution des moyennes des hauteurs des cinq traitements entre le 1^{er} Mars et le 30 juin 2026.

Répétition	Analyse de la variance	Hauteur moyenne (cm)	Date de mesure
H1	ddl= 4; F= 0,098 et P =0,983	28,671	01Mars
H2	ddl= 4; F= 0,754 et P =0,557	26,954	16Mars
H3	ddl= 4; F= 0,183 et P =0,947	30,054	31Mars
H4	ddl= 4; F= 0,318 et P =0,865	31,329	14Avril
H5	ddl= 4; F= 1,195 et P =0,316	31,282	27Avril
H6	ddl= 4; F= 0,145 et P =0,965	33,364	13Mai
H7	ddl= 4; F= 1,548 et P =0,192	32,536	7juin

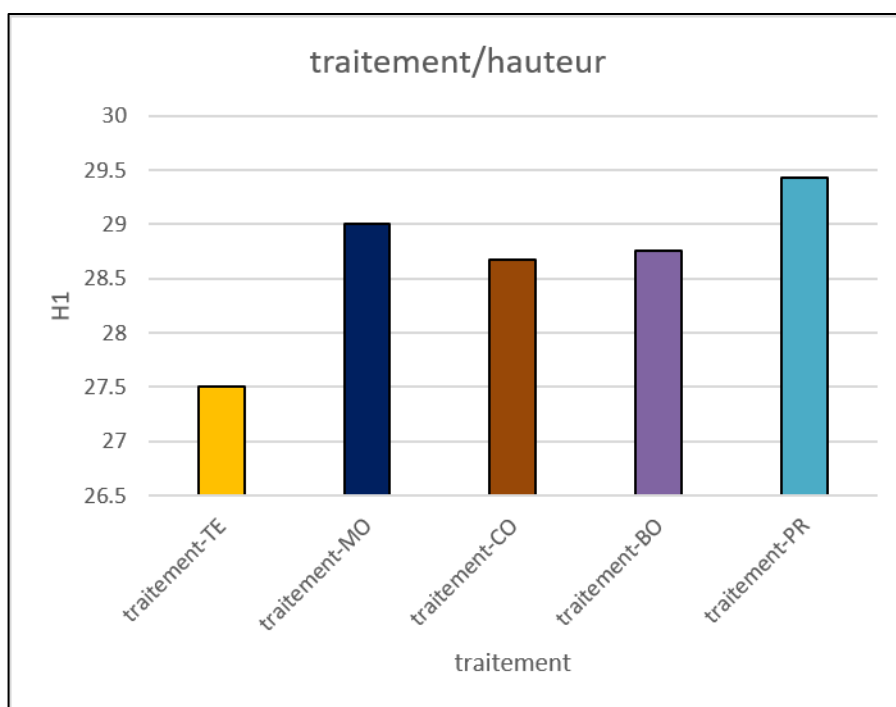


Figure 41: Hauteur des Cinq traitements des trois espèces le 1 Mars 2026

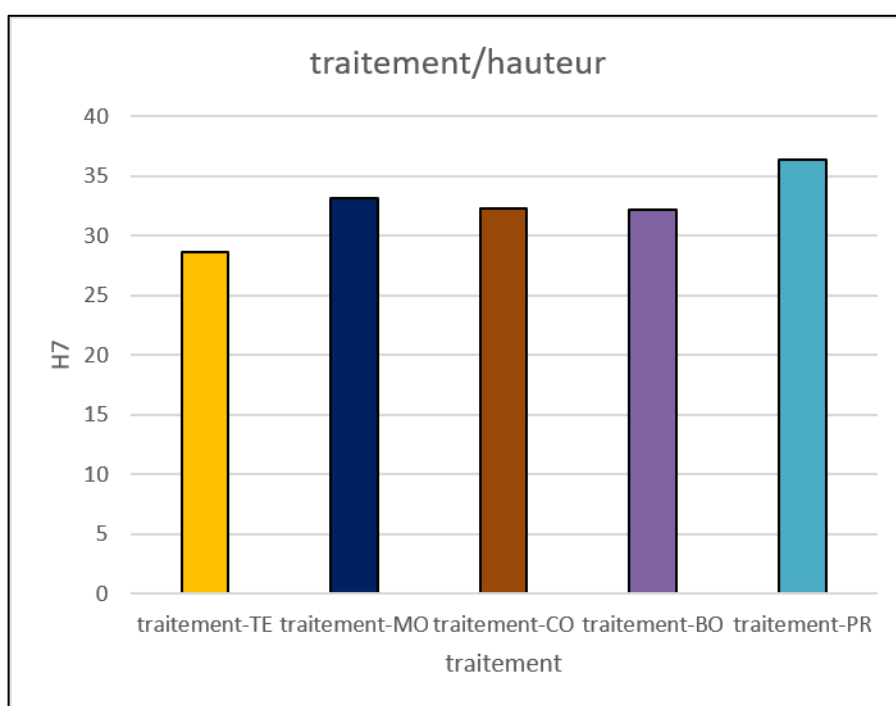


Figure 42 : Hauteur des Cinq traitements des trois espèces le 30 Juin 2026

2. Discussion des résultats de l'analyse univariée :

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'effet de différentes techniques basées sur la nature sur la réussite des plantations dans les conditions arides et semi-arides,

à travers l'analyse de la survie et de la croissance de trois espèces végétales : E1 (*Elaeagnus angustifolia*), E2 (*Schinus molle*), E3 (*Fraxinus sp*). Pour atteindre cet objectif, plusieurs traitements expérimentaux ont été appliqués, à savoir le témoin (TE), la matière organique (MO), le compost (CO), le boisraméal fragmenté(BO) et le traitement PR. Le suivi des plants a été réalisé sur plusieurs périodes d'observation successives afin d'évaluer l'évolution de différents paramètres de croissance.

Les variables étudiées comprenaient le taux de survie (S), le développement diamétral (D) et la croissance en hauteur (H), qui constituent des indicateurs essentiels de l'adaptation et de la performance des espèces dans les milieux contraignants. Afin de déterminer l'effet des traitements et des espèces sur ces paramètres, une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée. Cette approche statistique a permis de comparer les moyennes observées et d'identifier les différences significatives entre les modalités expérimentales.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'existence de variations significatives entre les espèces pour plusieurs caractères étudiés. Les valeurs de F, les degrés de liberté (ddl) ainsi que les probabilités associées (p-value) ont permis de déterminer l'importance statistique des différences observées. Ces résultats indiquent que les réponses des espèces aux traitements appliqués ne sont pas uniformes et que certaines espèces favorisent davantage la survie et la croissance des plants que d'autres.

Dans l'ensemble, cette analyse met en évidence l'intérêt des techniques basées sur la nature comme outils de restauration écologique et de lutte contre la dégradation des terres. Elle permet également d'identifier les espèces les plus performantes pour améliorer l'établissement, la croissance et la pérennité des plantations dans les zones arides et semi-arides.

2.1. Survie et Vitalité des Espèces (Paramètre S)

L'analyse de la variance (voir résultats ANOVA) montre que le taux de survie ou de vitalité globale ne présente pas de disparités majeures entre les trois espèces : E1 (*Elaeagnus angustifolia*), E2 (*Schinus molle*), E3 (*Fraxinus sp*) au début de l'expérimentation (S1 à S7), où les moyennes estimées restent homogènes et statistiquement regroupées dans le même groupe (Groupe A), avec un taux de survie global avoisinant les 93 % à 96 %.

Concernant l'effet des traitements appliqués, l'analyse statistique révèle que le paramètre S ne montre aucune différence statistiquement significative entre les modalités

(TE, MO, CO, BO, PR) pour l'ensemble des étapes ($p > 0.05$). Toutes les modalités se maintiennent dans le même groupe homogène (Groupe A). Cela suggère que les traitements appliqués n'ont pas exercé d'effet létal ou dépressif notable sur les plantes au cours de cette période, préservant ainsi leur viabilité fondamentale, bien que le traitement Pr (profondeur) affiche les moyennes les plus élevées (100 %) suivi de près par le témoin.

2.2. Croissance et Développement Diamétral (Paramètre D)

Le développement diamétral (D) constitue un indicateur phénotypique crucial pour évaluer la vigueur des espèces. Les résultats de l'analyse révèlent un effet lié au facteur « espèce ». Dès les premières étapes, l'espèce E3 (*Fraxinus sp*) présente des valeurs de diamètre globalement supérieures à celles des espèces E1 (*Elaeagnus angustifolia*) et E2 (*Schinus molle*). Cette supériorité se maintient au cours des différentes mesures, ce qui suggère une meilleure capacité de croissance radiale chez cette espèce.

Concernant l'effet des traitements, l'analyse descriptive met en évidence des différences entre les modalités testées. Les traitements PR et MO présentent des valeurs moyennes de diamètre significativement supérieures à celles du témoin, notamment en fin d'expérimentation (D7).

2.3. Croissance en Hauteur et Élongation (Paramètre H)

L'élongation de la tige (H) montre un effet des espèces, indiquant des différences nettes de croissance verticale. L'espèce E3 (*Fraxinus sp*) et l'espèce E1 (*Elaeagnus angustifolia*) présentent globalement des hauteurs supérieures à celles de E2 (*Schinus molle*), ce qui suggère une meilleure performance de croissance en hauteur dans les conditions expérimentales.

En revanche, l'analyse statistique des traitements n'a révélé aucun effet significatif sur la hauteur des plants. Malgré cela, des différences descriptives sont observées entre les modalités, où les traitements PR, MO et BO présentent des valeurs moyennes légèrement plus élevées que le témoin (TE). Ces résultats doivent être considérés comme des tendances générales et non comme des effets statistiquement confirmés pour ce paramètre spécifique.

2.4. Synthèse Générale de la Discussion

La confrontation des résultats de l'analyse univariée avec les caractéristiques des espèces étudiées et les effets des traitements appliqués permet de dégager plusieurs enseignements scientifiques.

1. Effet de l'espèce

Les résultats obtenus montrent l'existence d'une variabilité interspécifique dans les performances de croissance et de survie des espèces étudiées. L'espèce E3(*Fraxinus sp*) apparaît comme la plus performante dans les conditions de l'expérimentation, en présentant globalement les valeurs les plus élevées pour le taux de survie final ainsi que pour les paramètres de croissance en hauteur et en diamètre. À l'inverse, l'espèce E2(*Schinus molle*) a montré des performances relativement plus faibles, ce qui pourrait traduire une moindre capacité d'adaptation aux conditions environnementales de l'essai.

2. Effet des traitements

L'analyse des traitements révèle des différences de performance descriptives entre les modalités étudiées. Le traitement PR et le traitement MO présentent des valeurs moyennes plus élevées pour certains paramètres de croissance, notamment le diamètre. Cependant, les tests statistiques (ANOVA) n'ont pas toujours montré de différences significatives au seuil de 5 %. Ces observations suggèrent que certaines techniques basées sur la nature peuvent améliorer les conditions de développement des plants, mais l'effet reste modéré et variable selon les paramètres mesurés.

Comparaison avec les travaux antérieurs

L'analyse comparative de nos résultats avec les données de la littérature scientifique permet de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la réussite des plantations en milieu aride et semi-aride et de situer nos observations dans le contexte des programmes de restauration écologique. Les résultats obtenus montrent que les techniques basées sur la nature peuvent contribuer à améliorer les performances de croissance des plants, même lorsque leur effet sur certains paramètres n'apparaît pas immédiatement significatif.

Concernant le taux de survie, l'analyse statistique n'a révélé aucun effet significatif des traitements appliqués ($p = 0,302$). Néanmoins, les taux de survie enregistrés au cours de l'expérimentation restent élevés (93 % à 96 %), ce qui témoigne d'une bonne adaptation des espèces aux conditions du site d'étude. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Padilla et Pugnaire (2007), qui ont montré que la survie des jeunes plants en milieu sec dépend principalement de la capacité des racines à accéder aux ressources hydriques profondes plutôt que des traitements appliqués à court terme. De même, Whitford (2002) souligne que les espèces adaptées aux milieux arides possèdent des mécanismes physiologiques et morphologiques leur permettant de maintenir des taux de survie élevés

malgré les contraintes environnementales. Ainsi, la tolérance physiologique des espèces au déficit hydrique constitue un facteur déterminant durant la phase d'installation des plantations. Ces résultats sont également cohérents avec les observations réalisées dans les monts de Saïda par Aouadj et al. (2020), qui ont montré que plusieurs espèces utilisées dans les programmes de restauration écologique présentent une bonne capacité d'installation et de survie malgré les contraintes climatiques propres aux zones semi-arides de la région.

En revanche, les traitements ont exercé un effet significatif sur le diamètre au collet ($p = 0,010$). Ce résultat met en évidence l'importance de l'amélioration des propriétés du sol pour stimuler la croissance végétative. Plusieurs études en restauration écologique ont démontré que l'amélioration de la structure du sol et l'apport de matière organique favorisent la croissance radiale des jeunes plants en augmentant la disponibilité en eau et en nutriments (Cortina et al., 2011 ; Vallejo et al., 2012). Dans notre étude, les meilleurs résultats ont été observés avec les traitements impliquant la matière organique et la profondeur de plantation, ce qui confirme l'importance de la zone racinaire dans l'expression de la vigueur des plants. Ces observations rejoignent également celles d'Oliet et al. (2013), qui ont montré que l'amélioration des conditions nutritives et hydriques du sol favorise le développement des jeunes plants après leur transplantation. De même, Navarro-Cano et al. (2018) ont mis en évidence le rôle positif des amendements organiques dans l'amélioration de la fertilité du sol et de la croissance des végétaux dans les écosystèmes semi-arides. Dans le même contexte, Borsali et Zadi (2014), dans la forêt d'Aioun Branis (Saïda), ont montré que l'apport de matière organique contribue à l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol, favorisant ainsi les processus de restauration écologique. Ces observations renforcent l'interprétation selon laquelle les traitements intégrant la matière organique ont contribué à améliorer la croissance radiale des plants dans notre étude.

Concernant la hauteur des plants, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements ($p = 0,879$). Cette absence d'effet est cohérente avec les conclusions de Padilla et Pugnaire (2007), qui indiquent que la croissance en hauteur est fortement contrôlée par les caractéristiques intrinsèques de l'espèce et nécessite généralement un temps d'observation plus long pour refléter les améliorations des conditions édaphiques. De même, Chirino et al. (2009) rapportent que les bénéfices des techniques de restauration apparaissent souvent progressivement et deviennent plus visibles après plusieurs saisons de croissance. Ainsi, les effets des traitements semblent se manifester d'abord au niveau du développement racinaire et du diamètre avant d'influencer la croissance verticale.

Par ailleurs, l'analyse a montré un effet significatif de l'espèce sur le diamètre au collet ($p = 0,017$) et un effet très hautement significatif sur la hauteur des plants ($p < 0,001$). Ces résultats traduisent des différences importantes de comportement entre les espèces étudiées (*Elaeagnus angustifolia*, *Schinus molle* et *Fraxinus sp*). Ces variations peuvent être attribuées à leurs stratégies d'adaptation, notamment la capacité d'exploration racinaire et l'efficacité d'utilisation des ressources hydriques et nutritives. Ces observations sont conformes aux principes de restauration écologique, selon lesquels le choix des espèces constitue un facteur déterminant du succès des plantations en milieux contraints (Vallejo et al., 2012 ; Cortina et al., 2011). Elles rejoignent également les conclusions de Rey Benayas et al. (2009), qui considèrent que l'adaptation des espèces aux conditions écologiques locales représente l'un des facteurs les plus importants pour assurer la réussite des programmes de restauration. Cette interprétation est renforcée par les travaux de Behnke et Mortimore (2016), selon lesquels le succès des plantations en zones sèches résulte de l'interaction entre les caractéristiques biologiques des espèces, la disponibilité en eau et les propriétés du sol. À l'échelle locale, Aouadj et al. (2023), dans leur diagnostic floristique et écologique des monts de Saïda, soulignent également que le choix d'espèces adaptées aux conditions écologiques régionales constitue un élément essentiel de la réussite des opérations de restauration. Cette conclusion concorde avec les différences de croissance observées entre *Elaeagnus angustifolia*, *Schinus molle* et *Fraxinus sp* dans notre expérimentation.

Par ailleurs, les travaux menés dans la région de Saïda mettent en évidence l'importance de la connaissance de la flore locale et des caractéristiques écologiques pour orienter les actions de restauration écologique (Aouadj et al., 2020 ; Aouadj et al., 2023). De leur côté, Borsali et Zadi (2014) montrent que l'amélioration des propriétés du sol par les apports organiques constitue également un facteur favorable à la réussite des plantations.

Enfin, les résultats obtenus sont en accord avec les principes généraux de l'écologie des zones arides décrits par D'Odorico et Porporato (2006), selon lesquels l'eau constitue le principal facteur limitant du fonctionnement des écosystèmes secs. Ces auteurs soulignent que toute amélioration de la capacité du sol à retenir l'humidité peut favoriser l'établissement et la croissance des végétaux. Ainsi, même lorsque certains paramètres ne présentent pas de différences statistiques significatives à court terme, les techniques basées sur la nature peuvent contribuer à renforcer progressivement la résilience des plantations. Dans l'ensemble, les résultats de cette étude confirment que les techniques basées sur la nature

représentent une approche pertinente pour améliorer la réussite des plantations et soutenir les actions de restauration écologique dans les régions arides et semi-arides.

Conclusion

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence prédominante de l'espèce sur les performances de croissance, notamment pour la hauteur et le diamètre. L'espèce E3(*Fraxinus sp*) se distingue par de meilleures performances globales dans les conditions de l'étude.

Concernant les traitements, leur effet est variable selon les paramètres étudiés. Bien que des tendances positives soient observées pour le diamètre et la hauteur avec les traitements PR et MO, les analyses statistiques montrent que l'effet sur le taux de survie n'est pas significatif ($p > 0.05$). Le traitement PR montre des valeurs moyennes plus élevées pour certains paramètres de croissance, suggérant une efficacité potentielle qui mériterait d'être confirmée sur le long terme.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'effet de différentes techniques basées sur la nature (NBS) sur la croissance et la survie de différentes espèces végétales dans un milieu aride, ainsi que d'analyser l'interaction éventuelle entre l'espèce et le traitement.

Les résultats obtenus montrent que les réponses des plants varient selon les paramètres étudiés. L'analyse statistique a révélé un effet significatif de l'espèce sur certains paramètres de croissance, notamment la hauteur et le diamètre, tandis que les traitements appliqués n'ont montré un effet significatif que sur le diamètre. En revanche, aucun effet significatif n'a été observé sur la survie des plants, ni d'interaction significative entre l'espèce et le traitement.

Ces résultats indiquent que les techniques NBS testées présentent un effet partiel, principalement limité à l'amélioration du développement radial des plants. L'absence d'effet significatif sur la survie et la croissance en hauteur suggère que les conditions environnementales contraignantes du milieu aride étudié peuvent limiter l'expression des bénéfices attendus des traitements à court terme.

Ainsi, l'hypothèse initiale selon laquelle les techniques NBS améliorent globalement la croissance et la survie des plants est partiellement validée. Les résultats soulignent également l'importance des caractéristiques propres aux espèces dans la réponse observée, plus que l'effet combiné des traitements.

Enfin, cette étude met en évidence la nécessité de poursuivre les recherches sur une période plus longue afin de mieux évaluer l'efficacité réelle des techniques NBS dans les écosystèmes arides, et d'optimiser leur utilisation dans les programmes de restauration écologique.

Limites de l'étude

Les résultats obtenus ont également pu être influencés par certaines contraintes rencontrées sur le terrain. En effet, plusieurs épisodes pluvieux ont été enregistrés durant la période de suivi, parfois immédiatement avant les campagnes de mesure, ce qui a pu réduire temporairement le stress hydrique et atténuer les différences entre les traitements. Par ailleurs, des phénomènes localisés d'érosion et d'accumulation de sédiments ont été observés dans certaines cuvettes expérimentales. La présence occasionnelle de colonies de fourmis a également pu modifier localement la structure du sol. Ces facteurs environnementaux peuvent avoir contribué à accroître la variabilité des réponses observées.

Enfin, la dernière phase de suivi a coïncidé avec une élévation brutale des températures, marquant l'entrée dans la période estivale. Ce stress thermique intense, exacerbé par les effets du changement climatique, a probablement entraîné un arrêt de la croissance végétative. Dans certains cas, cela s'est traduit par une diminution apparente de la hauteur et du diamètre des plants, due à la déshydratation des tissus et à la perte de turgescence, ce qui a pu masquer le potentiel réel de croissance des espèces étudiées.

Perspectives et Recommandations

Au vu des résultats obtenus lors de cette expérimentation à Aïn Skhoua, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour améliorer la gestion des plantations et les projets de restauration dans les zones arides et semi-arides :

- Recommandations techniques et pratiques : les résultats ont montré l'efficacité relative de certaines techniques basées sur la nature. Il est donc recommandé de :
- 1) **Généraliser la plantation à grande profondeur (60 cm)** : Cette technique a permis un meilleur enracinement et une amélioration significative du diamètre au collet. Elle devrait être privilégiée par rapport à la plantation standard à 40 cm.
- 2) **Intégrer les amendements organiques** : L'apport de matière organique ou de compost s'est avéré bénéfique pour la croissance radiale. L'utilisation de ressources locales disponibles (comme le BRF ou le fumier) est conseillée pour améliorer la rétention hydrique et la structure du sol.
- 3) **Valoriser les espèces résilientes** : L'espèce *Elaeagnus angustifolia* (Olivier de Bohême) a montré une bonne adaptation. Son utilisation est recommandée pour la création de brise-vent et la stabilisation des sols dans les parcours steppiques.
 - Perspectives de recherche Cette étude a ouvert plusieurs pistes pour des recherches futures afin d'approfondir la compréhension de ces écosystèmes :
 - 1) **Prolonger la durée de suivi** : La présente étude s'est déroulée sur une courte période. Il est essentiel de poursuivre le suivi sur le long terme (2ans) pour évaluer la survie définitive des plants et leur capacité à résister aux cycles de sécheresse successifs.
 - 2) **Tester d'autres espèces et techniques** : Il serait intéressant d'étendre ces essais à d'autres essences forestières locales ou introduites, ainsi qu'à d'autres techniques de collecte des eaux (comme les demi-lunes ou les banquettes).
 - 3) **Analyser les paramètres physiologiques** : Des études complémentaires sur le potentiel hydrique foliaire et la teneur en chlorophylle permettraient de mieux comprendre les mécanismes d'adaptation physiologique des plants sous stress.

Références Bibliographiques :

Références Bibliographiques :

1. ANAT. (2004). *Carte bioclimatique de l'Algérie*. Agence Nationale des Aménagements du Territoire.
2. APC d'Aïn Skhoua. (2012). *Limites géographiques de la commune d'Aïn Skhoua*. Assemblée Populaire Communale d'Aïn Skhoua.
3. Aouadj, S. A., Nasrallah, Y., Hasnaoui, O., & Khatir, H. (2020). La flore rare, endémique et menacée des monts de Saïda (Algérie). *Revue Agrobiologia*, 10(1), 1986–1998.
4. Aouadj, R., et al. (2023). Diagnostic floristique et écologique des monts de Saïda : Choix des espèces pour la restauration.
5. Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1957). Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie*, 66, 193–220.
6. Barbault, R. (1983). *Écologie des populations et des peuplements*. Masson.
7. Behnke, R., & Mortimore, M. (2016). *Dryland opportunities: A new paradigm for people, ecosystems and development*. IIED & IUCN.
8. Belaroui, A. (2012). Évolution récente des précipitations dans les Hauts Plateaux algériens. *Revue des Régions Arides*, 23(1–2), 21–32.
9. Benabderrahmane, M. C., Abdelguerfi, A., & Ould-Mohamed, B. (2006). Réhabilitation des steppes dégradées dans la région de Naâma (Sud-Ouest algérien). *Annales de l'INRGREF*, numéro spécial, 313–325.
10. Benkhetto, A., Taïbi, K., Benkhetto, M., Azouzi, B., & Djili, K. (2022). Assessment of floristic diversity in the arid steppe region of Tiaret, Algeria. *Tropical Ecology*, 63(3), 463–479. <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00226-0>
11. Borsali, A. H., & Zadi, F. Z. (2014). Ecological restoration of forest soils: Case of the forest "Aioun Branise", Saida, Algeria. *Open Journal of Forestry*, 4(5), 527–535. <https://doi.org/10.4236/ojf.2014.45057>
12. Boudjadja, A., Messahel, M., & Houma, F. (2003). Bilan de la politique de reboisement en Algérie : Le cas du barrage vert. *Sécheresse*, 14(4), 241–248.
13. Boudjadi, A. (2010). *Étude géologique et structurale de la région de l'Ouest algérien*.

14. Chirino, E., Vilagrosa, A., Cortina, J., Valdecantos, A., Fuentes, D., Trubat, R., Luis, V. C., Puértolas, J., Bautista, S., Baeza, M. J., Peñuelas, J. L., & Vallejo, V. R. (2009). Ecological restoration in degraded drylands: The need to improve the seedling quality and site conditions in the field. In S. P. Grossberg (Ed.), *Forest Management* (pp. 85–114). Nova Science Publishers.
15. Clair, J. (1955). *Études géologiques sur l'Afrique du Nord*.
16. Clinckx, J. (1969). *Le Quaternaire récent et les formations superficielles des Hautes Plaines occidentales*.
17. Cloudsley-Thompson, J. L. (1996). *Biotic interactions in arid ecosystems*. Springer.
18. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (Eds.). (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN.
19. Commune d'Aïn Skhouna. (2008). *Monographie de la commune d'Aïn Skhouna*. Assemblée Populaire Communale d'Aïn Skhouna.
20. Cortina, J., Amat, B., Castillo, V., Fuentes, D., & Maestre, F. T. (2011). The seedling hub: Facilitating ecological restoration in dryland areas. *Journal of Arid Environments*, 75(6), 517–521.
21. Daget, P., & Poissonet, J. (1971). Une méthode d'analyse phytocéologique des prairies. *Annales Agronomiques*, 22(5), 5–41.
22. Dakiche, S. (2006). Évaluation de la dégradation des steppes algériennes et stratégie de restauration. *Sécheresse*, 17(3), 207–213.
23. D'Odorico, P., & Porporato, A. (2006). *Dryland ecohydrology*. Springer.
24. Emberger, L. (1942). Un projet de classification des climats en appliquant la méthode aux pays méditerranéens. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*.
25. Food and Agriculture Organization. (2005). *Global forest resources assessment 2005: Algeria*. FAO.
26. Food and Agriculture Organization. (2006). *World reference base for soil resources 2006*. FAO.
27. Food and Agriculture Organization. (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)*. FAO.

28. Food and Agriculture Organization. (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR): Main report*. FAO.
29. Food and Agriculture Organization. (2017). *The future of food and agriculture: Trends and challenges*. FAO.
30. FAO/AGLL/GIS (SDRN). (2002). *Digital soil map of the world and derived soil properties*. FAO.
31. Floret, C., & Pontanier, R. (1984). *L'aridité en Tunisie présaharienne : Climat, sol, végétation et aménagement*. ORSTOM.
32. Ghazi, A. (2004). Stratégies nationales de lutte contre la désertification en Algérie. *VertigO*, 5(3).
33. Grégoire, J., et al. (2012). *L'utilisation de XLSTAT dans les analyses statistiques*.
34. Guiraud, R. (1973). *Évolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie* (Thèse de doctorat).
35. INRF. (2006). *Rapport sur l'état des terres dans la commune d'Aïn Skhouna*. Institut National de Recherche Forestière.
36. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press.
37. Ionesco, T. (1965). *Contribution à l'étude bioclimatique du Maghreb*. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*.
38. IUCN. (2004). *Managing freshwater ecosystems for the future*. IUCN.
39. IUCN. (2020). *Global standard for nature-based solutions: A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS* (1st ed.). IUCN.
40. Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539.
41. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.
42. Laffitte, R. (1939). *Étude géologique de l'Aurès*. Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie.

43. Le Houérou, H. N. (1970). Les zones arides de l'Afrique du Nord. In *Bioclimatologie et écologie* (pp. 123–145). CNRS.
44. Le Houérou, H. N. (1974). The nature and causes of desertification. *Desertification Control Bulletin*.
45. Le Houérou, H. N. (1995). Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. *Options Méditerranéennes, Série B*, 10, 229–247.
46. Maes, J., & Jacobs, S. (2017). Nature-based solutions for Europe's sustainable development. *Conservation Letters*, 10(1), 121–124.
47. Middleton, N., & Thomas, D. (1997). *World atlas of desertification* (2nd ed.). Arnold.
48. Mohous, M. (2005). Dégradation et désertification des zones steppiques en Algérie. *Revue des Régions Arides*, numéro spécial, 115–122.
49. Moulay, M. (2022). *Inventaire floristique de la région d'Aïn Skhouna*. (Mémoire).
50. Nedjimi, B., & Guit, B. (2012). Effets du surpâturage sur la végétation des parcours arides. *Revue d'Écologie et de Biologie du Sol*, 19(1), 45–56.
51. Nedjraoui, D. (2003). La dynamique de la végétation steppique en Algérie. Université de Blida.
52. Nedjraoui, D., & Bedrani, S. (2008). La dégradation des steppes algériennes : Causes et conséquences. *VertigO*, 8(1).
53. Navarro-Cano, J. A., Verdú, M., & Goberna, M. (2018). Trait-based selection of nurse plants to restore ecosystem functions in mine tailings. *Journal of Applied Ecology*, 55(3), 1195–1206. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13094>
54. Olet, J. A., Puértolas, J., Planelles, R., & Jacobs, D. F. (2013). Nutrient loading of forest tree seedlings to promote stress resistance and field performance: A Mediterranean perspective. *New Forests*, 44(5), 649–669. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9382-8>
55. Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., & Sombroek, W. G. (1991). *World map of the status of human-induced soil degradation*. ISRIC.

56. Ouessar, M., Bruggeman, A., Abdelli, F., Moerkerk, M., Gabriels, D., & Cornelis, W. M. (2006). Water harvesting in degraded rangelands of Tunisia. In *Water conservation: New approaches* (pp. 145–160). CIHEAM.
57. Padilla, F. M., & Pugnaire, F. I. (2006). The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(4), 196–202. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004%5B0196:TRONPI%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004%5B0196:TRONPI%5D2.0.CO;2)
58. Padilla, F. M., & Pugnaire, F. I. (2007). Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival and growth during drought. *Functional Ecology*, 21(3), 489–495. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01267.x>
59. Ramsar Convention Secretariat. (2019). *Fiche descriptive Ramsar : Chott El Chergui*. Convention on Wetlands.
60. Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2014). *Biology of plants* (8th ed.). W. H. Freeman and Company.
61. Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J., Downing, T. E., Dowlatabadi, H., Fernández, R. J., Herrick, J. E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F. T., Ayarza, M., & Walker, B. (2007). Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*, 316(5826), 847–851. <https://doi.org/10.1126/science.1131634>
62. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. (2004). *The SER international primer on ecological restoration*. Society for Ecological Restoration International.
63. Tabet Aoul, F. (2018). *Étude du réservoir de la leishmaniose cutanée dans deux écosystèmes différents (Aïn Skhouana, wilaya de Saïda et Draâ El Mizan, wilaya de Tizi Ouzou)* (Thèse de doctorat). Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
64. United Nations Environment Programme. (1997). *World atlas of desertification*. UNEP.
65. United Nations Environment Programme. (2006). *Challenges to international waters: Regional assessments*. UNEP.
66. United Nations. (1994). *United Nations Convention to Combat Desertification*. United Nations.

67. United Nations Convention to Combat Desertification. (2011). *Land and soil in the context of a green economy for sustainable development, food security and poverty eradication*. UNCCD.
68. Valentin, C., Rajot, J. L., & Mitja, D. (2005). Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the sub-humid and semi-arid regions of West Africa. *Geoderma*, 125(3–4), 253–273. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.003>
69. Vallejo, V. R., Aronson, J., Pausas, J. G., & Cortina, J. (2012). Fire severity and ecosystem resilience in the Mediterranean Basin. In F. Moreira, M. Arianoutsou, P. Corona, & J. De las Heras (Eds.), *Post-fire management and restoration of southern European forests* (pp. 121–150). Springer.
70. Whitford, W. G. (2002). *Ecology of desert systems*. Academic Press.