



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

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi -Tébessa

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

Département des Etres vivants

MEMOIRE présenté en vue de l'obtention du diplôme DE MASTER

Domaine: Science de la nature et de la vie

Filière: Sciences biologiques

Option: Ecophysiologie végétale

Thème:

**Contribution à l'évaluation de la fertilité des sols sous
peuplements de *Pinus halepensis* à Tébessa Bir makkadem**

Présenté par :

Boualleg Sondes

Zemouli Ikram

Devant le jury :

Boudjabi Sonia

Hioun Soraya

Ghedabnia Karima

Pr. Université de Tébessa

M.CB. Université de Tébessa

M.A.A. Université de Tébessa

Présidente

Examinatrice

Promotrice

Date de soutenance:06.04.2026



Remerciements

À l'issue de ce modeste travail, je tiens à exprimer, avec une profonde reconnaissance, ma gratitude envers Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail, ainsi que Son soutien miséricordieux tout au long de ma vie et de mes années d'études.

Je remercie tout particulièrement Mme Ghedabnia Karima, ma promotrice, pour avoir accepté de m'encadrer. Je lui exprime ma gratitude pour sa disponibilité constante, la richesse de ses conseils, la qualité de son encadrement ainsi que la pertinence de ses orientations tout au long de ce travail.

J'adresse mes remerciements respectueux à Mme Boujabi Sonia, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance, ainsi qu'à Mme Hioun Soraya, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'examiner ce travail.

Enfin, j'exprime ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont soutenue et encouragée durant les moments difficiles, et qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'accomplissement de ce travail.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts, de patience et de persévérance

A mes très chers parents,

Aucun mot ne saurait exprimer ma profonde gratitude pour tout ce que vous avez fait pour moi. Merci pour votre amour infini, votre soutien moral et matériel, vos sacrifices et vos encouragements permanents qui m'ont donné la force de continuer et de réussir. Que Dieu vous protège et vous accorde une longue vie pleine de bonheur et de santé.

A toute ma famille,

A mon frère, Nour Islem, mes sœurs Ibtisame Awatef Nouha, merci pour leur affection, leurs conseils et leur présence dans les moments difficiles comme dans les meilleurs moments.

A mes chères neveux nièces,

Hayt, Safa, Rahma, Nizar, Ayla Norine, source de joie et de bonheur dans ma vie, je vous souhaite un avenir plein de réussite, de santé et de bonheur. Que Dieu vous protège et illumine votre chemin.

A mes amies et collègues,

Merci qui ont partagé avec moi les moments de stress, de fatigue mais aussi de joie durant ce parcours universitaire. Et merci pour votre aide, votre soutien, et tous les beaux souvenirs.

Enfin, je dédie ce travail à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Ikram.





Dédicaces

(وآخر دعوانهم ان الحمد لله رب العالمين)

À la mémoire de mon très cher père,

Qui a tant sacrifié pour moi et dont l'amour, les conseils et la présence resteront à jamais gravés dans mon cœur. Même s'il n'a pas pu voir l'aboutissement de ce mémoire, il demeure la source de ma force et de ma motivation. Qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis.

À ma très chère mère,

qui m'a soutenue dans tous les moments de ma vie, par son amour, sa patience et ses encouragements. Qu'Allah la garde et la protège.

À mon cher frère Hamza,

pour son soutien précieux, sa présence constante et son aide tout au long de mes études. Merci d'avoir toujours cru en moi.

À mes frères Moussa et Choukri,

ainsi qu'à mes sœurs Hanane, Basma et Hamida, amina

merci pour leur aide tout long de mon parcours. Leur encouragement me donne la force d'avancer et de ne jamais abandonner pour toute l'affection que vous m'apportez.

À toutes mes sœurs et à toute ma famille,

pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur amour sincère.

À tous mes amis,

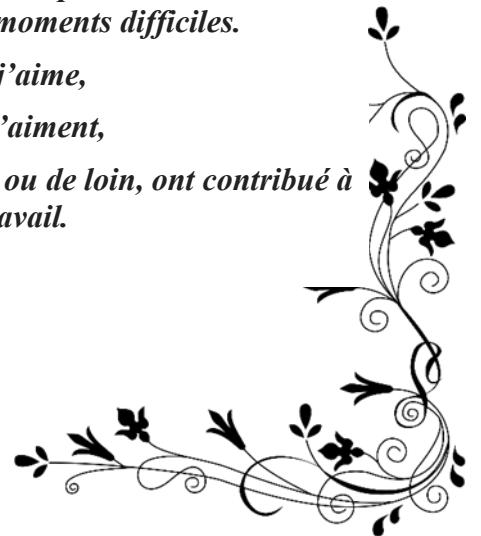
et particulièrement à ma chère amie Nesrine, qui a toujours été présente à mes côtés, pour son soutien, sa patience et sa bienveillance dans les moments difficiles.

À tous ceux que j'aime,

À tous ceux qui m'aiment,

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

Sondos.



Resumé

Cette étude vise à évaluer l'influence du pin d'Ale, (*Pinus halepensis*), sur la fertilité des sols dans une région semi-aride de Tébessa, plus précisément dans la daïra de BirMokkadem (forêt de Braracha-Alouana).

Pour atteindre cet objectif, une approche comparative a été adoptée entre deux stations : une station forestière (pinède de Braracha-Alouana) et une station témoin dépourvue de couvert végétal. Trois échantillons de sol ont été prélevés dans chaque station, puis analysés afin de déterminer leurs propriétés physico-chimiques, notamment la texture, le pH, la conductivité électrique, la teneur en matière organique, les teneurs en calcaire total et actif, ainsi que l'humidité du sol.

Les résultats obtenus mettent en évidence une amélioration globale des propriétés édaphiques sous couvert de pin d'Alep. Cette amélioration se traduit par une évolution de la texture du sol, passant d'une texture limono-sableuse à limono-argilo-sableuse, une augmentation de l'humidité du sol, ainsi qu'un enrichissement en matière organique et effet positif sur l'acidité du sol. En revanche, aucun changement notable n'a été constaté pour la conductivité électrique ni pour les teneurs en calcaire total et actif.

Mots-clés : Tébessa, Braracha-Alouana, Bir Mokkadem, Sol, (*Pinus halepensis*), Fertilité.

Abstract

This study aims to evaluate the influence of the Aleppo pine, *Pinus halepensis*, on soil fertility in a semi-arid region of Tébessa, more precisely in the daïra of Bir Mokkaïem (Braracha-Alouana forest).

To achieve this objective, a comparative approach was adopted between two sites: a forested site (Braracha-Alouana pine forest) and a control site devoid of vegetation cover. Three soil samples were collected from each site and analyzed to determine their physico-chemical properties, including soil texture, pH, electrical conductivity, organic matter content, total and active limestone contents, as well as soil moisture.

The results highlight an overall improvement in soil properties under Aleppo pine cover. This improvement is reflected in a change in soil texture from sandy-loam to sandy-clay-loam, an increase in soil moisture, and an enrichment in organic matter, along with a slight positive effect on soil acidity. In contrast, no significant changes were observed in electrical conductivity or in total and active limestone contents.

Keywords: Tébessa, Braracha-Alouana, Bir Mokkaïem, Soil, *Pinus halepensis*, Fertility.

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير شجرة الصنوبر الحلبي (*Pinus halepensis*) على خصوبة التربة في منطقة شبه جافة تبسة بدائرة -بئر مقدم (غابة برارشة علاونة).

ومن اجل ذلك تمت المقارنة بين محطتين محطة غابية (برارشة علاونة) ومحطة أخرى خالية من الغطاء النباتي كشاهد وقد تم اخذ ثلاث عينات من التربة من كل محطة من اجل إجراء التحاليل الفيزيوكيميائية كحموضة التربة الناقلية الكهربائية - نسبة المادة العضوية - نسبة الكلس الكلي والفعال - رطوبة التربة وقوامها أظهرت النتائج تأثير ايجابيا للصنوبر الحلبي على خصائص التربة. حيث تم تسجيل تغير في قوام التربة من رملي-طمي إلى طمي-طيني-رملي.

وزيادة في رطوبة التربة ونسبة المادة العضوية وتأثير ايجابي على حموضة التربة. في المقابل لم يسجل تغيرات ملحوظة على الناقلية الكهربائية ولا نسب الكلس الكلي الفعال.

الكلمات المفتاحية: خصوبة - صنوبر حلبي - تربة - بئر مقدم- برارشة علاونة - تبسة.

Table Des Matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Introduction	02
CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. Le pin d'Alep	04
1.1. Description botanique du pin d'Alep	
1.1.1. Feuilles (aiguilles)	04
1.2.2. Fleurs	06
1.1.3. Fruits	07
1.1.4. Graines	08
1.2.5. Rameaux	08
1.1.6. L'écorce	09
1.1.7. Bois	09
1.1.8. Système racinaire	01
1.2. Classification	11
1.3. Répartition du pin d'Alep	11
1.4. Exigences édaphiques	12

1.5. Exigences climatiques	13
1.6. Importance écologique du pin d'Alep	13
2. Le sol	13
2.1. Définition du sol	13
2.2. Composition du sol	14
2.3. Fertilité du sol	14
2.4. Facteurs physiques	15
2.4.1. Structure	15
2.4.2. Texture	15
2.4.3. Porosité	15
2.5. Facteurs chimiques	15
2.5.1. pH du sol	16
2.5.2. Conductivité électrique (CE)	17
2.5.3. Matière organique	17
2.5.4. Éléments nutritifs	17
2.6. Facteurs biologiques	17
2.7. Types de sols dans les zones à pin d'Alep	17
2.7.1Aurès-Némemcha	18
2.7.2Région du Tell	18
2.7.3Littoral et sublittoral	18

2.7.4 Atlas saharien	19
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES	
1. Description de la zone d'étude	21
1.1. Situation géographique	21
1.2. Le site d'étude	21
1.3. Le climat	23
2. L'étude du sol	24
2.1. Echantillonnage	24
2.2. Analyses physico-chimiques du sol	24
2.2.1. Texture du sol	25
2.2.2. L'humidité	25
2.2.3. pH	26
2.2.4 Conductivité électrique	26
2.2.5. Calcaire total	26
2.2.6 Le calcaire actif	27
2.2.7 La matière organique	28
3. Traitement statistique	29
CHAPITRE 3: RESULTATS	
1 La texture du sol	30
2. L'humidité	30

4.pH du sol	32
5.La conductivité électrique	32
6.Le calcaire total	33
7.Le calcaire actif	34
CHAPITRE 4 : DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	44
ANNEXES	49

LISTE DES TABLEAU

Tableau	N°
Tableau 1: La variation de la texture selon les stations d'étude.	30

LISTE DES FIGURES

Figure	N°
Figure 01 Arbre de pin d'Alep (<i>Pinus halepensis</i>)	04
Figure 02 les aiguilles du pin d'Alep	06
Figure 03 Cônes mâles du pin d'Alep	06
Figure 04 Cônes femelles du pin d'Alep	07
Figure 05 Fruits du pin d'Alep	07
Figure 06 Graines du pin d'Alep	08
Figure 07 Rameaux du pin d'Alep	09
Figure 08 Écorce du pin d'Alep	10
Figure 09 Système racinaire du pin d'Alep	10
Figure 10 Aire de répartition du pin d'Alep en Algérie	12
Figure 11 Représentation des composantes de la fertilité du sol	15
Figure 12 Localisation de la région d'étude	21
Figure 13 Les Stations d'études	23
Figure 14 Diagramme ombrothermique de la région de Tébessa de période 1980-2016	24
Figure 15 Variation des valeurs moyennes de l'humidité du sol selon les stations (Les lettres alphabétiques a et b : groupes homogènes)	31
Figure 16 Variation des valeurs moyennes de pH selon les stations	32
Figure 17 Variations des valeurs moyennes de conductivité selon les stations	33
Figure 18 Variations des valeurs moyennes du calcaire total selon les stations	33
Figure 19 Variation des valeurs moyennes du calcaire actif selon les stations	34
Figure 20 Variations des valeurs moyennes de matière organique selon les stations (Les lettres alphabétiques a et b : groupes homogènes)	35

INTRODUCTION

Les forêts méditerranéennes constituent des écosystèmes d'une grande importance écologique et environnementale. Elles couvrent une large partie du bassin méditerranéen et se caractérisent par une végétation adaptée à des conditions climatiques marquées par des étés chauds et secs et des hivers doux et relativement humides. Ces formations forestières jouent un rôle essentiel dans la conservation de la biodiversité, la protection des ressources en eau, le stockage du carbone et la préservation des sols contre les phénomènes de dégradation (Quézel & Médail, 2003 ; Blondel *et al.*, 2010).

En Algérie, les forêts méditerranéennes occupent une place importante dans les paysages naturels et sont principalement représentées par les formations de chêne vert, de chêne-liège et de pin d'Alep. Elles constituent un patrimoine écologique et socio-économique majeur, particulièrement dans les régions semi-arides où elles contribuent à la lutte contre la désertification et à la stabilisation des sols (Boudy, 1950 ; Benabdeli, 1996). Parmi les espèces forestières les plus répandues figure le *Pinus halepensis*, qui couvre une grande partie des surfaces boisées algériennes grâce à sa remarquable adaptation aux conditions de sécheresse et aux sols pauvres. Cette espèce joue un rôle fondamental dans la protection des sols en limitant l'érosion et en favorisant l'accumulation de matière organique à travers la production de litière (Quézel & Santa, 1962 ; Bentouati, 2006). La décomposition progressive de cette litière enrichit le sol en matière organique, améliore sa structure, augmente sa capacité de rétention en eau et stimule l'activité biologique, contribuant ainsi au maintien de sa fertilité et au bon fonctionnement de l'écosystème forestier (Duchaufour, 2001 ; Gobat *et al.*, 2003).

Plusieurs études ont montré que *Pinus halepensis* peut modifier les caractéristiques physicochimiques du sol. Les aiguilles et débris végétaux accumulés sous le couvert forestier enrichissent progressivement le sol en matière organique et en carbone, favorisant ainsi l'amélioration de certaines propriétés du sol (Jeddi et Chaieb, 2010). Les peuplements de pin d'Alep contribuent également à l'augmentation de l'humidité et de l'azote total du sol, particulièrement dans les zones semi-arides (Romeo *et al.*, 2020).

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact de *Pinus halepensis* sur la fertilité des sols. Pour ce faire, une approche comparative a été adoptée entre un site reboisé par le pin d'Alep (Pinède de Braracha-Alouana) et une parcelle témoin dépourvue de couvert végétal. Cette étude repose sur l'hypothèse selon laquelle le pin d'Alep pourrait induire une amélioration qualitative des propriétés du sol. L'analyse s'appuie sur plusieurs paramètres pédologiques, notamment le pH, la conductivité

électrique (CE), l'humidité du sol, la texture, la teneur en matière organique, ainsi que les taux de calcaire total et actif.

Ce mémoire comprend une introduction générale suivie de quatre chapitres : une synthèse bibliographique sur le pin d'Alep et les sols, une présentation du matériel et des méthodes, les résultats avec leur analyse, puis une discussion accompagnée d'une conclusion générale.

CHAPITRE 01

REVUE

BIBLIOGRAPHIQUE

1. Le pin d'Alep

Le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) est une espèce forestière largement répandue dans l'ensemble du bassin méditerranéen (Figure1). Il se caractérise par une grande capacité d'adaptation aux conditions écologiques difficiles, notamment à la sécheresse et aux sols pauvres, ce qui lui permet de coloniser une large gamme de bioclimats, à l'exception des zones arides et hyperarides (Bonnier, 1990 ; Quézel&Médail, 2003 ; DGF, 2010).

Le pin d'Alep est un arbre résineux pouvant atteindre jusqu'à 30 m de hauteur. Il présente généralement un tronc peu rectiligne, souvent incliné, ainsi qu'une cime claire, aplatie irrégulière, lui conférant une silhouette caractéristique (Bekeretetal. 1982).



Figure01 : Arbre de *Pinus halepensis* (Photo personnelle ,2026).

1.1Description botanique du pin d'Alep (*Pinus halepensis*)

1.1.1. Les feuilles (aiguilles)

Les aiguilles du pin d'Alep se présentent sous forme d'aiguilles fines, souples et pointues, mesurant généralement entre 6 et 12 cm de longueur et environ 1 mm d'épaisseur (Figure 2). Elles sont groupées par deux, de couleur vert grisâtre et persistent sur l'arbre pendant 2 à 3 ans. Elles

possèdent une cuticule épaisse qui limite la perte d'eau, ce qui constitue une adaptation aux conditions de sécheresse (Nahal, 1962 ; Seigue, 1985 ; Rameau *et al.*, 2008 ; Ozenda, 1982).



Figure02 : les aiguilles du pin d'Alep (Photo personnelle, 2026).

1.1.2. Les fleurs

A. Les cônes mâles

Chez le *Pinus halepensis*, espèce monoïque, les cônes mâles apparaissent au printemps (avril–mai). Ils sont jaunâtres, de petite taille, regroupés à la base des jeunes pousses et assurent la production du pollen (Figure3) . (Fady *et al.*, 2003 ; Quézel&Médail, 2003).



Figure 03 : Les cônes males du pin d'Alep (Photo personnelle, 2026).

b. Les cônes femelles

Les cônes femelles sont ovoïdes, mesurant environ 5 à 10 cm. D'abord verts, ils deviennent bruns à maturité après deux ans. Ils sont insérés de manière oblique sur les rameaux et présentent des écailles épaisses caractéristiques (Figure 4). (Nahal, 1962 ; Richardson, 1998).



Figure 04 : Les cônes femelles du pin d'Alep (Photo personnelle, 2026).

1.1.3. Les fruits

Les fruits correspondent à des cônes ligneux de forme conique, mesurant entre 5 et 12 cm (Figure 5). Ils peuvent rester fixés sur l'arbre pendant plusieurs années et ne s'ouvrent souvent qu'après exposition à de fortes températures, favorisant ainsi la régénération après incendie (Fady *et al.*, 2003 ; Nathan *et al.*, 1999).



Figure 05: Les fruits du pin d'Alep (Photo personnelle, 2026)

1.1.4. Les graines

Les graines du pin d'Alep sont petites et munies d'une aile, ce qui facilite leur dispersion par le vent (Figure6) (anémocorie) (Quézel&Médail, 2003).



Figure 06 : Graines du pin d'Alep (Photo personnelle, 2026).

1.1.5. Les rameaux et bourgeons

Les rameaux sont généralement fins, flexibles et de couleur verdâtre chez les jeunes pousses, puis deviennent grisâtres avec l'âge (Figure7). Cette espèce présente une croissance polycyclique, pouvant produire plusieurs pousses dans l'année (Ozenda, 1982 ; Fady *et al*2003).

Les bourgeons sont non résineux, de forme ovoïde et pointue, de couleur brune, recouverts d'écailles aux bords blanchâtres (Kadik, 1987).



Figure 07 : Les rameaux du pin d'Alep (Photo personnelle, 2026).

1.1.6. L'écorce

L'écorce du pin d'Alep évolue avec l'âge. Elle est lisse et de couleur gris clair chez les jeunes individus, puis devient épaisse, fissurée et brun rougeâtre chez les arbres adultes, formant un rhytidome protecteur contre les conditions environnementales difficiles (Figure8) (Nahal, 1962 ; Seigue, 1985 ; Rameau *et al.*, 2008 ; Fady *et al.*, 2003 ; Quézel&Médail, 2003 ; Khoudja, 2020).



Figure08 : L'écorce d'arbre du pin d'Alep (Photo personnelle, 2026).

1.1.7. Le bois

Le bois du pin d'Alep est léger, résineux et relativement tendre. Il est utilisé dans plusieurs domaines, notamment comme bois de chauffage, dans l'industrie de la pâte à papier, les emballages et certaines constructions légères (Thirgood, 1981 ; Vennetier *et al.*, 2005).

1.1.8. Le système racinaire

Le système racinaire est généralement pivotant et profond, permettant à l'arbre d'exploiter l'eau en profondeur (Figure9). Il peut aussi développer des racines latérales superficielles, ce qui améliore son adaptation aux sols pauvres et aux conditions de sécheresse (Maestre *et al.*, 2003).

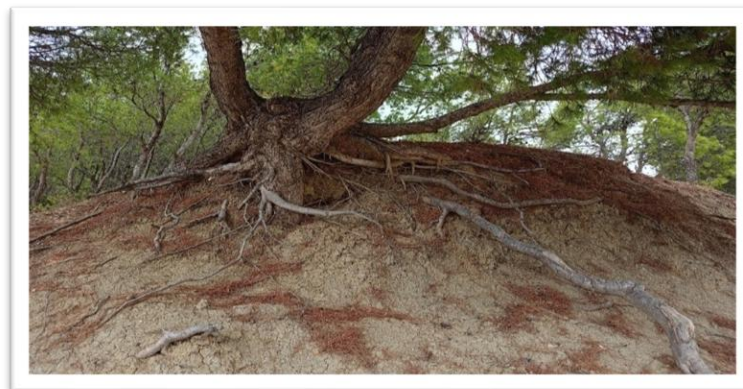


Figure 9 : Le système racinaire de pin d'Alep (photo personnelle 2026).

1.2. Classification

Selon Quézel et Médail (2003), la classification classique de *Pinus halepensis* s'établit comme suit:

Règne	Plantae (Plantes)
Division	Pinophyta (conifères)
Classe	Pinopsida
Ordre	Pinales
Famille	Pinaceae (Pinacées)
Sous-famille	Pinoideae
Genre	<i>Pinus halepensis</i> Mill., 1768

1.3. Répartition du pin d'Alep En Algérie

En Algérie, le pin d'Alep représente une espèce forestière très importante, occupant environ 35 % de la superficie forestière totale, soit près de 800 000 hectares (Figure10) (Mezali,2003).

Il est largement réparti dans plusieurs zones bioclimatiques, avec une dominance dans les régions semi-arides. On le trouve notamment dans la wilaya de Tébessa, les Hauts Plateaux constantinois et les montagnes des Aurès.

Il est également présent dans le nord du pays (Médéa, monts des Bibans), dans l'ouest (Saïda, Mascara, Sidi Bel Abbès, Télagh), ainsi que dans l'Atlas saharien, notamment à Djelfa et dans les monts des Ouled Naïl (Guit, 2015).

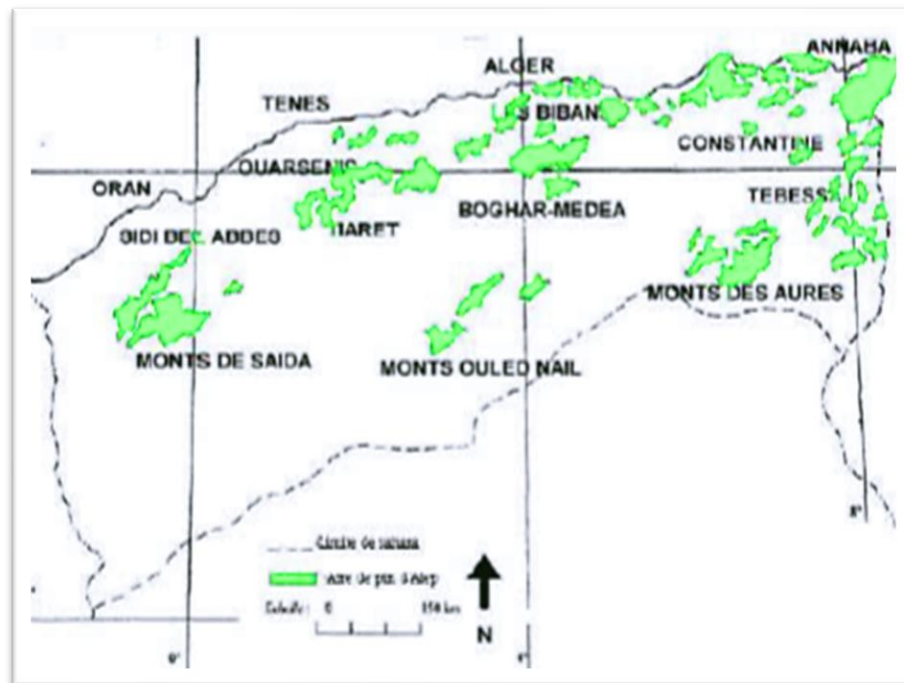


Figure 10 : Aire de répartition du pin d'Alep en Algérie (Seigue, 1985).

1.4. Exigences édaphiques

Le pin d'Alep est une espèce peu exigeante qui peut s'adapter à différents types de sols tels que les marnes, les calcaires, les schistes et les micaschistes. Cependant, il est généralement absent des sols granitiques et gneissiques.

Il montre une préférence pour les sols meubles, friables et bien drainés, favorables à l'enracinement (Loise, 1976 ; Quézel, 1986).

1.5. Exigences climatiques

Le pin d'Alep se développe principalement dans les climats méditerranéens, allant de l'aride supérieur au subhumide, et parfois humide, avec une prédominance dans les zones semi-arides (Nahal, 1986).

C'est une espèce héliophile et xérophile, capable de résister à une forte exposition au soleil et à de longues périodes de sécheresse.

Sa répartition dépend essentiellement des précipitations, de la sécheresse estivale et des températures hivernales. Son optimum écologique correspond à des précipitations annuelles de 400 à 600 mm et une température moyenne de 13,5 à 15 °C. Les meilleures conditions de développement se situent dans les bioclimats semi-arides et subhumides à hiver frais (Kadik, 1987).

1.6. Importance écologique du pin d'Alep

Le pin d'Alep joue un rôle écologique majeur dans les écosystèmes méditerranéens. Grâce à son système racinaire profond, il contribue à la stabilisation des sols et à la réduction de l'érosion hydrique.

Sa litière améliore la fertilité du sol en augmentant la matière organique, ce qui favorise la rétention d'eau, l'aération et l'activité biologique.

Il participe également au cycle des nutriments à travers la décomposition de ses aiguilles, stimulant ainsi l'activité microbienne et fongique (Quézel&Médail, 2003).

Bien qu'il puisse provoquer une légère acidification du sol, cet effet reste limité. Enfin, il est considéré comme une espèce pionnière essentielle pour la restauration des milieux dégradés grâce à sa résistance à la sécheresse (Maestre *et al.*, 2003).

2. Le sol

2.1 Définition du sol

Le sol est une formation naturelle superficielle résultant de l'altération de la roche mère sous l'action combinée de facteurs physiques, chimiques et biologiques, dans un contexte climatique et topographique donné. Ce processus, appelé pédogenèse, conduit à la formation d'horizons différenciés et confère au sol son caractère évolutif et dynamique. Ainsi, le sol ne constitue pas un simple support inerte, mais un système en interaction permanente avec les autres composantes de l'environnement. Selon la FAO (2015), il joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes, notamment à travers la production de biomasse, la régulation du cycle de l'eau, le stockage du carbone et la préservation de la biodiversité (Lal, 2020).

Le sol présente une organisation triphasique comprenant une phase solide (minérale et organique), une phase liquide (solution du sol) et une phase gazeuse. Cette structure lui permet d'assurer des fonctions essentielles telles que le recyclage des nutriments et la régulation des flux hydriques. La matière organique, bien que présente en faible quantité, joue un rôle fondamental dans la fertilité et la stabilité du sol (Lehmann & Kleber, 2015 ; Brady & Weil, 2016).

2.2 Composition du sol

Le sol est un système hétérogène constitué de deux phases principales en interaction. La phase solide comprend les particules minérales (sables, limons, argiles) issues de l'altération de la roche mère, ainsi que la matière organique qui contribue à la stabilité structurale et à la fertilité du sol. Les argiles jouent un rôle important grâce à leur capacité à retenir l'eau et les éléments nutritifs (Brady & Weil, 2016).

La phase fluide est formée de l'eau et de l'air occupant les pores du sol. L'eau transporte les nutriments nécessaires aux plantes, tandis que l'air assure les échanges gazeux indispensables à la respiration des racines et des micro-organismes. La structure poreuse du sol permet ainsi la circulation de l'eau, de l'oxygène et des nutriments, et conditionne son fonctionnement global. La répartition de ces éléments dépend principalement de la texture et de la structure du sol (Hillel, 2004 ; Bronick *et al*, 2005).

2.3 La fertilité du sol

La fertilité du sol correspond à sa capacité à assurer durablement la nutrition des plantes en fournissant les éléments nécessaires à leur croissance, leur développement et leur productivité dans des conditions favorables. Elle résulte de l'interaction étroite entre les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Figure 11). Sur le plan physique, une structure stable et une porosité équilibrée favorisent la circulation de l'eau et de l'air, facilitant ainsi l'enracinement et l'absorption des nutriments. Sur le plan chimique, la fertilité dépend de la disponibilité des éléments nutritifs, du pH et de la capacité d'échange cationique, qui permet au sol de retenir et de libérer les ions essentiels. Sur le plan biologique, l'activité des micro-organismes joue un rôle déterminant dans la décomposition de la matière organique et la minéralisation des nutriments. Ainsi, un sol fertile est un sol équilibré, capable de maintenir une activité biologique élevée et une disponibilité continue des nutriments (Marschner, 2012; Brady & Weil, 2016).



Figure 11 : Représentation des composantes de la fertilité du sol (Boualleg via IA.2026).

2.4 Facteurs physiques du sol

2.4.1. Structure du sol

La structure correspond à l'organisation des particules en agrégats stables liés par des colloïdes (argiles et humus). Elle influence directement la circulation de l'air et de l'eau, ainsi que la résistance à l'érosion (Hénin *et al.*, 1969).

2.4.2. Texture du sol

La texture du sol correspond à la répartition granulométrique des particules minérales en trois fractions principales : sable (grossier), limon (intermédiaire) et argile (fine). Elle dépend essentiellement de la nature de la roche mère et des processus pédogénétiques, ce qui en fait une propriété relativement stable à l'échelle du temps humain. La texture détermine en grande partie les propriétés hydriques du sol, notamment la capacité de rétention en eau, la perméabilité et la capillarité. Les sols sableux, caractérisés par de grosses particules, présentent une forte perméabilité et une bonne aération, mais une faible capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs. À l'inverse, les sols argileux retiennent efficacement l'eau et les nutriments grâce à leur

Forte surface spécifique, mais ils peuvent être sujets à la compaction et à une mauvaise aération. Les sols limoneux ou équilibrés offrent généralement des conditions optimales pour la croissance des plantes, en combinant rétention hydrique et facilité de travail (Hillel, 2004 ; Brady & Weil, 2016).

2.4.3. Porosité du sol

La porosité du sol représente la proportion des espaces vides (pores) entre les particules solides. Elle est essentielle au fonctionnement hydrique et biologique du sol, car elle conditionne la circulation de l'air et de l'eau. On distingue la macroporosité, responsable du drainage et de l'aération, et la microporosité, qui permet la rétention de l'eau disponible pour les plantes. Une porosité équilibrée garantit un bon compromis entre stockage de l'eau et oxygénation des racines. Elle dépend étroitement de la structure et de la texture du sol, ainsi que des pratiques culturales. Le compactage réduit la porosité, limite la croissance racinaire et diminue l'activité microbienne,

Affectant ainsi la fertilité du sol. La porosité est donc un paramètre fondamental pour évaluer la qualité physique des sols (Lal&Shukla, 2004).

2.5. Facteurs chimiques du sol

2.5.1. pH du sol

Le pH du sol est une mesure de l'activité des ions hydrogène (H^+) dans la solution du sol et permet de déterminer son caractère acide, neutre ou alcalin. Il joue un rôle déterminant dans la disponibilité des éléments nutritifs et dans l'activité biologique. En effet, certains nutriments deviennent moins disponibles dans des conditions extrêmes de pH, tandis que d'autres peuvent atteindre des niveaux toxiques. Par exemple, un pH acide favorise la solubilité de l'aluminium, qui peut être toxique pour les plantes, alors qu'un pH alcalin limite la disponibilité du phosphore et de certains oligoéléments. La majorité des plantes se développe de manière optimale dans un intervalle de pH compris entre 6 et 7,5, où la disponibilité des nutriments est maximale et l'activité microbienne est élevée (Brady & Weil, 2016).

2.5.2 Conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) du sol mesure la concentration totale des sels solubles présents dans la solution du sol. Elle constitue un indicateur direct de la salinité, particulièrement important dans les régions arides et semi-arides. Une CE élevée entraîne une diminution du potentiel hydrique du sol, rendant l'eau moins disponible pour les plantes et provoquant un stress osmotique. Cela peut affecter la germination, ralentir la croissance et réduire les rendements agricoles. De plus, un excès de certains ions, comme le sodium, peut détériorer la structure du sol et accentuer les problèmes de perméabilité. La gestion de la salinité est donc essentielle pour maintenir la productivité des sols (Rengasamy, 2010).

2.5.3. Matière organique

La matière organique du sol provient de la décomposition des résidus végétaux, animaux et microbiens. Elle joue un rôle multifonctionnel en améliorant les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Elle contribue à la formation des agrégats, augmente la capacité de rétention en eau, améliore la capacité d'échange cationique et fournit des éléments nutritifs essentiels aux plantes. De plus, elle constitue une source d'énergie pour les micro-organismes du sol, favorisant ainsi l'activité biologique et le recyclage des nutriments. La matière organique est également un

Élément clé dans la séquestration du carbone, contribuant à la régulation du climat (Lal, 2004).

2.5.4. Éléments nutritifs

Les éléments nutritifs essentiels aux plantes sont classés en macronutriments (azote, phosphore, potassium) et en éléments secondaires (calcium, magnésium, soufre). Ils interviennent dans de nombreux processus physiologiques tels que la photosynthèse, la respiration, la division cellulaire et la synthèse des protéines. Leur disponibilité dépend de plusieurs facteurs, notamment le pH, la texture, la matière organique et l'activité biologique du sol. Un déséquilibre nutritionnel, qu'il s'agisse d'une carence ou d'un excès, peut entraîner des perturbations physiologiques et limiter la croissance des plantes (Marschner, 2012).

2.6. Facteurs biologiques du sol

Le sol est un écosystème dynamique abritant une grande diversité d'organismes vivants, allant des micro-organismes (bactéries, champignons, actinomycètes) à la macrofaune (vers de terre, insectes). Ces organismes jouent un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique, la minéralisation des nutriments et la formation de la structure du sol. Les interactions biologiques, notamment les symbioses, sont également cruciales. Les mycorhizes, par exemple, établissent une association bénéfique avec les racines des plantes, améliorant l'absorption de l'eau et des nutriments, en particulier le phosphore. Elles contribuent également à la tolérance des plantes aux stress environnementaux tels que la sécheresse. L'activité biologique est donc un indicateur majeur de la qualité et de la fertilité du sol (Smith & Read, 2008).

2.7. Types de sols dans les zones à pin d'Alep

2.7.1. Aurès-Némemcha

Généralement peu profonds, calcaires, fortement soumis à la carbonatation et pauvres en matière organique. Ils présentent une faible capacité de rétention en eau, ce qui impose des conditions de stress hydrique importantes aux peuplements forestiers. Ces sols sont souvent sensibles à l'érosion torrentielle et à la dégradation. Cependant, le pin d'Alep s'y adapte remarquablement grâce à la plasticité de son système racinaire capable de pénétrer les fissures de la roche mère pour puiser l'eau en profondeur (Kadik, 1983 ; Bentouati, 2005).

2.7.2. Région du Tell

Les sols du Tell, soumis à des bioclimats plus cléments allant du semi-aride supérieur au subhumide, sont plus évolués. Ils présentent généralement une texture argilo-limoneuse à argilo-calcaire avec une teneur relativement plus élevée en matière organique en surface. Ils offrent de meilleures conditions hydriques et nutritives, hautement favorables au développement des écosystèmes forestiers. Ces sols constituent un milieu propice à une bonne croissance dendrométrique et à une production ligneuse maximale du pin d'Alep (Kadik, 1983).

2.7.3. Littoral et sublittoral

Dans les zones littorales et sublittorales, les sols associés aux pinèdes se développent principalement sur des formations sableuses ou des dunes fixées. Ils sont caractérisés par une

Forte perméabilité induisant un lessivage rapide des nutriments et une faible capacité de rétention en eau. La salinité des embruns marins peut également constituer un facteur limitant à proximité de la mer. Dans ces stations contraignantes, le pin d'Alep joue un rôle écologique majeur de stabilisation, de fixation des sables et de protection du trait de côte (Kadik, 1983).

2.7.4. Atlas saharien

Aux marges méridionales de son aire de répartition, les sols de l'Atlas saharien (comme dans les monts des Ouled Naïl ou d'El Bayadh) sont très peu évolués, superficiels, lithosoliques et extrêmement secs. Reposant sur des substrats calcaires ou gréseux, ils subissent des conditions climatiques sévères. La végétation y est limitée à des formations pré-forestières ouvertes. Le pin d'Alep y survit dans des conditions stationnelles limites, où l'apport de sa litière reste le seul garant du maintien d'un taux minimal de matière organique en surface (Kadik, 1983 ; Halitim, 1988).

CHAPITRE: 02

MATERIEL ET

METHODES

1. Description de la zone d'étude

1.1. Situation géographique

La wilaya de Tébessa fait partie du grand ensemble régional des Hauts Plateaux de l'Est. Wilaya frontalière, elle partage une frontière avec la Tunisie sur environ 297 km et s'étend sur une superficie de 13 788 km², pour une population estimée à 694 289 habitants.

Elle est limitée au nord par la wilaya de Souk Ahras, à l'ouest par les wilayas d'Oum El Bougi et de Khenchela, au sud par la wilaya d'El Oued, et à l'est par la Tunisie (Figure 12).



Figure 12 : Localisation de la région d'étude.

1.2. Site d'étude

Le site d'étude correspond à la forêt de Braracha-Alouana, localisée dans la daïra de Bir Mokraddem, au sein de la wilaya de Tébessa. Ce massif forestier est limité au nord par la commune d'El Hammamet, au sud par les plaines de Chéria, à l'est par la région de Tébessa et à l'ouest par la commune de Guorriguer. Il couvre une superficie d'environ 1 631 ha et se situe à près de 25 km à l'ouest du chef-lieu de la wilaya. L'altitude moyenne du site est d'environ 1 160m.

Le substrat géologique de la station est principalement constitué de formations calcaires, influençant fortement les caractéristiques édaphiques du milieu. La végétation présente une physionomie relativement basse, avec des arbres dont la hauteur varie généralement entre 4 et 8 m. Les peuplements forestiers ne montrent pas de signes apparents de maladies, hormis la présence de la chenille processionnaire, ce qui pourrait témoigner d'un certain équilibre écologique au sein de cet écosystème.

La couverture végétale est dominée essentiellement par le pin d'Alep (*Pinus halepensis*), associé à un cortège floristique typiquement méditerranéen comprenant notamment le romarin *Rosmarinus officinalis*), l'alfa (*Stipa tenacissima*) et le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*).

Cette composition floristique reflète l'adaptation des espèces aux conditions écologiques locales, caractérisées par un climat semi-aride et des sols calcaires (Conservation des forêts de Tébessa).

Le site étudié est localisé aux coordonnées géographiques 35°24'8,33'' N et 5°52'58,520'' E, à une altitude de 1 140 m. Dans le cadre de l'étude comparative, un site témoin a été sélectionné à proximité de la pinède de Braracha-Alouana . Il s'agit d'une station abandonnée, dépourvue de couverture végétale. Ce site témoin est situé aux coordonnées 35°24'8,389'' N et 5°53'4,354'' E, à une altitude de 1 145 m (Figure 13).

	
A.Station Braracha-Alouana (photo personnelle, 2025)	B.Station Témoin (photo personnelle, 2025)

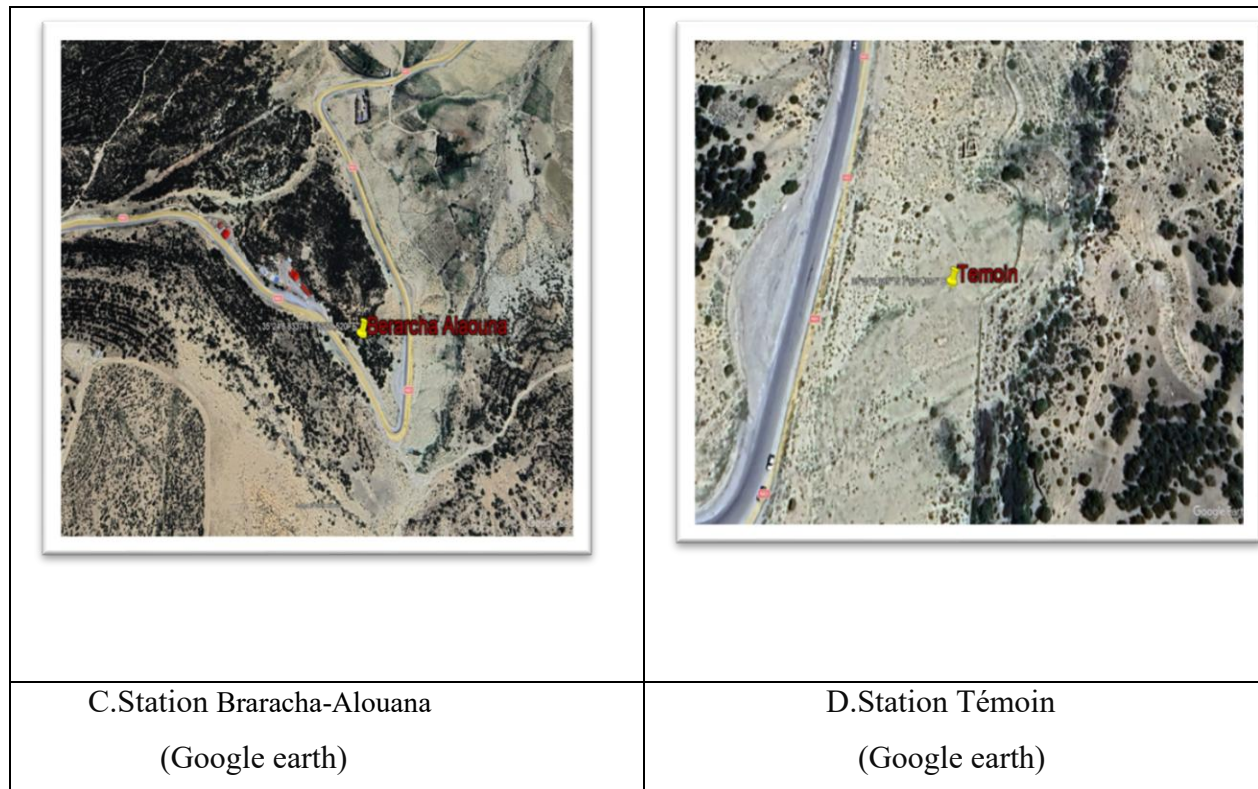


Figure 13 : Les Station d'étude.

1.3. Le climat

Le climat de la région de Tébessa

La wilaya de Tébessa présente un climat de type transitionnel, marqué par une forte variabilité spatiale liée principalement au relief et à sa position géographique. Cette diversité climatique se traduit par l'existence de plusieurs étages bioclimatiques, dont quatre principaux sont distingués :

- **Étage subhumide (400 à 500 mm/an)** : peu représenté, il se localise surtout dans les zones d'altitude, notamment sur les sommets du Djebel Serdies et du Djebel Bouromane.
- **Étage semi-aride (300 à 400 mm/an)** : dominant au nord de la wilaya, il concerne des localités comme El Aouinet, Morsott, BoulhafDyr et la ville de Tébessa.
- **Étage subaride (200 à 300 mm/an)** : caractéristique des zones steppiques, notamment à Oum Ali et El Ma Labiod.
- **Étage aride ou saharien doux (moins de 200 mm/an)** : situé au sud de l'Atlas saharien, il englobe les plateaux de Negrine et Ferkane.

Cette organisation bioclimatique confère à la région une grande diversité écologique et paysagère, influençant les systèmes agricoles, la végétation et l'occupation des sols.

L'analyse du diagramme ombrothermique (Figure 14) révèle également un climat fortement saisonnier, avec deux périodes distinctes une saison humide de novembre à avril, où les précipitations dominent, et une saison sèche de mai à octobre, caractérisée par une forte prédominance des températures.

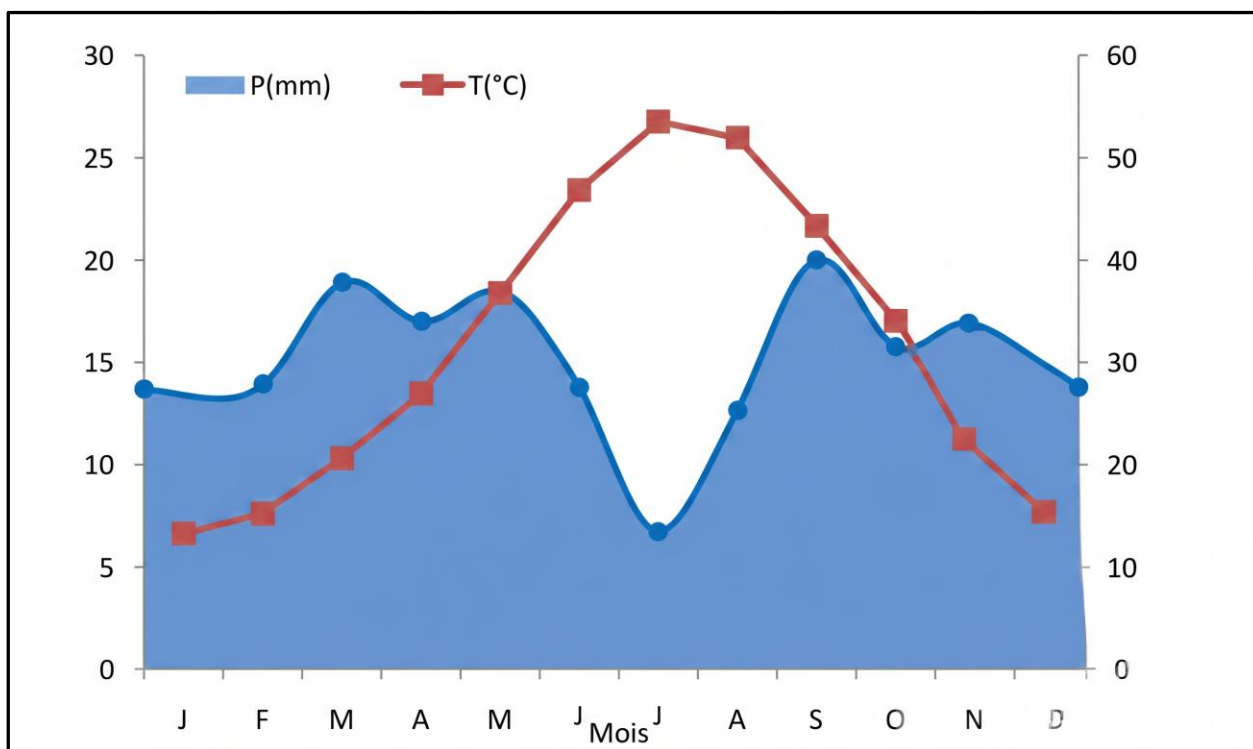


Figure 14 : Diagramme ombrothermique de la région de Tébessa de période 1980-2018

2. Étude du sol

2.1. Échantillonnage

Afin de réaliser ce travail, une sortie de terrain a été effectuée le 23 février 2025 en vue de collecter des échantillons de sol. Sur chaque site, les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un piochon, à une profondeur comprise entre 15 et 20 cm, au niveau de la rhizosphère des arbustes de pin d'Alep, ainsi que dans le site témoin, avec trois répétitions par site.

Les échantillons de sol ont ensuite été séchés à l'ombre pendant une durée d'environ 20 jours, puis tamisés à l'aide d'un tamis de maille de 2 mm afin d'obtenir une fraction fine et homogène destinée aux différentes analyses physico-chimiques.

2.2. Analyses physico-chimiques du sol

2.2.1. Texture du sol

a. principe

La texture du sol correspond à la répartition granulométrique des particules minérales qui le composent, notamment les fractions sable, limon et argile. Son principe repose sur la détermination des proportions relatives de ces différentes fractions en fonction de leur taille.

b. Mode opératoire

La détermination de la texture du sol est réalisée selon la méthode de sédimentation. Pour cela, 100g de sol sont mélangés à 200ml d'eau, puis la suspension est laissée au repos pendant une durée de 2 jours afin de permettre la décantation des différentes fractions granulométriques.

À l'issue de cette période, les particules se déposent selon leur taille et leur densité, formant des couches distinctes. L'épaisseur de chaque couche permet d'estimer les proportions relatives des fractions granulométriques, à savoir le sable, le limon et l'argile. Cette méthode permet ainsi d'évaluer la texture du sol et de classer sa composition granulométrique (ITA, 1975)

2.2.2. L'humidité du sol

a. Principe

L'humidité du sol correspond à la quantité d'eau contenue dans un échantillon de sol. Elle est déterminée par la méthode gravimétrique, qui repose sur la mesure de la perte de masse de l'échantillon après séchage à température élevée.

b. Mode opératoire

Une masse de sol frais (P1) est prélevée, puis placée dans une étuve réglée à 105 °C pendant 24 heures. Après séchage, l'échantillon est retiré de l'étuve puis pesé à nouveau afin d'obtenir la masse sèche (P2). La différence entre ces deux masses correspond à la quantité d'eau évaporée contenue dans l'échantillon de sol.

C. Calcul

Le pourcentage d'humidité du sol est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Humidité (\%)} = (P1 - P2) / P1 \times 100$$

Où :

. P1 : masse du sol frais (g)

. P2 : masse du sol sec après étuvage (g)

2.2.3. pH

a. principe

Le pH du sol est déterminé dans une suspension sol-eau (pH-eau), ce qui permet d'évaluer la concentration en ions hydrogène (H^+) dans la phase liquide surnageante.

Cette mesure renseigne sur l'acidité ou l'alcalinité du sol et constitue un indicateur important de ses propriétés chimiques.

b. Mode opératoire

Une masse de 10 g de sol fin est introduite dans un bécher, à laquelle sont ajoutés 50 ml d'eau distillée, correspondant à un rapport sol/ eau de 1.5. Après agitation, la suspension est laissée au repos pendant 30 minutes. La mesure du pH est ensuite effectuée l'aide d'un pH-mètre, conformément à la méthode décrite par (Mathieu & Pieltain, 2003)

2.2.4. Conductivité électrique**a. Principe**

La conductivité électrique (CE) constitue un indicateur de la salinité du sol. Elle repose sur le principe de la mesure de la capacité d'une solution du sol à conduire le courant électrique, laquelle dépend directement de la concentration en sels solubles présents dans la solution. Ainsi, plus la concentration en ions dissous est élevée, plus la conductivité électrique mesurée est importante. Cette mesure permet donc d'évaluer le degré de salinité du sol et d'apprécier son influence sur la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes.

b. Mode opératoire

Une suspension sol-eau est préparée en mélangeant 10 g de sol avec 50 ml d'eau distillée, correspondant à un rapport de 1 :5. Après agitation, la suspension est laissée au repos pendant 2 heures afin de permettre la mise en solution des sels solubles. La conductivité électrique de la phase surnageante est ensuite mesurée à l'aide d'un conductimètre (Mathieu & Pieltain, 2003).

2.2.5. Calcaire total**a. Principe**

La détermination du calcaire total repose sur la mesure du dioxyde de carbone (CO_2) libéré lors de la réaction entre un excès d'acide chlorhydrique (HCl) et un échantillon de sol de masse connue. Le carbonate de calcium ($CaCO_3$) présent dans le sol réagit avec l'acide pour produire du CO_2 , dont le volume dégagé permet d'estimer la teneur en calcaire total.

b. Mode opératoire

Dans un bécher contenant 10 ml d'acide chlorhydrique dilué, de masse initiale connue (P1), on ajoute progressivement 10 g de sol fin. Après agitation plusieurs fois, le bécher est pesé de nouveau afin de déterminer la masse finale après dégagement du dioxyde de carbone (P2)

C. Calcul

La teneur en calcaire total est déterminée selon la formule suivante :

$$\% \text{ CaCO}_3 = (P1-P2) \times 2.274 \times 100 / \text{masse du sol}$$

Où (P1-P2) représente la masse du CO₂ dégagé (Baize&Jabiol, 1995).

2.2.6. Le calcaire actif

a. principe

Le calcaire actif correspond à la fraction fine et réactive du carbonate de calcium (CaCO₃) présente dans le sol, caractérisée par une solubilité relativement élevée. En présence d'une solution d'oxalate d'ammonium, le carbonate de calcium forme de l'oxalate de calcium insoluble. L'excès d'oxalate d'ammonium est ensuite dosé par titrage avec une solution de permanganate de potassium, ce qui permet d'estimer la teneur en calcaire actif du sol. (Soltner, 2003).

b. Mode opératoire

Dans un erlenmeyer de 250 mL, 2 g de sol sont introduits puis mélangés avec 100 mL de solution d'oxalate d'ammonium. Après agitation pendant deux heures pour assurer une réaction complète, le mélange est filtré.

Un volume de 20 mL du filtrat est ensuite prélevé, puis complété par 100 mL d'eau distillée et 5 mL d'acide sulfurique (H₂SO₄). La solution obtenue est titrée par une solution de permanganate de potassium (KMnO₄) à 0,2 N jusqu'à l'apparition d'une coloration rose persistante correspondant au volume V (mL).

Un témoin est préparé dans les mêmes conditions, mais sans ajout de sol, afin de déterminer le volume V' (mL).

C. Calcul

La teneur en calcaire actif est calculée selon la formule suivante :

$$\text{CaCO}_3 (\%) = (V' - V) \times 0.2 \times (100/10) \times (50/1000) \times (100/2)$$

$$\text{CaCO}_3 (\%) = (V' - V) \times 5$$

Où :

V' : volume de permanganate de potassium utilisé pour le témoin (mL)

• V : volume de permanganate de potassium utilisé pour l'échantillon (mL)

2.2.7. Matière organique

a. Principe

La teneur en carbone organique est déterminée selon la méthode de Walkley et Black (Bonneau et Souchier, 1994). Cette méthode repose sur l'oxydation du carbone organique du sol par un excès de bichromate de potassium en milieu acide sulfurique. L'excès de bichromate non consommé est ensuite dosé par titration à l'aide du sel de Mohr.

La teneur en matière organique est ensuite estimée en multipliant le carbone organique obtenu par un facteur de conversion égal à 1,72 (Mathieu & Pieltain, 2003)

b. Mode opératoire

On introduit 1 g de sol préalablement tamisé dans un erlenmeyer, puis on y ajoute 10 mL de solution de bichromate de potassium (8 %) ainsi que 15 mL d'acide sulfurique. Le mélange est agité pendant 2 minutes, puis laissé au repos pendant 30 minutes afin de permettre l'oxydation du carbone organique. Après ce temps de réaction, le contenu est transvasé dans une fiole jaugée, en complétant jusqu'à 250 mL avec les eaux de rinçage de l'erlenmeyer. Ensuite, on prélève 50 mL de cette solution dans un bécher, auquel on ajoute 1 g de fluorure de sodium (NaF) ainsi que 3 à 4 gouttes de diphénylamine comme indicateur. Le titrage est alors effectué à l'aide d'une solution de sel de Mohr (sulfate de fer et d'ammonium) à 0,2 N, jusqu'au virage de la solution, initialement brun-noirâtre, vers une coloration verte. Le volume de solution de sel de Mohr utilisé est noté X mL. Parallèlement, un essai à blanc est effectué dans les mêmes conditions afin de déterminer le volume correspondant Y. (Calvet, 2003).

C. Calcul

La teneur en carbone organique est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$C (\%) = \frac{(Y-X) \times 0.6 \text{ mg de C} \times 100}{\text{Poids du sol}}$$

$$C (\%) = (Y-X) \times 0.6$$

Etant donné que l'oxydation du carbone à froid n'est complète qu'à 76%, une correction est nécessaire. On applique donc un facteur de 1.31 (100/76) au résultat obtenu. Par ailleurs, la matière organique (M.O.) est estimée 10n multipliant la teneur en carbone par 1.724.

3. Traitement statistique

Les données obtenues à partir des analyses du sol ont été soumises à une analyse de la variance (ANOVA) au seuil de signification $\alpha=0.05$ afin d'évaluer l'effet des différents facteurs étudiés. Lorsque des différences de signification ont été observées, une comparaison multiple des

moyennes a été réalisée à l'aide du test de Tukey. Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel statistique version.

CHAPITRE: 03

RESULTATS

1. La texture du sol

La texture des sols des deux stations est présentée dans le tableau 1. Selon le triangle textural (annexe 1), la station témoin est dominée par une texture limono-sableuse, tandis que la forêt de Braracha-Alouana présente une texture à dominante limono-argilo-sableuse.

Tableau 1: La variation de la texture selon les stations d'étude.

	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	Type de texture
Témoin	45,45	45,45	9,09	Limono-sableux
Forêt de Braracha- Alouana	45,94	27,02	27,02	Limono-argilo-sableux

2. L'humidité du sol

La figure 15 met en évidence les variations de l'humidité du sol selon les stations étudiées. La station témoin se distingue par la plus faible valeur moyenne (14,16 %), alors que la forêt de Braracha-Alouana enregistre la valeur la plus élevée (27,95 %). L'analyse de la variance (ANOVA) révèle une différence hautement significative entre les stations. Le test post-hoc de Tukey permet, quant à lui, de regrouper les stations en deux groupes homogènes (annexe 2).

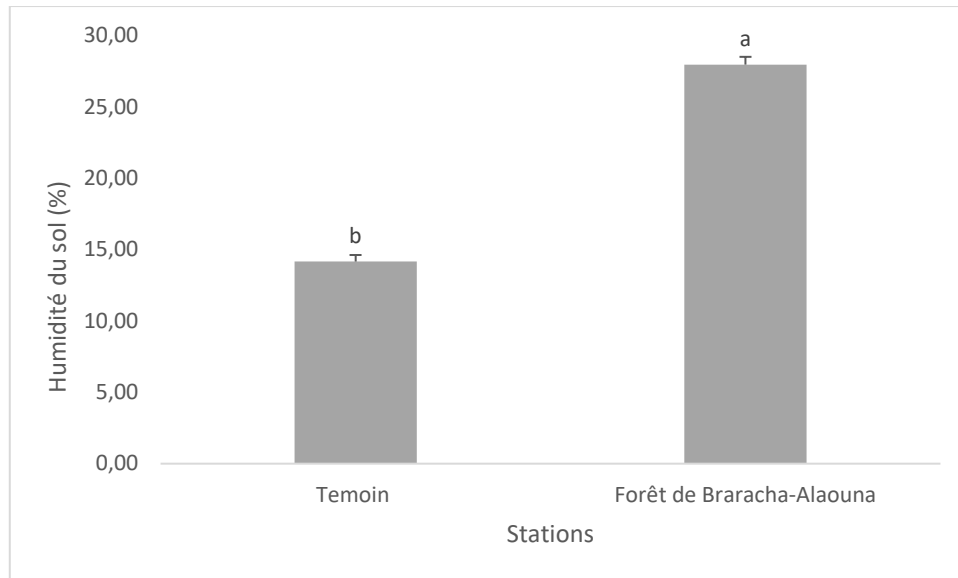


Figure 15 : Variations des valeurs moyennes d’humidité du sol selon les stations.

(Les lettres alphabétiques a et b : groupes homogènes).

3. pH du sol

La figure 15 illustre les variations du pH selon les stations étudiées. D’après cette figure, la station témoin présente la valeur moyenne la plus élevée (8,18), tandis que la valeur la plus faible (6,8) est observée au niveau de la forêt de Braracha-Alouana. L’analyse de la variance (ANOVA) indique des différences très hautement significatives entre les stations. Le test de Tukey a permis de distinguer deux groupes homogènes (annexe 2).

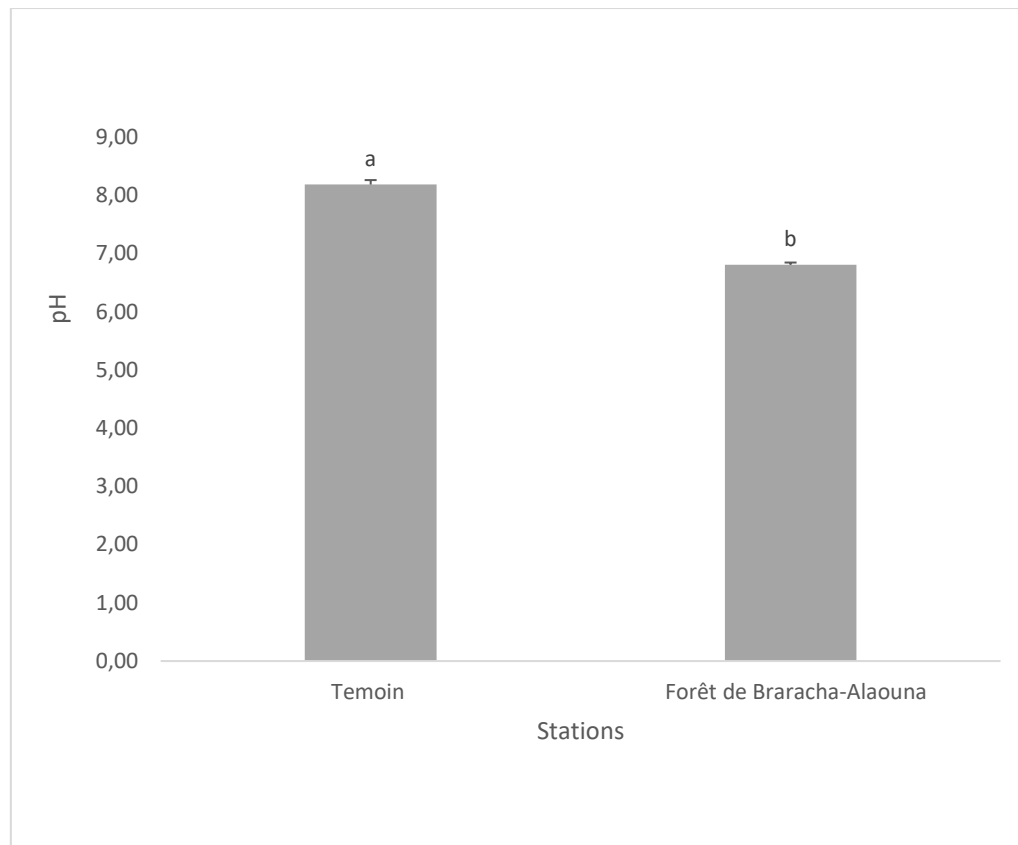


Figure 16 : Variations des valeurs moyennes de pH selon les stations.

(Les lettres alphabétiques a et b : groupes homogènes)

4.La conductivité électrique

Les valeurs moyennes de la conductivité électrique selon les stations sont présentées dans la figure 16. La forêt de Braracha-Alouana enregistre une valeur de 537 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tandis que la station témoin affiche une valeur de 460 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'analyse de la variance (ANOVA) indique une différence significative entre les stations. Par ailleurs, le test de Tukey a permis de distinguer deux groupes homogènes (annexe 2).

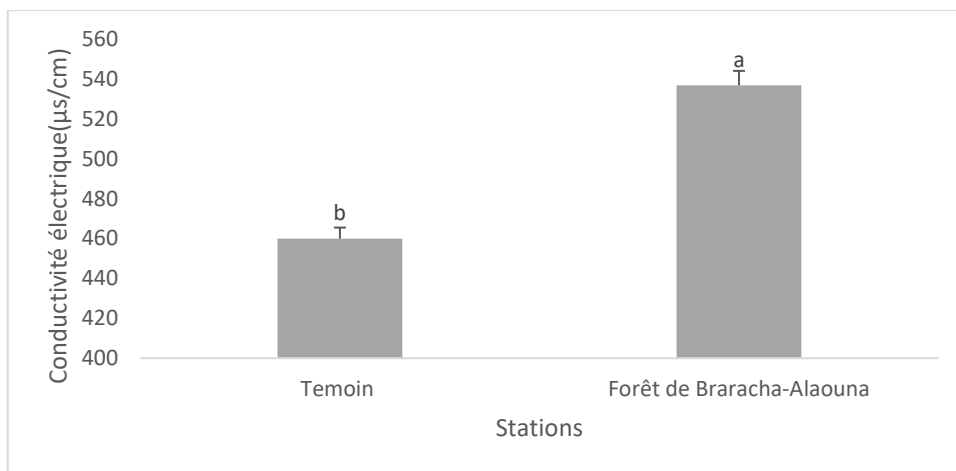


Figure 17 : Variations des valeurs moyennes de conductivité selon les stations.

(Les lettres alphabétiques a et b : groupes homogènes).

5. Le calcaire total

La figure 17 présente les variations des teneurs en calcaire total selon les stations étudiées. La station témoin enregistre la valeur la plus élevée (25,10 %), alors que la forêt de Braracha-Alouana montre la valeur la plus faible (19,08 %). L'analyse de la variance (ANOVA) indique une différence très hautement significative entre les stations. Le test post-hoc de Tukey a permis de distinguer deux groupes homogènes (annexe 2).

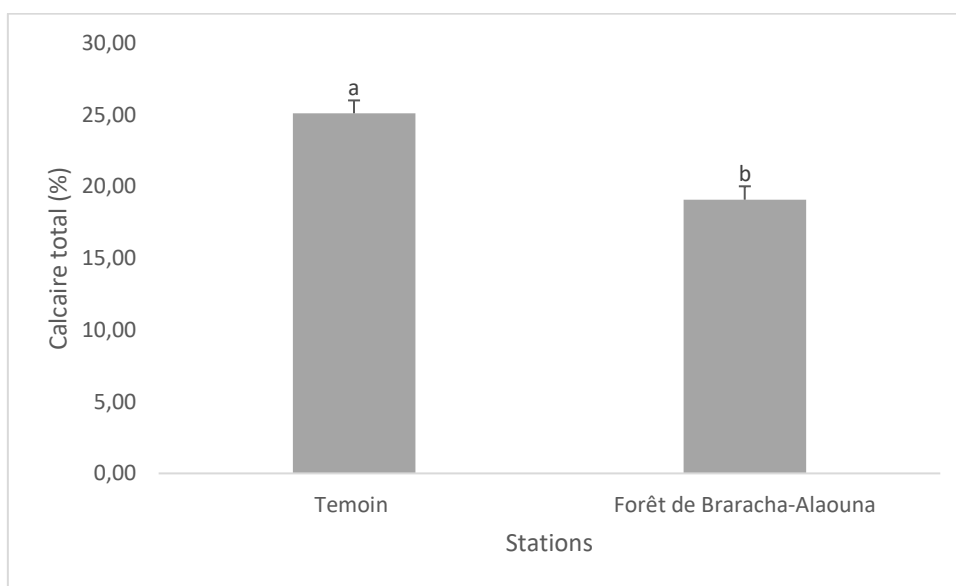


Figure 18: Variations des valeurs moyennes du calcaire total selon les stations

(Les lettres alphabétiques a et b : groupes homogènes).

6. Le calcaire actif

La figure 18 illustre les variations du calcaire actif en fonction des stations étudiées. La station témoin présente la valeur moyenne la plus élevée (19,83 %), tandis que la valeur la plus faible (10,83 %) est observée au niveau de la forêt de Braracha-Alouana. L'analyse de la variance (ANOVA) met en évidence une différence hautement significative entre les stations. Le test de Tukey a permis de distinguer deux groupes homogènes (annexe 2).

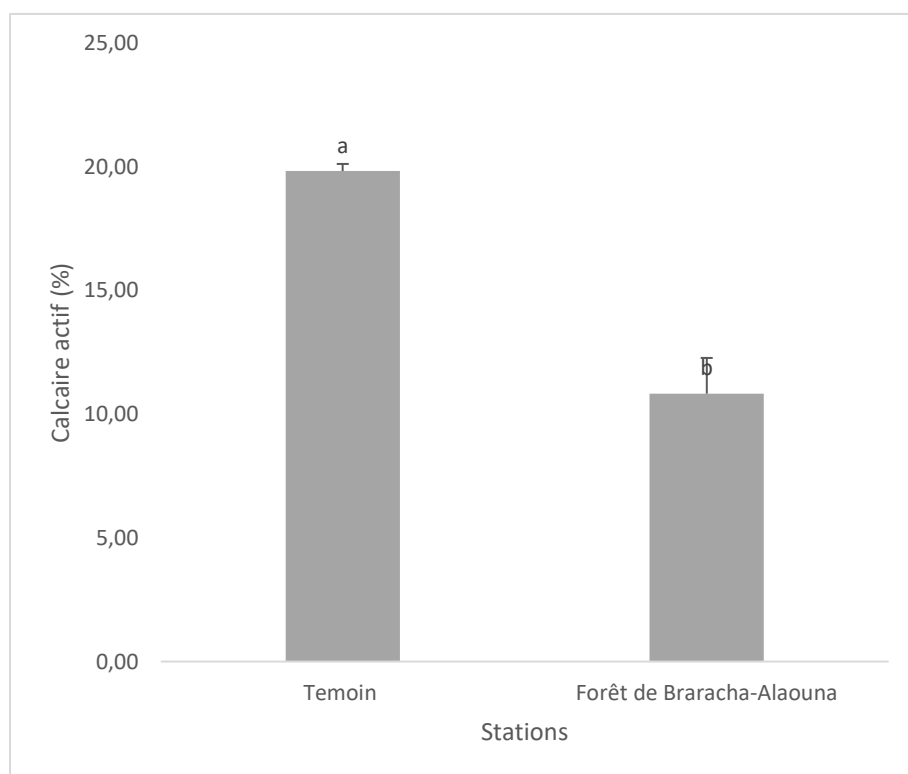


Figure 19 : Variations des valeurs moyennes du calcaire actif selon les stations.

(Les lettres alphabétiques a et b : groupes homogènes).

7. La matière organique

La figure 19 présente les résultats relatifs à la teneur en matière organique. La station de la forêt de Braracha-Alouana enregistre la valeur la plus élevée (2,72 %), tandis que la station témoin présente la valeur la plus faible (1,04 %). L'analyse de la variance (ANOVA) indique des différences très hautement significatives entre les stations. Le test post-hoc de Tukey permet de distinguer deux groupes homogènes (annexe 2).

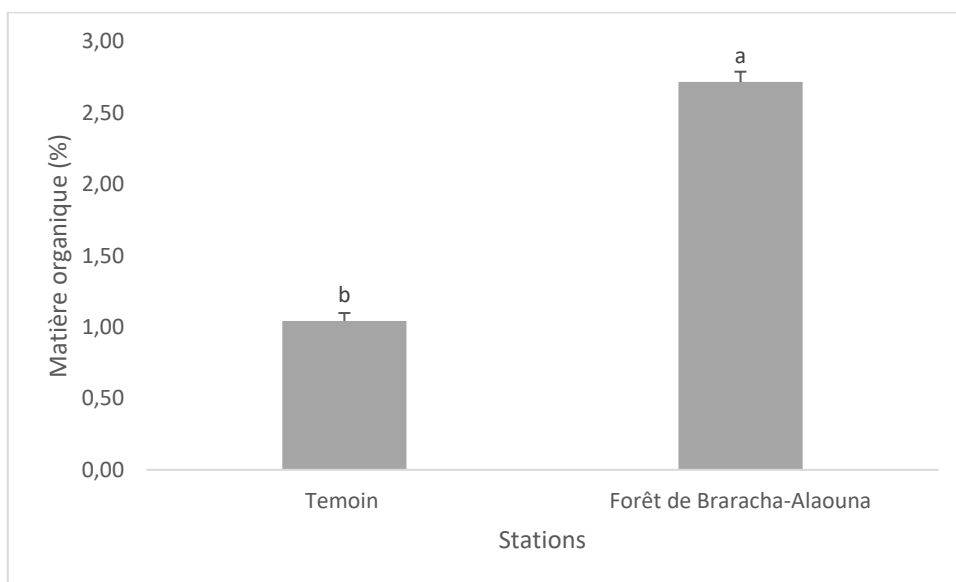


Figure 20 : Variations des valeurs moyennes de matière organique selon les stations.

(Les lettres alphabétiques a et b : groupes homogènes).

CHAPITRE: 04
DISCUSSION
GENERALE ET
CONCLUSION

Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*) constitue une espèce forestière essentielle dans les écosystèmes naturels en Algérie. Il contribue de manière significative à la restauration des sols dégradés et représente une ressource renouvelable importante pour les populations locales. Les résultats obtenus révèlent globalement une influence favorable sur la plupart des paramètres analysés.

La texture du sol

L'analyse granulométrique met en évidence des différences texturales marquées entre les deux stations étudiées. L'interprétation à partir du triangle des textures (annexe 3) montre que le sol de la station témoin présente une texture limono-sableuse, dominée par une forte proportion de sable, associée à une quantité modérée de limons et à une faible teneur en argile. Ce type de sol se caractérise généralement par une bonne perméabilité et un drainage efficace, mais également par une faible capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs, ce qui peut limiter sa fertilité.

En revanche, le sol de la forêt de Braracha-Alouana, sous couvert de *Pinus halepensis*, présente une texture limono-argilo-sableuse, traduisant une répartition plus équilibrée des fractions granulométriques, avec une proportion notable d'argile. Cette texture confère au sol une meilleure capacité de rétention hydrique, une plus grande aptitude à fixer les nutriments, ainsi qu'une stabilité structurale accrue. Cette évolution peut être attribuée à l'influence du couvert végétal, notamment à travers l'accumulation de matière organique et le rôle stabilisateur du système racinaire du pin d'Alep.

Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Bouzid *et al.* (2019), qui indiquent que les sols sous *Pinus halepensis* en zones semi-arides présentent fréquemment des textures sablo-limono-argileuses, favorables à la rétention en eau et à l'aération du sol.

Par ailleurs, des études réalisées dans d'autres régions méditerranéennes confirment cette variabilité texturale. En Espagne, Sarris et Christodoulakis (2024) ont montré que les sols sous *Pinus halepensis* sont majoritairement argilo-limoneux, développés sur des substrats calcaires tels que les calcaires et les marnes, ce qui souligne l'adaptabilité de cette espèce à des sols riches en éléments fins. De même, en Libye, Alsanoui *et al.* (2025) ont observé que les plantations de pin d'Alep se développent principalement sur des sols limoneux à faible teneur en argile, mettant en évidence l'influence des conditions locales et du substrat géologique.

L'humidité du sol

Les résultats obtenus mettent en évidence une amélioration significative de l'humidité du sol en présence de *Pinus halepensis*. En effet, la station témoin présente les valeurs les plus faibles, avec une humidité moyenne de 14,16 %, tandis que la station de Braracha-Alouana enregistre une humidité nettement plus élevée (27,95 %), soit environ le double. Ces résultats suggèrent que le pin d'Alep joue un rôle positif dans la rétention en eau du sol, tant pour l'humidité disponible que pour l'humidité résiduelle liée aux particules du sol.

Cette amélioration peut s'expliquer par plusieurs mécanismes fonctionnels. Le système racinaire profond du pin d'Alep permet l'exploitation de l'eau stockée dans les horizons inférieurs, tandis que le couvert végétal réduit l'évaporation en limitant l'exposition directe du sol (Bellot *et al.*, 2004). De plus, la présence de la canopée favorise l'interception des précipitations et contribue à maintenir une humidité plus élevée sous couvert forestier par rapport aux zones découvertes (Maestre *et al.*, 2003). Ainsi, l'humidité du sol, facteur limitant majeur en milieu semi-aride, se trouve significativement améliorée sous végétation forestière (Maestre *et al.*, 2015).

Des résultats similaires ont été rapportés dans d'autres contextes méditerranéens. En Tunisie, Jeddi et Chaieb (2010) ont montré que les plantations de *Pinus halepensis* augmentent significativement l'humidité du sol par rapport aux milieux non boisés, avec un effet qui s'intensifie avec l'âge des peuplements. Par ailleurs, Baraket *et al.* (2019) ont souligné que la dynamique de l'humidité du sol dépend également des conditions climatiques locales et des caractéristiques des peuplements, notamment leur origine génétique.

Le pH

L'analyse du pH montre que le sol de la station témoin (pH = 8,18) est basique, tandis que celui de la station de Braracha-Alouana (pH = 6,8) est classé comme neutre, conformément au référentiel pédologique de Baize et Jabiol (1995) (Annexe02). Cette différence met en évidence une diminution du pH sous couvert de *Pinus halepensis* par rapport à la station témoin. Cette évolution peut être expliquée par l'influence du couvert forestier. En effet, l'accumulation de la litière constituée principalement d'aiguilles favorise la formation d'un horizon organique dont la décomposition libère des acides organiques, contribuant ainsi à une légère acidification du sol. Ce phénomène est bien connu chez les conifères, qui ont tendance à modifier progressivement la réaction du sol. Cependant, cette acidification reste modérée en raison de la nature calcaire du

substrat, qui exerce un effet tampon en neutralisant partiellement les acides produits. Ainsi, la diminution du pH observée demeure faible et non accentuée (Zhang *et al* ,2016).

Par ailleurs, les résultats obtenus s'inscrivent globalement dans les tendances observées dans les écosystèmes semi-arides méditerranéens. Plusieurs études ont montré que les sols sous pin d'Alep présentent généralement des pH neutres à alcalins, en raison de leur richesse en carbonates (Samira *et al.*, 2019 ; Guit *et al.*, 2016 ; Kharazian *et al.*, 2022). En Algérie, Zouidi *et al.* (2019) confirment également la prédominance de sols alcalins sous *Pinus halepensis*. Néanmoins, certaines études, comme celle de Brakchi *et al.* (2025), ont signalé des sols légèrement acides à neutres, mettant en évidence l'influence des conditions locales, notamment le climat, la végétation et la nature du sol.

Ainsi, la valeur de pH obtenue dans cette étude, légèrement inférieure aux valeurs habituellement rapportées, traduit l'effet combiné de la litière forestière et du substrat calcaire. Elle reste néanmoins cohérente avec le fonctionnement des sols en milieu semi-aride, où les variations de pH sont généralement modérées

La conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) du sol est un indicateur de la concentration en sels solubles, couramment utilisée pour évaluer le degré de salinité. Des valeurs faibles traduisent généralement une faible teneur en sels et donc une absence de contrainte saline pour les plantes.

Dans la présente étude, la station de Braracha-Alouana a enregistré une CE de 537 $\mu\text{S/cm}$, tandis que la station témoin présente une valeur légèrement inférieure (460 $\mu\text{S/cm}$). Selon les critères de Mathieux et Piélet (2003), ces valeurs correspondent à des sols non salins, indiquant une absence de salinité significative.

Ces résultats sont cohérents avec plusieurs travaux réalisés en milieu semi-aride. En effet, dans une pinède steppique de la wilaya de Tiaret, Tir (2023) a rapporté une conductivité électrique très faible ($91,65 \pm 26,23 \mu\text{S/cm}$), confirmant le caractère non salin de ces sols. De même, Zouidi *et al.* (2019) ont montré que les sols sous *Pinus halepensis* dans l'ouest algérien présentent généralement une faible salinité, traduisant une relative stabilité de ce paramètre dans les écosystèmes semi-arides.

Toutefois, certaines variations peuvent être observées selon les conditions locales. Ainsi, dans la région de Saïda, Meddahi (2022) a signalé des valeurs de CE comprises entre 6,02 et 13,62

mS/cm, correspondant à une salinité modérée. Cette variabilité souligne l'influence des facteurs édaphiques et climatiques sur la dynamique des sels dans le sol.

Par ailleurs, les pratiques de gestion forestière et les interventions post-incendie n'affectent généralement pas de manière significative la conductivité électrique. Des études menées en Espagne ont montré que des techniques telles que le paillage, l'exploitation post-incendie ou la régénération naturelle à moyen et long terme n'entraînent pas de modifications notables de ce paramètre (Navidi *et al.*, 2022 ; Hedo *et al.*, 2015).

Calcaire du sol

Les résultats obtenus montrent que la station témoin présente des teneurs plus élevées en carbonate de calcium total (25,10 %) et en calcaire actif (19,83 %) que la station de Braracha-Alouana qui affiche respectivement 19,08 % et 10,83 %. Selon le référentiel pédologique de Baize (2000), ces deux sols sont classés comme modérément calcaires(annexe2).

De manière générale, les sols sous *Pinus halepensis* en zones semi-arides sont caractérisés par une richesse en carbonates, liée à la nature calcaire du substrat et aux faibles processus de lixiviation (Samira *et al.*, 2019 ; Zouidiet *al.*, 2019). En Algérie, ces teneurs peuvent être élevées et parfois dépasser 40 % (Djelailia, 2014).

Sur le plan écologique, le pin d'Alep est une espèce calcicole bien adaptée aux sols calcaires et alcalins, ce qui favorise son installation et son développement dans ces milieux (Khoujaet *al.*, 2020). Le calcaire actif peut toutefois influencer la disponibilité de certains éléments nutritifs, notamment le phosphore, mais cette espèce montre une bonne tolérance à ces contraintes (Kharazian *et al.*, 2022).

Enfin, les teneurs en carbonates et en calcaire actif restent généralement stables dans ces écosystèmes, même après perturbations, ce qui confirme le rôle dominant du substrat géologique dans le contrôle des propriétés du sol (Navidi *et al.*, 2022).

La matière organique

La teneur en matière organique constitue un indicateur clé de la fertilité et de la stabilité structurale des sols (Bronick&Lal, 2005). Dans la présente étude, elle varie de 2,72 % dans la station de Braracha-Alouana à 1,04 % dans la station témoin, correspondant respectivement à des niveaux moyennement élevés et faibles selon la classification de Soltner (1981). Cette différence significative met en évidence l'effet positif du couvert de *Pinus halepensis* sur l'enrichissement du sol en matière organique.

Cet effet s'explique principalement par l'apport continu de litière végétale, dont la décomposition favorise l'accumulation de matière organique, la formation d'humus et la libération d'éléments nutritifs. Ainsi, le pin d'Alep contribue non seulement à améliorer la fertilité du sol, mais également sa structure, sa capacité de rétention en eau et le maintien du microclimat édaphique (Baize&Jabiol, 1995).

Ces résultats sont en accord avec plusieurs études menées en région méditerranéenne. En Sicile, Pinzari *et al.* (2001) ont observé une augmentation notable de la matière organique sous couvert forestier (3,61 %). De même, Zouidi *et al.* (2019) et Al Omary (2011) ont montré que les sols sous pin d'Alep présentent des teneurs plus élevées en matière organique que les sols non boisés.

Toutefois, certaines études signalent des teneurs plus faibles (0,3 % à 1,7 %), comme dans la région de Naâma, ce qui indique que l'effet du pin d'Alep dépend également des conditions climatiques et édaphiques locales.

Ainsi, l'ensemble de ces résultats confirme le rôle essentiel de *Pinus halepensis* dans l'amélioration de la teneur en matière organique des sols et, par conséquent, dans le renforcement de leur fertilité en milieu semi-aride.

CONCLUSION

L'étude comparative réalisée dans la région de Tébessa, au sein de la pinède de Braracha-Alouana, visant à évaluer l'effet du *Pinus halepensis* sur la fertilité des sols par comparaison avec un sol témoin sans couvert végétal, a permis de mettre en évidence l'impact de cette espèce sur les caractéristiques physico-chimiques du sol.

Les résultats obtenus indiquent que le pin d'Alep exerce une influence globalement favorable sur la qualité édaphique. Cette amélioration se traduit principalement par une augmentation de la teneur en matière organique, une évolution de la texture vers un équilibre plus favorable, ainsi qu'une meilleure rétention de l'humidité. Par ailleurs, une légère diminution du pH a été observée sous couvert forestier, traduisant un début d'acidification lié à la décomposition de la litière, sans toutefois remettre en cause l'équilibre global du sol.

Concernant le calcaire, une réduction modérée des teneurs en calcaire total et actif a été enregistrée, bien que les sols demeurent classés comme modérément calcaires. Cela témoigne du rôle dominant du substrat géologique, qui maintient une certaine stabilité de ces paramètres. En revanche, la conductivité électrique n'a montré aucune variation notable, ce qui indique que la présence du pin d'Alep n'a pas d'effet significatif sur la salinité du sol dans les conditions étudiées.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment le rôle du pin d'Alep comme espèce amélioratrice des sols en milieu semi-aride, contribuant à l'optimisation des conditions édaphiques et au maintien de la fertilité.

Afin d'approfondir ces observations, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. Il serait intéressant d'élargir l'étude à différents contextes écologiques afin d'évaluer la variabilité de l'impact de cette espèce selon les conditions climatiques et géologiques. De plus, un suivi à long terme permettrait de mieux comprendre l'évolution progressive des propriétés du sol sous couvert forestier. Enfin, l'intégration d'analyses biologiques, notamment l'étude du microbiote du sol et de l'activité enzymatique, offrirait une meilleure compréhension des interactions entre le pin d'Alep et le fonctionnement biologique des sols.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- Alsanousi, A. A., Abdul-Hamid, H., Mohamed, J., & Masoud, M. (2025).***Pinus halepensis* Mill. in the Mediterranean region: A review of ecological significance, growth patterns, and soil interactions. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 18(1), 30.
- Bochet, E., Poesen, J., & Rubio, J. L. (2006).**Effects of plant species on UV-protection and runoff generation in semi-arid environments. *Journal of Hydrology*, 331(1-2), 189-197.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008).***The Nature and Properties of Soils* (14th Edition). Prentice Hall
- Baize, D. (2000).**Guide des analyses en pédologie. Paris : INRA.
- Baise D., Djabiol B., 1995** Guide pour la description des sols. Edit. INRA, Paris. france.
- Baraket, M., Kraima, B., Nefzi, K., Fkiri, S., Jaouadi, W., & Nasr, Z. (2019).** Seasonal variability of gas exchange responses and hydraulic traits of three provenances of *Pinus halepensis* Mill.
- Bellot, J., Maestre, F. T., Chirino, E., Hernández, N., & de Urbina, J. O. (2004).** Afforestation with *Pinus halepensis* reduces native shrub performance in a Mediterranean semiarid area. *Acta Oecologica*, 25(1–2), 7–15.
- Bentouati A., Bariteau M. (2005).** Une sylviculture pour le pin d'Alep des Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, 26(4), 315-321.
- Bonnier, G. (1990).**Flore complète portative de la France, de la Suisse et de la Belgique. Paris : Éditions Belin.
- Boutchiche, A., & Boutrigue, A. (2016).**Contribution à l'étude de la variabilité morphologique et structurale du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Mémoire de Master, Université d'Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016).***The Nature and Properties of Soils (15th ed.). Pearson Education, Columbus.*
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005).**Soil structure and management: a review. *Geoderma*,124(1-2), 3-22.
- Benabdeli, K. (1996).** Aspects physiologiques, dynamiques et cartographiques des déformations forestières algériennes. Oran, Algérie : Université d'Oran.

- Bentouati, A. (2006).** Croissance, productivité et aménagement des forêts de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) du massif des Ouled Yagoub (Khenchela-Aurès) (Thèse de doctorat). Université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie.
- Blondel, J., Aronson, J., Bodiou, J.-Y., & Boeuf, G. (2010).** The Mediterranean region: **Biological diversity in space and time (2nd ed.)**. Oxford, Royaume-Uni : Oxford University Press.
- Boudy, P. (1950).** Économie forestière nord-africaine. Tome II : Monographies et traitements des essences forestières. Paris, France : Larose.
- Calvet, R., 2003.** Le sol, Propriétés et fonctions, T1 : Constitution et Structure, phénomènes aux interfaces, Ed. France agricole, 455 p
- DGF (2010).** Rapport sur le secteur forestier. Direction Générale des Forêts, Alger, Algérie.
- Djelailia, Z. (2014).** Contribution à l'étude des propriétés physico-chimiques des sols sous *Pinus halepensis* (Mémoire de master). Université de Tlemcen.
- Duchaufour, P. (2001).** Introduction à la science du sol : Sol, végétation, environnement (6e éd.). Paris, France : Dunod.
- Fady, B., Semerci, H., & Vendramin, G. G. (2003).** EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Aleppo pine (*Pinus halepensis*). IPGRI, Rome.
- FAO. (2015).** Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Guit, B. (2015).** Étude de la régénération naturelle du Pin d'Alep. Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie.
- Guit, B. (2015).** Étude de la régénération naturelle du Pin d'Alep. Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie.
- Guit B., Nedjimi B. (2020).** Croissance radiale du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en fonction des paramètres stationnels dans les massifs forestiers naturels de l'Atlas saharien algérien. Bois et Forêts des Tropiques, 345, 5-13.
- Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2003).** Le sol vivant : Bases de pédologie, biologie des sols (2e éd.). Lausanne, Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- .
- Hénin, S., Gras, R., & Monnier, G. (1969).** Le profil cultural : l'état physique du sol
Masson et Cie, Paris.

Hedo, J., Lucas-Borja, M. E., Wic, C., Andrés-Abellán, M., & de las Heras, J. (2015).

Soil microbiological properties and enzymatic activities of long-term post-fire recovery in dry and semiarid Aleppo pine forests. *Solid Earth*, 6(1), 243–252.

Hillel, D. (2004). Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier Academic Press, Amsterdam.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2013). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson.

ITA. (1975). Méthodes d'analyses chimiques et physiques du sol. Laboratoire du sol. ITA, Mostaganem

ITA. (1975). Méthodes d'analyses chimiques et physiques du sol. Mostaganem : Laboratoire du sol.

Jeddi, K., & Chaieb, M. (2010). Soil properties and plant community in different aged *Pinus halepensis* plantations in arid Mediterranean areas: The case of southern Tunisia. *Land Degradation & Development*, 21(1), 32–39.

Kadik, B. (1987). Le Pin d'Alep en Algérie : écologie, dendrométrie et morphologie. OPU, Alger.

Kharazian, P., Fernández-Ondoño, E., Jiménez, M. N., Sierra Aragón, M., Aguirre-Arcos, A., Bacchetta, G., & De Giudici, G. (2022). *Pinus halepensis* in contaminated mining sites: Study of the transfer of metals in the plant–soil system using the BCR procedure. *Toxics*, 10(12), 728.

Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change. *Science*, 304(5677), 1623–1627.

Lal, R. (2015). Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.

Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). Principles of Soil Physics. Marcel Dekker Inc., New York.

Le Houérou, H. N. (2001). Biogeography of the arid and semi-arid lands. Springer, Berlin.

Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528, 60–68.

Maestre, F. T., et al. (2003). Does *Pinus halepensis* facilitate the establishment of shrubs?. *Forest Ecology and Management*.

- Maestre, F. T., Cortina, J., & Vallejo, R. (2003).** Pine plantations and soil properties in semiarid Spain: A comparative study with natural Mediterranean shrubland. *Forest Ecology and Management*, 195(1–2), 381–393.
- Maestre, F. T., Delgado-Baquerizo, M., Jeffries, T. C., Eldridge, D. J., Ochoa, V., Gozalo, B., & Singh, B. K. (2015).** Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(51), 15684–15689.
- Marschner, P. (2012).** Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.). Academic Press, London.
- Mezali, M. (2003).** Le secteur forestier algérien : potentialités et perspectives. DGF, Alger.
- Mathieu, C., Pielain, F., & Jeanroy, E. (2003).** analyse chimique des sols: méthodes choisies. Tec & doc
- Mathieu, C., Pielain, F., & Jeanroy, E. (2003).** Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. Paris : Tec & Doc.
- Meddahi, S. (2022).** Caractéristiques édaphiques du sud-ouest de la wilaya de Saïda (Mémoire de master). Université Moulay Tahar, Saïda.
- Maestre, F. T., & Cortina, J. (2004).** Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *Forest Ecology and Management*, 198(1-3), 303-317.
- Nahal, I. (1962).** Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) : Étude taxonomique et écologique. Nancy, France.
- Navidi, M., Lucas-Borja, M. E., Plaza-Álvarez, P. A., Carra, B. G., Parhizkar, M., & Zema, D. A. (2022).** Mid-term changes in soil properties after wildfire, straw mulching and salvage logging in *Pinus halepensis* forests. *Fire*, 5(5), 158.
- Nedjimi, B. (2025).** Provenance variability in cone, seed and wing characteristics of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) from Djelfa, Algeria. *Discover Forests*, 1(1), 7.
- Prevosto B. et al. (2009).** Régénération du pin d'Alep en Basse Provence : impact des traitements du sol et de la végétation. *Forêt Méditerranéenne*, 30(1), 3-12.
- Pausas, J. G., Bladé, C., Valdecantos, A., Seva, J. P., Fuentes, D., Alloza, J. A., ... & Vallejo, V. R. (2004).** Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain. *New Forests*, 28, 217-234.

Quezel, P. (2000). Biogeography and ecology of Syrian pine, Aleppo pine and Brutian pine in the Mediterranean basin. Ecology, biogeography and management of *Pinus halepensis* ecosystems, 11-32.

Quézel, P., & Médail, F. (2003). Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Paris, France : Elsevier.

Quézel, P., & Santa, S. (1962). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales (Vol. 1–2). Paris, France : CNRS.

Zavala, M. A., Espelta, J. M., & Retana, J. (2000). Constraints and trade-offs in Mediterranean pine–oak succession. Forest Ecology and Management, 127(1-3), 3-12.

Rabhi K., Bentouati A., Sghaier T. (2023). Effet de la sylviculture sur les potentialités de production du Pin d'Alep dans l'Aurès algérien. Revue forestière française, 74(1), 45-61.

Romeo, F., Marziliano, P. A., Turrión, M. B., & Muscolo, A. (2020). Short-term effects

different fire severities on soil properties and *Pinus halepensis* regeneration. Journal of Forestry Research, 31(4), 1271–1282.

Samira, M., Okkacha, H., Nadjat, M., Naima, B., Noury, B., & Kader, A. (2019). Climo-edaphic impact on the growth of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in the reforestation of the Naâma region (South-West Algeria). South Asian Journal of Experimental Biology, 9(3).

Sarris, D., & Christodoulakis, D. (2024). Topographic and climatic effects on *Pinus halepensis* growth at its drought tolerance margins under climatic change. Journal of Forestry Research, 35(1), 102.

Soltner D., 2003. Les bases de production végétales, Tome 1, Le sol et son amélioration, collection sciences et techniques agricoles, 23^{ème} édition, Imprimerie Prouteau, Paris, 472p.

Soltner, D. (1981). Les bases de la production végétale : Tome 1 – Le sol. Paris : Sciences et Techniques Agricoles.

Tir, E. (2023). Caractérisation édaphique d'une pinède steppique dépérissante dans la forêt domaniale de Rechaiga (Wilaya de Tiaret, Algérie). Agropastoralis Scientia, 1, 49.

Zouidi, M., Borsali, A. H., Allam, A., & Gros, R. (2019). Quality estimation of western Algeria forest soils. Malaysian Journal of Soil Science, 23.

Zouidi, M., Borsali, A. H., Allam, A., Gros, R., Rebufa, C., & Da Silva, A. M. F. (2020).Comparative study of coniferous forest litter of *Pinus halepensis* in arid and semi-arid areas of western Algeria. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 16(1), 39–50.

Zavala, M. A., Espelta, J. M., & Retana, J. (2000).Constraints and trade-offs in Mediterranean pine–oak succession. *Forest Ecology and Management*, 127(1-3), 3-12.

ANNEXES

Annexe01 : Les analyses physico-chimique du sol

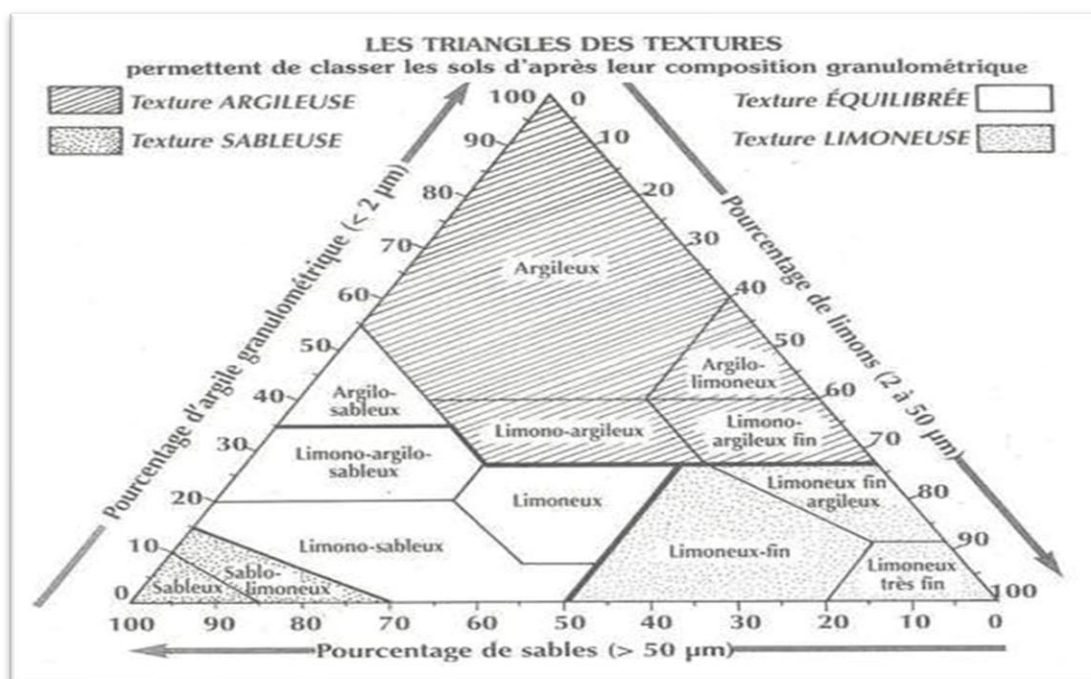
1.pH

	Hyper acide	Très acide	acide	Faiblement acide	Neutre	Basique	Très basique
pH	< 3.3	3.5 - 4.2	4.2 - 5	5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.7	> 8.7

2.Conductivite électrique

Conductivité (mmhos/cm)	Classe de salinité
< 0.6	Non salé
0.6 - 1	Légèrement salé
1 - 2	Salé
2 - 3	Très salé
> 4	Extrêmement salé

3.Le triangle de la texture du sol



4.Matière organique

Taux de matière organique	< 1	1 - 2	2 - 4	> 4
Calssement de la terre	Très pauvre	Pauvre	Moyenne	Riche

5.Calcaire total

Calcaire total	Classe de la terre
< 0.5	Non calcaire
0.5 - 5	Trèsfaible en calcaire
5 - 10	Faible en calcaire
10 - 25	Calcaire
25 - 50	Fortement calcaire
> 50	Très fortement calcaire

Annexe02 : Les analyses statistiques

Effect	Univariate Tests of Significance for pH (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	336,9003	1	336,9003	90241,14	0,000000
Station	2,8566	1	2,8566	765,16	0,000010
Error	0,0149	4	0,0037		

Cell No.	Tukey HSD test; variable pH (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00373, df = 4,0000			
	Station	pH Mean	1	2
2	2	6,803333	b	
1	1	8,183333		a

Effect	Univariate Tests of Significance for CE (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. Of Freedom	MS	F	p
Intercept	1491013	1	1491013	35928,04	0,000000
Station	8894	1	8894	214,30	0,000127
Error	166	4	42		

Cell No.	Tukey HSD test; variable CE (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 41,500, df = 4,0000			
	Station	CE Mean	1	2
	1	460,0000	b	
	2	537,0000		a

Effect	Univariate Tests of Significance for Calcaire total (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	2927,367	1	2927,367	3482,197	0,000000
Station	54,421	1	54,421	64,735	0,001295
Error	3,363	4	0,841		

Cell No.	Tukey HSD test; variable Calcaire total (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,84067, df = 4,0000			
	Station	Calcaire total Mean	1	2
	2	19,07667	b	
	1	25,10000		a

Effect	Univariate Tests of Significance for Calcaireactif (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	1410,667	1	1410,667	1302,154	0,000004
Station	121,500	1	121,500	112,154	0,000450
Error	4,333	4	1,083		

Cell No.	Tukey HSD test; variable Calcaireactif (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 1,0833, df = 4,0000			
	Station	Calcaireactif Mean	1	2
	2	10,83333	b	
	1	19,83333		a

Effect	Univariate Tests of Significance for %Matière organique (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	21,20640	1	21,20640	5130,581	0,000000
Station	4,20007	1	4,20007	1016,145	0,000006
Error	0,01653	4	0,00413		

Cell No.	Tukey HSD test; variable %Matière organique (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00413, df = 4,0000			
	Station	%Matière organique Mean	1	2
	1	1,043333	b	
	2	2,716667		a

Effect	Univariate Tests of Significance for Humidité du sol (Spreadsheet1) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	2659,878	1	2659,878	10458,24	0,000000
Station	285,522	1	285,522	1122,63	0,000005
Error	1,017	4	0,254		

Cell No.	Tukey HSD test; variable Humidité du sol (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,25433, df = 4,0000			
	Station	Humidité du sol Mean	1	2
	1	14,15667	b	
	2	27,95333		a