



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences de la Nature et de la Vie

N° d'ordre :.....

N° de série :.....

## **THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat 3<sup>eme</sup> cycle L.M.D.

**FILIERE**

**SCIENCES DE LA NATURE**

**OPTION**

**BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALE**

**Thème :**

**Caractérisation et valorisation du pin  
d'Alep**

**Présenté par**

**HANI Insaf**

**Devant le jury :**

<b>Président</b>	: Mr SAHEB M.	Pr	Université Larbi Ben M'Hidi, Oum EL Bouaghi
<b>Rapporteur</b>	: Mme RACHED M.	Pr	Université Larbi Ben M'Hidi, Oum EL Bouaghi
<b>Examineurs</b>	: Mme KADI Z.	MCA	Université Larbi Ben M'Hidi, Oum EL Bouaghi
	: Mme REDJAIMIA L.	MCA	Université Larbi Ben M'Hidi, Oum EL Bouaghi
	: Mme KARA K.	MCA	Université Frères Mentouri, Constantine 1

**Année universitaire : 2021 - 2022**

## *Dédicace*

*Avec mes sentiments de gratitude les plus profonds, je dédie ce travail :*

*A mes très chers parents, sans eux je n'ai pas pu être ce que je suis, en reconnaissance de leurs efforts, leurs amours et leurs encouragements durant toutes mes études et mes recherches.*

*A mon très cher mari Oussama, en signe d'amour et de gratitude pour m'avoir supporté, soutenu et surtout compris en permanence, pour ces sacrifices, ces encouragements, sa fidélité et sa gentillesse. Sans lui, je ne saurais pu progresser et en arriver à l'achèvement de ce travail.*

*A mon beau père pour sa gentillesse, leur soutien et son accompagnement au terrain.*

*A toute ma famille*

*Insaf Hani*

## **REMERCIEMENTS**

*A l'issue de ce travail, je remercie avant tout DIEU, tout puissant, de m'avoir donné volonté, courage et patience pour terminer ce travail.*

*Je tiens à remercier madame Malika RACHED-KANOUNI, Professeur à l'Université Larbi Ben M'Hidi d'Oum El Bouaghi, Merci pour votre encadrement efficace, votre disponibilité. Merci pour votre compréhension, votre grande gentillesse et pour la confiance que vous m'avaient témoigné tout au long de cette étude. Malgré vos importantes obligations, vous aviez toujours été présente pour encadrer mes recherches dans la bonne direction et ceci été fondamental dans la bonne réalisation de cette thèse. Soyez assurées de ma profonde gratitude.*

*Mes remerciements vont également aux membres de jury, le Professeur SAHEB Menaour de l'université Larbi Ben M'Hidi, d'avoir accepté de présider le jury chargé d'évaluer cette thèse, Mesdames KADI Zahia et REDJAIMIA Lilia Maîtres des Conférences de l'université Larbi Ben M'Hidi pour leurs aides et pour avoir pris le temps de lire et d'évaluer ce travail et Madame KARA Karima Maître de Conférence de l'université Frères Mentouri/Constantine I, d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail. Qu'ils soient assurés de ma profonde reconnaissance.*

*Je tiens à remercier tous ceux qui d'une façon ou d'une autre ont contribué à la réalisation de ma thèse, car c'est avant tout le fruit d'un travail collectif. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude pour leur aide, leurs conseils judicieux et leur disponibilité, je cite en particulier :*

*M<sup>lle</sup> ALEM Souad à l'université Larbi Ben M'Hidi d'Oum El Bouaghi, pour sa disponibilité et son aide.*

*Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Menasri Ammar enseignant chercheur à l'école nationale des forêts (Khenchela), pour toutes nos discussions et ses conseils qui m'ont accompagné tout au long de mon cursus.*

*Je remercie vivement Mr Oulem Salim, Directeur de la circonscription de Kais (Conservation des forêts de Khenchela) et son équipe, de m'avoir accueilli, d'avoir mis à ma disposition de la documentation et m'a facilité les déplacements sur le territoire du massif forestier de Beni Oudjana. Ma gratitude va également à Mr. Tihmamin, chef du secteur de Taozianet (conservation des forêts de Khenchela), d'avoir été toujours disponible pour me conduire sur le terrain et accompagner lors de mes sorties, où parfois l'accès est particulièrement très difficile. Je le remercie davantage pour sa gentillesse et tout le temps qu'il m'a accordé.*

*Mes sincères remerciements s'adressent plus spécialement à monsieur Zraib Azzedin, et à madame Kadi KENZA docteurs à l'université Abbes Laghrour-Khenchela pour leurs aides précieux et leurs conseils techniques.*

*Je remercie également Dr. Fatima Allouche, Maître de conférences à l'université Abbes Laghrour-Khenchela, pour ses louables encouragements et sa disponibilité.*

## Résumé

Dans le cadre de la valorisation des espèces végétales de l'Algérie, nous avons étudié une plante spontanée *Pinus halepensis* Mill. de la forêt de Bénis Oudjana, en raison de la diversité de ses attributs économiques, écologiques et médicinaux. C'est une plante xérophyte qui présente des caractéristiques morphologiques et physiologiques lui permettant de tolérer les conditions climatiques des zones semi-arides. L'objectif de ce travail est d'estimer la viabilité par le suivi de l'état actuel de cette forêt comprenant la végétation et les pressions, de quantifier les composés phénoliques, d'évaluer l'activité antioxydante des extraits de pin d'Alep et de proposer un plan d'aménagement simplifiée. La collecte de données y afférentes a eu recours à un inventaire forestier (pied par pied dans les 16 parcelles d'étude choisies selon l'altitude et l'exposition) et un inventaire des pressions. L'état a été évalué par l'analyse de ces composants. Les diverses analyses menées lors de cette étude ont révélé que la pinède de Bénis Oudjana est soumise à des pressions biotiques et abiotiques et une viabilité assez bonne. Cela est induit par une qualité de peuplement bonne ( $FE = 55,4\%$ ), une mortalité très faible ( $T_m = 1,5\%$ ), un potentiel d'avenir bon (taux de régénération :  $Tr = 76,75\%$ ) et par sa taille (abondance :  $N = 300$  pieds/ha ; dominance :  $G = 28,53$  m<sup>2</sup>/ha). Le pâturage et les coupes illicites constituent les pressions les plus importantes. La richesse spécifique est élevée dans les versants Ouest (85,71%), ces derniers présentent le meilleur niveau de viabilité par rapport aux autres expositions. Le schéma d'arbres le plus régulier selon l'indice d'agrégation de Clark et Evans ( $R$ ) est également des parcelles d'exposition Ouest ( $1,6 \pm 0,1$ ), qui se caractérisent par la densité la plus élevée ( $1010 \pm 342$  pieds/ha) avec une fréquence abondante des jeunes arbres selon le coefficient de forme de la distribution de Weibull ( $c = 0,812$ ). En outre, la caractérisation phytochimique d'extraits obtenus à partir des écorces et des aiguilles de *Pinus halepensis* Mill. par deux techniques d'extraction (macération et Soxhlet) et leur potentiel antioxydant ont montré que les extraits des écorces de pin d'Alep sont les plus riches en composés phénoliques et possèdent un pouvoir réducteur très important. La macération semble être la meilleure méthode d'extraction des phénols totaux (403,43 mg EAG/g d'extrait) et des tanins condensés (350,30 mg EC/g d'extrait), alors que, le meilleur contenu en flavonoïdes est enregistré chez l'extraction successive par Soxhlet. L'extrait aqueux et méthanolique ont marqué les plus grandes activités antioxydantes pour les écorces et les aiguilles respectivement ( $1,17 \pm 0,02$  et  $4,93 \pm 0,85$  µg/ml) ( $4,93 \pm 0,85$  et  $5,15 \pm 0,43$  µg/ml). Ces valeurs considérables en métabolites seraient responsables de la propriété antioxydante et constituent une source importante pour identifier des substances bioactives de *P. halepensis* Mill.

**Mots clé :** *P. halepensis*, structure, viabilité, polyphénols, plan de gestion simplifié

## ملخص

في اطار تثمانين اصناف النباتات الجزائرية، قمنا بدراسة نبتة عفوية (*Pinus halepensis* Mill.) في غابة بني وجانة. من اجل تنوع خصائصها الاقتصادية، الايكولوجية و الطبية. هذه النبتة لها خصائص مورفولوجية و فيزيولوجية تسمح لها بتحمل الظروف المناخية للمناطق الشبه الجافة. الهدف من هذا العمل هو تقييم الجدوى الغابية بمتابعة و مراقبة الوضع الحالي لهذه الغابة بما في ذلك الغطاء النباتي و الضغوط المؤثرة، تحديد المركبات الفينولية، تقييم النشاط المضاد للاكسدة لمستخلصات الصنوبر الحلبي و اخيرا اقتراح برنامج تنمية مبسط لكثا الصنوبر في هذه الغابة. جمعت كل المعطيات عن طريق جرد غابي و اخر للعوامل المؤثرة لـ 16 محطة اختيرت حسب الارتفاع و الاتجاه الجيوغرافي. كشفت التحليلات المختلفة التي أجريت خلال هذه الدراسة أن غابة الصنوبر في بني وجانة تخضع لضغوط حيوية وغير حيوية وفعالية جيدة إلى حد ما. هذا ناتج عن الجودة الجيدة لكثا الصنوبر ( $EF = 55,4\%$ ) ، ومعدل وفيات منخفض جدًا ( $Tm = 1,5\%$ ) وإمكانية مستقبلية جيدة (معدل التجديد:  $Tr = 76,75\%$ ) وحجمها (الوفرة:  $N = 300$  جذع/هكتار ؛ السيادة:  $G = 28.53$  م<sup>2</sup>/كتار). كما ان الرعي الجائر و القطع الغير القانوني للأشجار من أهم الضغوط التي تهدد الغابة. تظهر الدراسة ان الثراء النوعي للأشجار مرتفع في المنحدرات الغربية بنسبة 85.71% ، هذه الاخيرة تتمتع بأفضل مستوى من الجدوى مقارنة بالاتجاهات الأخرى. النمط الأكثر انتظامًا للأشجار وفقًا لمؤشر R Clark and Evans هو أيضًا يميز كثا الصنوبر في هذا الاتجاه ( $0.1 \pm 1.6$ )، والتي بدورها تتميز بأعلى كثافة ( $342 \pm 1010$  جذع/هكتار) مع تكرار و فير للأشجار الشابة وفقًا لمعامل الشكل لتوزيع Weibull ( $c = 0.812$ ). علاوة على ذلك، الوصف الكيميائي للمستخلصات التي تم الحصول عليها من لحاء وإبر الصنوبر الحلبي من خلال تقنيتي الاستخلاص (النقع والسوكسليت) قد أظهرت أن مستخلصات لحاء الصنوبر الحلبي هي الأكثر ثراءً بالمركبات الفينولية ولها خصائص مضادة للاكسدة كبيرة جدا. كما يبدو أن النقع هو أفضل طريقة لاستخراج الفينولات الكلية بمعدل ( $403,43\text{mg EAG/g}$ ) والتانين المكثف بمعدل ( $350,30$   $\text{mg EC/g}$ )، بينما تم تسجيل أفضل محتوى من الفلافونويد في الاستخلاص المتتالي بواسطة Soxhlet سجل المستخلص المائي والميثانولي أكبر أنشطة مضادات الأكسدة للحاء والإبر على التوالي. هذه القيم الكبيرة في المركبات البوكيميائية ستكون مسؤولة عن خصائص مضادات الأكسدة وتشكل مصدرًا مهمًا لتحديد المواد النشطة بيولوجيًا لشجرة الصنوبر الحلبي.

**الكلمات المفتاحية:** *P. halepensis* ، البنية ، الجدوى ، البولي فينول ، برنامج تسيير مبسط.

## Abstract

Within the framework of the valorisation of the plant species of Algeria, we studied a spontaneous plant *Pinus halepensis* Mill. of the forest of Benis Oudjana, because of the diversity of its economic, ecological and medicinal attributes. It is a xerophytic plant with morphological and physiological characteristics that allow it to tolerate the climatic conditions of semi-arid areas. The objective of this work is to estimate the viability by monitoring the current state of this forest including vegetation and pressures, to quantify phenolic compounds, to assess the antioxidant activity of extracts of Aleppo pine and to propose a simplified management plan. The collection of related data used a forest inventory (in the 16 study plots selected according to altitude and exposure) and an inventory of pressures. Condition was assessed by analysing these components. The various analyses conducted during this study revealed that the Benis Oudjana pine forest is subject to biotic and abiotic pressures and a fairly good viability. This is induced by a good stand quality (EF = 55.4%), a very low mortality (Tm = 1.5%), a good future potential (regeneration rate: Tr = 76.75%) and by its size (abundance: N= 300 tree/ha; dominance: G= 28.53 m<sup>2</sup>/ha). Grazing and illegal cutting are the most important pressures. Species richness is high on the western slopes (85.71%), these slopes have the best level of viability compared to other exposures. The most regular tree pattern according to Clark and Evans aggregation index (R) is also plots of western exposure (1.6±0.1), which are characterized by the highest density (1010 ± 342 tree/ha) with abundant frequency of young trees according to the shape coefficient of the Weibull distribution (c = 0.812). Furthermore, phytochemical characterization of extracts obtained from the barks and needles of *Pinus halepensis* Mill. by two extraction techniques (maceration and Soxhlet) and their antioxidant potential showed that the extracts of Aleppo pine barks are the richest in phenolic compounds and have a very important reducing power. Maceration seems to be the best method of extraction of total phenols (403.43 mg EAG/g extract) and condensed tannins (350.30 mg EC/g extract), while, the best flavonoid content is recorded in the successive extraction by Soxhlet (1,17 ± 0,02 and 4,93 ± 0,85 µg/ml) (4,93 ± 0,85 and 5,15 ± 0,43 µg/ml). The aqueous and methanolic extract marked the highest antioxidant activities for barks and needles respectively (1.17 ± 0.02 and 4.93 ± 0.85 µg/ml) (4.93 ± 0.85 and 5.15±0.43 µg/ml). These considerable metabolite values are thought to be responsible for the antioxidant property and are an important source for identifying bioactive substances of *P. halepensis* Mill.

**Key words:** *P. halepensis*, structure, viability, polyphenols, simplified management plan.

# Sommaire

## Remerciements

Introduction.....	1
-------------------	---

## Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. Description générale du pin d'Alep.....	4
1. Systématique de <i>Pinus halepensis</i> Mill.....	4
2. Aire de répartition naturelle du pin d'Alep.....	4
2.1. Aire de répartition du pin d'Alep dans le monde.....	4
2.2. Aire de répartition en Algérie.....	5
3. Plasticité écologique.....	6
4. Phénologie de l'espèce.....	7
5. Caractéristiques botaniques du <i>Pinus halepensis</i> .....	9
6. Caractéristiques forestières.....	11
II. Structure des peuplements forestiers.....	11
1. Attributs structuraux.....	12
1.1. Description de la structure d'un peuplement forestier.....	13
1.2. Attributs structuraux fréquemment utilisés.....	14
1.2.1. Variation de dimensions d'arbres.....	14
1.2.2. Distribution en diamètre et en hauteur des peuplements forestiers.....	14
1.2.3. Diamètre des arbres.....	14
1.2.4. Distribution en classes de diamètre à 1.30 m.....	15
1.2.5. Distribution en hauteur des arbres.....	15
2. Indices de structure.....	16
2.1. Indices indépendants de la distance.....	17
2.1.1. Indices utilisant la surface terrière et la densité.....	18
2.1.2. Indices de vigueur et indices fondés sur les houppiers.....	18
2.2. Indices dépendants de la distance.....	18
2.2.1. Indice de Clark et Evans.....	18
2.2.2. Indices basés sur les relations de voisinage.....	18
3. Diversité spécifique.....	19
3.1. Indice de Shannon.....	19
3.2. Indice de Simpson.....	19
III. Valorisation du pin d'Alep.....	20
1. Avantages socio-économiques des forêts du pin d'Alep.....	21
1.1. Valorisation du bois.....	21
1.2. Valorisation des oléorésines (résine, gomme, gomme).....	21
1.3. Valorisation des graines.....	21
1.4. Valorisation des écorces.....	23
1.4.1. Valorisation agricole des écorces.....	23
1.4.2. Valorisation écologique des écorces.....	24
1.4.3. Valorisation industrielle des écorces.....	25
1.4.4. Valorisation biologique des écorces.....	25
2. Utilisation ethnomédicale du pin d'Alep en Algérie.....	26

IV. Valorisation phytochimique du genre <i>Pinus</i> .....	27
1. Polyphénols.....	27
1.1. Flavonoïdes.....	27
1.2. Acides phénoliques.....	28
1.3. Stilbènes.....	29
1.4. Lignanes.....	30
1.5. Lignines.....	30
1.6. Tanins.....	31
2. Localisation et intérêt des polyphénols dans les plantes.....	32
3. Propriétés thérapeutiques des polyphénols.....	32
V. Pressions et menaces du pin d'Alep de Béni Oudjana.....	33
1. Pâturage.....	34
2. Défrichements.....	35
3. Incendies.....	36

## Chapitre II : Matériel et méthodes

I. Présentation de la zone d'étude.....	37
1. Caractéristiques écologiques de la zone d'étude.....	37
1.1. Situation géographique.....	37
1.2. Géologie.....	38
1.3. Relief.....	38
1.4. Expositions.....	39
1.5. Pentas.....	39
1.6. Caractérisation climatique de la zone d'étude.....	40
1.6.1. Température.....	41
1.6.2. Précipitations.....	42
1.6.3. Synthèse climatique.....	44
2. La végétation.....	48
2.1. Les peuplements forestiers (Arborescents).....	49
2.2. Matorral.....	49
2.3. Formations présteppeiques et steppeiques.....	50
2.4. Régénération naturelle.....	50
2.5. Reboisements.....	51
3. Occupation du sol.....	51
II. Méthodologie.....	52
1. Caractérisation des parcelles d'étude des peuplements de pin d'Alep.....	52
1.1. Cartographie.....	52
1.2. Choix des parcelles.....	52
1.3. Type d'échantillonnage.....	53
1.4. Collecte des données.....	53
2. Traitements des données.....	54
2.1. Richesse spécifique.....	54
2.2. Indices de diversité.....	54
2.2.1. Indice de Shannon-Wiener.....	55
2.2.2. Indice d'équitabilité.....	55
2.2.3. Indice de diversité de Simpson.....	56
2.3. Analyse sylvicole.....	56
2.3.1. Structure spatiale.....	56
2.3.2. Analyse de la régénération.....	57

2.4. Stabilité.....	58
2.5. Analyse des pressions et menaces.....	58
2.6. Analyse de la viabilité.....	58
2.7. Patron de distribution spatiale et indices de complexité structurale.....	59
2.7.1. Indice de Clark et Evans ( $R$ ).....	59
2.7.2. Indice de mélange ( $Mi$ ).....	59
2.7.3. Indice de différenciation des diamètres ( $Tij$ ).....	60
2.8. Structure démographique.....	61
3. Caractérisation phytochimique de pin d'Alep.....	62
3.1. Matériel végétal.....	62
3.2. Préparation de la poudre végétale.....	62
3.3. Extraction des métabolites secondaires.....	62
3.3.1. Extraction au Soxhlet.....	62
3.3.2. Préparation de l'extrait brut hydrométhanolique.....	63
3.4. Etude quantitative.....	63
3.4.1. Dosages des phénols totaux.....	63
3.4.2. Dosage des flavonoïdes.....	64
3.4.3. Dosage des tanins condensés.....	64
3.5. Evaluation de l'activité antioxydante.....	65
3.5.1. Activité « scavenging » du radical DPPH.....	65
3.5.2. Réalisation de l'essai.....	65
3.5.3. Expression des résultats.....	65
4. Analyse statistique.....	66
4.1. Analyse de la variance (ANOVA).....	66
4.2. Analyse en composantes principales (ACP).....	66

### **Chapitre III : Résultats et discussion**

I. Caractérisation des peuplements de pin d'Alep.....	67
1. Caractérisation de la structure des peuplements de pin d'Alep.....	67
1.1. Richesse spécifique.....	67
1.2. Analyse de la diversité spécifique.....	72
1.3. Structure spatiale.....	75
1.3.1. Structure horizontale.....	75
1.3.2. Structure spatiale verticale.....	79
1.4. Patron de distribution spatiale et indices de complexité structurale.....	80
1.5. Structure démographique des peuplements naturels de pin d'Alep.....	85
2. Qualité des peuplements naturels de pin d'Alep.....	92
2.1. Stabilité.....	92
2.2. Degré de couverture des peuplements naturels du pin d'Alep.....	96
2.3. Régénération naturelle et mortalité des peuplements.....	97
3. Les pressions exercées sur les peuplements naturels de pin d'Alep.....	99
4. Analyse en composantes principales (ACP).....	109
5. Viabilité des peuplements de pin d'Alep.....	113
II. Valorisation phytochimique du pin d'Alep.....	115
1. Variabilité du rendement des extractibles.....	115
2. Dosage phytochimique des extraits.....	118
3. Evaluation de l'activité antioxydante.....	125
4. Analyse de corrélation.....	128

III. Proposition d'un plan d'aménagement pour la pinède de Bénis Oudjana.....	129
1. Objectifs d'aménagement.....	129
2. Stratégie d'aménagement.....	129
3. Plan d'aménagement simplifié (PAS).....	129
4. Recommandations.....	130
<b>Conclusion.....</b>	<b>133</b>
<b>Perspectives.....</b>	<b>136</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>137</b>
<b>Annexes</b>	

## Liste des abréviations

<b>AA</b>	:	Activité antioxydante
<b>ACP</b>	:	Analyse en composantes principales
<b>AlCl<sub>3</sub></b>	:	Trichlorure d'aluminium
<b>ANOVA</b>	:	Analyse de variance
<b>BM</b>	:	Bois moyen
<b>C</b>	:	Circonférence
<b>CM</b>	:	Carrés moyens
<b>DDL</b>	:	Degré de liberté
<b>Dhp</b>	:	Diamètre à hauteur de poitrine
<b>DPPH</b>	:	2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl
<b>Ds</b>	:	Indice de Simpson
<b>E</b>	:	Indice d'équitabilité
<b>EAG</b>	:	Equivalent d'acide gallique
<b>EC</b>	:	Equivalent de catéchine
<b>EQ</b>	:	Equivalent de quercétine
<b>F</b>	:	Test de Fisher
<b>FE</b>	:	Facteur d'élancement
<b>g</b>	:	Surface terrière
<b>G</b>	:	Gaulis
<b>GB</b>	:	Gros bois
<b>H'</b>	:	Indice de Shannon
<b>Hf</b>	:	Hauteur de fût
<b>Ht</b>	:	Hauteur totale
<b>IC<sub>50</sub></b>	:	Concentration inhibitrice médiane
<b>M<sub>i</sub></b>	:	Indice de mélange
<b>MNT</b>	:	Model numérique de terrain
<b>N.S</b>	:	Différence non significative
<b>Na</b>	:	Nombre d'individus adultes
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	:	Sodium carbonate purifié
<b>Nm</b>	:	Nombre d'individus morts
<b>Nr</b>	:	Nombre de régénération
<b>P</b>	:	Perchis
<b>PB</b>	:	Petit bois
<b>PFNL</b>	:	Produits forestiers non ligneux
<b>PI</b>	:	Pourcentage d'inhibition
<b>PP</b>	:	Polyphénols
<b>R</b>	:	Clark et Evans
<b>Rdt %</b>	:	Rendement d'extraction
<b>RS</b>	:	Richesse spécifique
<b>S</b>	:	Superficie en hectares
<b>SCE</b>	:	Somme des carrés des écarts
<b>SH</b>	:	Surfaces des houppiers
<b>TGB</b>	:	Très gros bois
<b>T<sub>ij</sub></b>	:	Indice de différenciation des diamètres
<b>UV</b>	:	Ultraviolet
<b>Ve</b>	:	Volume exploitable
<b>Vt</b>	:	Volume total

## Liste des figures

Figure 1 :	Répartition de pin d'Alep dans le monde.....	5
Figure 2 :	Aire de répartition du pin d'Alep en Algérie.....	6
Figure 3 :	Organes de pin d'Alep de la forêt de Bénis Oudjana.....	9
Figure 4 :	Indices quantifiant la structure des forêts.....	17
Figure 5 :	Bois du pin d'Alep.....	21
Figure 6 :	Les tapis Biosorb.....	24
Figure 7 :	Structure de base des flavonoïdes.....	27
Figure 8 :	Quelques exemples des acides hydroxycinnamiques.....	29
Figure 9 :	Quelques exemples des structures chimiques des stilbènes.....	29
Figure 10 :	Principaux constituants de la lignine.....	31
Figure 11 :	Carte de situation géographique de la forêt de Bénis Oudjana.....	37
Figure 12 :	Profil altitudinal de la zone d'étude.....	38
Figure 13 :	Carte d'expositions cardinales de la forêt de Bénis Oudjana.....	39
Figure 14 :	Carte de pentes du massif forestier de Béni Oudjana.....	40
Figure 15 :	Evolution des températures moyennes mensuelles de la station d'El Hamma durant la période (1995-2018).....	41
Figure 16 :	Evolution des températures (m) et (M) d'El Hamma (1995 et 2018).....	42
Figure 17 :	Variations interannuelles des précipitations de la période (1995-2018)....	43
Figure 18 :	Diagramme ombrothermique de la station d'El-Hamma (1995-2018).....	45
Figure 19 :	Climagramme d'Emberger pour les parcelles d'études.....	48
Figure 20 :	Peuplement pure de pin d'Alep de la forêt de Bénis Oudjana.....	49
Figure 21 :	Matorral du massif de Bénis Oudjana.....	49
Figure 22 :	Formation présteppeiques du massif de Bénis Oudjana.....	50
Figure 23 :	Sujets régénérés du cèdre de l'Atlas de Bénis Oudjana.....	50
Figure 24 :	Carte représentant les 16 parcelles d'étude.....	53
Figure 25 :	Schéma général de l'indice de mélange.....	60
Figure 26 :	Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.....	63
Figure 27 :	Courbe d'étalonnage de la quercétine.....	64
Figure 28 :	Courbe d'étalonnage de la catéchine.....	64
Figure 29 :	Variation de la diversité floristique dans les parcelles d'étude.....	70
Figure 30 :	Distribution de tiges par classe de hauteurs dans les 16 placettes d'étude.	80
Figure 31 :	Structure en diamètre des groupements de pin d'Alep exposés au Sud.....	86
Figure 32 :	Structure en diamètre des groupements de pin d'Alep exposés à l'Ouest.....	86
Figure 33 :	Structure en diamètre des groupements de pin d'Alep exposés au Nord.....	87
Figure 34 :	Structure en diamètre des groupements de pin d'Alep exposés à l'Est.....	87
Figure 35 :	Structure en hauteur des groupements de pin d'Alep exposés au Nord.....	88
Figure 36 :	Structure en hauteur des groupements de pin d'Alep exposés à l'Est.....	89
Figure 37 :	Structure en hauteur des groupements de pin d'Alep exposés au Sud.....	89
Figure 38 :	Structure en hauteur des groupements de pin d'Alep exposés à l'Ouest...	90
Figure 39 :	Parcelles en ordre croissant de diamètre moyen.....	93
Figure 40 :	Coefficient d'élancement en ordre croissant du diamètre moyen.....	94
Figure 41 :	Hauteur totale moyenne en fonction du diamètre à 1.3 m du peuplement.....	94

Figure 42 :	Spécimen d'un chablis dans la parcelle O1.....	95
Figure 43 :	Polypore du pin d'Alep observé dans la station N1.....	100
Figure 44 :	Balai de sorcière observé chez les peuplements E3 et O2.....	102
Figure 45 :	La chenille processionnaire du pin observée dans la placette N2.....	103
Figure 46 :	Coupe d'assainissement du pin d'Alep dans la parcelle E2.....	105
Figure 47 :	Pâturage de caprins dans le massif forestier de Bénis Oudjana.....	107
Figure 48 :	Dépérissement du pin d'Alep dans le massif de Bénis Oudjana (parcelle S3).....	108
Figure 49 :	Histogrammes des valeurs propres en fonction des composantes principales.....	109
Figure 50 :	Représentation graphique des paramètres quantitatifs dans le plan factoriel 1-2.....	111
Figure 51 :	Représentation graphique des points individus (parcelles) dans le plan Factoriel 1-2.....	112
Figure 52 :	Représentation graphique des 21 variables à l'intérieur du cercle de corrélation sur le plan factoriel 1-2.....	113
Figure 53 :	Rendement d'extraction des composés phénoliques dans les différentes fractions des écorces et des aiguilles de pin d'Alep.....	116
Figure 54 :	Teneurs en polyphénols, flavonoïdes et tanins de l'écorce du pin d'Alep.....	119
Figure 55 :	Teneur en polyphénols, flavonoïdes et tanins des aiguilles de pin d'Alep.....	120
Figure 56 :	Activité antioxydante des différentes fractions des écorces et des aiguilles du pin d'Alep vis-à-vis du radical DPPH.....	126

## Liste des tableaux

Tableau 1 :	Moyennes mensuelles des températures maximales (M) et minimales (m) d'El Hamma (Période 1995-2018).....	41
Tableau 2 :	Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la période 1995-2018 de la station d'El Hamma.....	43
Tableau 3 :	Régime saisonnier (RS) de la station d'El Hamma (période 1995-2018).....	44
Tableau 4 :	Etage bioclimatique de la station d'El Hamma (Période 1995-2018).....	46
Tableau 5 :	Quotients pluviothermiques en fonction de l'altitude (1995 - 2018).....	47
Tableau 6 :	Occupation du sol du massif forestier de Bénis Oudjana.....	51
Tableau 7 :	Typologie des peuplements forestiers de Bénis Oudjana.....	51
Tableau 8 :	Richesse spécifique des différentes expositions dans les placettes étudiées.....	68
Tableau 9 :	Indices de diversité des parcelles étudiées de la forêt de Bénis Oudjana.....	73
Tableau 10 :	Caractéristiques quantitatives et qualitatives des peuplements de pin d'Alep.....	76
Tableau 11 :	Test d'ANOVA des paramètres dendrométriques des différentes expositions des peuplements de pin d'Alep du massif forestier des Bénis Oudjana.....	76
Tableau 12 :	Test d'ANOVA à un critère fixe des paramètres dendrométriques en fonction des expositions des peuplements de pin d'Alep.....	77
Tableau 13 :	Répartition des tiges de pin d'Alep par classes de diamètre.....	78
Tableau 14 :	Pourcentage du bois par exposition.....	79
Tableau 15 :	Valeurs des indices $R$ , $Mi$ et $Tij$ de peuplements pin d'Alep.....	81
Tableau 16 :	ANOVA à un facteur fixe (exposition et les variables $R$ , $Mi$ et $Tij$ ).....	82
Tableau 17 :	Valeurs des trois paramètres de la distribution théorique de Weibull.....	85
Tableau 18 :	Valeurs des trois paramètres de la distribution théorique de Weibull.....	88
Tableau 19 :	Valeurs moyennes de CE des parcelles étudiées.....	92
Tableau 20 :	ANOVA testant la variation du coefficient d'élancement.....	95
Tableau 21 :	Valeurs moyennes des surfaces des houppiers et degré de couverture.....	96
Tableau 22 :	Taux de régénérations et de mortalité dans les parcelles d'étude.....	97
Tableau 23 :	Inventaire des pressions des parcelles d'étude dans la forêt de Bénis Oudjana...	99
Tableau 24 :	Valeurs propres des 3 axes principaux.....	109
Tableau 25 :	Valeurs des corrélations et corrélations carrées des variables initiales de 4 premières composantes principales et information prise en compte par le premier plan factoriel représenté par les axes 1 et 2 pour l'ensemble des parcelles.....	110
Tableau 26 :	Evaluation du niveau de viabilité des parcelles.....	114
Tableau 27 :	Rendement d'extraction des composés phénoliques dans les différentes fractions des écorces et des aiguilles de pin d'Alep.....	115
Tableau 28 :	Les équations des courbes d'étalonnage des standards utilisés dans le dosage des métabolites.....	118
Tableau 29 :	Teneurs en phénols totaux, flavonoïdes et tanins des différents extraits contenus dans l'écorce et les aiguilles du pin d'Alep.....	119
Tableau 30 :	Équations des courbes d'étalonnage des extraits et d'acide ascorbique.....	125
Tableau 31 :	Activité antioxydante des différentes fractions des écorces et des aiguilles du pin d'Alep vis-à-vis du radical DPPH (les valeurs IC50 sont en $\mu\text{g/ml}$ ).....	125
Tableau 32 :	Matrice de corrélation de Pearson (aiguilles de pin d'Alep).....	128
Tableau 33 :	Matrice corrélation de Pearson (écorces de pin d'Alep).....	128

# ***Introduction***

## **Introduction**

Le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est considéré comme une composante principale et essentielle de la forêt méditerranéenne et représente un capital forestier de grande valeur par la majorité des pays du pourtour méditerranéen et plus particulièrement en Algérie (Boudy, 1950 ; Nahal, 1962). Le pin d'Alep est parmi les espèces d'arbres les plus communément plantées à cause de leur croissance rapide, de leur résistance aux conditions les plus xériques, de leurs aptitudes à reconstituer les zones dégradées et à occuper les terrains nus (Zavala et Zea, 2004).

En Algérie le pin d'Alep couvre 35% des surfaces boisées au nord, soit environ 850 000 ha. Il forme des forêts importantes dont les valeurs écologiques sont variables (Bentouati, 2006 ; Guit, 2015). Il est localisé en grande partie à l'état naturel dans les régions de l'est et du centre du pays principalement sur les Atlas, tellien et saharien (Guit, 2015). Cette espèce qui est présentée dans tous les étages bioclimatiques, depuis le littoral jusqu'à l'Atlas saharien, trouve son optimum de croissance essentiellement en zone semi-aride (Kadik, 2005 ; Djerrad, 2016). Sa grande plasticité et son tempérament robuste ont fait d'elle une essence pionnière de grand reboisement (Quézel, 2002 ; Kadik, 2005 ; Guit, 2015 ; Djerrad, 2016).

Depuis plusieurs décennies, le pin d'Alep dans les zones arides et semi arides a subi de sévères dégradations dues aux effets des pressions d'origine anthropique croissantes (coupes illicites, surpâturage, incendies) et climatiques (sécheresses successives et prolongées) causant ainsi la régression de cette essence forestière (Bentouati, 2006 ; Rached-Kanouni et al., 2020).

Le massif forestier de Beni Oudjana constitue l'une des principales forêts naturelles de pin d'Alep des zones semi-arides de l'Atlas saharien algérien (Hani et al., 2020 ; Hani et al. 2021). Face à la désertification qui menace le nord algérien, ce massif forestier est parmi les dernières barrières naturelles contre l'avancée du désert (Hani et al., 2021). Cependant, cette barrière naturelle a été quelque peu façonnée par l'homme depuis longtemps pour la satisfaction de ses besoins.

Pour mieux appréhender la dégradation des écosystèmes forestiers qui est d'ordre naturel et anthropique, l'étude de la végétation paraît très indiquée. En effet, la flore et la végétation d'une région sont le résultat d'un long processus de sélection naturelle sous l'action du climat, des conditions édaphiques et topographiques, sans oublier les activités anthropiques (Adedire, 2002 ; Orthmann 2005; Parmentier, 2005).

Une connaissance précise des ressources forestières existantes, ainsi que leur évolution devrait porter essentiellement sur la composition floristique, sur la structure et sur la régénération des essences à valeur, d'où la nécessité de réaliser un inventaire forestier.

Les études de la variabilité géologique, écologique, climatique, morphologique et dendrologique ont fait l'objet de nombreux travaux scientifiques dans plusieurs pays méditerranéens et en Algérie (Nahal, 1962 ; Debazac et Tomassone, 1965 ; Kadik, 1984 ; Spencer, 1985 ; Bariteau, 1992 ; Meddour, 1992 ; Safar, 1994 ; Nicault, 1999 ; Bentouati, 2006 ; Guit, 2015 ; Djerrad, 2016 ; Sarmoum *et al.* 2016 ; Hani *et al.*, 2020 ; Hani *et al.*, 2021). D'autres études ont été également menées sur la variabilité chimique des métabolites et des huiles essentielles du pin d'Alep (Schiller *et al.*, 1986 ; Dob *et al.*, 2007 ; Abi-Ayad *et al.*, 2011 ; Djerrad, 2016).

A la suite du rapport Brundtland qui a mis en exergue la notion de développement durable, il faut dorénavant orienter les considérations de la production de la pinède comme intégrant toutes les fonctions tant économiques qu'écologiques, sociales et humaines. A l'instar des espèces forestières, le pin d'Alep reste peu étudié sur le plan économique en Algérie. Ce manque d'informations constitue un handicap, quand il s'agit d'évaluer correctement cette espèce. Un diagnostic complet permet de ce fait de définir les aptitudes et les potentialités forestières de cette essence dans son milieu et de préciser la meilleure façon de la mettre en valeur.

L'industrie du bois à haut débit, des coproduits (produits forestiers non ligneux : PFNL) tels que les noeuds, les écorces, les aiguilles et les souches d'arbres sont éliminés pour leurs trop fortes quantités en lignines et composés lipidiques. Cependant, de nombreuses études ont montré que ces matières sont riches en polyphénols et en antioxydants extractibles (Packer *et al.*, 1999). Les polyphénols sont connus pour leurs propriétés organoleptiques (arôme, astringence), leurs capacités de coloration (teinture, trouble), ainsi que leurs propriétés biocides (fongicides, antibactériennes). Mais les polyphénols sont surtout célèbres pour leurs effets sur la santé humaine tels que la propriété anti-inflammatoire, la protection cardiovasculaire ou l'activité anticancéreuse (Rohdewald, 2002 ; Shafer et Hogger, 2007). Les coproduits de l'industrie du bois se présentent donc comme une biomasse riche en composés à haute valeur ajoutée (Meullemiestre, 2014 ; Saha Tchinda, 2015).

L'évaluation du contenu en composés phénoliques dans divers organes d'un arbre peut-être un indicateur très pertinent de changements d'états dus aux différentes conditions

environnementales ou une réponse à des conditions de traitement particulier (Kadi *et al.*, 2018).

L'objectif de ce travail est de constituer une base de données de référence et d'évaluer systématiquement la viabilité de pin d'Alep dans la forêt de Béni Oudjana afin de promouvoir ses coproduits (PFNL) tout en reconnaissant que les produits précités pourraient éventuellement contribuer de manière notable à l'amélioration des revenus de la population locale.

Les objectifs spécifiques à atteindre qui découlent de cet objectif général sont donc de :

- Connaître la qualité de la forêt de Béni Oudjana (composition, structure, état actuel,...).

- Identifier et ordonner par ordre de menaces les pressions présentes qui empêchent le développement et la continuité de l'espèce à croître dans ce massif forestier.

- Valorisation des PFNL et caractérisation biochimique (polyphénols, antioxydants,...) de cette espèce.

- Etablir une stratégie de gestion durable de l'écosystème (proposer un plan d'aménagement simplifié en fonction de l'état écologique actuel et la tendance future de l'écosystème), conciliant la conservation et la valorisation des PFNL de pin d'Alep.

Le présent travail comporte trois chapitres :

- Le premier (synthèse bibliographique) donne un aperçu général sur le sujet (collecte des informations sur le sujet, sur le site d'étude et sur les méthodes et les stratégies utiles pour la réalisation du sujet).

- Le deuxième (matériel et méthodes) est consacrée à décrire la zone d'étude, les parcelles traitées, les techniques employées et les méthodes statistiques utilisées pour l'interprétation et le traitement des données (mesures dendrologiques pour l'inventaire forestier de l'espèce, inventaire de sous-produits de l'espèce et les végétaux de son cortège floristique, recherche des composés phénoliques par plusieurs méthodes).

- Dans le troisième chapitre, les résultats obtenus sont statistiquement analysés et discutés.

Et enfin, une conclusion permettant de tirer, synthétiser et expliquer les évolutions et les tendances dévoilées par les divers tests statistiques en fonction des données quantitatives des différentes caractéristiques étudiées, suivie de quelques recommandations et perspectives.

***Chapitre I : Synthèse  
Bibliographique***

## **I. Description générale du pin d'Alep**

### **1. Systématique de *Pinus halepensis* Mill.**

Pin de Jérusalem, pin blanc (Provence), Aleppo pine, ce pin fut décrit pour la première fois par Duiamel en 1755, sous le nom de *Pinoshiero soliviitana*. Plus tard, Miller l'a réécrit en 1768 sous le nom de *Pinus halepensis* Mill. (Nahal, 1962).

*Pinus halepensis* Mill. appartient au sous règne des *Tracheobionta*, à l'embranchement des *Spermaphytes*, au sous-embranchement des *Gymnospermes*, à la classe des *Pinopsida*, à l'ordre des *Coniferales* et au sous-famille des *Pinoideae*, au genre *Pinus* (Camus, 1914). Ce genre est représenté essentiellement par deux espèces *Pinus halepensis* Mill. et *Pinus brutia* Ten. (Lieutaghi, 2004).

La systématique du pin d'Alep établie par Farjon (1996) se résume comme suit :

<b>Règne :</b>	Plantae
<b>Embranchement :</b>	Spermaphyta
<b>Sous-embranchement :</b>	Gymnospermae
<b>Classe :</b>	Pinopsida
<b>Ordre :</b>	Abietales
<b>Famille :</b>	Pinaceae (Abietaceae)
<b>Sous-famille :</b>	Pinoïdeae
<b>Genre :</b>	<i>Pinus</i>
<b>Sous-genre :</b>	<i>Eupinus</i>
<b>Espèce :</b>	<i>Pinus halepensis</i> Mill.

### **2. Aire de répartition naturelle du pin d'Alep**

#### **2.1. Aire de répartition du pin d'Alep dans le monde**

Il est intéressant de signaler que le pin d'Alep n'existe pas à l'état naturel dans la région d'Alep en Syrie (Nahal, 1962). Cette espèce est largement répandue sur le pourtour méditerranéen (Figure 1). Ces forêts occupent au total plus de 3,5 millions d'hectares qui sont réparties dans certains pays comme suit :

- En Algérie, le pin d'Alep est fréquent sur tous les massifs montagneux, du tell littoral jusqu'à l'Atlas saharien ; selon Kadik (1987), la superficie de cette essence approche 850 000 hectares.

- En Tunisie, il couvre une superficie de 340 000 hectares, et colonise essentiellement les Monts de la dorsale tunisienne (Souleres, 1969).

- Au Maroc, le pin d'Alep est peu fréquent à l'état spontané, il occupe une superficie de 65 000 ha répartis en peuplements disloqués occupant la façade littorale méditerranéenne au niveau du Rif, du moyen et du haut Atlas (Quezel, 1986 ; Bentouati, 2006).

- En Espagne, il est très bien développé constituant 15% de la superficie boisée (Montéro, 2000).

- En France, la surface des peuplements de pin est passée de 36 000 ha à 232 000 ha en un siècle (Brochiero *et al.*, 1999).

- En Italie, le pin d'Alep couvre environ 20 000 ha et reste à proximité des côtes (Seigue, 1985).



**Figure 1.** Répartition de pin d'Alep dans le monde (Caudullo *et al.*, 2017).

## **2.2. Aire de répartition en Algérie**

En Algérie, le pin d'Alep est présent dans toutes les variantes bioclimatiques avec une prédominance dans l'étage semi-aride (Figure 2). Sa plasticité et sa rusticité lui ont conféré un tempérament d'essence possédant un grand pouvoir d'expansion formant ainsi de vastes massifs forestiers. Il est présent partout, d'est en ouest allant du niveau de la mer aux grands massifs montagneux du Tell littoral et de l'Atlas Saharien. Son optimum de croissance et de développement se situe au niveau des versants nord de l'Atlas saharien où il constitue des forêts importantes et on peut citer à l'est, les grands massifs de Tébessa avec leurs 90 000 ha,

celui des Aurès à plus de 100 000 ha constitués principalement par les pinèdes des Béni-Imloul (72 000 ha), des Ouled Yagoub et celle des Béni Oudjana (Bentouati, 2006).

Au centre du pays, on peut signaler les forêts de Médéa Boghar, de Theniet El Had qui totalisent respectivement 52 000 et 47 000 hectares et les vieilles futaies des Monts des Ouled Nail dans la région de Djelfa (Gaouas *et al.*, 1997 ; Bentouati, 2006).

A l'ouest du pays, en Oranie, on peut trouver de vastes massifs concentrés dans les régions de Bel Abbés, de Saida et de l'Ouarsenis (Quezel et Barbero, 1992 ; Mezali, 2003).

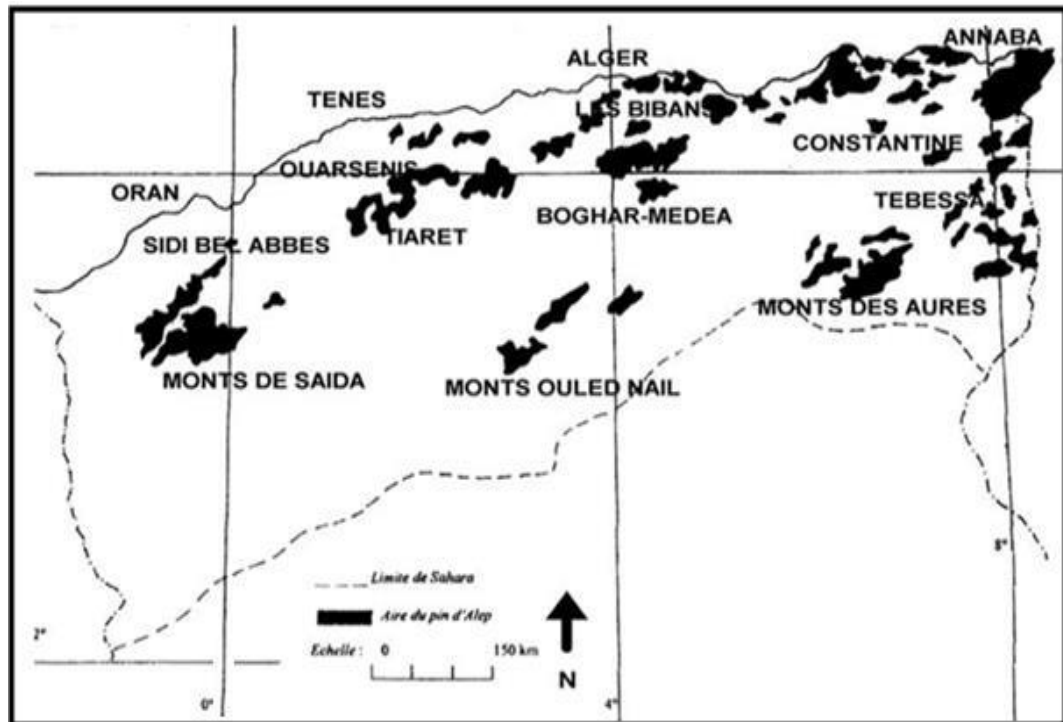


Figure 2. Aire de répartition du pin d'Alep en Algérie (Bentouati, 2006).

### 3. Plasticité écologique

Le pin d'Alep est une des essences méditerranéennes qui offre une plasticité écologique, puisqu'il a réussi à coloniser tous les substrats et également présent dans la majorité des variantes bioclimatique méditerranéenne (Quezel, 1986 ; Kadik, 2005).

Le pin d'Alep pousse dans des zones où les précipitations annuelles sont comprises entre 200 et 1500 mm. La pluviométrie ne semble pas être un facteur déterminant de la répartition de l'espèce, même si c'est entre 350 et 700 mm de précipitation annuelle qu'elle présente son développement optimal. Cependant, même si le pin d'Alep est indifférent à la quantité des précipitations, il n'en reste pas moins, parmi les essences provençales, celle qui est la mieux adaptée à la sécheresse (Kadik, 2005 ; Djerrad, 2016).

Un des facteurs climatiques majeurs limitant l'expansion du pin d'Alep est la température. On le rencontre dans des gammes de températures moyennes annuelles allant de 11 à 19°C, ce qui correspond à peu près à des moyennes des minimas du mois le plus froid comprises entre -3 et +10°C ; d'après Quezel (1985), ce paramètre constitue sa présence et sa distribution, des températures inférieures à sa limite de -3°C constituent l'un des principaux facteurs pour le développement de la survie de l'espèce. Le pin d'Alep peut supporter des froids accidentels de -15 à -18 °C, à condition qu'ils restent exceptionnels et de courte durée (Nahal, 1962).

Au point de vue sol, le pin d'Alep pousse sur des substrats tels que la marne, le calcaire, les schistes ou les micaschistes. On ne le trouve pas, par contre, sur les granites ou les gneiss. En fait, le pin d'Alep semble indifférent à la nature de la roche mère, mais semble s'installer préférentiellement sur les substrats meubles ou friables (Loisel, 1976).

On trouve également le pin d'Alep sur des sols très variés qui vont des lithosols (recolonisation d'éboulis par exemple) aux sols évolués profonds (recolonisation de terrasses par exemple). Si la profondeur du sol est directement corrélée au niveau de production des peuplements, il n'existe pas, par contre, de relation entre cette profondeur et la présence ou l'absence de pin d'Alep (Abbas *et al.*, 1985).

En ce qui concerne sa tolérance en rapport avec la chimie des sols, le pin d'Alep est une essence calcicole qui supporte des taux importants de calcaire (Marion et Poupon, 1974), atteignant 90% de calcaire total et 40% de calcaire actif (Loisel, 1976).

En plus de sa plasticité, le pin d'Alep présente aussi une particularité de supporter un déficit hydrique important et prolongé, ce qui lui confère une bonne résistance à la sécheresse surtout en période estivale (Bariteau, 1992).

#### **4. Phénologie de l'espèce**

La phénologie est la science ayant pour objet l'étude des phénomènes saisonniers qui marquent la vie des plantes et des animaux tout au long de l'année. Pour les plantes par exemple, il s'agit de l'apparition et de l'éclatement des bourgeons, de la date de floraison, des débuts et arrêts croissance des rameaux, de l'apparition, du déploiement, du jaunissement et de la chute des feuilles, de la formation, des changements de couleur, de la maturité et de la chute des fruits, etc. Dès 1875-80, le Service de la Météorologie Française, les services forestiers et des jardins botaniques ont ainsi mis en place des réseaux nationaux de suivi phénologique destiné à fournir des indices à mettre en relation avec les données météo. Ces réseaux ont malheureusement été abandonnés au milieu du XX<sup>e</sup> siècle (Chuine, 2005a).

Si la phénologie des plantes est clairement liée au climat (Differt, 2001; Lebourgeois *et al.*, 2008), cette relation dépend de l'espèce, de sa variabilité génétique et de sa sensibilité à différents facteurs météorologiques: ainsi certaines espèces dépendent plus de la pluie, d'autres de la température, certaines sont plus sensibles aux limites imposées par le froid en hiver ou par la chaleur au printemps.

Pour une espèce donnée cette dépendance thermique peut varier en fonction de sa situation par rapport aux limites de son aire de répartition (Morin *et al.*, 2007). Sur le réseau d'observation français RENECOFOR, Lebourgeois *et al.* (2007) montrent les relations entre différentes variables climatiques et le comportement des principales espèces.

Il a été par exemple émis l'hypothèse que le développement épidémique récent du chancre à *Crumelopsis* sur pin d'Alep (Martinez, 2002) pouvait être lié au réchauffement du printemps qui favoriserait le développement plus précoce de ce champignon pathogène, à un moment où les conditions d'humidité et la fréquence des pluies sont plus élevées, donc plus favorables.

Les observations phénologiques constituent la méthode la plus importante de l'étude de la relation entre le rythme de développement d'une espèce et les variations écologiques du milieu ambiant (Vennetier *et al.*, 2011). L'étude phénologique du pin d'Alep entreprise par plusieurs auteurs permet de déceler les observations phénologiques suivantes :

- La reprise de la végétation chez le pin d'Alep est relativement tardive et se situe entre février et mars.
- Les mois de mai et juin correspondent à la période de croissance maximale (radiale et apicale).
- La période de croissance est stoppée par la sécheresse vers le mois de juillet.
- Le pin d'Alep est un arbre polycyclique, susceptible d'effectuer plusieurs pousses par an et de produire des faux cernes (Serre 1976a et b).
- Les cônes mûrissent au cours de la deuxième année et laisse le plus souvent échapper leurs graines au cours de la troisième année (Nahal, 1962).
- La dissémination naturelle des graines a lieu entre la fin du mois d'août et la fin du mois d'octobre. Le cône doit avoir subi de fortes chaleurs, qui détruisent les joints de résine entre les écailles, pour pouvoir s'ouvrir (Francelet, 1970).
- La germination peut avoir lieu, soit à la fin de l'automne, soit au début du printemps (Calamassi *et al.*, 1984).
- Le Pin d'Alep fructifie dès l'âge de 10 à 12 ans, mais les graines qu'il produit ne sont aptes à germer qu'à l'âge de 18 à 20 ans (Nahal, 1962).

### **5. Caractéristiques botaniques du *Pinus halepensis***

Le pin d'Alep est une espèce très caractéristique qui existe à l'état spontané presque dans tout le nord algérien où il peut atteindre 30 m de hauteur (Boudy, 1950 ; Pardé, 1957 ; Gaussen, 1960 ; Mathieu, 1897 ;). Il a généralement un tronc tortueux (Figure 3a), irrégulier et branchu. Le fût utilisable comme bois d'œuvre dépasse rarement 8 m. Cependant, on trouve des peuplements à fûts élancés, droits et peu branchus, comme certains peuplements de Grèce et celui de Cadenet en France (Nahal, 1962).

Sa longévité est estimée à 150 ans avec une moyenne de 100 à 120 ans (Kadik, 1987). L'écorce des jeunes sujets est lisse et d'un gris-argenté (Figure 3b) ; chez les adultes, elle forme un rhytidome plus ou moins gerçure en écailles minces, larges et aplaties et de couleur rougeâtre. Elle est très inflammable et contient une grande quantité de tannins. L'utilisation de l'écorce du pin d'Alep pour le tannage est connue depuis très longtemps au Proche-Orient, en Europe et en Afrique du Nord ( Kadik, 1950; Nahal, 1962). De nos jours, les pratiques de l'écorçage ont disparu en raison de l'utilisation des tannins artificiels (Nahal, 1962).



**a : Tronc**



**b : Ecorces**



**c : Aiguilles**



**d : Cônes**

**Figure 3.** Organes de pin d'Alep de la forêt de Béni Oudjana (Hani, 2018).

Les rameaux sont verts clair, puis gris clair, assez fins. Il est polycyclique car cet arbre fait souvent une seconde pousse la même année. Les bourgeons sont non résineux, ovoïdes, aigus, bruns avec des écailles libres frangées de blanc. Les feuilles persistantes, associées par 2 (parfois 3 et 4) et groupées en pinceau aux extrémités des rameaux, sont des aiguilles fines d'un vert clair de 1 mm d'épaisseur maximum et de 4 à 10 cm de longueur (Figure 3c).

Les fleurs apparaissent sur les rameaux de l'année en fin du printemps début de l'été. Les cônes sont gros avec une taille de 6 à 12 cm avec un pédoncule épais de 1 à 2 cm (Kadik, 1987). souvent isolés et réfléchis (Figure 3d). Ils sont pourpres puis brun lustré avec des écussons aplatis, persistant plusieurs années sur l'arbre. Les cônes mûrissent au cours de la deuxième année et laissent souvent échapper leurs graines au cours de la troisième année. Le pin d'Alep fructifie de bonne heure, à l'âge de 10 à 12 ans. Les graines sont de petite taille de 5 à 7 mm à aile longue, brun gris sur une face et gris moucheté de noir sur l'autre. Les graines ne sont aptes à germer et suffisamment abondantes qu'à partir de l'âge de 18 à 20 ans. Cent kg de cônes produisent à peu près 50 kg de graines ailées (Nahal, 1962 ; Kadik, 1987), ce qui facilite leur dissémination par le vent et l'extension de leur aire de distribution (Chaumeil, 2006).

La nature de l'enracinement dépend de la profondeur du sol. Dans les sols profonds, il est pivotant avec de fortes racines latérales, mais dans les terrains superficiels, les racines apparaissant à la surface du sol. Néanmoins, dans l'ensemble, l'arbre est fortement accroché au sol, ce qui lui permet de vivre dans les sols très érodés et rocheux. On voit très souvent ses racines se faufiler entre les fissures et les calcaires durs (Nahal, 1962).

La couronne est de forme conique quand l'arbre est jeune, puis s'étale au fur et à mesure qu'il vieillit en raison du ralentissement du développement en hauteur de la flèche terminale. L'âge auquel commence ce ralentissement dépend de la fertilité des sols et, en particulier, de leur profondeur. Sur des sols fertiles et profonds, la couronne conserve plus longtemps sa forme conique que sur les sols superficiels et pauvres. La couronne du pin d'Alep est irrégulière, en général très claire, donnant peu d'ombre et de couleur vert-jaunâtre (Nahal, 1962).

Pendant la saison humide, les graines de pin d'Alep germent rapidement et en masse. La mortalité est forte chez les jeunes semis, notamment au cours des deux premières années, mais la grande production de semences et leur taux de germination élevé permettent de compenser ces pertes (Nahal, 1962).

Ces semis ont besoin de lumière, mais un léger couvert leur est plutôt favorable. Ils sont capables de s'installer sur la plupart des types de sol, mais un recouvrement important des herbacées leurs est très défavorable. La régénération sous pinèdes, même dense, ne pose aucun problème car l'éclairement reste suffisant (Nahal, 1962).

## **6. Caractéristiques forestières**

Le bois du pin d'Alep est bien différencié, avec un aubier blanc jaunâtre et un duramen brun, souvent, fortement engorgé de résine (Christel et Thierry, 1995 ; Elaieb *et al.*, 2020). Le bois est composé d'un aubier blanc jaunâtre et d'un cœur brun rougeâtre clair. Il est assez léger ; la limite entre le duramen et l'aubier n'est pas systématiquement bien nette. Les cernes annuels sont sinueux mais observables, sans difficulté. La zone du bois final est foncée, étroite et se différencie assez nettement de la zone du bois initial.

Les canaux résinifères sont gros, bien apparents, assez espacés et sécrétant une résine abondante (Nahal, 1962). Le bois de pin d'Alep peut être utilisé, après élimination de la résine, pour la fabrication de la pâte à papier (Nahal, 1962 ; Elaieb *et al.*, 2020).

Au vu des résultats des études menées par plusieurs auteurs (Daoui *et al.*, 2007 ; Elaieb *et al.*, 2010 ; Elaieb *et al.*, 2015 ; Ben Dhib, 2016 ; Ben Dhib *et al.*, 2016 ; Elaieb *et al.*, 2017 ; Elaieb *et al.*, 2020), le bois du pin d'Alep se place parmi les bois mi-dur à mi-lourd qui présente de bonnes caractéristiques mécaniques, mais qui est, cependant, fragile et cassant aux effets de chocs. Son retrait volumétrique est moyen et sa durabilité naturelle est faible. Il s'agit donc d'un bois qui s'usine et sèche naturellement sans problèmes particuliers (Elaieb *et al.*, 2020).

## **II. Structure des peuplements forestiers**

Dans la pratique forestière, la compréhension de la structure des arbres et des forêts est essentielle aux activités de gestion et d'aménagement. Toutes les interventions humaines dans la gestion des forêts et la conservation de la nature consistent essentiellement en des modifications de la structure des forêts dans un but précis, en supprimant et en ajoutant des arbres individuels. Par conséquent, une bonne compréhension des caractéristiques des forêts aide à prévoir les résultats probables de la gestion forestière (Pommerening et Grabarnik, 2019).

D'après Pranjic et Lukić (1996), « le terme structure des peuplements implique la distribution des espèces, le nombre d'arbres et la distribution des dimensions des arbres par unité de surface. C'est le résultat de l'intensité de la croissance simultanée de chaque espèce d'arbre exposée aux influences humaines et naturelles » (Indir *et al.*, 2013).

Oliver et Larson (1996) ont défini la structure de la forêt comme une distribution physique et chronologique des arbres dans le peuplement. La définition simple de Kimmins (1997) est que la structure du peuplement est la disposition verticale et horizontale des arbres. Cette hétérogénéité croissante de la structure horizontale et verticale des peuplements est liée au nombre d'espèces et de peuplements présentant une grande stabilité écologique.

Les options culturelles peuvent modifier cette structure et ont un rôle potentiel important pour assurer la diversité des peuplements et la stabilité écologique (Pretzsch, 1998 ; Humphrey *et al.*, 2000 ; McElhinny *et al.*, 2005).

Pommerening (2002) a donné un aperçu des trois principaux aspects de la structure du peuplement, les attributs structurels et leurs distributions empiriques, et des indices de complexité structurelle.

Depuis un certain temps, les indices qui quantifient la structure des peuplements sont intégrés dans la recherche forestière et sont également utilisés pour la compréhension des processus écologiques et du fonctionnement des écosystèmes forestiers (McElhinny *et al.*, 2005).

Une manière simple de définir la structure d'un peuplement est de dire qu'elle représente l'organisation verticale et horizontale (spatiale) des différents éléments (Goreaud, 2000 ; Pommerening, 2002). Dans la littérature écologique, la structure d'un peuplement est communément décomposée en deux termes : les indices structuraux et la complexité structurelle (McElhinny *et al.*, 2005).

### **1. Attributs structuraux**

A l'échelle d'un peuplement, la structure est définie en termes de plusieurs attributs structuraux. Caractériser la structure d'un peuplement revient à caractériser tous ses attributs structuraux. Ces attributs structuraux décrivent différents éléments du peuplement (arrangement des arbres, couvert de la canopée, diamètre et hauteur des arbres, distribution spatiale des arbres, nombre d'espèces...) (Ngo Bieng, 2007). La caractérisation de ces attributs structuraux permet une mesure de :

- L'abondance, par exemple la densité d'arbres d'une certaine classe de diamètre (Acker *et al.*, 1998).

- L'abondance relative, par exemple la diversité des diamètres (Gove, 1996). Buongiorno *et al.*, 1994), la surface terrière d'une espèce précise dans un mélange (Spies et Franklin, 1991).

- La richesse, par exemple la richesse des espèces dans la canopée (Munks *et al.*, 1996).
- La variation des tailles, par exemple l'écart type des diamètres (Spies et Franklin, 1991).
- La variation spatiale, par exemple la variation des distances au plus proche voisin dans un peuplement (Franklin *et al.*, 1981).

Ces différents attributs donnent une caractérisation des différents éléments constituant le peuplement, et ceux qui caractérisent les variations sont d'une importance particulière car ils peuvent aussi décrire une hétérogénéité à l'échelle du peuplement (McElhinny *et al.*, 2005).

La complexité structurale (McElhinny *et al.*, 2005) d'un peuplement est considérée comme une mesure de l'ensemble des différents attributs structuraux présents, ainsi que la relative abondance de chacun de ces attributs. L'ensemble des attributs du peuplement participe à sa complexité structurale.

### **1.1. Description de la structure d'un peuplement forestier**

La description de la structure d'un peuplement passe en général par la description de ses attributs structuraux. Plusieurs attributs structuraux ont été utilisés dans la littérature pour décrire les structures forestières. Il n'y a pas de suite définitive d'attributs structuraux, différents auteurs soulignant dans leurs études l'importance d'un attribut ou d'un ensemble de différents attributs. Les attributs structuraux sont choisis pour différents objectifs. Ils permettent en général de caractériser : par exemple la biodiversité d'un écosystème forestier donné (Bebi *et al.*, 2001 ; Bachofen et Zingg, 2001) ; ou encore un habitat pour un groupe faunique particulier (Watson *et al.*, 2001 ; Newsome et Catling, 1979). D'autres auteurs choisissent des attributs parce qu'ils sont relativement faciles à utiliser et à modéliser, et leur utilisation permet de faire un lien vers des attributs structuraux plus complexes (Buongiorno *et al.*, 1994 ; Gove, 1996 ; Wikstrom et Eriksson, 2000). Dans d'autres cas, des attributs sont choisis parce qu'ils permettraient de faire un lien avec la dynamique du peuplement (Condit *et al.*, 1998). Il arrive aussi que la disponibilité des mesures systématiques (dans des placettes permanentes) définit les attributs structuraux utilisés (Maltamo *et al.*, 1997 ; Acker *et al.*, 1998). De nombreux auteurs utilisent des attributs qui permettent de faire la différence entre les structures de différents peuplements, ou encore entre différents stades de succession d'un peuplement (Dewalt *et al.*, 2003 ; Ziegler, 2000 ; Tyrrell et Crow, 1994 ; Spies et Franklin, 1991).

La caractérisation des attributs relatifs à la structure des peuplements forestiers hétérogènes permet leur description, mais le lien est souvent fait avec leur fonction et leur composition, ce qui permet de tenir compte des processus écologiques sous-jacents (Franklin

*et al.*, 2002). La structure se réfère à l'arrangement spatial des divers composants de l'écosystème, à l'exemple des hauteurs des différents niveaux de canopée et de la distribution spatiale des arbres. La composition quant à elle rend compte de l'identité et de la variété des composantes de l'écosystème (exemple : la richesse spécifique). La fonction rend compte de l'action de différents processus écologiques sous-jacents, en tenant compte de la structure et de la composition.

Les attributs structuraux, fonctionnels et de composition sont dépendants, les attributs d'un groupe pouvant illustrer des caractéristiques d'un autre groupe. Cette division n'est pas une catégorisation claire. Les attributs structuraux renseignent ainsi sur la structure, mais aussi sur la composition et la fonction (Ngo Bieng, 2007).

## **1.2. Attributs structuraux fréquemment utilisés**

Les attributs structuraux utilisés dans la littérature pour caractériser la structure des peuplements forestiers. Il s'agit surtout de ceux dont l'efficacité a été prouvée.

### **1.2.1. Variation de dimensions d'arbres**

La distribution des arbres basée sur leurs dimensions a l'avantage supplémentaire de pouvoir être évaluée facilement à partir d'inventaires forestiers communs (Pommerening, 1997). Les attributs structuraux des forêts et des peuplements forestiers conventionnellement utilisés pour décrire la structure des peuplements sont : le diamètre à hauteur de poitrine moyen (dhp à 1,30 m), les distributions de fréquences du diamètre et de la hauteur, la hauteur moyenne totale et de fut, la surface terrière moyenne et le volume totale moyen par unité de surface (Gadow *et al.*, 2012).

### **1.2.2. Distribution en diamètre et en hauteur des peuplements forestiers**

La connaissance de la distribution par classes de diamètre ou de hauteur est indispensable pour renseigner sur l'écologie des espèces, les contraintes sylvicoles éventuelles et l'état de la ressource (Herrero-Jáuregui *et al.*, 2012).

### **1.2.3. Diamètre des arbres**

C'est une mesure universelle de la taille des arbres dans la littérature concernant les structures forestières (McElhinny *et al.*, 2005). C'est un attribut structural très utilisé et la mesure est faite à la hauteur de poitrine. On peut alors le quantifier pour un peuplement en terme de moyenne des diamètres à hauteur de poitrine ( $D_{1,30}$ ).

La moyenne des  $D_{1,30}$  augmente généralement avec l'âge du peuplement. Elle a été utilisée pour différencier les stades de succession dans les forêts.

La surface terrière est un attribut directement relié à la moyenne quadratique des  $D_{1,30}$ . Elle est indicative du volume du peuplement et de la biomasse. Elle a été utilisée pour caractériser et différencier des forêts primaires et secondaires (Kappelle *et al.*, 1996).

#### **1.2.4. Distribution en classes de Diamètre à 1.30 m**

L'utilisation de la distribution de fréquence des dhp est répandue en foresterie. La répartition des dhp peut être décrite à l'aide du coefficient d'asymétrie (*skewness*) ou à l'aide d'un indice de diversité comme l'indice de Shannon-Weiner (Buongiorno *et al.* 1994 ; Angers *et al.*, 2014). La distribution diamétrale peut également être décrite en y ajustant une fonction mathématique comme la distribution théorique de Weibull (Leak 1996, Zhang *et al.* 2001, Schwartz *et al.*, 2005).

Cette distribution assez couramment citée dans la littérature forestière se caractérise par une plus grande souplesse d'emplois (Rondeux, 1999 ; Angers *et al.*, 2014).

#### **1.2.5. Distribution en hauteur des arbres**

La répartition verticale du feuillage entre différentes strates de végétation peut être quantifiée à l'aide du même type d'indices de diversité que ceux qui décrivent la diversité en espèces. Un exemple très connu est celui de l'indice de diversité de la hauteur du feuillage (Angers *et al.*, 2014).

La relation entre les hauteurs et les diamètres des arbres est bien établie dans la littérature (Temesgen et Gadow, 2004), on peut penser que les attributs structuraux associés aux diamètres peuvent servir pour évaluer les attributs relatifs à la hauteur (Buongiorno *et al.*, 1994). Cependant parce que cette relation n'est pas linéaire et dépend de plusieurs facteurs (notamment la fertilité), il est plus significatif d'utiliser les attributs directement associés à la hauteur pour caractériser les éléments verticaux de la structure.

L'attribut le plus simple associé à la hauteur des arbres est la hauteur de la canopée qui peut être indicatif du stade de succession (Kappelle *et al.*, 1996), du nombre de strates (Spies, 1998) et de la biomasse du peuplement (Means *et al.*, 1999).

La variation dans la taille (hauteur et diamètre) des arbres est un important attribut structural ; elle est complexe à caractériser car elle dépend autant de l'arrangement horizontal des arbres que de leur taille (Zenner, 2000 ; Svensson et Jeglum, 2001). La diversité des tailles d'arbres pour caractériser la structure horizontale est ainsi insuffisante, les peuplements présentant une distribution en classes de diamètres similaires peuvent avoir des arrangements spatiaux très différents. Il apparaît ainsi que l'utilisation de la diversité des tailles comme

attribut de structure a plus à voir avec le fait qu'elle est facile à mesurer, et à elle seule, elle ne caractérise pas totalement la structure du peuplement.

Il est important de tenir compte également de la distribution spatiale des arbres (Zenner, 2000 ; McElhinny *et al.*, 2005) particulièrement en peuplement hétérogène (Goreaud, 2000).

Il existe une grande variété d'attributs pour caractériser la structure de peuplements forestiers hétérogènes. Ils sont basés sur différents éléments du peuplement. On peut les combiner en des indices de complexité structurale pour avoir une caractérisation de la structure à l'échelle du peuplement.

Cette approche a été utilisée dans des travaux de recherche pour caractériser et comparer des structures de peuplements forestiers, mais elle est très compliquée (McElhinny *et al.*, 2005).

Pour quantifier les attributs structuraux des peuplements, et surtout pour faciliter la comparaison entre les peuplements, des indices de structure ont été développés (Watson *et al.*, 2001). Ils permettent de quantifier objectivement et de manière fiable la structure des peuplements, qui autrement serait décrite de manière verbale (Sterba et Zingg, 2006).

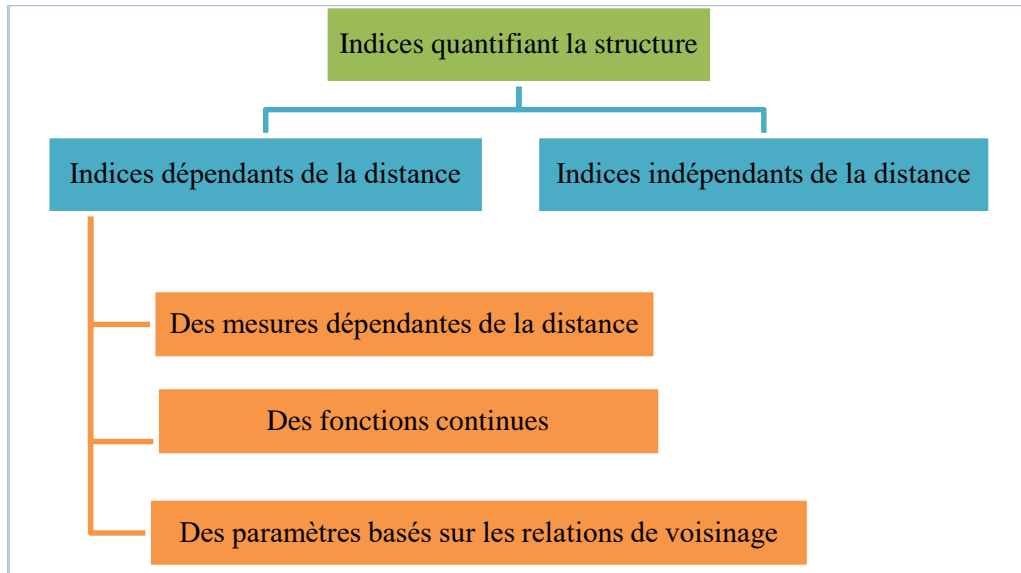
## **2. Indices de structure**

Les indices de structure sont des constructions mathématiques qui ont été conçues pour quantifier les éléments de structure d'un peuplement forestier et les exprimer sous forme d'un nombre (ou d'une distribution) (Pommerening, 2002).

Ils permettent ainsi de comparer la structure des peuplements. Suite à la demande croissante d'outils pour caractériser la diversité des environnements locaux dans les peuplements hétérogènes, particulièrement en termes de distribution spatiale des arbres et de leurs caractéristiques (définies par les autres attributs structuraux) (Mason et Quine, 1995, Ferris et Humphrey, 1999), de nombreux indices de structure ont été développés.

Ils décrivent, en donnant des valeurs moyennes ou des distributions, certains aspects horizontaux de la structure des peuplements forestiers (Upton et Fingleton, 1989).

La majorité des indices quantifiant la structure des forêts peuvent être divisés en deux grands groupes (Figure 4) : des indices dépendants de la distance et des indices indépendants de la distance (Tomé et Burkhart, 1989 ; Sylvie, 1998 ; Pommerening, 2002). Les premiers évaluent la structure sans aucune référence spatiale, alors que les deuxièmes sont basés sur les relations spatiales entre arbres voisins, prenant en compte leurs différences d'attributs structuraux (Ngo Bieng, 2007).



**Figure 4.** Indices quantifiant la structure des forêts (Pommerening, 2002).

### 2.1. Indices indépendants de la distance

Ces indices peuvent se répartir entre des indices qui caractérisent la compétition d'un peuplement dans son ensemble, et à ce titre sont plus des descripteurs de peuplement que de véritables indices de compétition (densité, surface terrière, indice de Reineke...), et des indices mesurant la compétition subie par un arbre (indices utilisant les ratios, les caractéristiques de houppier par exemple). Leur calcul ne nécessite aucune connaissance sur la position des arbres du peuplement étudié, ils peuvent être construits avec des données issues d'inventaires classiques de terrain (Sylvie, 1998).

#### 2.1.1. Indices utilisant la surface terrière et la densité

Une mesure simple de la compétition est obtenue en calculant la surface terrière du peuplement dans lequel se trouve l'arbre sujet. La surface terrière peut être calculée pour tous les arbres compétiteurs ou pour une fraction d'entre eux. Par exemple, le calcul peut se restreindre à la population d'arbres dont le diamètre à 1,30 m est supérieur à celui du sujet. Ces derniers indices permettent une différenciation de la compétition selon les dimensions des arbres (exemple diamètre du tronc) ou de position sociale au sein du même peuplement et ont été utilisés en particulier pour l'analyse de peuplements hétérogènes (Schütz, 1993). Ces indices peuvent s'utiliser au niveau du peuplement tout entier (indices non spatialisés) ou après avoir défini une zone d'influence.

### **2.1.2. Indices de vigueur et indices fondés sur les houppiers**

Les indices de vigueur cherchent à quantifier la vitalité d'un arbre, son statut social en utilisant, par exemple, certaines de ses dimensions aériennes. Les indices de houppier utilisent des informations sur les caractéristiques des couronnes des arbres (volume, surface, etc.). Quelques-uns de ces indices sont illustrés dans le cas des indices spatialisés « Les indices utilisant les caractéristiques du houppier » (Daniels *et al.*, 1986).

### **2.2. Indices dépendants de la distance**

Leur calcul fait cette fois intervenir la distance entre les arbres, et nécessite de disposer de ces données, ou au moins d'une cartographie des individus (Sylvie, 1998). Selon Pommerening (2002), ces indices sont divisés en trois groupes : des mesures dépendantes de la distance, des paramètres basés sur les relations de voisinage et des fonctions continues.

#### **2.2.1. Indice de Clark et Evans**

Ces indices nécessitent une connaissance spatialisée de l'emplacement des voisins. Le plus commun est l'indice d'agrégation de Clark et Evans ( $R$  ; Clark et Evans, 1954). Dans les années 1950 et 1960, des variables numériques ont été développées pour décrire les aspects de la variabilité de la localisation des arbres dans les peuplements forestiers par une valeur unique. L'indice d'agrégation  $R$  en est un exemple. Il représente la relation entre la distance moyenne observée et la distance moyenne attendue entre les arbres voisins les plus proches (McElhinny *et al.*, 2005 ; Indir *et al.*, 2013).

#### **2.2.2. Indices basés sur les relations de voisinage**

Les relations de voisinage jouent un rôle vital dans l'écologie forestière et décrivent la microstructure de ces écosystèmes. On distingue deux principaux indices développés pour cet objectif.

##### **2.2.2.1. Indice de différenciation des diamètres**

L'indice de différenciation des diamètres ( $T_{ij}$ ) caractérise la différence de taille entre des arbres voisins et décrit la distribution spatiale des tailles d'arbres. Pour un arbre de référence  $i$  et ses  $n$  voisins  $j$  (Pommerening, 2002).

##### **2.2.2.2. Indice de mélange**

L'indice de mélange des espèces ( $M_i$ ) ou le mélange spatial des arbres concerne spécifiquement la microstructure des écosystèmes. Il donne la proportion de trois ou quatre arbres voisins les plus proches qui n'appartiennent pas à la même espèce que l'arbre de référence  $i$  (Pommerening, 2002).

### **3. Diversité spécifique**

Une première impression sur la structure des forêts est fournie par les distributions de fréquences des tailles et des espèces d'arbres (Gadow *et al.*, 2012). La diversité des écosystèmes à l'échelle spatiale est subdivisée en diversité alpha, bêta, gamma et delta (MacArthur, 1965 ; Whittaker, 1972 ; Pommerening, 2002). Dans les écosystèmes forestiers, la diversité alpha opère au sein des peuplements forestiers ; la diversité bêta fait référence à la variation entre les peuplements forestiers ; la diversité gamma et delta opère à des échelles plus grandes (Lähde *et al.*, 1999).

Il existe une demande croissante d'informations sur la diversité alpha, en particulier sur la distribution spatiale des arbres et leurs attributs (Mason et Quine, 1995 ; Ferris et Humphrey, 1999). C'est pourquoi des indices structuraux ont été développés, ils décrivent, en tant que valeurs moyennes ou distributions, certains aspects horizontaux de la structure des peuplements forestiers (Upton et Fingleton, 1985 ; 1989).

L'un des premiers indices de diversité est la richesse spécifique (RS). Cet indice évalue le nombre d'espèces d'arbres dans le peuplement (Gonçalves *et al.*, 2010). Bien qu'il permette de distinguer la diversité en fonction du nombre d'espèces, il ne donne aucune information sur le poids de chaque espèce dans le mélange (Gonçalves, 2003).

#### **3.1. Indice de Shannon**

Indice de Shannon (Shannon et Weaver, 1949) est un exemple d'algorithme indépendant de la distance. Cet indice est sans conteste l'indice le plus utilisé pour décrire la diversité des espèces (Lindenmayer *et al.*, 2000 ; Cordonnier *et al.*, 2012).

#### **3.2. Indice de Simpson**

L'indice de Simpson, autre indice fréquemment utilisé et indépendant de la distance, présente l'intérêt de disposer d'un estimateur non biaisé et d'une variance d'échantillonnage plus faible que l'indice de Shannon (Lande, 1996). Toutefois, cet indice se révèle moins sensible au nombre d'espèces que l'indice de Shannon, et on l'associe davantage à un indice de dominance qu'à un indice de diversité (Lande, 1996 ; Cordonnier *et al.*, 2012).

Les indices de diversité (ex. : Shannon, Simpson, etc.) développés pour caractériser la diversité et la richesse des communautés d'espèces peuvent être modifiés pour caractériser la diversité d'autres attributs structuraux (ex. : dhp, hauteur, répartition du feuillage par strate...) (Angers *et al.*, 2014).

Les indices présentés précédemment caractérisent la structure spatiale des peuplements forestiers (à l'exception d'indices de diversité). Ils ne sont qu'une partie de la diversité d'indices de structure existants dans la littérature. Il existe plusieurs études comparant la capacité de ces indices à rendre compte de la structure de peuplements forestiers (Pommerening, 2002 ; Sterba et Zingg, 2006). Ces indices apparaissent ainsi comme des outils de description utiles.

Il existe un nombre considérable d'autres indices pour décrire la structure forestière, qui sont basés sur des concepts similaires. Ils ne peuvent pas être discutés en détail ici, car cela dépasserait le cadre de ce document.

### **III. Valorisation du pin d'Alep**

La biomasse forestière est principalement affectée à la production de bois d'œuvre et de bois d'industrie. Elle est depuis toujours valorisée comme biomatériaux (pâte à papiers, panneaux à particules, isolants), comme biocombustibles pour produire de la chaleur ou de l'électricité par différentes voies telles que la combustion ou la méthanisation.

Et également comme matière première de la chimie, en tant qu'agro-solvants, tensio-actifs, liants, résines, principes actifs et huiles essentielles principalement utilisée par les industries pharmaceutiques, cosmétiques, parfumerie et agro-alimentaire (Alcimed, 2012). La biomasse joue un rôle important dans le monde de l'économie. La politique mise en place pour lutter contre le réchauffement climatique et réduire la consommation des matières non renouvelables favorisent l'émergence de cette ressource renouvelable.

Toute transformation du bois engendre une quantité énorme de résidus sous forme de sciure, nœuds, d'écorce, de feuillage et de ramilles. Cependant, de nombreuses études ont montré que ces matières étaient riches en polyphénols et en antioxydants extractibles. Les polyphénols sont connus pour leur propriétés organoleptiques (arôme, astringence), leur capacité de coloration (teinture), ainsi que leur propriétés biocides (fongicides et antibactériennes). Les coproduits de l'industrie du bois se présentent donc comme une biomasse riche en composés à haute valeur ajoutée. L'extrait d'écorce de *Pinus* est bien connue dans la médecine traditionnelle, Hippocrate, le « Père de la Médecine » mentionnait déjà leurs effets thérapeutiques sur les maladies inflammatoires (Packer *et al.*, 1999). Shafer et Hogger (2007) l'ont décrit comme anti-diabétique, Rohdewald (2002) a mis en évidence son action antioxydante et son rôle dans différentes maladies.

## **1. Avantages socio-économiques des forêts du pin d'Alep**

Les forêts en général fournissent plusieurs avantages à la société à travers les différentes activités économiques créées en termes d'emploi et de revenu généré de l'usage, de l'exploitation et de la transformation des produits forestiers, ainsi que des bénéfices liés à la régulation de l'eau et du climat, et de protection des sols (FAO, 2014). Les forêts de pin d'Alep fournissent une multitude de produits, à savoir le bois, les graines (zkoukou), les huiles essentielles, le miel, et les tannins (Dahman, 1986), mais également d'autres produits et services non marchands entre autres la protection des barrages contre la sédimentation. La population forestière est le premier bénéficiaire de la forêt du pin d'Alep. Elle bénéficie des droits d'usage comme le pâturage et le prélèvement du bois mort.

### **1.1. Valorisation du bois**

Les prélèvements du bois des forêts du pin d'Alep ont été variables dans le temps. Le bois de pin d'Alep (Figure 5) ne jouit pas d'une excellente réputation sur l'ensemble du pourtour du bassin méditerranéen (Daoui *et al.*, 2007), pour au moins trois raisons :

- L'arbre présente un port tourmenté, ce qui hypothèque un rendement matière correct en première transformation.
- Son bois est riche en résine, ce qui provoque l'encrassement des outils et détériore la mouillabilité des surfaces produites par usinage.
- Son bois présente de nombreux nœuds, défauts qui diminuent les résistances mécaniques du matériau et compliquent l'usinage quel qu'il soit (endommagement des outils et des surfaces obtenues) (Daoui *et al.*, 2007 ; Ben Dhib *et al.*, 2016 ; Elaieb *et al.*, 2017 ; Elaieb *et al.*, 2020).



**Figure 5.** Bois du pin d'Alep (Unité d'exploitation et transformation du bois de Khenchela, 2019).

## **1.2. Valorisation des oléorésines (résine, gomme, gomme)**

Le pin d'Alep est gemmé depuis une époque très lointaine. Parmi les pins gemmés dans le bassin méditerranéen, c'est celui qui donne le plus de rendement. D'après leur rendement décroissant en oléorésine (Nahal, 1962) ; il donne environ 3 Kg de résine (la gomme) par arbre et par an (Parajoannou, 1954 ; Kadik, 1987). La gomme pure contient 20 à 24 % d'essence de térébenthine et 75 à 80 % de cellophane.

L'essence de térébenthine du pin d'Alep est très appréciée sur le marché international. Son prix est plus élevé que celui des essences de pin maritime et des autres pins de l'Amérique et de l'Europe. D'après Nahal (1962), l'essence de térébenthine du pin d'Alep est une matière première excellente pour la fabrication du camphre synthétique et peut rivaliser avec les meilleurs produits de l'industrie américaine. D'après Thibaut *et al.* (1992), l'essence de térébenthine et la colophane intéressent beaucoup les industries surtout ceux de peinture. La résine de pin d'Alep est supposée avoir été utilisée comme constituant du mélange antiseptique utilisé par les anciens Egyptiens pour embaumer leurs morts (Nahal, 1962).

## **1.3. Valorisation des graines**

Les graines de pin d'Alep comptent parmi les principaux produits forestiers non ligneux (PFNL) ayant une grande valeur commerciale. L'intérêt des graines sur les plans nutritionnel, médicinal et cosmétique réside surtout dans leur richesse en acides gras insaturés et en composés antioxydants présents en proportion appréciable dans leur huile végétale extraite naturellement à partir des graines (Khouja *et al.*, 2020a ; Daly-Hassen et Ayari, 2020).

Les graines de pin d'Alep peuvent être exploitées doublement pour leur pâte (usage nutritionnel) et pour leur huile végétale (usages médicinal et cosmétique). Cependant, la plus value escomptée en exploitant d'une manière optimale les résidus (pâte dégraissée) après extraction de l'huile peut se révéler très rentable et offrir des gains considérables aux industriels du domaine agro-alimentaire.

La valeur et la qualité des produits ainsi obtenus (huile et pâte dégraissée) dépendent étroitement de la qualité de la graine au départ, des conditions de son stockage, du procédé d'extraction de l'huile et celui de transformation de la pâte résiduelle. Les graines de pin d'Alep (ou Zgougou) sont très prisées par les Tunisiens qui l'utilisent traditionnellement pour préparer une crème pâtissière typique à l'occasion du Moulded (Daly-Hassen et Ayari, 2020). A part cet usage exceptionnel et propre aux tunisiens, on découvre que les graines du pin d'Alep revêtent une grande importance dans la nutrition humaine (Nergiz et Domnez, 2004) et deviennent de plus en plus populaires puisqu'elles rentrent davantage dans de nombreuses autres préparations culinaires (glace, cakes, pâtisserie traditionnelle...). Par ailleurs, selon la

littérature, les graines de nombreuses espèces de pin, trouvent une utilisation très variée en médecine traditionnelle notamment comme remède naturel contre la fatigue et le vieillissement (Watanabe *et al.*, 1995), en tant qu'anti-inflammatoire (Rohdewald, 2002 ; Yen *et al.*, 2008), antinéoplasique (Li *et al.*, 2007 ; Potta *et al.*, 2005), antibactérien (Maksimiuk, 1970), immunomodulateur (Li *et al.*, 2007; Rohdewald, 2002) et anticancéreux (Kadri *et al.*, 2014 ; Khouja, 2016). L'intérêt médicinal du pin le doit surtout à la richesse de ses graines en composés bénéfiques pour la santé, et plus particulièrement, aux antioxydants naturels qu'elles renferment (Su *et al.*, 2009). Par ailleurs, l'acide  $\alpha$ -linoléique qui est doté d'un effet très avantageux sur la santé humaine, notamment contre les maladies cardiovasculaires et certains cancers, est présent en proportion appréciable dans l'huile végétale des graines du pin d'Alep (Cheikh-Rouhou *et al.*, 2006 ; Khouja, 2016). De par ses caractéristiques physico-chimiques remarquables et sa richesse en composés actifs, l'huile végétale est très demandée dans les secteurs des industries médicinales, pharmaceutiques et cosmétiques. Une telle huile a une odeur végétale délicate caractéristique du pin d'Alep, une coloration jaune claire et une texture légère. Elle se distingue aussi par un arôme agréable et doux, possède un excellent toucher et pénètre facilement dans la peau (Khouja *et al.*, 2020a). La teneur et la composition chimique de cette huile diffèrent selon la provenance de la graine et selon le mode d'obtention (Khouja, 2016 ; Khouja *et al.*, 2020a).

#### **1.4. Valorisation des écorces**

Actuellement, il existe peu de voies de valorisation réelle des écorces autres que la production d'énergie. Cependant, un énorme surplus est encore rejeté dans l'environnement causant de graves problèmes environnementaux (Hassan and Mun, 2002). Pourtant on peut noter que différentes études mentionnent les nouvelles applications des écorces comme leur utilisation dans la fabrication du charbon (Harkin et Rowe, 1971).

##### **1.4.1. Valorisation agricole des écorces**

L'usage des écorces en agriculture en tant que paillage des sols est une mise en valeur directe. En effet, en réduisant l'apparition des mauvaises herbes, l'écorce améliore la qualité des sols. Elle sert aussi à l'amendement et à la fertilisation. L'écorce séchée et découpée permet la rétention d'eau et le maintien des animaux d'élevage plus secs et propres grâce à son plus grand pouvoir de rétention des liquides et d'absorption des odeurs par rapport au bois (Deschênes, 1986 ; Bouras, 2015).

**1.4.2. Valorisation écologique des écorces**

Des études ont été faites sur l'utilisation des écorces de pin d'Alep en tant qu'adsorbant des polluants des eaux grises (Dalahmeh *et al.*, 2012 ; Bouras, 2015), ou des eaux usées qui viennent des raffineries de pétrole, de l'industrie du plastique, du cuir ou de peinture (Nahal, 1962 ; Martin-Dupont *et al.*, 2002 et 2006; Vázquez *et al.*, 2007 ; Takano *et al.*, 2008). De plus, l'usage des écorces en tant que biosorbant (Figure 6), se révèle être un outil rentable pour le traitement des effluents et pourrait être la source de nouvelles techniques d'usage et de mise en valeur des déchets forestiers afin de protéger l'environnement et les ressources en eau (Martin-Dupont *et al.*, 2002 ; Bouras, 2015).



**Figure 6.** Les tapis Biosorb ([www.pearl-sas.com](http://www.pearl-sas.com)).

### **1.4.3. Valorisation industrielle des écorces**

Au cours de la dernière décennie, la crise pétrolière a entraîné une hausse continue des prix des colles à bois synthétiques (principalement de type phénolique) qui a causé des problèmes de coûts dans leur application industrielle. En conséquence, des efforts croissants ont été faits pour remplacer, totalement ou partiellement, les matières premières des colles synthétiques par d'autres sources nouvelles, moins chères et renouvelables de composés phénoliques comme l'écorce et les résidus forestiers et agricoles. L'utilisation des écorces ou de bois est liée à leur disponibilité, au rendement en extrait, et à la qualité des matières extractives. La teneur en tannins hydrolysables et condensés dans les matières extractives revêt une importance particulière (Houwink et Salomon, 1965).

L'écorce a également fait l'objet d'étude concernant la fabrication de mousses à base de tannins (Nahal, 1962 ; Tondi *et al.*, 2008) ainsi que la formulation des résines elles-aussi à base de tannins voués à la fabrication d'adhésifs (Eberhardt et Reed, 2006 ; García *et al.*, 2014). L'utilisation des écorces en tant que matière première dans la fabrication des panneaux de particules est une autre manière de mettre en valeur cette matière (Yemele, 2008).

Grâce à sa teneur en subérine, l'écorce peut aussi être transformée en isolant (revêtement mural ou pour le sol). Pour la transformer en panneaux d'isolation, l'écorce est tout d'abord purifiée de toutes ses impuretés, pour ensuite être découpée et concassée en granulés de très petits diamètres (quelques millimètres seulement) avant d'en faire un panneau isolant (Bouras, 2015).

### **1.4.4. Valorisation biologique des écorces**

Les écorces du *Pinus halepensis* possèdent une activité biologique connue depuis longtemps, elles sont riches en extractibles (composés phénoliques) et présentent des propriétés bioactives significatives (El Omari *et al.*, 2020). L'utilisation des écorces en tant que nouvelle source d'actifs naturels à haute valeur ajoutée est une des mises en valeur de celles-ci. Ces actifs naturels peuvent être utilisés dans plusieurs domaines comme les industries pharmaceutiques, cosmétiques ou en médecine (Bouras, 2015).

Les effets antibactériens et antifongiques de *P. halepensis* ont donné des résultats prometteurs. Les molécules impliquées dans les activités antibactériennes sont essentiellement des terpènes tels que l' $\alpha$ -pinène et le  $\beta$ -caryophyllène qui exercent des actions antimicrobiennes remarquables notamment contre certaines souches bactériennes. Par ailleurs, ces extraits ont également montré une grande capacité de protection, en particulier les cellules du foie contre divers dommages, notamment via leur remarquable capacité antioxydante (El Omari *et al.*, 2020).

D'autres propriétés biologiques telles que des effets anticancéreux et anti-inflammatoires ont également été démontrées par des extraits de *P. halepensis* Mill. Bien que cette plante se soit avérée active contre ces pathologies, les mécanismes pharmacodynamiques et les voies pharmacocinétiques n'ont pas encore été déterminés (El Omari *et al.*, 2020).

## **2. Utilisation ethnomédicale du pin d'Alep en Algérie**

De nombreuses enquêtes ethnobotaniques ont indiqué que *P. halepensis* est utilisé dans la médecine traditionnelle pour traiter plusieurs maladies. Les applications thérapeutiques de cette plante dépendent de la partie utilisée, la maladie traitée, et du mode d'utilisation mais aussi elle dépend de la région dans laquelle la plante est utilisée.

L'écorce est la partie la plus utilisée en médecine traditionnelle (El Omari *et al.*, 2020). La plante est utilisée dans les régions du Nord-Ouest de l'Algérie (Mascara) contre les maladies du système gastro-intestinal (Benarba *et al.*, 2015), la résine est utilisée par la population du Nord-Est de l'Algérie (Djebel Zdim, Setif) comme désinfectant, antifongique et contre les maladies des voies respiratoires (Chermat et Gharzouli, 2015).

Le fruit de pin d'Alep est utilisé par la population de la région du Hodna en Algérie contre l'hypertension, également sous forme de poudre, le fruit est utilisé dans la même région contre les hémorroïdes, la tuberculose, l'ulcère et les maladies pulmonaires (Madani. *et al.*, 2015).

Les graines de pin d'Alep sont utilisées par la population de Nord-Est algérien contre les ulcères gastriques et intestinaux, les infections respiratoires, l'infection de la prostate, la stérilité et les maux de dents (Bouasla et Bouasla, 2017). La population algérienne du nord-est des montagnes du Dahra (région de Bissa) les graines sont utilisées contre les maux d'estomac et les inflammations rénales (Senouci *et al.*, 2019).

Les racines de pin d'Alep sont également utilisées en médecine traditionnelle en décoction pour traiter les infections respiratoires (Parc national de Belezma à Batna) (Chohra et Ferchichi, 2019).

Les feuilles et la résine sont utilisées par la population du Nord-Est algérien (région de Bordj Bou Arreridj) contre les maladies respiratoires (bronchite, pneumonie et rhume), les problèmes urinaires, les parasitoses délirantes et les plaies (Miara *et al.*, 2019).

Les bourgeons de la plante, les feuilles et la résine sont contre les maladies des voies respiratoires et urinaires, comme antiseptique et stimulants des glandes surrénales (Laid *et al.*, 2014).

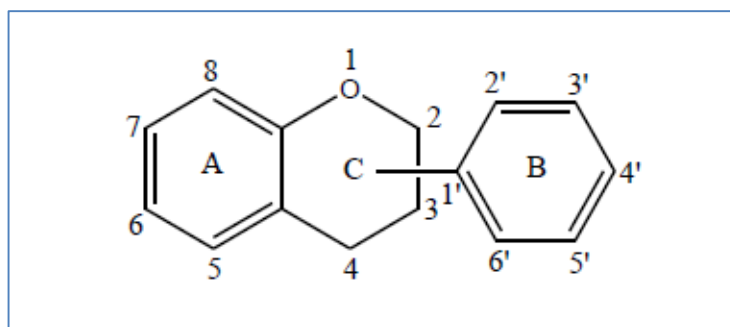
## IV. Valorisation phytochimique du genre *Pinus*

### 1. Polyphénols

Les composés phénoliques ou les polyphénols (PP) sont des produits du métabolisme secondaire des plantes, largement distribués possédant plusieurs groupements phénoliques, avec ou non d'autres fonctions et comportant au moins 9000 structures connues différentes (Bahorun, 1997), allant de molécules phénoliques simples de bas poids moléculaire tels que, les acides phénoliques à des composés hautement polymérisés comme les tannins (Akowauh *et al.*, 2004). Ils font partie intégrante de l'alimentation humaine et animale (Martin et Andriantsitohaina, 2002). Ces corps jouent un rôle fondamental car sont des éléments importants des qualités sensorielles (couleur et caractères organoleptiques) et nutritionnelles des végétaux, tels que les légumes, les fruits, les céréales ou les fruits secs, ainsi que dans les boissons, le café, le cacao ou le thé que consomme l'homme environ un gramme de polyphénols chaque jour, soit dix fois plus que de vitamine C et 100 fois plus que de caroténoïdes ou vitamine E (Scalbert, *et al.*, 2005). L'activité antioxydante des polyphénols est reconnue et pourrait expliquer leur rôle potentiel dans la prévention de plusieurs maladies associées au stress oxydatif, telles que le cancer, les maladies cardiovasculaires et neurodégénératives.

#### 1.1. Flavonoïdes

Les flavonoïdes représentent le groupe de phénols végétaux le plus courant et le plus largement distribué (Bravo, 1998). Sont des composés de bas poids moléculaire, comprenant quinze atomes de carbone, ont le squelette structural général C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>-C<sub>6</sub>. Essentiellement, la structure est constituée de deux cycles aromatiques A et B à six atomes de carbones (Figure 7), reliés par un pont à 3 carbones qui peut ou non être une partie d'un troisième cycle C, habituellement sous la forme d'un noyau hétérocyclique (Bravo, 1998 ; Harborne et Williams, 2000).



**Figure 7.** Structure de base des flavonoïdes (Balasundram *et al.*, 2006).

Les flavonoïdes peuvent être classés par six sous classes différentes, à savoir les flavonols, les flavones, les flavanones, les flavanols, les isoflavones et les anthocyanidines (Balasundram *et al.*, 2006). Ce sont des antioxydants particulièrement importants en raison de leur potentiel redox élevé, ce qui leur permet d'agir comme agents réducteurs, donneurs d'hydrogène et désactiveurs d'oxygène singulet. En outre, ils ont un potentiel de chélation des métaux très important (Tsao, 2010).

Ces composés servent de protection contre les radiations ultraviolettes, les pathogènes et les herbivores (Harborne et Williams, 2000). Ils donnent aussi la coloration de certaines fleurs et fruits ainsi que du bois. De nombreux chercheurs ont montré que la coloration la durabilité naturelle de certains bois est due à la présence de flavonoïdes. Ces composés sont connus pour leurs activités antivirales, antibactériennes, anti-tumorales, anti-allergiques, anti-inflammatoires, vasculo-protectrice et anti-cancérogènes (Saha *et al.*, 2013).

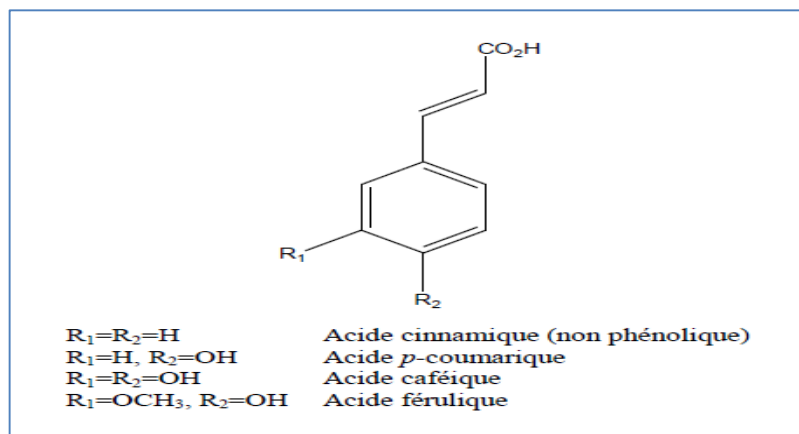
### **1.2. Acides phénoliques**

Les acides phénoliques font partie des formes les plus simples des composés phénoliques et se séparent en deux grands groupes distincts:

- Les acides hydroxybenzoïques sont dérivés de l'acide benzoïque et ont une formule de base de type C<sub>6</sub>-C<sub>1</sub>. Ils sont particulièrement représentés chez les Gymnospermes et les Angiospermes d'où ils sont souvent libérés après hydrolyse alcaline du matériel végétal (Ignat *et al.*, 2011).

Les acides hydroxybenzoïques comprennent l'acide gallique, p-hydroxybenzoïque, protocatéchique, vanillique et syringique (Balasundram *et al.*, 2006).

- Les acides hydroxycinnamiques représentent une classe très importante dont la structure de base C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub> dérive de celle de l'acide cinnamique (Figure 8). Le degré d'hydroxylation du cycle benzénique et son éventuelle modification par des réactions secondaires sont un des éléments importants de la réactivité chimique de ces molécules. De plus, l'existence d'une double liaison dans la chaîne latérale conduit à deux séries isomères (cis ou Z et trans ou E) dont les propriétés biologiques peuvent être différentes (Boubekri, 2014). Les acides hydroxycinnamiques sont plus courants que les acides hydroxybenzoïques et consistent principalement en s acides caféique, férulique, p-coumarique et sinapique (Balasundram *et al.*, 2006).

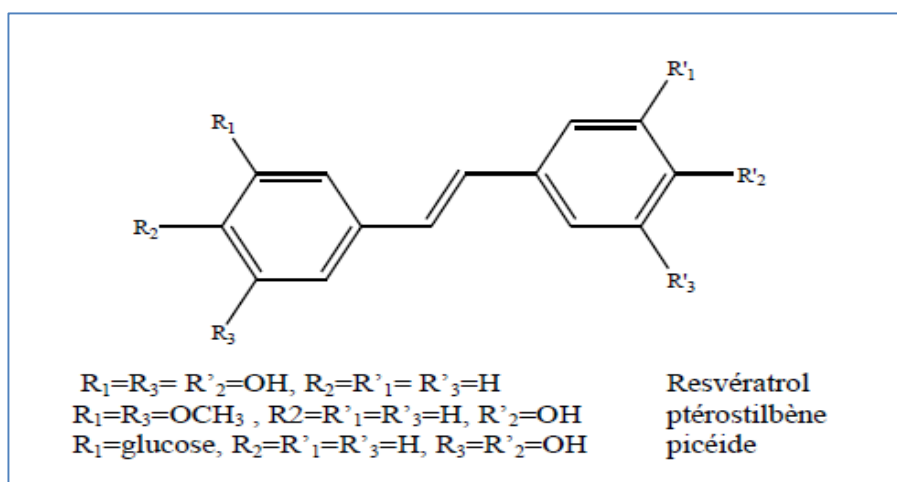


**Figure 8.** Quelques exemples des acides hydroxycinnamiques (Boubekri, 2014).

### 1.3. Stilbènes

Les stilbènes sont des composés phénoliques contenant au minimum deux noyaux aromatiques reliés par une double liaison (Figure 9), formant un système conjugué. Cette particularité leur confère une grande réactivité due à la délocalisation des électrons  $\pi$  sur la totalité de la molécule (Belkheiri, 2010). Les stilbènes agissent comme des composés antifongiques car ils sont synthétisés par la plante en réponse à une attaque par un agent pathogène. D'autres séliciteurs abiotiques, tels que les rayons UV les métaux lourds peuvent déclencher la production des stilbènes (Bavaresco, 2003).

Les stilbènes constituent aussi des composés phénoliques majoritaires dans le bois interne de plusieurs pins. Certains agissent comme phytoalexin, c'est-à-dire que leur présence a été induite par un stress provenant d'une attaque fongique ou bactérienne. Les plus rencontrés dans le genre *Pinus* sont le pinosylvin, le pinosylvin monométhyl ether et le pinosylvin diméthyl ether. Ces derniers sont des constituants caractéristiques du bois interne du genre *Pinus* (Rowe, 1989).



**Figure 9.** Quelques exemples des structures chimiques des stilbènes (Boubekri, 2014).

#### **1.4. Lignanes**

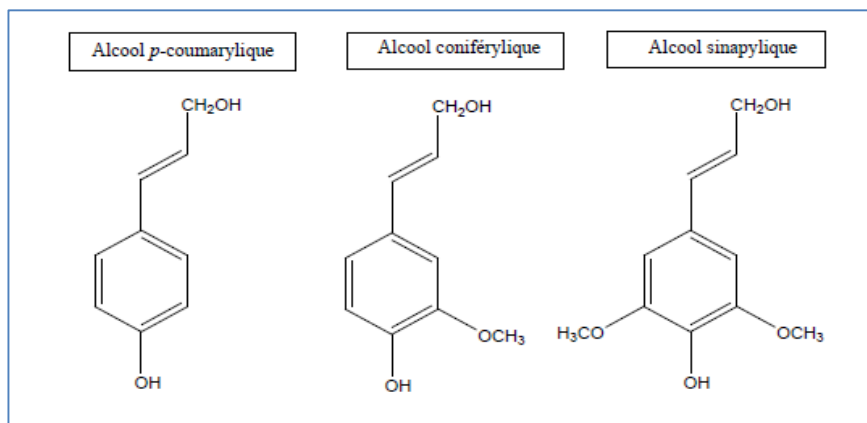
Les lignanes sont produits par dimérisation oxydative de deux unités de phénylpropane. L'intérêt pour les lignanes et leurs dérivés synthétiques augmente en raison des applications potentielles dans la chimiothérapie anticancéreuse et de divers autres effets pharmacologiques (Ignat *et al.*, 2011). D'un point de vue chimique, les lignanes présentent une énorme diversité structurelle, bien que leur squelette moléculaire soit constitué seulement de deux unités de phénylpropane (C6-C3). Ils sont largement répandus dans le règne végétal et ont été trouvés chez des espèces appartenant à plus de soixante-dix familles. Les lignanes se trouvent dans les racines, les rhizomes, les tiges, les feuilles, les graines et les fruits (Saleem *et al.*, 2005 ; Ignat *et al.*, 2011).

Les composés phénoliques retrouvés dans les pins sont très variés. Les lignanes, qui sont dérivés des phénylpropanes, sont souvent présents en grande quantité. Ceux principalement rencontrés dans le bois de cœur, les nœuds et l'écorce sont le lariciresinol, Tisolariciresinol, le secoisolariciresinol et le (-)-nortrachelogenin (Suga *et al.*, 1993; Willfôr *et al.*, 2003a; Willfôr *et al.*, 2003b). Le xylopyranoside de (+)-isolarisiresinol est un glycoside de lignan isolé dans un extrait au MeOH des aiguilles de *Pinus densiflora* (Jung *et al.*, 2003).

#### **1.5. Lignines**

La lignine est un polymère fortement ramifié (C6-C3)<sub>n</sub>, formés par trois alcools phénoliques simples (Figure 10). Les alcools sont oxydés en radicaux libres par une enzyme ubiquiste chez les plantes ; la peroxydase. Les radicaux libres réagissent ensuite spontanément et au hasard pour former la lignine (Hopkins, 2003).

Elle est localisée dans les parois cellulaires et plus spécialement dans les parois secondaires des éléments conducteurs, contribuant à la résistance mécanique et à la rigidité des tiges lignifiées. Malgré son abondance (elle n'est dépassée que par celle de la cellulose), sa structure n'est pas bien comprise. La lignine est un très grand polymère, insoluble dans l'eau et dans la plupart des solvants organiques, il est donc impossible de l'extraire sans lui faire subir d'importantes dégradations. De plus les trois monomères de bases peuvent s'assembler de multiples façon formant une structure tridimensionnelle très ramifiée (Hopkins, 2003 ; Boubekri, 2014).



**Figure 10.** Principaux constituants de la lignine.

### 1.6. Tanins

Les tanins sont des composés phénoliques très abondants chez les angiospermes, les gymnospermes et les dicotylédones (Konig *et al.*, 1994). Ils représentent un groupe hétérogène assez difficile à définir de façon rigoureuse et concise car il n'y a pas de structure chimique de base. Ils se trouvent dans presque toutes les parties des végétaux (écorce, racines, feuilles, fruits, bois ...). Ils peuvent être subdivisés en tanins hydrolysables et condensés (Hagerman, 2002 ; Ignat *et al.*, 2011).

- Les tanins condensés sont des polymères d'unités flavonoïdes reliées par de liaisons fortes carbone-carbone, ces liaisons ne sont pas hydrolysables mais peuvent être oxydées par les acides forts libérant des anthocyanidines (Hopkins, 2003 ; Ignat *et al.*, 2011). Ils peuvent protéger l'arbre contre les agents d'altérations antifongiques, contre les champignons et les antioxydants.

- Les tanins hydrolysables sont des esters d'acides phénoliques (acide gallique ou ellagique associés à un polyol (habituellement le glucose) (Clifford, 2000; Collin *et al.*, 2011). Ce sont des composés macromoléculaires dont la masse moléculaire peut atteindre 20000 Da et qui sont solubles dans l'eau (D'Mello *et al.*, 1991; Haslam, 1989; Yemele, 2008). Ils peuvent être classifiés dans deux sous-groupes : les ellagitannins et les gallotannins.

Les principaux tanins retrouvés dans les pins, surtout étudiés à partir du pin maritime (*Pinus maritima* L.), sont des oligomères de deux à sept unités de flavan-3-ol. Les plus fréquemment retrouvés sont les procyanidines, c'est-à-dire des oligomères de catéchine ou d'epicatéchine (Romani *et al.*, 2006).

## **2. Localisation et intérêt des polyphénols dans les plantes**

A l'échelle de la cellule, les composés phénoliques sont principalement répartis dans deux compartiments : les vacuoles et la paroi. Dans les vacuoles, les polyphénols sont conjugués, avec des sucres ou des acides organiques, ce qui permet d'augmenter leur solubilité et de limiter leur toxicité pour la cellule. Au niveau de la paroi, on trouve surtout de la lignine et des flavonoïdes liés aux structures pariétales (Bénard, 2009).

Certains flavonoïdes ont même été localisés au niveau du noyau des cellules où ils pourraient directement moduler l'expression des gènes. Ces divers lieux de localisation impliquent un transfert des composés phénoliques depuis leurs lieux de synthèse (Macheixetal, 2005 ; Bénard, 2009).

Au niveau tissulaire, la localisation des polyphénols est liée à leur rôle dans la plante et peut être très caractéristique. Au sein même des feuilles la répartition des composés est variable, par exemple les anthocyanes et les flavonoïdes sont majoritairement présents dans l'épiderme. Au niveau de la plante entière, il faut noter que certains composés ne sont accumulés que dans des organes bien définis (Tomás-Barberan et Espin, 2001).

Les composés phénoliques l'un des groupes de substances phytochimiques les plus répandus, sont d'une importance physiologique et morphologique considérable pour les plantes. Ces composés jouent un rôle important dans la croissance et la reproduction, en offrant une protection contre les agents pathogènes et les prédateurs (Bravo, 1998).

Ces composés jouent un rôle important dans l'interaction entre la plantes et son environnement. Les flavonoïdes protègent non seulement la plante contre les effets nocifs des UV, mais également jouent un rôle crucial dans le processus de reproduction sexuée chez les plantes. Une classe spéciale de polymères flavonoïdes, flavonoles et anthocyanines ont également été impliquées dans l'attraction des pollinisateurs. Certains flavonoïdes participent à l'interaction entre les plantes et d'autre organismes tels que les bactéries symbiotiques et les parasites (Koes *et al.*, 1994). En plus de contribuer à la couleur et aux caractéristiques sensorielles et nutritionnelle des fruits, des légumes et d'autres plantes (Lapornik *et al.*, 2005).

## **3. Propriétés thérapeutiques des polyphénols**

Des études épidémiologiques mettent en avant les effets bénéfiques de la consommation de fruits et légumes pour lutter contre des maladies dégénératives comme les cancers ou les maladies neurodégénératives, mais aussi pour prévenir les maladies cardiovasculaires, l'obésité ou le diabète (Tomás-Barberan et Espin, 2001).

La structure des phénols végétaux, leur confère une activité antioxydante aussi importante que celles des vitamines C et E (Rice-Evans *et al.*, 1997). Leur mode d'action est

une combinaison de réactions chimiques (chélation de métaux, la donation d'hydrogène ou d'électron) qui interrompt les réactions d'oxydation de molécules, comme l'ADN, les lipides ou les protéines, en formant des radicaux plus stables et donc qui aboutit à une diminution des teneurs en radicaux libres, Ces composés interviennent également à différents stades de développement des cancers, notamment en stimulant la mort de cellule et en inhibant certaines enzymes. Pendant longtemps, l'action bénéfique de la consommation des fruits et légumes a été principalement reliée aux teneurs en composés antioxydants de ces aliments (Rice-Evans *et al.*, 1997).

### **V. Pressions et menaces du pin d'Alep de Béni Oudjana**

Le pin d'Alep est un élément essentiel dans le paysage Algérien et un capital économique très important pour le secteur forestier. Cependant, les forêts que l'on retrouve de nos jours, un peu partout à travers le pays, ont perdu leur caractère originel et se sont retrouvées dans un état de faiblesse et de dégradation très poussé, un état jugé très préjudiciable à leur pérennité et à leur survie (Khouja *et al.*, 2020b). Ce sont principalement la pression humaine qui s'est longtemps exercée sur ces forêts et les fléaux qui les ont frappées qui sont à l'origine de leur structure actuelle. En effet, en plus de l'impact du changement climatique, le pin d'Alep a été longtemps soumis à de nombreuses adversités : incendies répétés, pâturages intensifs, exploitations abusives, défrichements illicites..., tous ces facteurs combinés ont entraîné la dégradation de nombreuses forêts et leur substitution par des formations buissonnantes improductives ou par des friches déboisées et soumises à l'érosion (Benmessaoud, 2009 ; Khouja *et al.*, 2020b).

Du point de vue historique, la dégradation des forêts des Aurès est liée à son histoire, son satellite fidèle (Abdessemed, 1984). Depuis la nuit des temps, les Aurès ont constitué par leur position stratégique, un bastion de résistance. Les civilisations antérieures à l'ère chrétienne ont largement malmené les forêts en Afrique du Nord ; la dégradation s'est poursuivie en progression continue avec les invasions : vandales, byzantines et enfin celle des arabes, notamment, Béni Hilals qui réussirent à instaurer le « nomadisme » et ses conséquences catastrophiques sur les espaces forestiers (Julien, 1951 ; Abdessemed, 1984).

Ce n'est que durant la colonisation Française que les exploitations régulières ont commencée sans aucune doctrine sylvicole. Les premières exploitations ont eu lieu à partir de 1908, 100 000 m<sup>3</sup> de bois d'œuvre ont été retirés de Béni Oudjana dans la cédraie. Pour la période 1910 -1940, il n'existe pas de données, toutefois de grandes quantités de bois ont été retiré (Boudy, 1955). Ce fut ensuite les exploitations de guerre pour faire face aux besoins de combustibles que de grandes superficies ont été parcourues de manière intensive, intégrées

dans l'économie de guerre. C'est ainsi que les plus beaux peuplements de chêne vert ont été anéantis (Boudy, 1955).

Pendant la guerre de libération 1954 - 1962, il n'y a pas eu d'exploitation. Les Aurès étaient considérés comme le bastion de la révolution, de ce fait c'était une « zone interdite ». (BNEDER, 2008). Après l'indépendance, le retour des populations rurales à l'intérieur et à la périphérie du massif coïncidait avec la reprise des activités agricoles, essentiellement centrées sur la céréaliculture marginale de subsistance et sur l'élevage extensif (Abdessemed, 1984).

Dans les conditions économiques de l'époque, cultiver des terrains marginaux revenait très cher et conduisait à une impasse ; celle-ci ne pouvait être tournée qu'en s'orientant vers la vocation d'élevage extensif de ces zones difficiles en revalorisant les parcours forestiers. En plus de cette orientation, la population rurale s'est également « rabattue sur les ressources ligneuses pour la satisfaction de ses besoins en combustible : bois de cuisson, bois de chauffage et en bois de service pour la construction (Abdessemed, 1984 ; BNEDER, 2008).

Les peuplements forestiers, préforestiers et présteppiques des Beni Oudjana subissent depuis fort longtemps une pression anthropique plus ou moins importante selon les zones. L'équilibre naturel a été rompu pour un certain nombre de milieux. C'est le cas en particulier du secteur Sud au fait qu'il se situe dans des conditions écologiques difficiles, voire, marginales. Aussi, on assiste actuellement à une régression intense de la couverture forestière et ce phénomène est suivi par une destruction inévitable et irréversible des sols, qui interdit par conséquent la réinstallation naturelle des essences originelles. Tel est le cas de plusieurs zones où la dégradation des écosystèmes est aujourd'hui de plus en plus alarmante ((Benabid, 1985 ; BNEDER, 2008).

Il faut noter en effet que les populations humaines de ces zones montagneuses sont d'une manière générale pauvres, et que les terres agricoles proprement dites sont exiguës (Minifundisme, indivisions). Ceci les oblige à s'orienter vers l'élevage des ovins, caprins et bovins en terrain forestier et/ou à pratiquer des défrichements des forêts pour satisfaire les besoins croissants en bois (construction, combustible) et en branchages pour les troupeaux, en terres agricoles ou terrains de parcours (Benabid, 1985 ; BNEDER, 2008 ; Menasri, 2014).

Seuls les principaux problèmes seront envisagés :

### **1. Pâturage**

Dans les zones arides et semi-arides d'Afrique du Nord, le surpâturage est généralement considéré comme une cause essentielle de la dégradation des écosystèmes naturels (Le Houerou, 1969).

La présence de bétail en forêt est une réalité palpable en Algérie et constitue un facteur important d'évolution des peuplements forestiers (FAO, 2007). Le massif forestier de Béni Oudjana comme toutes les forêts algérienne, l'élevage constitue la source de revenu la plus importante pour la population montagnarde (Abdessemed, 1985 ; Menasri, 2014). Il n'existe pas de statistiques fiables sur les effectifs qui s'alimentent du domaine forestier. Mais, les estimations faites par le Bureau National des Etudes pour le Développement Rural (BNEDER, 2008) pour la forêt domaniale de Béni Oudjana en 2008 ont montré qu'il y a une population riveraine et enclavée estimée à 15 073 habitants répartie sur 16 mechtas. Cette population se compose de 2 415 ménages, ces derniers occupent 1 900 logements. Il est apparu, également, que cette population détient un cheptel estimé à 19 988 têtes, répartie entre 12 473 ovins, 5 782 caprins et 1 733 bovins. Ce cheptel est constamment à la recherche d'une alimentation fourragère qu'il ne trouve que dans l'espace forestier, on connaît maintenant mieux les effets néfastes, destructeurs de cet élevage extensif.

Le problème des pâturages en forêt réside beaucoup plus dans le manque d'organisation caractérisant la conduite du troupeau dans les zones où la charge est très élevée compte tenu des disponibilités fourragères et de leur répartition dans l'année (FAO, 2007). Ce problème du pâturage en forêt reste, pour l'Algérie comme pour de nombreux pays du pourtour méditerranéen, l'une des préoccupations fondamentales des aménagistes sylvo-pastoraux (Abdessemed, 1985).

## **2. Défrichements**

Les peuplements forestiers subissent en plus des exploitations massives légales durant la colonisation Française, des mutilations, des coupes délictueuses, ou carrément des défrichements qui sont perpétrés par les populations riveraines et enclavées (Abdessemed, 1984 et 1985).

L'exploitation massive des cédraies, des pinèdes et des chênaies vertes fournissait divers bois (bois d'œuvre, bois de chauffage, bois de construction) pour les besoins coloniaux dans le cadre de l'économie de guerre. Cependant, les travaux sylvicoles d'éducation et d'amélioration des peuplements n'ont jamais été entrepris (Abdessemed, 1984).

Peu importants avant l'indépendance, les délits de défrichement, de coupe, d'écimage entrepris par les populations locales se sont fortement accrus durant les dernières décennies. En effet, dans certains secteurs, les récoltes de bois par coupes clandestines effectuées d'une manière anarchique, parfois systématiques dépassent de loin aujourd'hui celles autorisées au niveau des exploitations régulières. Il importe de souligner que les prélèvements délictueux s'effectuent pour satisfaire des besoins, le plus souvent de subsistance ou à des fins

commerciales. Ainsi le bois de construction, le bois d'œuvre et le bois de chauffage sont récoltés pour l'usage domestique ou pour être vendu dans les centres urbains. L'abattage illégal des arbres porte sur les meilleures perches (pieds droits) qui sont souvent coupés, écorcés et débités en perches. Ce procédé réalisé sur place à l'ordre d'outils modernes (tronçonneuses) est à l'origine d'un gaspillage et de pertes importantes. L'émondage et l'écimage permettent d'assurer le bois de cuisson et d'alimenter le bétail en période de neige (Abdessemed, 1984 ; BNEDER, 2008).

Quant aux défrichements illégaux qui ont existé depuis l'époque romaine, ils se sont accélérés durant la période coloniale et continuent de se pratiquer de nos jours. Selon le rapport national sur l'état et l'avenir de l'environnement (RNE) établi par le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'environnement en 2000, le domaine forestier national a perdu, durant la période 1893-1941, 116 000 ha de forêts au profit de l'extension des cultures coloniales (Meharzi, 2010). Actuellement, les populations montagnardes, habitant soit en pleine forêt ou en lisières et possédant des petites parcelles, continuent, à leur tour, à défricher les régions isolées, là où la surveillance des services forestiers est défaillante (Meharzi, 2010 ; Menasri, 2014).

Les défrichements prennent leur ampleur, le plus souvent dans les régions isolées, là où la surveillance des services forestiers est défaillante. Ils portent généralement sur des formations préforestières en vue de la céréaliculture ou de l'arboriculture traditionnelle (Quezel, 1980 ; Benmessaoud, 2009).

### **3. Incendies**

Lors de la période coloniale, l'Aurès à lui seul, a enregistré 22 000 ha de forêts incendiées, dont 6 300 ha pour les forêts de la wilaya de Khenchela (Béni Melloul et Béni Oudjana) (Menasri, 2014).

En dehors de cette période, l'Aurès semble curieusement à l'abri des grandes catastrophes estivales que sont les incendies, car, au vu des statistiques récoltées au niveau des services des forêts durant les deux dernières décennies. Nous pouvons avancer que les grands incendies et par conséquent les plus grandes superficies du couvert végétal détruit sont celles enregistrées au cours des années 2009 et 2012. Cela est dû essentiellement : (i) aux conditions météorologiques très favorables à l'éclosion des incendies, caractérisées par des vents dominants du Sud assez violents (Sirocco) qui soufflent 30 à 40 jours pendant la saison estivale ; (ii) la nature des peuplements composés essentiellement des essences résineuses très inflammables telles que le pin d'Alep et les genévriers (DGF, 2012 ; Menasri, 2014).

# *Chapitre II : Matériels et méthodes*

## I. Présentation de la zone d'étude

### 1. Caractéristiques écologiques de la zone d'étude

#### 1.1. Situation géographique

L'étude a été réalisée dans la forêt domaniale de Bénis Oudjana (Figure 11) qui représente une partie d'un ensemble forestier et pastorale du massif d'Aurès (Est de l'Algérie) situé dans la wilaya de Khenchela entre la longitude ( $X_1 : 6^{\circ}58'07''$ ,  $X_2 : 6^{\circ}42'34''$ ) et latitude ( $Y_1 : 35^{\circ}28'22''$ ,  $Y_2 : 35^{\circ}19'04''$ ) (Hani *et al.*, 2020) ; il couvre une superficie juridique totale de 43 824,4184 ha (BNEDER, 2008). Il est limité :

- au nord par la plaine de Rmila et la commune de Kais ;
- au nord-ouest, par la commune de Taouzianat ;
- à l'est par le massif d'Ouled Yacoub ;
- à l'ouest, par la commune de Yabous ;
- au sud par le puissant massif de Chélia.

Le relief est constitué par une chaîne montagneuse formée de plis parallèles orientés du sud-ouest vers le nord-est.

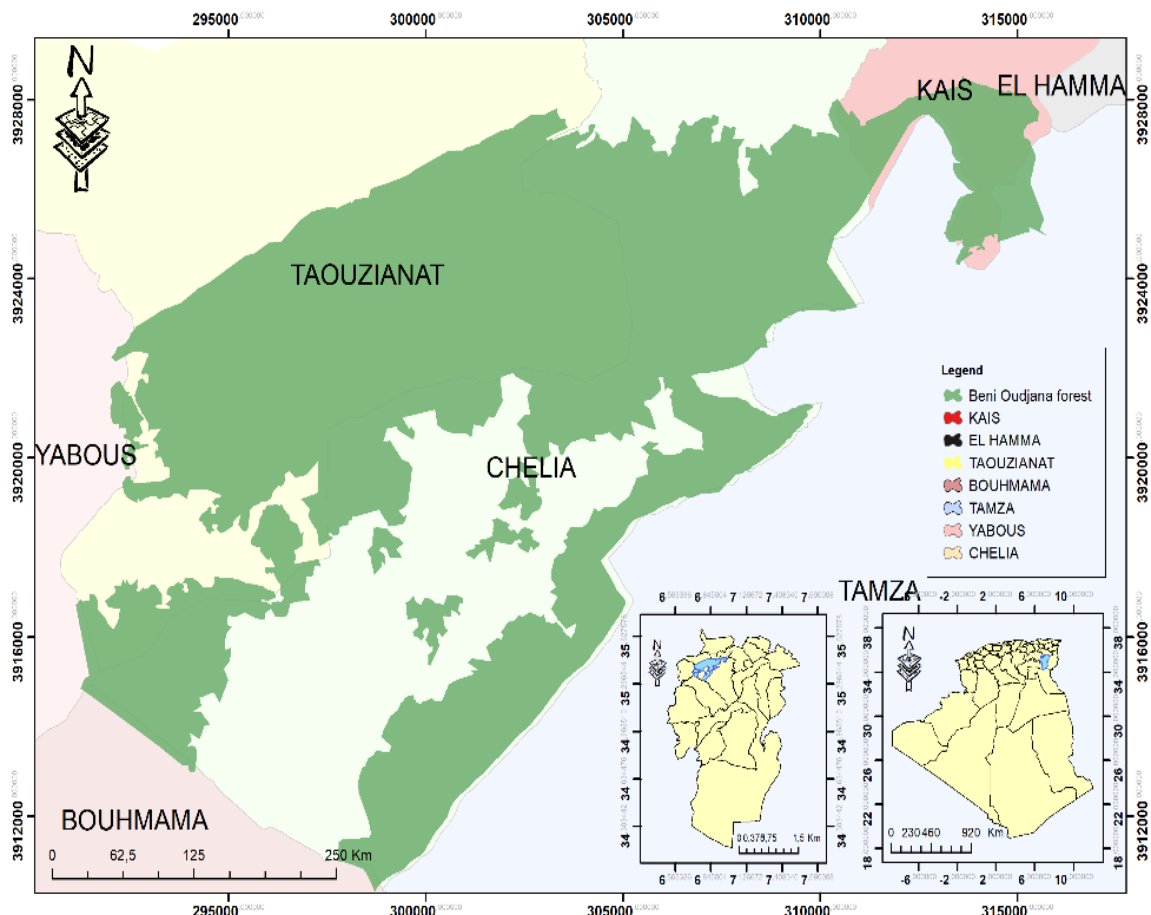


Figure 11. Carte de situation géographique de la forêt de Bénis Oudjana (Hani, 2021).

### 1.2. Géologie

La pinède de Bénis Oudjana repose sur le Crétacé supérieur (Laffite, 1939). Le Turonien est présent sous forme d'un arc assez large qui se prolonge dans le synclinal de djebel Aurès avec un faciès à prédominance calcaire.

Le centre du massif est occupé par le Cénomaniens avec la présence de dolomie et de calcaire dans la partie nord, alors que dans la partie sud se localisent des substrats marno et marno-calcaires (Bentouati, 2006). Vers le nord-est de la zone, le Cénomaniens côtoie l'Albien localement à la base de la cédraie avec présence de grés et de marnes rouges. Le Coniacien et le Santonien marquent la limite nord-ouest du massif sous forme d'une bande plus ou moins régulière et longeant le massif du nord au sud.

### 1.3. Relief

Le relief de l'aire d'étude présente les caractéristiques des zones de montagne, des altitudes comprises entre 897 à 2328 m (Figure 12), des pentes fortes supérieures à 25% dominantes, et un réseau hydrographique dense, représenté essentiellement par Oued El Abiod, Oued El Arab, Oued Boulefreis, Oued Taouzient et leurs affluents. La lithologie de la zone d'étude fait apparaître globalement l'importance des roches résistantes à l'érosion (calcaires et dolomies dures). On y rencontre aussi, mais sur de superficies assez restreints, les alluvions et les conglomérats, moyennement résistants (BNEDER, 2008).

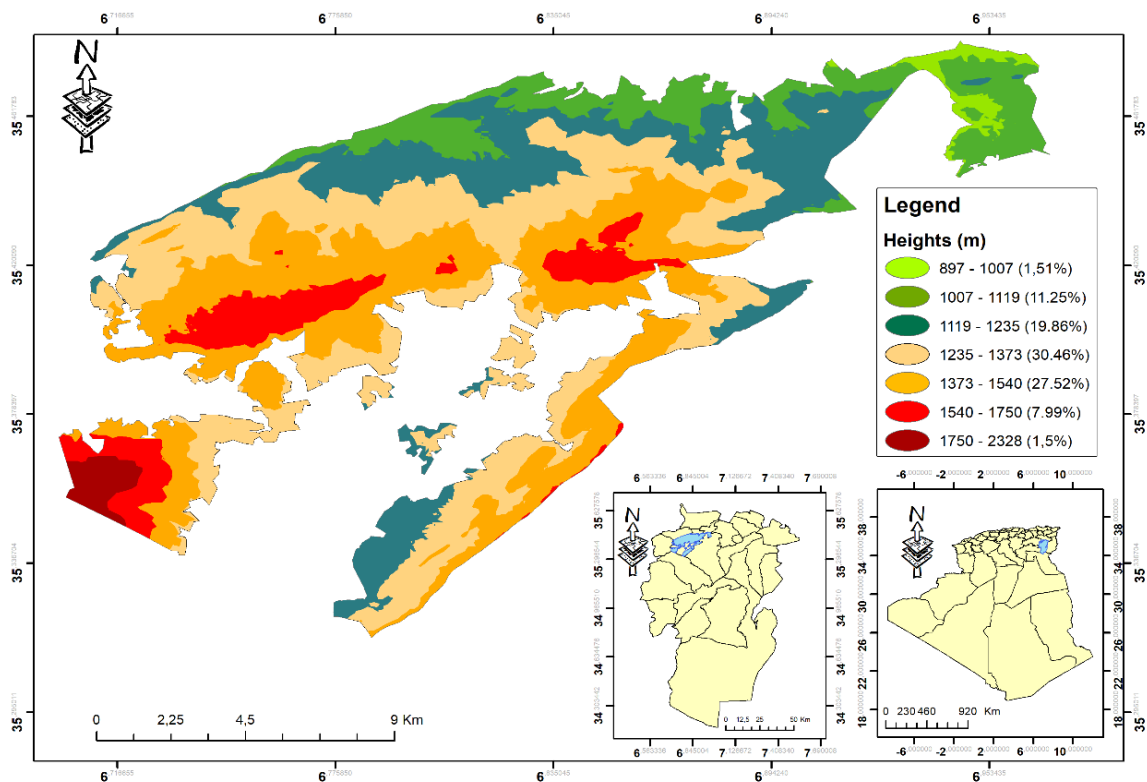


Figure 12. Profil altitudinal de la zone d'étude (Hani, 2021).

### 1.4. Expositions

La carte des expositions a été faite à l'aide de l'analyse du modèle numérique du terrain (MNT) par l'intermédiaire du module Aspect du menu « ArcToolbox » du logiciel ArcGIS 10.3. Les principales classes d'expositions ont été retenues suivant l'objectif de l'étude. Elles sont déterminées par rapport aux huit points cardinaux avec des valeurs exprimées en degré. Dans ce travail, nous avons regroupé chaque exposition principale avec ses expositions secondaires afin d'obtenir les principales classes d'expositions (Nord, Est, Sud et Ouest). D'après la carte des expositions, le massif forestier de Bénis Oudjana se caractérise par la dominance des expositions Nord et Ouest (Figure 13), tandis que l'exposition Sud et Est sont les moins représentés.

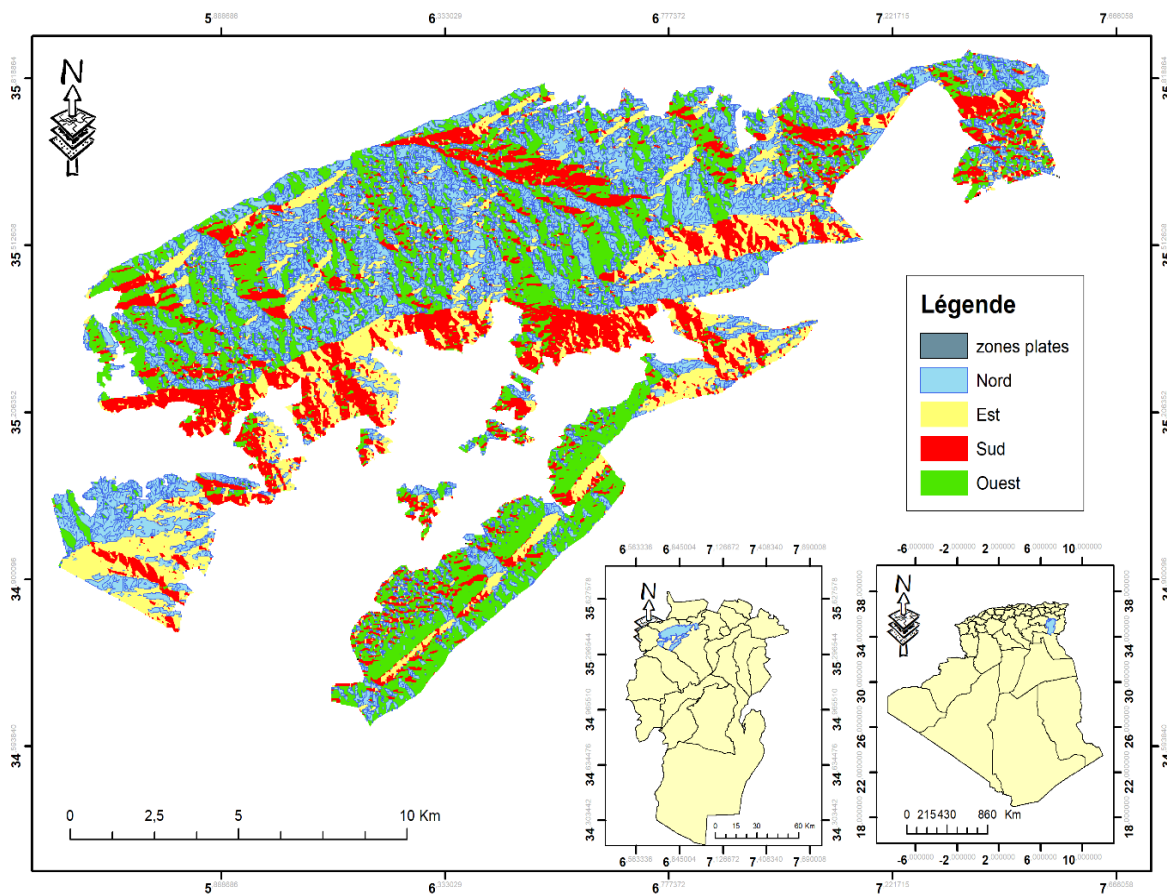


Figure 13. Carte d'expositions cardinales de la forêt de Bénis Oudjana (Hani, 2021).

### 1.5. Pentas

Le MNT a permis d'établir également la carte des pentes de la zone d'étude par l'intermédiaire du module Slope du menu (ArcToolbox, ArcGIS 10.3) ; la carte permet de dégager cinq classes de pentes renseignant sur la déclivité de la zone d'étude. Les valeurs des pentes de chaque espace ou de chaque forme topographique sont :

- Les pentes nulles à faibles (0 - 3 %)
- Les pentes modérées (3 - 12 %)
- Les pentes abruptes (12 - 20 %)
- Les pentes très abruptes (20 - 35 %)
- Les pentes extrêmes (>35 %)

Le massif forestier de Bénis Oudjana selon la carte des pentes est représenté par des pentes modérées à abruptes (Figure 14). Les pentes très abruptes et extrêmes sont presque absentes.

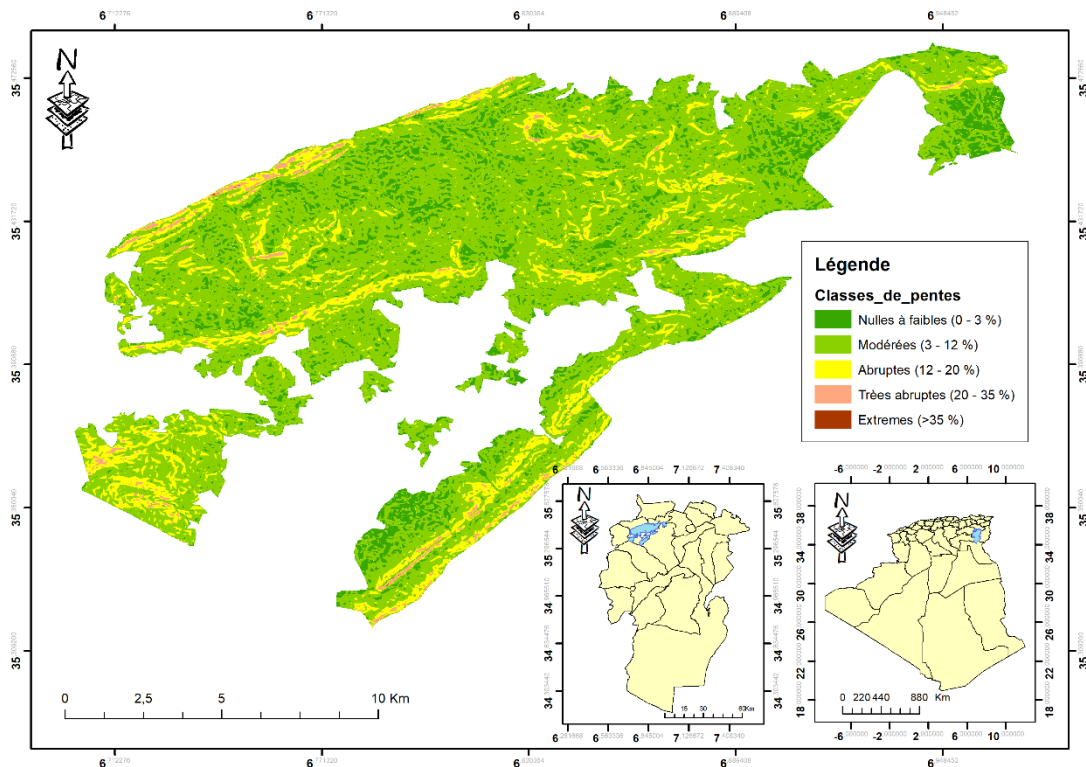


Figure 14. Carte de pentes du massif forestier de Bénis Oudjana (Hani, 2021).

### 1.6. Caractérisation climatique de la zone d'étude

Le climat est l'élément le plus important dans la caractérisation de la productivité forestière. Il joue un rôle principal dans le développement des végétaux et de leur distribution. C'est un facteur déterminant en raison de son importance dans l'établissement, l'organisation et le maintien des écosystèmes (Bentouati, 2006). Cependant, le climat de l'Algérie septentrionale appartient à celui de la Méditerranée. Il est caractérisé par deux saisons bien tranchées, celle des pluies et celle de la sécheresse. La période des pluies coïncide avec celle du froid, alors que la saison chaude correspond à la période sèche estivale (Seltzer, 1946 ; Kadik, 1987 ; Le Houérou, 1995 ; Menasri, 2014).

### 1.6.1. Température

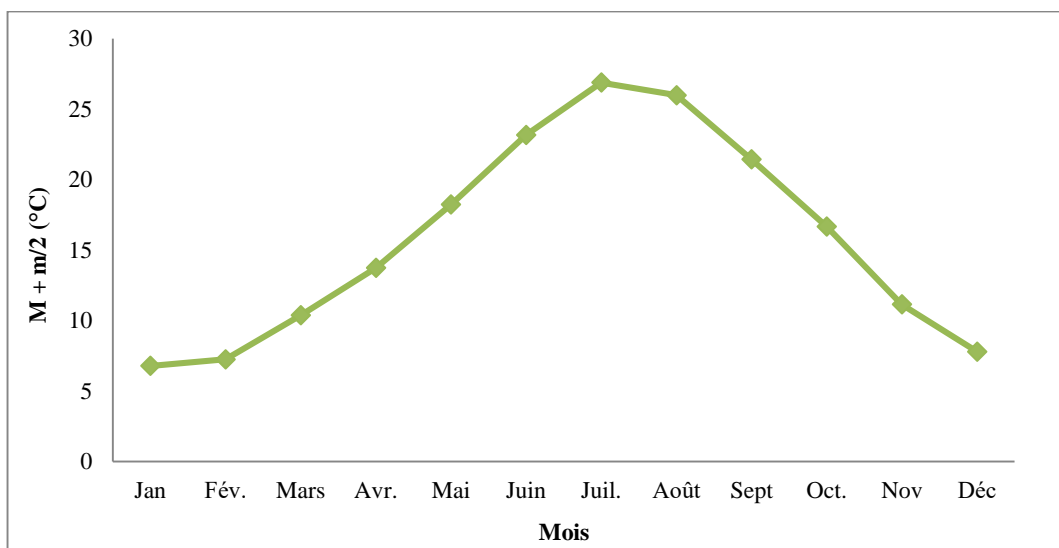
La température représente un facteur limitant de toute première importance car, elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère (Ramade, 1984). Etant donnée de la rareté des relevés thermiques notamment dans la zone d'étude et même si elles existent, elles présentent soit des anomalies soit des lacunes, on se concentre sur les données de températures enregistrées d'une façon continue dans la station d'El Hamma (Khenchela) pour une période s'étalant de 1995 à 2018, et équivalente à 24 ans (Tableau 1).

**Tableau 1.** Moyennes mensuelles des températures maximales (M) et minimales (m) d'El Hamma (Période 1995-2018) (Source : Station El Hamma, 2018).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
<b>M</b>	11,7	12,2	15,9	19,9	25,0	30,6	34,8	33,6	27,6	22,2	16,0	12,2
<b>m</b>	2,80	2,40	4,90	7,70	11,5	15,7	19,0	18,5	15,4	11,2	6,4	3,4
<b>M+m/2</b>	6,80	7,20	10,4	13,7	18,2	23,2	26,9	26,0	21,4	16,7	11,1	7,8

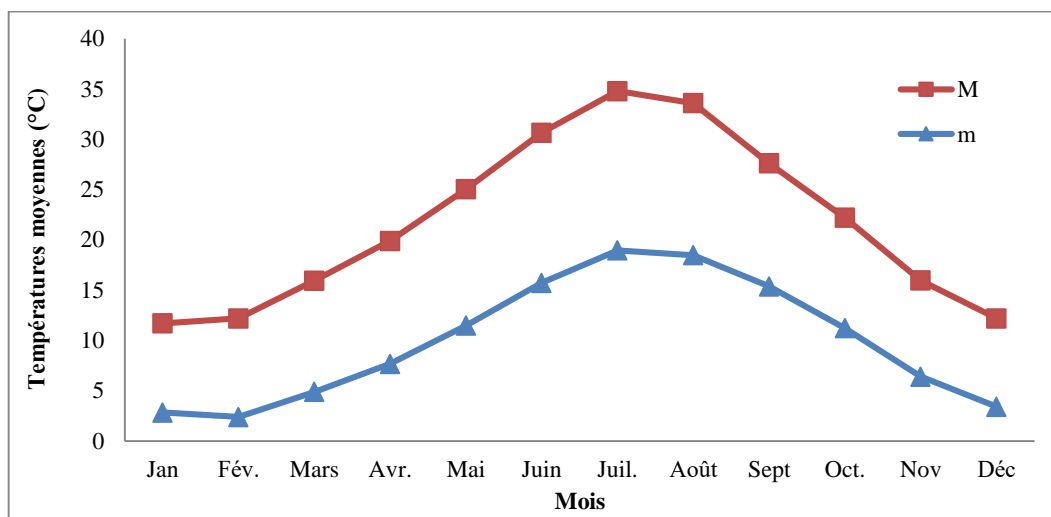
L'analyse de la figure 15 fait ressortir clairement la tendance de la station d'El Hamma vers la fraîcheur. Nous remarquons que pour l'ensemble des données, le mois de janvier est le mois le plus froid (6,80°C). Cette moyenne correspond aux températures favorables au développement du pin d'Alep situées entre 3,6 et 7,7°C tels que décrit par Kadik (1983). Il ressort également que la température moyenne mensuelle inférieure à la température moyenne annuelle (15,78°C) est de 6 mois (novembre à avril). Ceci divise l'année en deux saisons distinctes caractéristiques du climat méditerranéen) :

- Une saison froide (6 mois) allant de novembre jusqu'à avril.
- Une saison chaude (6 mois) qui s'étale du mois de mai au mois d'octobre.



**Figure 15.** Evolution des températures moyennes mensuelles de la station d'El Hamma durant la période (1995-2018).

Daget (1977) avait souligné que la vie du végétal se déroule entre deux pôles thermiques : la moyenne des minimas du mois le plus froid (m) et la moyenne des maximas du mois le plus chaud (M). Cependant, la valeur (m) détermine le degré et la durée de la période critique des gelées. Par ailleurs, plus m est plus bas, plus les gelées sont sévères et plus fréquentes (Menasri, 2014). Les moyennes des minimas mensuels varient entre 2,4°C en février et 19°C en mois de juillet (Figure 16).



**Figure 16.** Evolution des températures m et M d'El Hamma (1995-2018).

Le mois le plus chaud s'avère être le mois de juillet, avec une moyenne des maximas de 34,8°C. En effet, le mois de juin est plus chaud que le mois de septembre et les quantités de pluie qui tombent en septembre sont plus importantes qu'en juin.

Le pin d'Alep marque son optimum de développement entre les températures maximales moyennes de 31°C à 33°C (Kadik, 1987). Pour notre région, les maxima sont observés au mois de juillet, avec une valeur de 34,8°C. La continentalité thermique (M-m), dans les zones à pin d'Alep présente des valeurs variant de 19,90°C et 35,70°C ; les valeurs de ce paramètre oscillent entre 31°C et 35°C dans les pineraies productives (Kadik, 1983). Globalement notre région d'étude évolue dans des limites de températures moyennes annuelles allant de 6,80 à 26,9°C. Le régime thermique est relativement homogène. L'hiver est rigoureux comme en témoignent les données recueillies durant la période 1995-2018.

### 1.6.2. Précipitations

L'origine des pluies en Algérie est plutôt orographique. En effet, les précipitations varient en fonction de l'altitude, de l'orientation des chaînes de montagne et de l'exposition. De ce fait, les versants nord et nord-ouest reçoivent plus de précipitations que les autres expositions. Ainsi les quantités de pluies augmentent de bas en haut, selon un gradient pluviométrique altitudinal (Seltzer, 1946 ; Kadik, 1987 ; Menasri, 2014).

Les données de précipitations enregistrées pendant la période (1995-2018), sont illustrées dans le tableau 2.

**Tableau 2.** Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la période 1995-2018 de la station d’El Hamma.

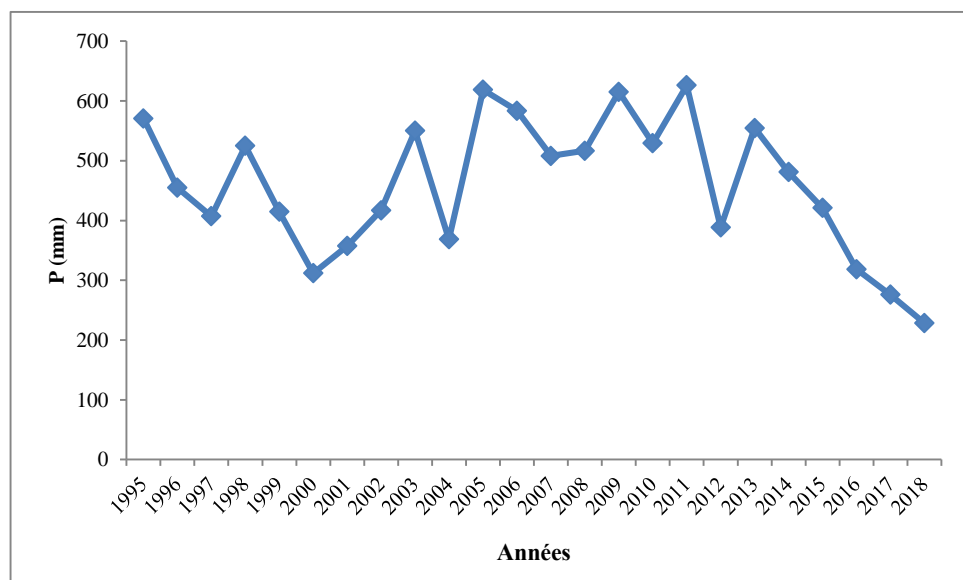
Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Total
P (mm)	43,2	29,7	41,9	46,2	57,2	29,7	14,8	37,6	54,2	42,1	35,8	36,1	468,4

La période pluviale s’étend de septembre à mai. Le mois de mai est le plus pluvieux avec 57,2 mm pour la période considérée, alors que le mois de juillet est le plus sec avec 14,8 mm pour cette même période.

En Algérie, la pluviosité minimale enregistrée par Kadik (1983), pour la zone du pin d’Alep est de 308 mm ; en dessous de cette limite, il est subordonné au genévrier rouge et à l’alfa ; sa production et son développement deviennent très faibles. La limite de la pluviosité est de 876 mm, à partir de laquelle il est fortement concurrencé par d’autres espèces végétales notamment le chêne vert. Selon Kadik, son aire optimale se situerait entre 400 mm et 600 mm par an ; notre zone d’étude se situe dans cet intervalle.

Dans sa contribution à l’étude du pin d’Alep en Algérie, Kadik (1983) affirme que les principaux facteurs écologiques qui régissent l’extension du pin d’Alep en Algérie sont la pluviométrie, la sécheresse estivale, la moyenne des minimums du mois le plus froid (m).

On constate que les années 2004, 2009 et 2011 ont été les plus pluvieuses (Figure 17), tandis qu’une grande diminution est observée durant l’année 2017 (la pluviométrie annuelle est de 276 mm).



**Figure 17.** Variations interannuelles des précipitations de la période (1995-2018).

Il est connu que dans un climat continental, le déficit hydrique est un élément décisif pour le maintien de la végétation. La moyenne des précipitations reste une notion aléatoire et purement indicative car la répartition saisonnière de la pluviométrie est plus intéressante à considérer que la quantité d'eau qui tombe annuellement (Bentouati, 2006). Pour le végétal, l'eau utile est celle disponible durant son cycle de développement (Djebaili, 1984), autrement dit la répartition des pluies est plus importante que la quantité annuelle des précipitations.

L'examen du tableau 3 permet de distinguer que la zone d'étude bénéficie d'un régime saisonnier de précipitation de type PAHE caractérisé par le maximum de pluviosité au printemps (145,2 mm), suivie de l'automne avec 132,2 mm. Cela est très profitable pour la végétation du moment qu'il coïncide avec la reprise végétative. En hiver, les pluies continuent de tomber. Elles sont généralement de faibles intensités et réparties sur une assez longue durée (109 mm). A cette époque, les sommets reçoivent déjà les premiers flocons de neige. Par contre, la saison estivale est caractérisée par de basses précipitations (85,2mm).

**Tableau 3.** Régime saisonnier de la station d'El Hamma (période 1995-2018).

Saisons	Hiver	Printemps	Été	Automne	Total
<b>P (mm)</b>	109,0	145,2	82,1	132,2	<b>468,4</b>
<b>P (%)</b>	23,27	31,00	17,53	28,22	<b>100</b>
<b>R S</b>	H	P	E	A	<b>PAHE</b>

Selon Daget (1977), un climat est méditerranéen si la somme estivale des précipitations est la plus faible des quatre valeurs saisonnières. Donc, c'est le cas de notre région d'étude, où la station d'El Hamma figure dans le régime saisonnier de type PAHE, où l'été est la saison la moins arrosée, alors que le printemps et l'automne sont les saisons les plus pluvieuses de l'année, ceci montre le caractère méditerranéen du climat de la région. En Algérie, le régime pluviométrique saisonnier sur le littoral, sublittoral et le Tell est de type HPAE selon Kadik (1983) ; dans les autres zones, les précipitations saisonnières se rapprochent beaucoup, il est difficile de déterminer un régime uniforme. En Algérie, les précipitations estivales varient de 14 à 50 mm ; l'aire optimale du pin d'Alep se situe à des valeurs comprises entre 32 et 50 mm.

### **1.6.3. Synthèse climatique**

Les facteurs climatiques n'ont pas une véritable indépendance en météorologie et en écologie (Sauvage, 1963), d'où l'intérêt de formules climatiques proposées par des auteurs pour une étude synthétique du climat (Barka, 2016).

La synthèse climatique est une étape indispensable à toute étude environnementale. Elle conditionne par le biais de ces composantes, le type de climat et de la couverture végétale.

### 1.6.3.1. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Bagnouls et Gaussen (1953) ont établi des diagrammes ombrothermiques pour évaluer la durée et l'intensité de la saison sèche pendant l'année (Stewart, 1969). Ils se sont basés sur la formule ( $P = 2 \text{ mm} \leq T = 1^\circ\text{C}$  ; les mois secs sont définis, quand la courbe des précipitations est située au-dessous de celle des températures moyennes. Autrement exprimé par ( $P \leq 2 T$ ).

Le diagramme ainsi obtenu permet de visualiser la saison sèche où la courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations. Ces graphiques permettent de suivre facilement la suite des saisons et l'importance de leur sécheresse. Mais, ils présentent l'inconvénient de ne pas faciliter la comparaison entre les stations. La figure 18 montre très clairement que la station d'El-Hamma présente une saison sèche qui s'étale sur trois mois allant de mai à aout.

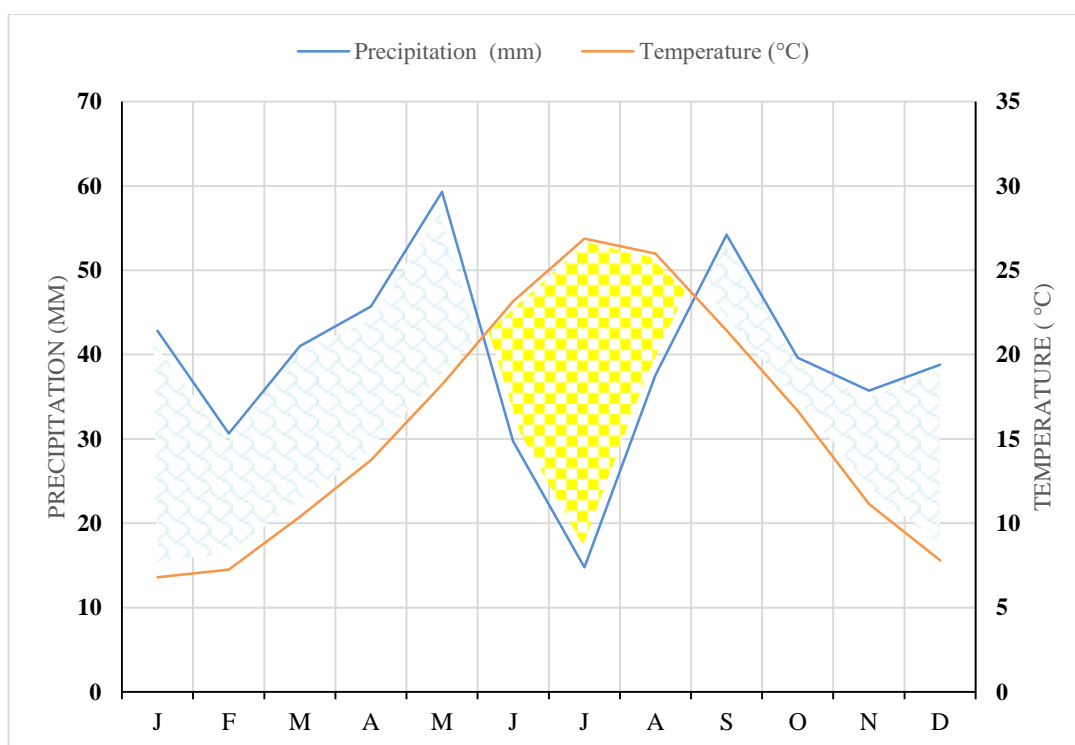


Figure 18. Diagramme ombrothermique de la station d'El-Hamma (1995-2018).

### 1.6.3.2. Quotient pluviothermique et climagramme d'Emberger

L'indice climatique le plus utilisé en région méditerranéenne est le climagramme d'Emberger ( $Q_2$ ). Cet indice exprime le degré d'aridité du climat est combiné à la moyenne de minima du mois le plus froid pour rendre compte de la répartition de la végétation.

Le calcul du quotient pluviothermique d’Emberger  $Q_2$  est donné par la formule suivante :

$$Q_2 = 2000P / (M^2 - m^2)$$

En appliquant la formule suivante élaborée par Stewart (1968) pour l’Algérie. Il est déterminé selon la formule suivante :

$$Q_2 = 3.43(P / (M - m))$$

Avec :

- $Q_2$  : le quotient pluviométrique d’EMBRGER
- P : Pluviométrie annuelle moyenne en mm
- M : Moyenne maximale du mois le plus chaud en °C
- m : Moyenne minimale du mois le plus froid en °C

La station météorologique d’El-Hamma se situe dans l’étage bioclimatique semi-aride à hiver frais (Tableau 4).

**Tableau 4.** Etage bioclimatique de la station d’El Hamma (Période 1995-2018).

Altitude (m)	M (°C)	m (°C)	P (mm)	M-m	Q2	Etage bioclimatique.
928,5	34,9	2,4	468,4	32,5	49,5	Semi-aride frais

### 1.6.3.3. Situation de la zone d’étude dans le climogramme d’Emberger

Il faut bien noter qu’en Algérie, la hauteur pluviométrique est déterminée aussi par la direction des axes montagneux par rapport à la mer et aux vents humides du nord et du nord-ouest (Seltzer, 1946 ; Kadik, 2005 ; Menasri, 2014).

Seltzer (1946), Gaussen (1948), Chaumont et Paquin (1971), Stewart (1968, 1970), Le Houérou *et al.* (1977), Halimi (1980) et Djellouli (1981, 1991) ont admis que la température diminue avec l’altitude. Dans notre cas, nous avons considéré les gradients proposés par (Bouaoune, 1987). Cet auteur admet pour les précipitations P un gradient de 39 mm pour 100 m de dénivellation, pour la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud M, un gradient de -0,75°C pour 100 m de dénivellation, et pour la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (m) un gradient de -0,35°C pour 100 m de dénivellation.

Ces valeurs ont été retenues pour l'extrapolation des données fournies par la station de référence d'El Hamma (Khenchela), des valeurs de P, M et de m pour la zone d'étude. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 5.

**Tableau 5.** Quotients pluviothermiques en fonction de l'altitude (1995 - 2018).

Stations	altitudes	m (°C)	M (°C)	P (mm)	Q2	Etages bioclimatiques
N1	1024	2,2	34,8	468,5	49,3	<b>Semi-aride à hiver frais</b>
N3	1106	2	34,8	468,4	48,9	
N2	1121	1,7	34,8	468,6	48,5	
E1	1140	1,4	34,8	468,6	48,1	
O2	1186	1	34,8	468,6	47,6	
S3	1240	0,6	34,8	468,7	47	
O4	1284	0,1	34,8	468,7	46,3	
E3	1292	-0,5	34,8	468,7	45,6	<b>Semi-aride à hiver froid</b>
N4	1314	-1	34,8	468,8	44,9	
E2	1333	-1,6	34,8	468,8	44,2	
S4	1339	-2,2	34,8	468,8	43,5	
S1	1383	-2,9	34,8	468,8	42,7	<b>Semi-aride à hiver très froid</b>
E4	1399	-3,6	34,8	468,8	41,9	
O3	1434	-4,3	34,8	468,9	41,2	
S2	1446	-5,1	34,7	468,9	40,4	
O1	1472	-5,9	34,7	468,9	39,6	

Pour déterminer l'étage bioclimatique de la zone d'étude, nous avons procédé à l'évaluation du quotient pluviothermique à différentes altitudes. Le tableau 5 permet de conclure que le massif forestier des Bénis Oudjana se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais à très froid (Figure 19). Selon l'altitude, les parcelles d'étude sont classées en trois catégories de sous étage bioclimatique :

- Les parcelles ayant (N1, N3, N2, E1, O2, O3 et O4) ayant des altitudes allant de 1024 à 1284 m, sont caractérisées par un climat semi-aride à hiver frais.

- Les altitudes variant entre 1292 à 1339 m se trouvent dans les parcelles (E3, N4, E2 et S4), qui se situent dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver froid.

- Les parcelles (S1, E4, O3, S2 et O1) se situent dans les altitudes plus hautes (1383-1472 m), se trouvent dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver très froid.

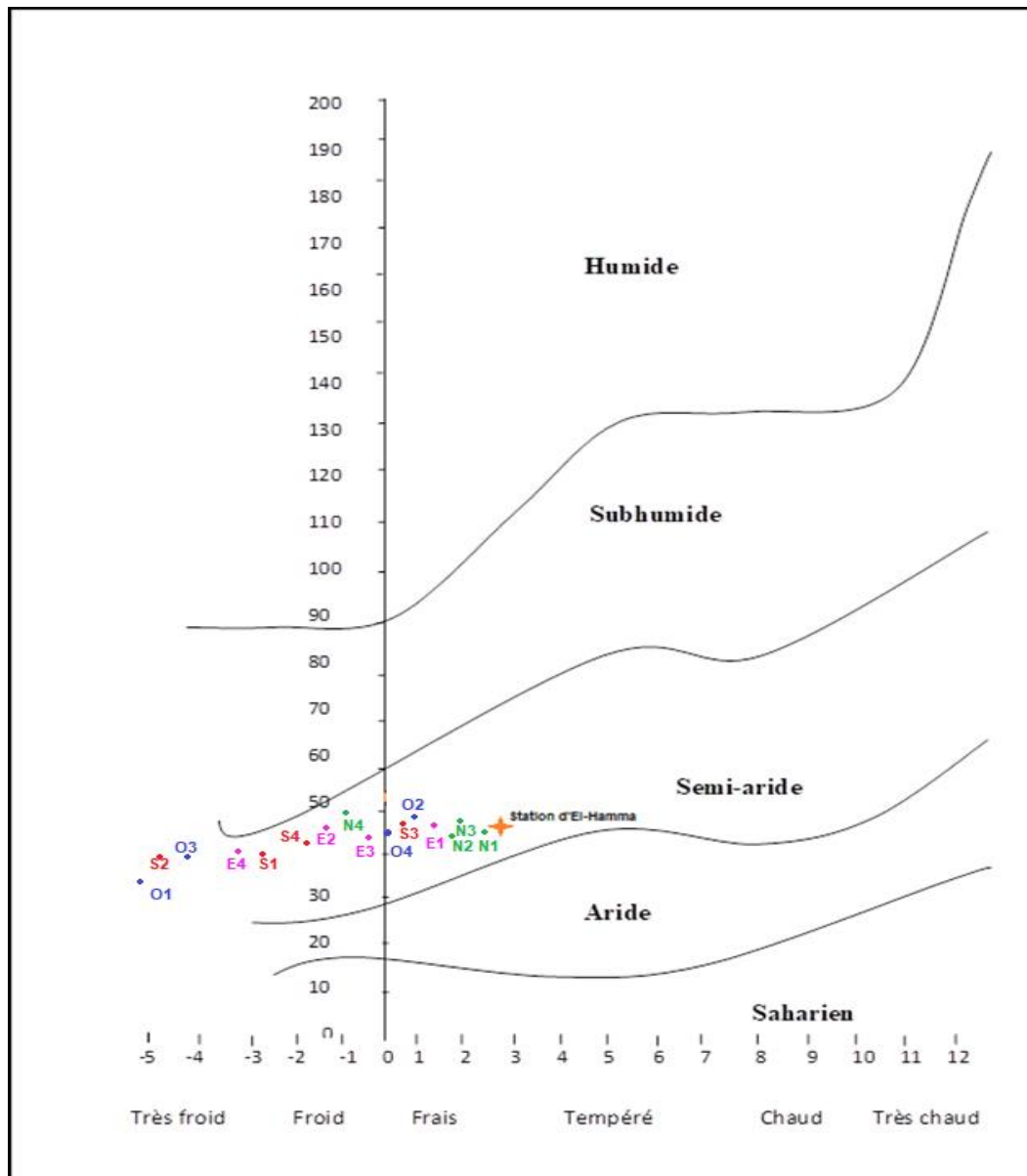


Figure 19. Climagramme d'Emberger pour les 16 parcelles d'études.

## 2. La végétation

Selon la dernière étude d'aménagement effectué par BNEDER (2008) pour le développement de la forêt domaniale de Bénis Oudjana, les travaux de photo-interprétation et de cartographie ont permis de relever un grand nombre de strates ou types de peuplements. Ceux-ci sont classés en cinq catégories :

### **2.1. Les peuplements forestiers (Arborescents)**

Cette classe comprend les peuplements de pin d'Alep, de cèdre et de chêne vert dont les strates individualisées sont les peuplements purs ou mélangés ; ces types de peuplements intéressent les essences principales à savoir le pin d'Alep, le cèdre de l'Atlas et le chêne vert. Le chêne zeen est une essence qui a été très maltraitée et qu'actuellement il ne subsiste que sous forme de quelques taillis associés au chêne vert (Figure 20).



**Figure 20.** Peuplement pure de pin d'Alep de la forêt de Bénéis Oudjana (Hani, 2018).

### **2.2. Matorral**

Le matorral provient de la dégradation de la chênaie verte, de la pinède et de la cédraie comprenant des individus défigurés et mal individualisés. On note, également des taillis de frêne dimorphe et de genévrier oxycèdre (Figure 21).



**Figure 21.** Matorral du massif de Bénéis Oudjana (Hani, 2018).

### **2.3. Formations présteppiques et steppiques**

Ces formations individualisent deux types physiologiques, le premier groupe, les steppes arborées définies comme formation présteppiques, contenant des sujets d'essences arborescentes très dispersées, reliques de formations forestières anciennes, dégradées et dont il ne subsiste que le pin d'Alep. A signaler également, la présence de romarin, de globulaire et de sujets de genévrier de Phénicie très disséminés, mais c'est l'alfa qui domine par sa présence et son développement. Le deuxième groupe, les steppes pures à base d'alfa, il s'agit de nappes alfatières plus ou moins étendues et denses (Figure 22).



**Figure 22.** Formation présteppiques du massif de Bénis Oudjana (Hani, 2018).

### **2.4. Régénération naturelle**

La régénération naturelle a été observée dont les peuplements de pin d'Alep, cèdre de l'Atlas, chêne vert et le genévrier oxycèdre (Figure 23).



**Figure 23.** Sujets régénérés du cèdre de l'Atlas de Bénis Oudjana (Hani, 2018).

### 2.5. Reboisements

Le pin d'Alep et le cèdre de l'Atlas sont les deux essences forestières qui ont fait l'objet de reboisement par les services forestiers dans le plan d'aménagement de cette forêt.

### 3. Occupation du sol

En se référant au même rapport mentionné précédemment, l'étude s'étend sur une superficie de 12871,88 hectares occupés en grande partie par les peuplements forestiers avec 7374,35 ha représentant 57,29% de la surface totale (Tableau 6).

Les formations résineuses (pin d'Alep et cèdre d'Atlas) naturelles et artificielles occupent 4506,34 ha soit 61,17% par rapport aux formations feuillues essentiellement constituées par le chêne vert en taillis, en vieille futaie et en taillis sous futaie, et s'étendant sur 2860,78 ha, soit 38,83% de toutes les formations forestières.

**Tableau 6.** Occupation du sol du massif forestier de Bénis Oudjana (BNEDER, 2008).

Occupation du sol	Occupation forestière		Occupation pré forestières	Pré steppiques et steppiques	Autres occupation
	Résineux	Feuillues			
Surface (ha)	4506,34	2860,78	1576,28	3833,95	87,30
Surface relative	57,29 %		12,24 %	29,78 %	< 1%

Les formations préforestières, matorrals et garrigues issues soit de la déféctuosité sylvicole après exploitation (chêne vert), soit des dégradations dues aux facteurs anthropozoïques (surpâturage, incendies, écimages et émondages pastoraux).

Les formations présteppiques et steppiques s'étendent sur 3833,95 ha soit 29,78% de la superficie totale de la zone d'étude. Les terrains agricoles, les terrains vides, les pelouses sylvatiques, les terrains rocheux et les zones incendiées sont des occupations non forestières ne représentent qu'une très faible proportion du territoire forestier soit 87,30 ha avec un taux nettement inférieur à 1%.

Nous constatons comme il est bien montré dans le tableau 7, que le massif renferme des écosystèmes forestiers spontanés essentiellement à base de pin d'Alep, de chêne vert, et de cèdre de l'Atlas. Le pin d'Alep est l'essence forestière la plus dominante. Elle est donc la plus adaptée aux changements du milieu physique et aux activités anthropozoïques.

**Tableau7.** Typologie des peuplements forestiers de Bénis Oudjana BNEDER (2008).

Typologie des peuplements		Surface (ha)	
Peuplements forestiers arborescents	Pinède pure	3278,71	
	Chênaie verte pure	2847,89	
	Cédraie pure	70,21	
	Peuplements mélangés	Pin d'Alep et chêne vert	33,71
Cèdre et chêne vert		31,68	
Régénérations naturelles	Cèdre d'Atlas	75,01	
	Pin d'Alep	54,12	
	Chêne zeen	13,49	
Formations forestières artificielles	Cèdre	31,03	
	Pin d'Alep	932,24	

## II. Méthodologie

### 1. Caractérisation des parcelles d'étude des peuplements de pin d'Alep

#### 1.1. Cartographie

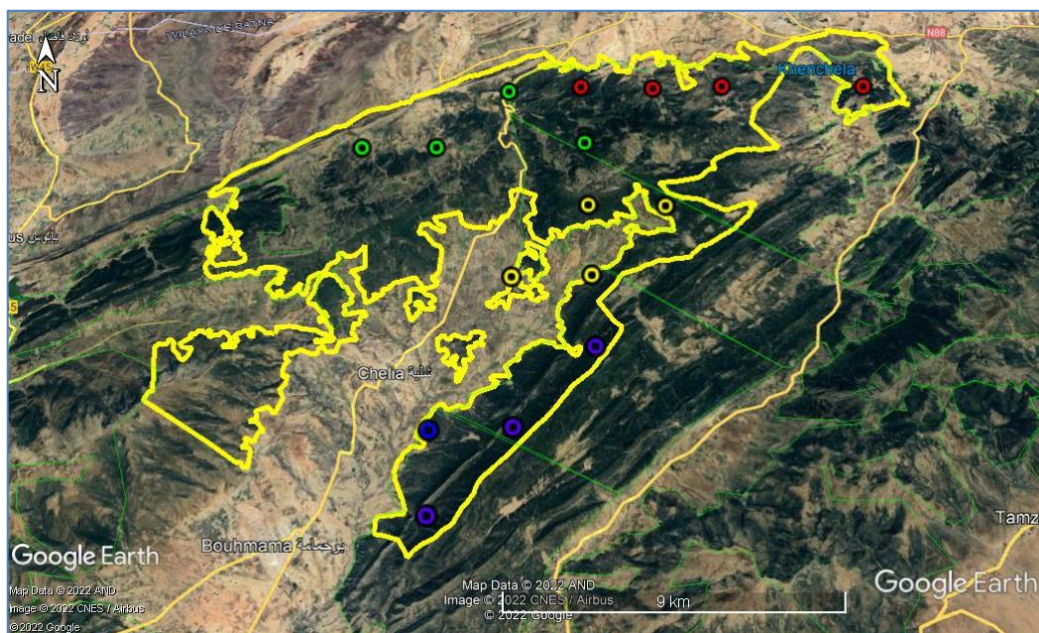
L'objectif de la cartographie est de bien identifier et décrire d'une manière spatiale la zone d'étude (forêt de Bénis Oudjana). Elle a servi ainsi à localiser le site d'étude. Elle consiste en premier lieu à l'exploration des cartes déjà existantes. Ces cartes analysées et interprétées pour servir d'outils indispensables à l'inventaire forestier. En second lieu, des nouvelles cartes ont été conçues afin d'actualiser les anciennes et de localiser la zone d'étude et les parcelles d'observation. Par manque de photos aériennes et d'images satellitaires récentes, une levée à l'aide d'un GPS a été effectuée. L'élaboration des différentes cartes est réalisée à partir du logiciel ARCGIS 10.3, pour cela une méthode a été adoptée :

- L'intégration des images Google-Earth dans le système d'information géographique (SIG) et l'élaboration du plan parcellaire de la zone d'étude.
- La saisie des données du terrain et la création de la table attributaire.
- Après avoir intégré toutes les données du terrain dans le SIG, on a procédé à l'élaboration de différentes cartes citées précédemment. Cela est produit par l'élaboration d'une fonction de sémiologie qui aboutit à l'élaboration des différentes cartes thématiques de la zone d'étude (carte de la localisation géographique de zone, carte des altitudes, carte des pentes, carte d'exposition et une dernière pour la situation des 16 parcelles d'étude).

#### 1.2. Choix des parcelles

Le choix des parcelles est basé essentiellement sur les gradients altitudinaux et aux expositions cardinales qui sont des facteurs discriminants majeurs de la répartition de la pluviosité, des températures et de l'ensoleillement qui, à leur tour déterminent la répartition de la végétation, l'occupation des terres et la nature des cultures.

Les coordonnées géographiques des 16 parcelles choisies pour l'étude de la structure et la valorisation de pin d'Alep du massif forestier de Bénis Oudjana sont illustrées dans la figure 24 et (Annexe I, Tableau 1).



Points rouges : N1, N2, N3, N4. Points verts : E1, E2, E3, E4. Points jaunes: S1, S2, S3, S4. Points bleus : O1, O2, O3, O4.

**Figure 24.** Carte représentant les 16 parcelles d'étude (Google Earth Pro).

### 1.3. Type d'échantillonnage

L'inventaire s'est déroulé durant la période de septembre à décembre 2018 (Annexe I, Tableau 2), période à laquelle la végétation ligneuse atteint sa croissance maximale. L'échantillonnage préconisé dans le choix des stations est de type aléatoire de telle sorte qu'on a sélectionné 4 parcelles pour chaque exposition principale (Est, Sud, Ouest, Nord) selon les altitudes caractérisant le massif forestier de Bénis Oudjana. La mise en place de 16 parcelles des formes rectangulaires (20 m x 25 m), au sein des peuplements jugés les plus représentatifs de cette forêt.

### 1.4. Collecte des données

La méthode adoptée pour la collecte des données est l'inventaire pied par pied dans les parcelles. Cette méthode constitue un outil élémentaire et essentiel à toute gestion forestière, car celui-ci permet une description de l'état de la ressource. La caractérisation des peuplements en termes de structure, de composition et de dynamique de régénération est d'autant plus importante dans le cas de peuplement d'allure irrégulière se régénérant par voie naturelle (Lisein, 2011).

- A l'intérieur de chaque parcelle, tous les individus ont été recensés. Pour chaque arbre, les paramètres dendrométriques mesurés sont (Annexe I, Tableaux 3 et 4):
  - Les noms vernaculaires des essences donnés par le ou les guides locaux.
  - Diamètre traditionnel ou la circonférence à 1,30 m du sol (Dhp, hauteur de poitrine).
  - La hauteur totale (Ht) définie par la longueur de la ligne droite joignant le pied de l'arbre (niveau du sol) à l'extrémité du bourgeon terminal de la tige.
  - La hauteur du fût (Hf) définie par la longueur de la ligne droite joignant le pied de l'arbre à la première grosse branche.
  - Les coordonnées géographiques (longitude et latitude) de chaque parcelle et de chaque Arbre.
  - La distance entre les quatre arbres les plus proches et l'arbre référent.
  - La régénération a été obtenue par simple comptage (Bonou *et al.*, 2009).
  - Relevé des pressions de chaque parcelle (pâturage, incendies, défrichements...).
- Prélèvement des échantillons (écorces et aiguilles).
- Paramètres topographiques sont:
  - Pente (inclinaison) du terrain tout en précisant la présence ou l'absence de l'érosion.
  - Altitude par station et la morphologie du terrain.

## **2. Traitements des données**

### **2.1. Richesse spécifique**

Plusieurs indices ont été utilisés pour mesurer la diversité biologique. Le nombre d'espèces collectées dans un échantillon est exprimé par deux notions distinctes : la richesse spécifique, qui correspond au nombre d'espèces d'une communauté ou d'un échantillon ; elle est parfois déclinée en densité spécifique, qui correspond au nombre d'espèces par unité d'échantillonnage. L'indice de richesse spécifique se note généralement ( $S = N$  : nombre des espèces dans le peuplement). Il ne renseigne que sur le nombre d'espèces dans l'échantillon. La richesse spécifique est ainsi dépendante de l'échelle d'étude de sorte que les résultats d'une étude réalisée à une échelle donnée ne sauraient être extrapolés ni transposés à une autre échelle. C'est l'expression la plus simple de la diversité biologique (Djerrad, 2015). Cet indice évalue le nombre d'espèces dans le peuplement Gonçalves *et al.*, 2010).

### **2.2. Indices de diversité**

Les indices d'hétérogénéité ont été développés pour corriger l'insuffisance de la richesse spécifique en introduisant la notion d'équitabilité qui exprime la régularité ou la répartition équitable des individus au sein des espèces de la communauté et repose sur une

combinaison de la richesse spécifique et de l'abondance des espèces. Le postulat de l'équitabilité se fonde sur le fait qu'une espèce représentée par plusieurs individus (espèce abondante) et une espèce représentée par un ou quelques individus (espèce rare) ne peuvent pas avoir la même importance écologique en termes de contribution au fonctionnement de l'écosystème. Trois indices intégrant cette notion sont fréquemment utilisés :

### **2.2.1. Indice de Shannon-Wiener**

L'indice de Shannon ( $H'$ ), permet d'exprimer la diversité en prenant en compte le nombre d'espèces et l'abondance des individus au sein de chacune de ces espèces. Ainsi, une communauté dominée par une seule espèce aura un coefficient moindre qu'une communauté dont toutes les espèces sont codominantes (Felfili *et al.*, 2004 ; Grall et Coïc, 2005 ; Margurran 1988). Si une seule espèce est enregistrée dans la sous-parcelle, l'indice de Shannon  $H'$  est égal à zéro. Pour  $k$  espèces avec des proportions égales,  $H'$  correspond à  $\ln(k)$  (Keren *et al.* 2019). Il dérive de la théorie de l'information et mesure l'entropie d'un échantillon, soit la « saturation » de la communauté (Kent et Cooker, 1992). L'indice est donné par la formule :

$$H' = \sum_{i=1}^{RS} P_i \ln P_i$$

$P_i$  :  $n_i/N$

$RS$  : nombre total d'espèces

$N_i$  : nombre d'individus d'une espèce dans l'échantillon

$N$  : nombre total d'individus de toutes les espèces dans l'échantillon.

### **2.2.2. Indice d'équitabilité**

L'indice d'équitabilité, symbolisé par la lettre  $E$  est le rapport entre la diversité calculée  $H'$  et la diversité théorique maximale  $H'_{max}$  qui est représenté par le  $\log_2$  de la richesse totale  $S$  (Blondel, 1979 ; Chenchouni, 2010). Cet indice varie de zéro à 1 (Barbault, 1998). Une équitabilité égale à 1 correspond à une communauté dont les effectifs sont parfaitement équirépartis entre les espèces, c'est-à-dire où toutes les espèces ont le même nombre d'individus. L'équitabilité est égale à 0 lorsqu'une seule espèce domine. Ainsi l'équitabilité prend en compte la diversité absolue potentielle de la communauté représentée par  $H'_{max}$ , traduisant ainsi la capacité du système de supporter  $S$  espèces représentées avec des proportions équivalentes. Cet indice mesure l'équitabilité par rapport à une répartition théorique égale pour l'ensemble des espèces :

$$E = H'/H'max$$

$H'max$  :  $\log S$  (nombre d'espèce)

### 2.2.3. Indice de diversité de Simpson

Cet indice ( $Ds$ ) a été proposé par Simpson en 1965. Il mesure la probabilité que deux individus sélectionnés au hasard appartiennent à la même espèce. L'indice est inversement proportionnel à la diversité (Piélou, 1969 ; Pearson et Rosenberg, 1978).

De ce fait, une formulation a été proposée afin d'établir un indice directement représentatif de l'hétérogénéité. Cet indice varie donc de 0 (diversité minimum) à 1 (diversité maximum) (Margurran 1988 ; Felfili et al 2004 ; Grall et Coïc, 2005).

$$Ds = 1 - \sum \frac{[ni(ni - 1)]}{[N(N - 1)]}$$

$ni$  : nombre d'individus dans l'espèce  $i$

$N$  : nombre total d'individus

## 2.3. Analyse sylvicole

L'objectif de cette analyse est d'obtenir toutes les informations sur le peuplement permettant d'avoir une meilleure compréhension de son aptitude à un aménagement et d'envisager les traitements sylvicoles adéquats (Rondeu, 2021).

### 2.3.1. Structure spatiale

#### 2.3.1.1. Analyse horizontale

Elle étudie trois caractéristiques :

- L'abondance des arbres (ou la densité du peuplement) qui est donnée par le nombre de tige par hectare ( $N/ha$ ) et l'espacement moyen des arbres.

- La dominance qui est révélée par la surface terrière  $G$ , exprimée en  $m^2/ha$ , est la somme des sections transversales à hauteur de 1,30 m du sol, de tous les arbres (Rabiou *et al.*, 2015). Elle est déterminée par la formule suivante :

$$Gi = \Sigma g = \Sigma (\pi * Di^2 / 4)$$

$g$  : Surface terrière de l'individu  $i$

$Gi$  : surface terrière du peuplement

$Di$  : Diamètre à hauteur poitrine de l'individu  $i$

La surface terrière est un bon indicateur de la richesse d'un peuplement. Plus elle est élevée, plus le peuplement est riche.

### 2.3.1.2. Volume total

Le volume total est un critère dendrométrique particulièrement important pour caractériser un peuplement forestier et sa productivité (Deleuze *et al.*, 2014). Ce critère a été estimé à partir l'équation en-dessous.

$$V_i = 0.522 * \frac{h_i * C^2}{4\pi(1 - 1.3/h_i)^2}$$

$h_i$  : hauteur de l'arbre en m (Pour le volume de la biomasse,  $h_i$  est la hauteur totale, mais pour le calcul de volume exploitable ( $V_e$ ), la hauteur du fût est considérée).

0,522 : coefficient de forme de *P. halepensis* (les tiges sont assimilées à un cylindre).

### 2.3.1.3. Analyse verticale

Une analyse verticale qui induit l'étude du profil structural, permettant ainsi de visualiser l'architecture (Nombre de strates, états de développement). Elle induit la structure des hauteurs répartissant les arbres en nombre de tige par classe de hauteur et le degré de couverture ( $DC$  : surface totale des projections des houppiers des arbres exprimée en pourcent). Il est possible après observation du recouvrement de dire si la formation végétale est très fermée, fermée ou ouverte (Kemadjou, 2011).

$$DC (\%) = (\sum S_h * 100) / S_p$$

$n$  := nombre de houppiers

$S_h$  : surface couverte par houppier

$S_p$  : surface de la parcelle

### 2.3.2. Analyse de la régénération

La régénération est représentée par les tiges de diamètre strictement inférieur à 5cm. Le taux de régénération  $Tr$  est le rapport entre le nombre d'individus régénérés ( $n$ ) et le nombre d'individus semenciers ( $N$ ) (Randrianindrina, 2008).

$$Tr (\%) = (n/N) * 100$$

La référence de la régénération choisi dans notre est celle de BNEDER (2008) :

- Une régénération absente.
- Une régénération rare.
- Une régénération insuffisante (inférieur à 30%).
- Une régénération suffisante (entre 30 à 60%).
- Une régénération abondante (supérieur à 60%).

## **2.4. Stabilité**

Tous les paramètres de l'analyse structurale permettent d'évaluer la qualité des peuplements. Toutefois, d'autres caractères sont aussi dégagés pour les étoffer. L'idée de stabilité est incluse. Elle est donnée par la valeur du coefficient d'élanement qui est le rapport entre la hauteur et le diamètre ( $CE = h/d$ ).

Le facteur d'élanement peut prendre différentes valeurs. On donne généralement les bornes suivantes :

- $H/D < 80$  : pas de risque en général
- $80 < H/D < 100$  : ne pas faire d'éclaircie forte
- $H/D > 100$  : gros risques.

Ces valeurs dénotent des risques par rapport au vent, par rapport à la neige et aux bris qu'elle peut occasionner (Gaudin, 1996).

## **2.5. Analyse des pressions et menaces**

Il s'agit d'établir et d'interpréter une liste des pressions par ordre d'importance (la pression la plus rencontrée est la plus importante).

## **2.6. Analyse de la viabilité**

Cette analyse consiste à l'évaluation de la viabilité de l'écosystème. La méthode utilisée est celle établie par The Nature Conservancy (TNC, Hachette, 1994). Les niveaux de viabilité de quelques attributs sylvicoles de la forêt sont récoltés et énumérés, par rapport à des valeurs de référence récoltées dans des études similaires. Les niveaux de viabilité restent des jugements relatifs à ces références.

Quatre catégories d'indicateurs (taille, conditions, contexte spatial, pressions) permettent d'estimer le niveau de viabilité. Des attributs de mesure de viabilité sont choisis parmi les paramètres mesurés dans l'analyse sylvicole :

- La taille est relative à des attributs quantitatifs soulignant l'importance des peuplements ; ce sont l'abondance et la dominance ;
- Les conditions sont la régénération, la mortalité et la stabilité ;
- le contexte spatial est régi par le degré de couverture et l'espacement moyen des arbres.
- Et les pressions et les menaces : le nombre des coupes illicites, la surface brûlée, le nombre des arbres malades (insectes, champignons...).

Les critères des trois premiers facteurs ont été comparés avec des valeurs obtenues dans des écosystèmes jugés viables.

## 2.7. Patron de distribution spatiale et indices de complexité structurale

### 2.7.1. Indice de Clark et Evans ( $R$ )

Dans les années 1950 et 1960, des variables numériques ont été développées pour décrire les aspects de la variabilité de la localisation des arbres dans les peuplements forestiers par une valeur unique. L'indice d'agrégation de Clark et Evans (1954) en est un exemple. Il représente la relation entre la distance moyenne observée et la distance moyenne attendue entre les arbres voisins les plus proches (McElhinny *et al.*, 2005 ; Indir *et al.*, 2013).

Un  $R$  égal à 1 indique une distribution aléatoire des arbres. Si l'indice de Clark et Evans est supérieur à 1, il indique une tendance à une distribution régulière des arbres. Une valeur de  $R$  inférieure à 1 indique une distribution agrégée des arbres.

Pour chaque placette d'échantillonnage, l'indice d'agrégation  $R$ , a été calculé, sans correction des effets de bord. Les variables numériques ont été développés pour décrire les aspects de la variabilité de l'emplacement des arbres dans les peuplements par une valeur de signal (Evans 1950-1960), il est défini comme :

$$R = \frac{\bar{r} \text{ observé}}{E(r)} \quad E(r) = \frac{1}{2\sqrt{\frac{N}{A}}} \quad R[0; 2.1491]$$

Où  $\bar{r}$  observé représente la moyenne des distances entre les arbres et leurs plus proches voisins dans un peuplement forestier donné, tandis que  $E(r)$  est la distance moyenne entre les plus proches arbres voisins dans le peuplement avec des emplacements d'arbres d'intensité complètement aléatoire  $\lambda=N/A$  avec  $A$ = superficie du peuplement forestier et  $N$  est le nombre d'arbres (Pommerening et Stoyan 2006, Pommerening et Uria-Diez 2017).

### 2.7.2. Indice de mélange ( $M_i$ )

L'indice de mélange des espèces ( $M_i$ ), ou le mélange spatial des arbres concerne spécifiquement la microstructure des écosystèmes. Il donne la proportion de trois ou quatre arbres voisins les plus proches qui n'appartiennent pas à la même espèce que l'arbre de référence  $i$ . L'indice de mélange global pour le peuplement (placette d'échantillonnage) est défini par la valeur moyenne de tous les arbres de référence. Plus la valeur moyenne de mélange est élevée, plus les différentes espèces d'arbres sont mélangées (Figure 25). Des valeurs plus faibles indiquent une ségrégation (Pommerening, 1997).

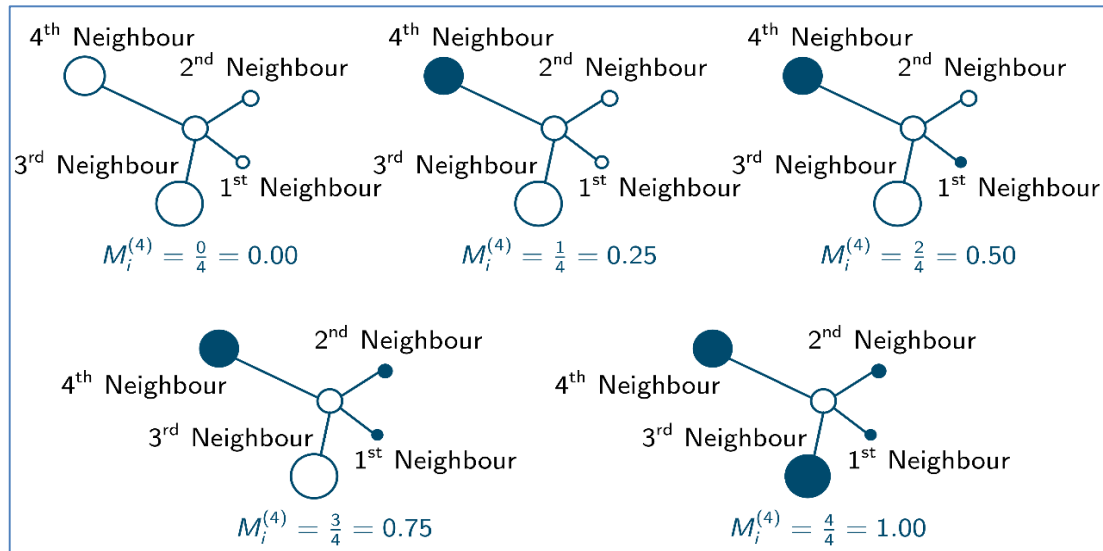


Figure 25. Schéma général de l'indice de mélange (Gadow, 1993).

Dans ce cas l'indice  $M_i$ , a été calculé pour chaque individu de pin d'Alep et ses 4 voisins les plus proches. Tandis que l'indice de mélange global pour chaque placette d'échantillonnage a été défini par la valeur moyenne de tous les arbres de de pin d'Alep. Pommerening (1997) a cité que plus la valeur moyenne de mélange est élevée, plus les différentes espèces d'arbres sont mélangées.

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad M_i[0; 1]$$

Où :

$M_i$  : l'indice de mélange des espèces ;  $n$  : le nombre d'arbres voisins les plus proches (4 dans notre cas) ;  $v_{ij} = 1$ , si l'arbre de référence  $i$  et le voisin ;  $j$  sont des espèces d'arbres différentes ; sinon  $v_{ij} = 0$  (Pommerening 2002, Pommerening et Grabarnik 2019).

### 2.7.3. Indice de différenciation des diamètres ( $T_{ij}$ )

Cet indice décrit la distribution spatiale des diamètres des arbres voisins. Les valeurs possibles de l'indice sont comprises entre 0 et 1. Si l'indice prend la valeur 0, cela signifie que les arbres voisins ont le même diamètre que l'arbre de référence. L'indice global de différenciation des diamètres du peuplement (placette d'échantillonnage) est défini par la valeur moyenne de tous les arbres de référence. Selon Pommerening (2002) les valeurs peuvent être classées et interprétées comme suit :

- Un faible niveau de différenciation ( $0,0 < T_{ij} < 0,3$ ), l'arbre ayant le plus petit Dhp est de 70 % ou plus de la taille de l'arbre de référence ;

- Un niveau de différenciation moyen ( $0,3 < Tij < 0,5$ ), l'arbre ayant le plus petit Dhp est de 50 à 70 % de la taille de l'arbre de référence ;
- Un niveau de différenciation élevé ( $0,5 < Tij < 0,7$ ), l'arbre ayant le plus petit Dhp est de 30 à 50 % de la taille de l'arbre de référence ;
- Un niveau de différenciation très élevé ( $0,7 < Tij < 1,0$ ), l'arbre ayant le plus petit Dhp est plus fin que 30 % de la taille de l'arbre de référence (Indir *et al.*, 2013).

Dans chaque placette d'échantillonnage l'indice de différenciation des diamètres ( $Tij$ ), a été calculé pour chaque individu de pin d'Alep et l'indice global a été défini par la valeur moyenne de tous les arbres. L'indice de différenciation des diamètres ( $Tij$ ), est exprimé par :

$$Tij = 1 - \frac{\min(DHPi, DHPj)}{\max(DHPi, DHPj)} \quad Tij[0; 1]$$

Où Dhp : diamètre de la hauteur en poitrine (Dhp en cm) (Pommerening, 2002).

### 2.8. Structure démographique

La structure démographique de l'espèce a été analysée selon les diamètres des arbres, (définies à partir d'un seuil de 5 cm et une amplitude de 5 cm) et la hauteur des arbres ; cette dernière a été définie à partir d'un seuil de 1.30 m, avec une amplitude de 2 m. Ces classes de diamètre et de hauteur ont servi à construire des histogrammes de distribution. Les structures observées ont été ajustées à la distribution théorique de Weibull à trois paramètres à l'aide du logiciel MINITAB 18 (Rondeux, 1999 ; Goba *et al.*, 2019). La fonction correspondante de densité de probabilité  $f(x)$  se présente sous la forme suivante :

$$f(x) = \frac{c}{b} (x - a/b)^{c-1} \exp \left[ - \left( \frac{x-a}{b} \right)^c \right]$$

Où :  $x$  est le diamètre des arbres, ( $a$ ) est le paramètre de position, ( $b$ ) est le paramètre d'échelle ou de taille et ( $c$ ) est le paramètre de forme lié à la structure observée. La distribution peut prendre plusieurs formes selon la valeur du paramètre de forme ( $c$ ) (Husch *et al.*, 2003 ; Glèlèk *et al.*, 2016) ; avec  $c$  le paramètre de forme (ou pente de Weibull) lié à la structure considérée et  $b$  le paramètre d'échelle lié à la valeur centrale de la distribution de probabilité de la variable  $x$  : diamètre. Une valeur de  $c < 1$ , distribution en « J renversé » est caractéristique des peuplements multispécifiques ou inéquiennes, tandis qu'une valeur  $c > 3,6$  est caractéristique des peuplements à prédominance d'individus âgés. Par ailleurs si  $1 < c < 3,6$  cela désigne des peuplements avec prédominance d'individus jeunes ou de faible diamètre.

### 3. Caractérisation phytochimique de pin d'Alep

### **3.1. Matériel végétal**

La teneur en métabolites secondaires dans les écorces et les aiguilles dépend de l'âge de l'arbre, des conditions de croissance et des conditions stationnelles, etc... (Salhi, 2020). Afin d'éviter d'éventuels fluctuations de la concentration en polyphénols, les différents morceaux d'écorce ainsi que les aiguilles de pin d'Alep du massif forestier de Benis Oudjana sont prélevés sur des arbres des parcelles étudiées (en fonction d'altitudes et des expositions) et à la même date.

### **3.2. Préparation de la poudre végétale**

Les écorces et les aiguilles de pin d'Alep sont récupérées dans des sacs en plastique pour éviter toute forme de contamination. Et sont ensuite séchées à l'air libre pendant un mois. Après séchage, les échantillons ont été broyés. Puis passées au tamis afin d'avoir une poudre homogène. La poudre obtenue a été mise dans des piluliers en verre et conservées jusqu'à extraction.

### **3.3. Extraction des métabolites secondaires**

Il existe plusieurs méthodes d'extraction des polyphénols. La méthode la plus efficace qui a été choisie dans cette étude est l'extraction solide-liquide en utilisant deux techniques d'extraction, l'extraction à chaud avec un appareil Soxhlet et l'extraction à froid ou macération (Penchev, 2010). Les appareils et les produits réactifs chimiques utilisés en annexe II.

#### **3.3.1. Extraction au Soxhlet**

40 g de chaque échantillon est placé dans une cartouche poreuse de cellulose Whatman, bouchée par du coton. La cartouche est ensuite placée dans le réservoir du Soxhlet. Le ballon est rempli par 200 ml du solvant puis est porté à ébullition. La partie du solvant vaporisée, est décondensée au niveau du réfrigérant et va ainsi retomber dans la partie du Soxhlet où se trouve la cartouche contenant l'échantillon. Le solvant liquide va imprégner l'échantillon, et commencer à extraire les molécules d'intérêt.

Lorsque le Soxhlet est suffisamment rempli, le siphonage entraîne les extractibles dans le ballon. Le solvant est de fait récupéré dans le ballon et recommence un nouveau cycle d'extraction. Plusieurs solvants sont utilisés avec des polarités différentes (équivalentes aux forces éluantes) permettant de séparer sélectivement des molécules plus ou moins polaires.

Les solvants retenus pour notre extraction étaient l'éther de pétrole pur, l'acétone, le mélange toluène-éthanol (2:1 v/v) et l'eau (Saha, 2015). Le contenu du ballon (solvant plus

matières solubilisées) est évaporé à sec à l'aide d'un évaporateur rotatif muni d'une pompe à vide à une température de 45 °C pour éliminer tous le solvant.

### 3.3.2. Préparation de l'extrait brut hydrométhanolique

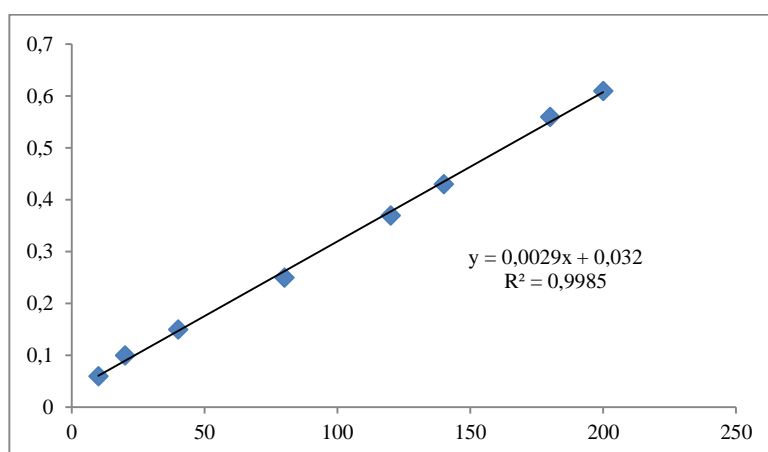
Une quantité de 40 g de chaque échantillon (écorce et aiguilles) est macérée dans 200 ml de Méthanol 70% pendant 24 heures sous agitation. La macération hydrométhanolique obtenue est filtrée sur papier filtre, puis concentrée sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif à 45°C.

## 3.4. Etude quantitative

### 3.4.1. Dosages des phénols totaux

Le dosage des polyphénols totaux a été déterminé par spectrophotométrie, selon la méthode colorimétrique utilisant le réactif de Folin-Ciocalteu (Singleton *et al.*, 1999). Ce dosage est basé sur la quantification de la concentration totale de groupements hydroxyles présents dans l'extrait. Le protocole utilisé est basé sur celui décrit par (Singleton et Ross, 1965), en y apportant quelques modifications. Brièvement, dans des tubes à hémolyse en verre, un volume de 200 µl de chaque extrait a été ajouté, avec un mélange de 1 ml de réactif Folin-Ciocalteu dilué 10 fois, et 800 µl d'une solution de carbonate de sodium à 7,5 %. Les tubes sont agités et conservés pendant 30 min. L'absorbance est lue à 765 nm.

Une courbe d'étalonnage a été réalisée en parallèle dans les mêmes conditions opératoires en utilisant l'acide gallique à différentes concentrations (10 - 200 µg/ml), elle est exprimée en microgramme d'équivalent d'acide gallique par un milligramme de la matière sèche (µg EAG/mg Extrait) (Figure 26).

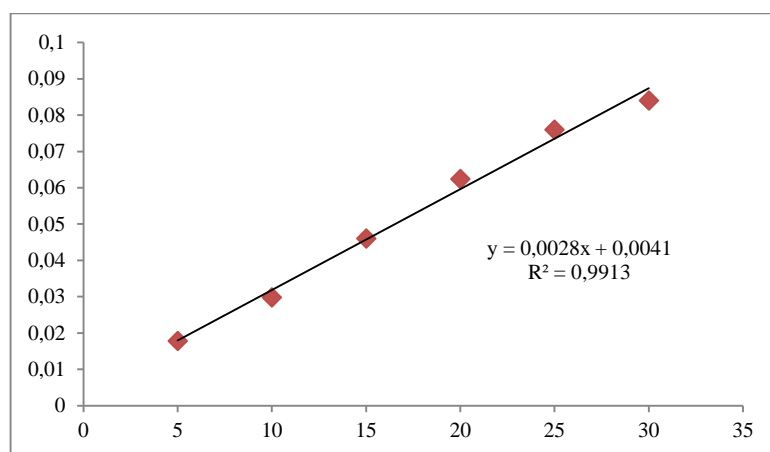


**Figure 26.** Courbe d'étalonnage de l'acide gallique.

### 3.4.2. Dosage des flavonoïdes

Le dosage des flavonoïdes est effectué selon la méthode de trichlorure d'aluminium ; ( $\text{AlCl}_3$ ) (Vanhaelen *et al.*, 1980) avec de légères modifications. 1 ml de chaque extrait (préparé avec des dilutions convenables) est ajouté à un 1 ml de la solution d' $\text{AlCl}_3$  (2%) (Fraichement préparé). Après 20 minutes d'incubation, l'absorbance a été lue à 430 nm.

La concentration des flavonoïdes dans les extraits a été calculée à partir d'une courbe d'étalonnage établie avec la quercétine (5- 30  $\mu\text{g/ml}$ ) et elle est exprimée en microgramme d'équivalent de quercétine par un milligramme de la matière sèche ( $\mu\text{g EQ/mg}$  Extrait) (Figure 27).

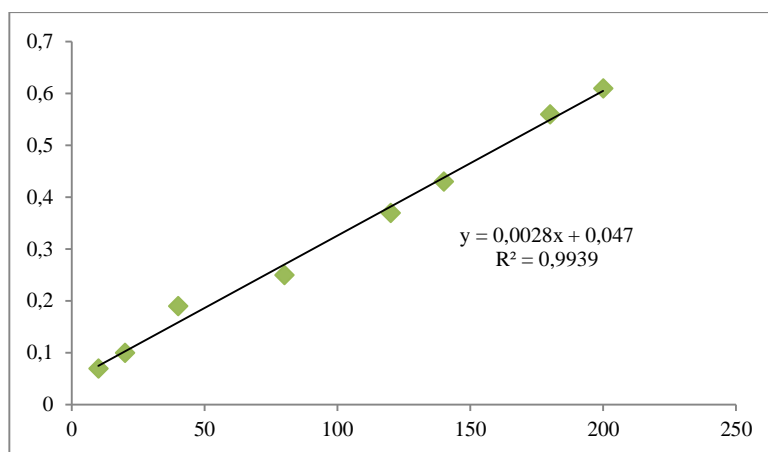


**Figure 27.** Courbe d'étalonnage de la quercétine.

### 3.4.3. Dosage des tanins condensés

Nous avons adopté la méthode à la vanilline avec l' $\text{HCl}$ . Cette méthode dépend de la réaction de la vanilline avec le groupement flavonoïde terminal des Tanins condensés et la formation de complexes rouges (Makkar, 2000 ; Schofield, 2001), cela s'explique par la propriété des tanins à se transformer en anthocyanidols de couleur rouge par réaction avec la vanilline (Sun *et al.*, 1998). La teneur en tanins condensés a été déterminée par la méthode de vanilline décrite par (Julkunen-Titto, 1985). Un volume de 50  $\mu\text{l}$  de chaque extrait a été ajouté à 1500  $\mu\text{l}$  de la solution vanilline/méthanol à 4 %, puis mélangé vigoureusement. Ensuite, un volume de 750  $\mu\text{l}$  de l'acide chlorhydrique concentré ( $\text{HCl}$ ) a été additionné. Le mélange obtenu est laissé réagir à température ambiante pendant 20 min.

L'absorbance est mesurée à 550 nm contre un blanc. Différentes concentrations comprises entre 0 et 200  $\mu\text{g/ml}$  préparées à partir d'une solution mère de la catéchine, permettront de tracer la courbe d'étalonnage (Figure 28).



**Figure 28.** Courbe d'étalonnage de la catéchine.

### 3.5. Evaluation de l'activité antioxydante

#### 3.5.1. Activité « scavenging » du radical DPPH

L'évaluation de l'activité antioxydante a été effectuée selon la méthode du DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl). Dans ce test, les antioxydants réduisent le 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl de couleur violette en un composé jaune, le diphénylpicrylhydrazine (Kadi *et al.*, 2018).

#### 3.5.2. Réalisation de l'essai

4 mg de DPPH 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl ( $C_{18}H_{12}N_5O_6$ ) a été solubilisé dans 100 ml de méthanol absolu. 1 ml de chaque solution méthanolique des extraits à différentes concentrations (2- 1- 0,5- 0,25- 0,125- 0,0625 mg/ml) sont ajoutés à 1 ml de la solution méthanolique du DPPH (0,0025 g/l). La lecture de l'absorbance est faite contre un blanc préparé pour chaque extrait à 517 nm après 30 minutes d'incubation à l'obscurité et à la température ambiante.

#### 3.5.3. Expression des résultats

Les résultats ont été exprimés en pourcentage d'inhibition (% PI) et par la valeur de la concentration inhibitrice ( $IC_{50}$ ).

Le % PI du DPPH a été calculé selon la formule suivante :

$$\% PI \text{ du DPPH} = [(A_{\text{blanc}} - A_E) / A_B] \times 100$$

$A_{\text{blanc}}$  : absorbance de la réaction témoin (contenant tous les réactifs sauf l'extrait).

Pour chaque extrait, nous avons déterminé la valeur  $IC_{50}$ , concentration de l'extrait qui permet la réduction de 50 % de DPPH. Les  $IC_{50}$  sont déterminées en utilisant Microsoft Office Excel 2016. Elles sont calculées par les droites de régression linéaires ( $y=ax+b$ )

résultantes des graphes tracés des pourcentages d'activité antioxydante en fonction de différentes concentrations des extraits et du standard utilisé (Brand *et al.*, 1995 ; Tamert et Latreche, 2015). Le contrôle positif est représenté par une solution d'un antioxydant standard, (l'acide ascorbique) dont l'absorbance a été mesuré dans les mêmes conditions que les échantillons (Annexe III).

#### **4. Analyse statistique**

##### **4.1. Analyse de la variance (ANOVA)**

Les données calculées ont été analysées à l'aide du logiciel MINITAB 18. Les analyses de variance à un facteur (ANOVA) ont servi à comparer les moyennes des paramètres dendrométriques, les indices de diversité et les indices de structure spatiale des peuplements de pin d'Alep dans les différentes parcelles et les caractéristiques phytochimiques de différents extraits de l'écorce et des aiguilles. Les tests d'ANOVA significatifs ont été suivis du test Fisher de comparaison multiple par paires au seuil de significativité de 5%. Les données qui ne suivent pas une distribution normale selon le test de Ryan Joiner ont été comparées à l'aide du test non paramétrique de Kruskal Wallis.

##### **4.2. Analyse en composantes principales (ACP)**

L'analyse en composante principale est une technique mathématique qui permet de détecter les dépendances statistiques entre un grand nombre de variables quantitatives. Elle sert essentiellement à réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre, c'est-à-dire de « résumer » les grandes masses de données sous la forme de vecteurs représentatifs (vecteurs propres) montrant la dispersion des individus que l'on peut lier aux influences susceptibles d'expliquer la variabilité du champ étudié. A chaque champ spatial, est associée une chronique temporelle (composante principale) qui reproduit le résumé des variables obtenues par combinaison linéaire et explique un certain pourcentage par rapport à la variance totale.

Dans notre étude, seuls les paramètres quantitatifs ont été analysés. Les données enregistrées ont été d'abord soumises à une analyse descriptive. Les valeurs moyennes, minimales, maximales, l'écart-type de la moyenne et le coefficient de variation ont été déterminés pour l'ensemble des 21 variables quantitatives étudiées (abondance, dominance, contenance, surface terrière, régénération, mortalité, degré de couverture, mortalité,..).

L'ACP est utilisée pour la détermination d'éventuels groupes homogènes pour les 16 parcelles ainsi que pour étudier les corrélations entre les variables d'une part et avec les mesures effectuées d'autre part.

# *Chapitre III : Résultats et discussion*

## **Résultats et discussion**

Le massif forestier de Bénis Oudjana (Khenchela) renferme des écosystèmes forestiers spontanés essentiellement à base de pin d'Alep, de chêne vert et de cèdre de l'Atlas. Le pin d'Alep est l'essence forestière la plus dominante. Elle est bien adaptée aux conditions écologiques difficiles. Son intérêt patrimonial et économique justifie d'une surveillance importante, ainsi qu'une sylviculture adaptée (BNEDER, 2008). Etudier la structure et la qualité des peuplements forestiers représente un outil essentiel permettant de mieux comprendre et ainsi de mieux gérer cette forêt.

L'analyse sylvicole et l'inventaire des ligneux sont faites à partir des paramètres dendrométriques récoltés sur 16 parcelles d'une part et la valorisation des quelques produits forestiers non ligneux (PFNL) d'autre part. Les résultats obtenus peuvent mener à la proposition de quelques recommandations pour contribuer à l'amélioration de la viabilité de la forêt et doivent servir d'outil d'aide à la décision pour une amélioration de sa gestion.

### **I. Caractérisation des peuplements de pin d'Alep**

#### **1. Caractérisation de la structure des peuplements de pin d'Alep**

L'analyse sylvicole constitue une activité fondamentale en sylviculture et représente la base même du processus de décision (Rajoelison *et al.*, 2008). Elle a pour objectif l'étude et l'analyse d'un peuplement donné pour juger ses potentialités en vue d'une meilleure connaissance de ce dernier. Dans ce point, nous présentons les résultats obtenus en deux parties. La première s'intéresse aux résultats des indices de la biodiversité et de la seconde démontre la structure de *Pinus halepensis* de la forêt de Bénis Oudjana.

##### **1.1. Richesse spécifique**

L'inventaire forestier réalisé dans la zone d'étude a donné les résultats illustrés dans le tableau 8. Il a permis de dénombrer 7 espèces réparties en 6 familles. La flore de cette zone est principalement dominée par les *Pinaceae* (*Pinus halepensis* Mill. et *Cedrus atlantica* Manetti.) et les *Cupressaceae* (*Juniperus oxycedrus* L.), suivies par les *Fagaceae* (*Quercus ilex* L.), tandis que les *Lamiaceae* (*Rosmarinus officinalis* L.), les *Anacardiaceae* (*Pistacia lentiscus* L.) et les *Oleaceae* (*Phillyrea angustifolia* L.) sont les familles les moins fréquentes.

D'une manière générale, la densité des espèces rencontrées dans les parcelles étudiées varie selon l'altitude et l'exposition des placettes. Les moyennes de cette densité varient de  $930 \pm 292,3$  pieds/ha dans les placettes exposées au Nord à  $2315 \pm 1203,6$  pieds/ha dans les placettes à exposition Ouest. La densité moyenne des ligneux (différentes espèces confondues) au niveau de la forêt de Bénis Oudjana est de l'ordre  $1421 \pm 494$  pieds/ha ; elle

est plus importante comparée à celle de la forêt de Sidi R’Ghies qui est de  $735 \pm 368$  individus/ha (Rached-Kanouni *et al.*, 2019) ; malgré que ces deux forêts sont situées dans le même étage bioclimatique semi-aride.

**Tableau 8.** Richesse spécifique des différentes expositions dans les placettes étudiées.

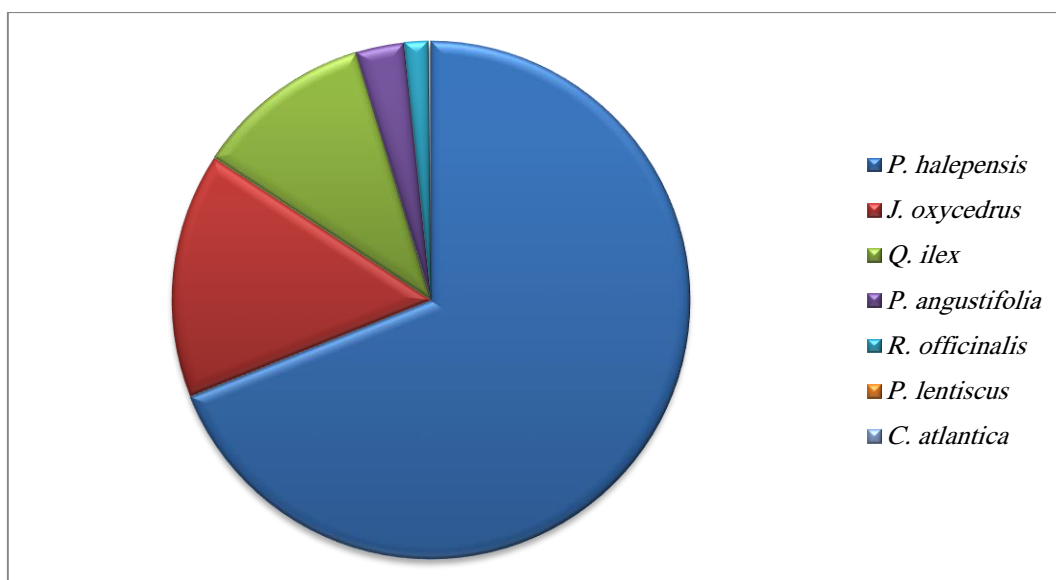
Exposition	Parcelles	Espèce	Nom Scientifique	N/ha	Nt/ha
Nord	N <sub>1</sub>	Filaire	<i>P. angustifolia</i>	60	720
		Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	220	
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	100	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	340	
	N <sub>2</sub>	Filaire	<i>P. angustifolia</i>	540	1360
		Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	120	
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	200	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	500	
	N <sub>3</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	500	860
		Pistachier lentisque	<i>P. lentiscus</i>	20	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	340	
	N <sub>4</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	240	780
Pin d’Alep		<i>P. halepensis</i>	540		
Est	E <sub>1</sub>	Filaire	<i>P. angustifolia</i>	20	900
		Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	60	
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	100	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	720	
	E <sub>2</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	140	1200
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	480	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	580	
	E <sub>3</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	400	1520
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	220	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	900	
	E <sub>4</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	240	1460
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	520	
Pin d’Alep		<i>P. halepensis</i>	700		
Sud	S <sub>1</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	160	1200
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	140	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	900	
	S <sub>2</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	240	1660
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	180	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	1240	
	S <sub>3</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	460	940
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	280	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	200	
	S <sub>4</sub>	Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	200	880
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	680	
	Ouest	O <sub>1</sub>	Cèdre de l’Atlas	<i>C. atlantica</i>	20
Pin d’Alep			<i>P. halepensis</i>	4060	
O <sub>2</sub>		Filaire	<i>P. angustifolia</i>	60	1600
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	120	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	1420	
O <sub>3</sub>		Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	340	1500
		Chêne vert	<i>Q. ilex</i>	180	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	980	
O <sub>4</sub>		Genévrier oxycèdre	<i>J. oxycedrus</i>	160	2080
		Romarin	<i>R. officinalis</i>	340	
		Pin d’Alep	<i>P. halepensis</i>	1580	

La densité de pin d'Alep varie de 430 pieds/ha dans les placettes exposées au Nord à 2010 pieds/ha dans les placettes à exposition Ouest du massif forestier de Bénis Oudjana. La densité moyenne de pin d'Alep dans cette forêt est de  $1404 \pm 455$  pieds/ha. Cette densité est plus importante par comparaison à celle de la forêt de Hamimet (Oum El Bouaghi), qui est de l'ordre de  $378 \pm 78$  pieds/ha (Yahi *et al.*, 2021), et celle de Chettaba (Constantine) qui est  $442 \pm 152$  pieds/ha (Rached-Kanouni *et al.*, 2020).

Les caractéristiques structurales sont des indicateurs majeurs pour mesurer l'évolution qualitative et quantitative des peuplements forestiers (Oosterhoom et Kapelle, 2000). La densité de peuplement de pin d'Alep est plus élevée sur l'exposition Ouest de la forêt de Bénis Oudjana (2010 pieds/ha) par rapport aux autres expositions. La différence des densités des peuplements pourrait être liée aux caractéristiques écologiques des milieux d'étude, notamment les types de sol, la topographie, le climat, le recouvrement et surtout le gradient altitudinal (Rabiou *et al.*, 2015 ; Rached-Kanouni *et al.*, 2020). Les peuplements de *P. halepensis* sont soumis au pâturage qui constitue l'activité principale de la population locale des versants Nord et Est ; cette action anthropique permanente peut également justifier la variation des densités entre les différentes expositions. L'impact négatif des différentes pressions anthropiques exercées sur les peuplements du *P. halepensis* dans le massif de Bénis Oudjana est reconnu depuis longtemps. Les activités humaines telles que l'exploitation forestière, l'élevage, l'agriculture, l'expansion incontrôlée des habitations et les incendies provoquent la dégradation des écosystèmes forestiers et la disparition des espèces forestières (Adjonou, 2010).

Les espèces inventoriées représentent le cortège floristique de *Pinus halepensis* tels que : *Cedrus atlantica*, *Juniperus oxycedrus*, *Pistacia lentiscus*, *Quercus ilex*, *Phillyrea angustifolia* et *Rosmarinus officinalis* (Figure 29).

La richesse spécifique est de deux à quatre espèces à la parcelle. Le nombre d'espèces est 2 dans les parcelles N4, S4 et O1. Les parcelles les plus riches en espèces sont N1, N2 et E1 ; les espèces fréquentes dans ces parcelles sont : *Pinus halepensis*, *Quercus ilex* et *Juniperus oxycedrus*. Le pin d'Alep constitue l'espèce dominante dans les 16 parcelles d'inventaires. Dans le massif forestier de Bénis Oudjana, le pin d'Alep est l'essence forestière dominante avec un pourcentage de 68,95%. Les 2 autres espèces ont des proportions égales à 15,30% pour le genévrier oxycèdre et 11,08 pour le chêne vert.



**Figure 29.** Variation de la diversité floristique dans les parcelles d'étude.

Le pin d'Alep offre une plasticité écologique importante, puisqu'il a réussi à coloniser tous les substrats et également présent dans la majorité des variantes bioclimatique méditerranéenne avec une prédominance dans l'étage semi-aride, il est bien adapté aux conditions écologiques difficiles (Quezel, 1986 ; Bentouati, 2006). Sur la base des quelques travaux de recherche (Boudy, 1955 ; Seigue, 1985), le pin d'Alep est l'essence prédominante qui occupe 1 158 533 ha de la superficie des principales essences forestières en Algérie et se rencontre principalement dans les zones semi arides (Menasri, 2014). Suivie par le genévrier oxycèdre avec un pourcentage de 15,30%. Ce dernier est une espèce prédominante dans les terres arides et semi arides. Très fréquent sur les versants arides et ensoleillés comme les forêts claires (Boudy, 1955 ; Quezel, 1986). Sa dominance dans le versant Nord et Sud par rapport au chêne vert qui présente un pourcentage de 11,08%, cela s'explique par une dynamique progressive du genévrier oxycèdre dans ces zones d'altitudes variables. Comme dans le cas de la forêt domaniale de Béni Melloul (Khenchela), au niveau de la strate basse où on trouve le chêne vert dans les stations fraîches contrairement au genévrier oxycèdre et le genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea* L.) qui caractérisent les stations les plus sèches et les plus dégradées (Menasri, 2014).

Le romarin est une espèce thermophile résistante à la sécheresse qui présente des caractères apparents de xérophytisme (petites feuilles etc..). Elle se développe dans les bioclimats semi-arides et subhumides à variantes chaude à fraîche au niveau des étages de végétation thermo-méditerranéen et méso-méditerranéen, et préfère les sols carbonatés et bien drainés (Naggar et Iharchine, 2015 et 2016). Il est présent dans le versant Ouest et uniquement dans la placette O4 avec un pourcentage de 1,50 %. Sa présence dans ce versant peut

s'expliquer par l'humidité relativement élevée, ce facteur climatique est l'un des principaux facteurs qui contrôlent la répartition de la végétation (Bentouati, 2006). Nous savons très bien que l'origine des pluies en Algérie est plutôt orographique. En effet, les précipitations varient en fonction de l'altitude, de l'orientation des chaînes de montagne et de l'exposition. De ce fait, les versants Ouest reçoivent plus de précipitations que les autres expositions. Ainsi les quantités de pluies augmentent selon un gradient pluviométrique altitudinal (Seltzer, 1946 ; Kadik, 1987 ; Kadik, 2005 ; Menasri, 2014 ; Djerrad, 2016).

La filaire à feuilles étroites (*Phillyrea angustifolia* L.), se trouve dans les placettes à exposition Nord, Est et Ouest avec un taux de 3% du pourcentage total d'espèces inventoriées. Ces placettes sont plus ou moins denses, avec des altitudes ne dépassent pas les 1200 m, en mélange avec le pin d'Alep, le chêne vert et le genévrier oxycèdre, ce groupement est assez fréquent dans les régions semi-arides, dans les Aurès et les monts de Tébessa (Kadik, 2005 ; Djerrad, 2016).

Le cèdre de l'Atlas est une espèce endémique originaire des montagnes du Nord-africain (Boudy, 1950). C'est une espèce forestière protégée (décret n°93/285 du 23 novembre 1993 fixant la liste des espèces végétales non cultivées protégées en Algérie). Son aire naturelle s'étend au Maroc en deux Blocs (le Rif, le moyen et le haut Atlas oriental) et en Algérie principalement sur l'Atlas tellien et l'Atlas saharien (Mhirit, 1999). En effet, l'aire de sa répartition en Algérie est très morcelée. Les peuplements les plus importants se rencontrent dans l'Aurès, mais d'autres cédraies colonisent les massifs montagneux de l'Ouarsenis, de l'Atlas mitidjien, des Babors et du Hodna (Abdessamed, 1981 ; Derridj, 1990 ; Benabid, 1993 ; Mhirit, 1999). En terme altitudinal, les limites inférieures et supérieures diffèrent d'une cédraie à l'autre. En Algérie, la limite inférieure est fonction de la plus ou moins grande humidité de la station. Elle se situe entre 1400 et 1500 m en versant Nord et à partir de 1600 m en versant Sud (Boudy, 1950 ; Houamel, 2012). Selon Khanfouci (2005), l'exposition joue un rôle crucial sur la répartition du cèdre de l'Atlas. En Algérie, les vents dominants sont de direction Nord-Ouest (Seltzer, 1946 ; Kadik, 1987 ; Kadik, 2005 ; Menasri, 2014 ; Djerrad, 2016), ce qui fait que ces deux versants sont exposés à une pluviométrie plus importante que les versants sud qui sont exposés aux vents chauds et secs (Sirocco) et à un ensoleillement quasi permanent (Houamel, 2012). On rencontre de ce fait les plus belles cédraies sur les versants Nord. Dont la limite inférieure est plus basse que celle de l'exposition Sud, cette dénivellation est due à la variation d'humidité (Emberger, 1938).

Dans le massif forestier de Bénis Oudjana, le cèdre de l'Atlas se trouve à une altitude de 1472 m dans la parcelle exposée à l'Ouest (O1), avec seulement 20 pieds/ha (Tableau 8).

Selon Bentouati (2006), il est fréquent de trouver des sujets isolés du cèdre de l'Atlas côtoient le pin d'Alep à ce niveau altitudinal (inférieur à 1600 m), sachons que son optimum bioclimatique correspond à l'étage montagnard-méditerranéen entre 1600 m et 2000 m (Achhal *et al.*, 1980). Cette étude est compatible avec celles menées en Algérie par Boudy (1950), Khanfouci (2005) et Houamel (2012), qui affirment que l'exposition du versant joue un rôle très important dans la répartition et dans la vie du cèdre de l'Atlas qui trouve son meilleur optimum de croissance dans l'exposition Nord et Ouest à une altitude de 1400 m. Ces versants sont non seulement bien arrosés mais également à l'abri des vents desséchants (Sirocco), et portent les plus belles cédraies en raison de leur humidité. Et par les études effectuées sur les cédraies du Moyen Atlas au Maroc par Ezzahiri *et al.*, (2000), qui font ressortir que celles qui sont les mieux développées et où la régénération est mieux réussie sont celles exposés à l'Ouest et au Nord-Ouest, alors que celles exposées à l'Est et au Sud-Ouest ont les faibles fructifications et des difficultés de régénération.

En Algérie, Le pistachier lentisque, occupe l'étage thermo-méditerranéen. Dans ces régions, *Pistacia lentiscus* est largement distribué dans des écosystèmes « extrêmes » caractérisés par la rareté des éléments nutritifs et de l'eau ; avec une exposition prolongée au rayonnement solaire et aux hautes températures (Bhourri *et al.*, 2010). Dans le massif forestier de Bénis Oudjana, la présence de cette espèce est signalée uniquement dans le peuplement à exposition Nord (N3) avec 20 arbres/ha. Bien qu'il soit adapté au sol et au climat méditerranéen semi-aride, le pistachier lentisque est de nos jours négativement affecté par plusieurs facteurs: le tourisme, les incendies, la dégradation des sols, la déforestation et la plantation d'autres arbres, surtout les oliviers. En raison de cette pression, le nombre d'arbrisseau de *Pistacia lentiscus* ne cesse de diminuer (Dogan *et al.*, 2003).

### **1.2. Analyse de la diversité spécifique**

L'approche de l'étude de la diversité biologique et écologique des forêts s'avère une étape importante pour une meilleure prise en charge des milieux forestiers (Djerrad, 2016). La diversité prend en compte non seulement le nombre d'espèces, mais également la distribution des individus au sein de ces espèces. La diversité spécifique exprime la répartition des espèces entre les individus présents. Dans notre cas, elle est évaluée à l'aide des indices de diversité (indice de Shannon-Wiener :  $H'$ , indice de Simpson :  $D_s$  et l'indice d'équitabilité de Piélou :  $E$ ). Toutefois, l'utilisation de ces trois indices, de manière concomitante permet à une étude plus complète des informations concernant la structure du peuplement (Grall et Coïc, 2005 ; Hani *et al.*, 2021).

La richesse spécifique forestière de la forêt de Bénis Oudjana est constituée d'un patrimoine qui se compose de pin d'Alep, de chêne vert, de genévrier oxycèdre, cèdre de l'Atlas, la filaire, le pistachier lentisque et le Romarin. L'indice de diversité de Shannon est calculé pour les 16 parcelles. Lorsque tous les arbres ont été inventoriés, ses valeurs sont comprises entre 0,03 et 1,23 bits, ce qui indique une faible régularité de la répartition des individus. Les valeurs moyennes de l'indice  $H'$  selon les expositions varient de  $0,50 \pm 0,4$  bits pour l'Ouest à  $0,95 \pm 0,3$  bits pour les expositions Nord. L'analyse statistique par le biais du test de Fisher montre une différence significative entre les expositions (Est, Ouest, Nord et Sud) et les indices de diversité spécifique  $H'$ ,  $D_s$  et  $E$  (Tableau 9).

Les résultats de l'indice de Simpson semblent identiques à ceux de l'indice de Shannon. Les valeurs moyennes de l'indice  $D_s$  calculées pour chaque exposition varient de  $0,83 \pm 0,1$  bits pour les placettes d'exposition Nord à  $0,46 \pm 0,3$  bits pour les placettes orientées vers l'Ouest.

Ainsi, les valeurs de l'indice d'équitabilité de Piélou varient de  $0,27 \pm 0,2$  bits pour les peuplements d'exposition Ouest à  $0,56 \pm 0,12$  bits pour les peuplements ayant l'exposition Nord.

**Tableau 9.** Indices de diversité des parcelles étudiées de la forêt de Bénis Oudjana.

Exposition	Parcelles	RS	$H'$ (bits)	$H'_{max}$	$D_s$ (bits)	$E$ (bits)
Nord	N1	4	1,20	1,198	0.864	0,658
	N2	4	1,23	1,231	0.888	0,678
	N3	3	0,77	0,770	0.701	0,506
	N4	2	0,62	0,617	0.890	0,427
Moyenne		-	<b><math>0,95 \pm 0,3^a</math></b>	<b><math>1,14 \pm 0,3^a</math></b>	<b><math>0,83 \pm 0,1^a</math></b>	<b><math>0,56 \pm 0,12^a</math></b>
Est	E1	4	0,69	0,688	0.496	0,343
	E2	3	0,97	0,969	0.882	0,600
	E3	3	0,94	0,941	0.857	0,560
	E4	3	1,02	1,017	0.926	0,617
Moyenne		-	<b><math>0,90 \pm 0,1^{ab}</math></b>	<b><math>1,17 \pm 0,1^a</math></b>	<b><math>0,79 \pm 0,2^a</math></b>	<b><math>0,52 \pm 0,12^a</math></b>
Sud	S1	3	0,74	0,735	0.669	0,406
	S2	3	0,74	0,738	0.672	0,410
	S3	3	1,04	1,040	0.946	0,627
	S4	2	0,54	0,536	0.773	0,352
Moyenne		-	<b><math>0,76 \pm 0,2^{ab}</math></b>	<b><math>0,99 \pm 0,2^a</math></b>	<b><math>0,76 \pm 0,1^{ab}</math></b>	<b><math>0,44 \pm 0,12^{ab}</math></b>
Ouest	O1	2	0,03	0,031	0.045	0,010
	O2	3	0,42	0,423	0.385	0,205
	O3	3	0,87	0,869	0.791	0,508
	O4	3	0,70	0,702	0.639	0,391
Moyenne		-	<b><math>0,50 \pm 0,4^b</math></b>	<b><math>0,99 \pm 0,2^a</math></b>	<b><math>0,46 \pm 0,3^b</math></b>	<b><math>0,27 \pm 0,21^b</math></b>

Les résultats obtenus indiquent qu'il existe trois groupes homogènes dont le premier groupe (a) caractérisé des plus grandes valeurs ; il présente les peuplements à exposition Nord pour l'indice de Shannon-Wiener, et les peuplements à exposition Nord et Est pour les indices de Simpson et l'indice d'équitabilité de Pielou.

Un second groupe (ab) qui est intermédiaire, caractérise les peuplements à exposition Est et Sud pour l'indice  $H'$  avec des moyennes respectivement  $0,90 \pm 0,1$  bits et  $0,76 \pm 0,2$  bits ; et représente les peuplements à exposition Sud pour les indices  $D_s$  et  $E$  soient respectivement  $0,76 \pm 0,1$  bits et  $0,44 \pm 0,12$  bits. Alors que le troisième groupe (b) caractérise les moyennes les plus faibles de trois indices ( $H' = 0,50 \pm 0,4$  bits,  $D_s = 0,46 \pm 0,3$  bits et  $E = 0,27 \pm 0,21$  bits respectivement) et se manifeste dans les peuplements à exposition Ouest.

Nous remarquons que la richesse spécifique est élevée dans les versants Ouest et Nord, soit respectivement 85,71% et 71,42% de la richesse totale. Cela pourrait s'expliquer par les conditions écologiques favorables offertes par les stations où la présence du cèdre en est une bonne preuve. La richesse spécifique est basse dans les versants Est et Sud, soient 57,14% et 42,85% respectivement de la richesse spécifique totale. Ces derniers se trouvent en effet dans des conditions défavorables dues essentiellement aux facteurs anthropiques ayant dégradé le milieu naturel. A grande échelle, le massif forestier de Bénis Oudjana est peu diversifié en terme des arbres ligneux que celui obtenu par certains travaux effectués en Algérie dans les forêts de Constantine ou Skikda situées au Nord-Est de l'Algérie (Hadeff *et al.*, 2014 ; Rached-Kanouni *et al.*, 2015) et à l'étranger dans la forêt de Serra da Lousã au Portugal (Gonçalves *et al.*, 2010). Cela pourrait s'expliquer par les variations écologiques du milieu, et par la forte pression anthropique exercée notamment les incendies et le pâturage intensif. Ce dernier, s'il n'attaque pas directement les arbres de la forêt, il modifie considérablement le groupement végétal et rompt l'équilibre biologique qui assure la permanence de la forêt (Debazac, 1959 ; Menasri, 2014). Selon Akpo *et al.* (1999), une plus grande diversité implique une grande égalité des contributions individuelles.

Pour les peuplements exposés à l'Ouest, l'indice de Shannon-Weaver est de ( $0,5 \pm 0,4$  bits), cela peut être expliqué par la dominance d'une espèce par rapport aux autres espèces voisines. En revanche, les peuplements exposés au Nord, au Sud et à l'Est, cet indice est maximal et approximativement équivalent au  $H_{max}$ . Cela signifie que tous les individus sont répartis d'une façon égale pour toutes les espèces (Grall et Coïc, 2005). Les résultats de l'indice de Simpson sont identiquement assimilables à ceux de l'indice de Shannon, où le pin d'Alep est abondant dans les quatre parcelles du versant Ouest. Les indices de diversité de

Shannon-Weaver et de Simpson ont révélé un grand équilibre entre la distribution des espèces forestières des versants Nord, Sud et l'Est et une dominance de l'espèce pin d'Alep dans le versant Ouest.

Les valeurs de l'indice d'équitabilité indiquent qu'il existe un certain équilibre entre les populations étudiées dans les versants Nord et Est. La variation des valeurs de cet indice correspond proportionnellement à celles de la diversité. La plus petite valeur de  $E$  est enregistrée dans les peuplements d'exposition Ouest. Vu les résultats obtenus, il est donc évident qu'une valeur élevée de  $H'$  ne peut être interprétée en matière de perturbation du peuplement que si elle est accompagnée de l'indice d'équitabilité. La prise en compte de ces deux valeurs de manière concomitante est donc nécessaire pour apprécier l'état du milieu. L'attribution de seuils à la valeur de  $H'$  seule s'avère donc relativement inappropriée (Grall et Coic, 2005).

D'une manière globale, la composition des espèces forestières recensées dans les versants étudiés reflète des conditions bioclimatiques du semi-aride, dont les représentants sont caractérisés par une tolérance vis-à-vis des conditions climatiques défavorables et de la pauvreté du sol notamment en matière organique.

### **1.3. Structure spatiale**

#### **1.3.1. Structure horizontale**

Les caractéristiques dendrométriques sont des indicateurs majeurs pour mesurer l'évolution qualitative et quantitative des peuplements forestiers (Oosterhoom et Kapelle, 2000).

La surface terrière est un critère permettant de juger l'état d'une essence dans un peuplement. Pour l'ensemble de peuplements exposés au Nord, elle est de  $17,99 \pm 6,55 \text{ m}^2/\text{ha}$  (Tableau 10). La surface terrière étant étroitement liée au diamètre, les unités d'occupation des terres renfermant beaucoup d'individus de petit diamètre présentent de faibles surfaces terrières. Ainsi, les surfaces terrières les plus importantes sont observées dans les peuplements exposés au sud ( $33,42 \pm 8,7 \text{ m}^2/\text{ha}$ ), suivies par les peuplements d'expositions Ouest ( $19,02 \pm 8,13 \text{ m}^2/\text{ha}$ ). Les faibles valeurs s'observent dans les expositions Est ( $17,69 \pm 9,62 \text{ m}^2/\text{ha}$ ). Du point de vue spécifique, la surface terrière varie suivant les expositions.

**Tableau 10.** Caractéristiques quantitatives et qualitatives des peuplements de pin d'Alep.

Exposition	Parcelle	D (cm)	Ht (m)	Hf (m)	g (m <sup>2</sup> )	gh (m <sup>2</sup> )	G (m <sup>2</sup> )	Vt (m <sup>3</sup> )	Ve (m <sup>3</sup> )
Nord	N1	21,33	13,17	5,63	0,06	0,04	19,48	184,80	57,79
	N2	12,78	6,61	2,44	0,02	0,01	11,31	69,38	18,16
	N3	21,47	9,55	4,37	0,08	0,04	26,43	268,70	64,23
	N4	15,49	6,85	2,57	0,03	0,02	14,73	75,37	24,38
Est	E1	31,19	11,17	5,01	0,09	0,08	31,60	228,73	105,69
	E2	19,18	10,42	3,98	0,05	0,03	10,92	87,89	2,30
	E3	11,72	7,65	3,95	0,02	0,01	11,57	80,66	3,08
	E4	15,56	9,60	3,75	0,04	0,02	16,69	186,45	4,48
Sud	S1	19,05	8,86	2,61	0,06	0,03	37,25	368,61	6,91
	S2	8,99	5,57	2,72	0,03	0,01	23,82	292,48	5,61
	S3	26,87	6,79	6,00	0,15	0,06	29,09	276,98	10,46
	S4	35,54	12,70	7,29	0,17	0,10	43,52	459,01	16,61
Ouest	O1	14,31	12,80	5,15	0,03	0,02	22,64	257,39	6,77
	O2	5,78	3,19	3,98	0,01	0,00	7,34	40,15	1,61
	O3	16,12	12,14	11,77	0,04	0,02	25,90	321,10	17,59
	O4	7,59	6,13	5,59	0,01	0,00	20,19	260,52	15,67

Ainsi, l'ANOVA effectuée sur les valeurs obtenues des surfaces terrières et de diamètre moyen des arbres de *P. halepensis* de différentes expositions confirme les résultats précédents avec une différence très hautement significative ( $p = 0,000$ ). Les valeurs moyennes de diamètre oscillent de  $10,95 \pm 5,03$  cm pour les parcelles d'exposition Ouest à  $22,61 \pm 11,31$  cm pour les parcelles exposées à l'Est (Tableau 11).

Les valeurs les plus élevées de la hauteur totale des arbres sont respectivement  $9,7 \pm 1,5$  m pour les parcelles exposées à l'Est ; alors que pour la hauteur du fût les moyennes varient de  $3,7 \pm 1,5$  m pour l'exposition nord à  $6,62 \pm 3,5$  m pour l'exposition Ouest.

**Tableau 11.** Test d'ANOVA des paramètres dendrométriques des différentes expositions des peuplements de pin d'Alep du massif forestier des Bénis Oudjana.

Paramètres	Nord	Est	Sud	Ouest
D	$17,76 \pm 4,34^a$	$19,41 \pm 8,42^a$	$22,61 \pm 11,31^a$	$10,95 \pm 5,03^b$
H	$9,05 \pm 3,06^a$	$9,708 \pm 1,514^a$	$8,48 \pm 3,12^a$	$8,57 \pm 4,67^a$
Hf	$3,754 \pm 1,529^a$	$4,17 \pm 0,568^a$	$4,65 \pm 2,36^a$	$6,62 \pm 3,50^b$
G	$17,99 \pm 6,55^{ab}$	$17,69 \pm 9,62^b$	$33,42 \pm 8,71^a$	$19,02 \pm 8,13^c$
Vt	$149,6 \pm 95,5^a$	$145,9 \pm 73,3^{ab}$	$349,3 \pm 83,4^{ab}$	$219,81 \pm 23,3^b$
Ve	$41,12 \pm 3,2^a$	$28,95 \pm 1,2^a$	$9,90 \pm 4,92^a$	$10,41 \pm 7,52^a$

On note un faible volume du bois au sein des différentes placettes quelque soit l'exposition ; la plus forte valeur est obtenue dans les parcelles d'exposition Sud ( $349,3 \pm 83,4$  m<sup>3</sup>/ha), celles qui sont exposées à l'Est enregistrent la valeur la plus faible ( $145,9 \pm 73,3$

m<sup>3</sup>/ha). Ces valeurs soumises à l'analyse de la variance à un critère fixe montre qu'il existe une différence hautement significative (p = 0,002) entre les expositions du massif forestier (Tableau 12). Les peuplements exposés au Nord présentent la valeur du volume exploitable la plus importante par rapport aux autres expositions ; il est de l'ordre 41,12 ± 3,2 m<sup>3</sup>/ha.

**Tableau 12.** Test d'ANOVA à un critère fixe des paramètres dendrométriques en fonction des expositions des peuplements de pin d'Alep.

Paramètre	Source	DDL	SCE	CM	F	P	S
<b>D</b>	Exposition	3	6580	2193,4	8,22	0,000	***
	Erreur	464	123765	266,7			
	Total	467	130345				
<b>G</b>	Exposition	3	0,1667	0,055578	8,34	0,000	***
	Erreur	464	3,0939	0,006668			
	Total	467	3,2606				
<b>Ht</b>	Exposition	3	187,7	62,57	1,21	0,305	N.S
	Erreur	464	23965,2	51,65			
	Total	467	24152,8				
<b>Hf</b>	Exposition	3	404,0	134,679	13,58	0,000	***
	Erreur	205	2033,4	9,919			
	Total	208	2437,5				
<b>Vt</b>	Exposition	3	19,21	6,404	5,04	0,002	***
	Erreur	464	589,04	1,269			
	Total	467	608,25				
<b>Ve</b>	Exposition	3	83,4	27,80	0,36	0,784	N.S
	Erreur	205	15936,0	77,74			
	Total	208	16019,4				

(\*\*\* : Différences très hautement significatives selon l'ANOVA ; N.S : différences non significatives).

Nos résultats révèlent que les arbres à petits diamètres sont observés dans les parcelles à exposition Ouest. Cette observation s'explique par la prédominance des individus jeunes dans ces peuplements. Les grandes valeurs de diamètre moyen, de surface terrière et de volume total des arbres sont obtenues dans les parcelles à exposition Sud témoignent de la fréquence élevée d'individus âgés.

La comparaison de nos résultats avec ceux de la forêt de Chettaba montre que la densité moyenne, la surface terrière et le volume total y sont plus élevées dans la forêt de Chettaba avec une pluviométrie de 670 à 800 mm/an ; alors que celle de Benis Oudjana est de 382 à 451mm/an. Le plus faible diamètre moyen relevé dans la zone de notre étude s'explique par la fréquence élevée des individus jeunes de faible diamètre. Par contre, le diamètre moyen élevé observé dans la forêt de Chettaba résulte de la prédominance d'individus âgés (Rached-Kanouni *et al.*, 2020). Les individus de petit diamètre sont moins représentés en raison d'un déficit de recrutement. Par contre, la dominance des individus de gros diamètre pourrait être

liée aux facteurs climatiques conjugués aux facteurs anthropiques qui constituent les principaux obstacles à la régénération. Quant à la forêt de Bénis Oudjana, l'espèce se régénère mieux (zone la moins arrosée) où elle trouve son plein développement. Les résultats sont également utiles pour tout scientifique ou gestionnaire forestier qui souhaite les utiliser pour avoir une idée de la variabilité de la structure des peuplements de pin d'Alep dans les deux forêts afin de pouvoir proposer un plan de gestion rationnel et durable des ressources forestières.

Les résultats de la répartition du bois du pin d'Alep montrent l'existence de toutes les classes de diamètre (Tableau 13). Les peuplements sont essentiellement représentés par des gaulis et des perchis dont les moyennes de densité sont de l'ordre  $1190 \pm 756$  pieds/ha et de  $905 \pm 548$  pieds/ha respectivement, avec des effectifs plus faibles dans les petits bois ( $260 \pm 105$  pieds /ha) et en moyens bois ( $265 \pm 22$  pieds/ha) ; les gros bois et les très gros bois sont rares ( $100 \pm 32$  et  $30 \pm 41$  pieds/ha respectivement).

Pour la première classe de diamètre ( $D < 7,5$  cm), la régénération existe dans toutes les placettes et elle est quasiment absente pour la placette E1. Le petit bois (la classe de diamètre de 17.5 cm à 27.5cm) est présent dans toutes les placettes.

**Tableau 13.** Répartition des tiges de pin d'Alep par classes de diamètre.

Parcelle	G	P	PB	BM	GB	TGB
	$D \leq 7.5$	$7.5 < D \leq 17.5$	$17.5 < D \leq 27.5$	$27.5 < D \leq 42.5$	$42.5 < D \leq 62.5$	$62.5 < D$
<b>N1</b>	100	40	60	100	20	-
<b>N2</b>	180	180	120	-	20	-
<b>N3</b>	160	40	20	40	80	-
<b>N4</b>	120	200	120	100	0	-
<b>E1</b>	-	40	120	160	40	-
<b>E2</b>	60	60	40	80	-	-
<b>E3</b>	300	220	60	60	-	-
<b>E4</b>	180	100	80	-	40	-
<b>S1</b>	240	160	20	120	20	20
<b>S2</b>	660	120	60	80	-	20
<b>S3</b>	120	40	-	-	40	40
<b>S4</b>	100	40	-	60	80	20
<b>O1</b>	240	340	160	80	20	-
<b>O2</b>	920	160	20	40	-	-
<b>O3</b>	300	80	100	140	20	-
<b>O4</b>	940	380	60	-	20	20

Le tableau 14 synthétise les résultats précédents en montrant le taux actuel du peuplement pour les 6 catégories de diamètre (incluant la classe des régénérations naturelles).

Le taux des arbres à gros bois est élevé dans les peuplements exposés au sud, soit 83% (120 pieds/ha). 50% de l'effectif des gaulis est dans les peuplements exposés à l'ouest, soit (2400 pieds/ha) ce qui traduit le taux élevé de la régénération naturelle dans cette exposition.

**Tableau 14.** Pourcentage du bois par exposition.

<b>Exposition</b>	<b>G (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>PB (%)</b>	<b>BM (%)</b>	<b>GB (%)</b>	<b>TGB (%)</b>
<b>Nord</b>	11,7	12,7	30,8	22,6	30,0	0,0
<b>Est</b>	11,3	11,6	28,8	28,3	20,0	0,0
<b>Sud</b>	26,4	49,2	7,7	24,5	35,0	83,3
<b>Ouest</b>	50,4	26,5	32,7	24,5	15,0	16,7
<b>Total</b>	100 %	100%	100%	100 %	100%	100%

Du point de vue production de bois, la pinède de Bénis Oudjana est peu productive. Dans ce cas, il faut mettre en évidence un programme de production et d'exploitation dans les stations fertiles avec des conditions d'exploitation facile pour la population locale et les entreprises d'exploitation du bois. Bien que le maintien d'un couvert dense s'oppose à l'objectif « production de bois » qui implique des éclairés fortes ou plus ou moins dans les peuplements concernés.

Du fait que le pin d'Alep appartient aux résineux qui sont des espèces dynamiques et se régénèrent d'une manière assez bonne. Les résultats sont satisfaisants pour l'ensemble du massif forestier de Béni Oudjana, où les gaulis et les perchis sont les catégories les plus dominantes. Malgré que la région est caractérisée par une population riveraine et enclavée assez importante. Ce taux aurait pu être plus conséquent si l'ensemble d'occupation forestière était mieux protégé des perturbations anthropozoogènes.

### **1.3.2. Structure spatiale verticale**

Elle présente la stratification verticale de la formation forestière et renseigne sur la hauteur du peuplement, son degré de fermeture, la densité, l'étalement des houppiers et l'étagement de la végétation (Rajoelison, 1997). Il s'avère intéressant de connaître le degré de recouvrement ou de fermeture qui est en étroite relation avec la pénétration de lumière dans les sous-bois car c'est l'un des facteurs qui déterminent l'installation de la régénération naturelle. Dans l'analyse verticale, on étudie également la structure des hauteurs.

Elle est donnée par la distribution du nombre de tiges de toutes les parcelles ramenées à l'hectare pour chaque classe de hauteur, elle nous renseigne sur la stratification verticale du peuplement (Lantovololona, 2010).

La distribution des arbres par classe de hauteur dans la forêt de Bénis Oudjana illustrée par l’histogramme de la figure 30. Nous observons ici que les arbres ayant une hauteur inférieure à 5 m (stade fourré à gaulis) sont plus nombreux (41,12 % des arbres) ; cette classe comporte un nombre d’individus important à cause de la régénération qui reste assez élevée.

La deuxième classe est représentée par l’intervalle de classes entre [5-10[(gaulis) qui forment 20,36% du peuplement. La classe [10-15[(bas perchis) comprend un nombre d’individus moins important avec un pourcentage de 16,37 %. La classe du haut perchis comprise entre 15 à 20 est représentée par un taux de 12,77 %. Les classes de hauteurs supérieures à 20 m sont les moins représentées dans le massif forestier de Bénis Oudjana.

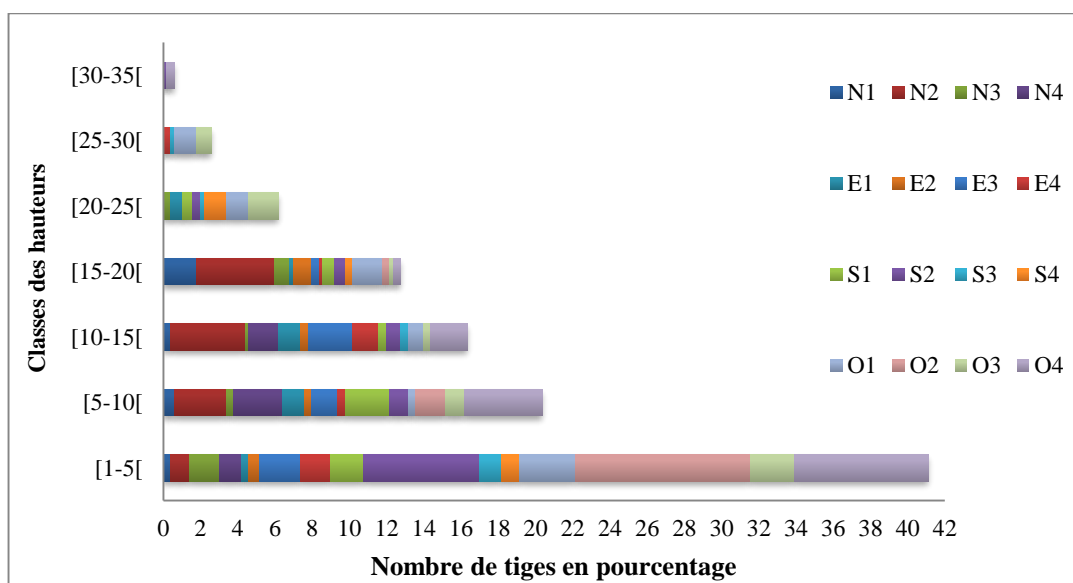


Figure 30. Distribution de tiges par classes de hauteurs dans les 16 parcelles d’étude.

#### 1.4. Patron de distribution spatiale et indices de complexité structurale

La structure spatiale des espèces est l’un des paramètres clés en écologie pour la compréhension des processus écologiques et du fonctionnement des écosystèmes forestiers. Elle représente l’arrangement spatial des individus dans la forêt et constitue un thème central en écologie (Pitman *et al.*, 2001). Il existe plusieurs techniques pour caractériser la distribution spatiale des arbres dans la forêt (Motz *et al.*, 2010). Dans le cadre de la présente étude, nous avons utilisé la méthode du plus proche voisin de Clark et Evans, l’indice de mélange et l’indice de différenciation de diamètres (Gadow et Hui, 2002). Les résultats de ces trois indices sont illustrés dans le tableau 15.

L’indice d’agrégation de Clark et Evans est calculé pour les 16 parcelles. Lorsque tous les arbres ont été observés, ses valeurs sont comprises entre 0,8 et 1,7 ; ces dernières valeurs indiquent une disposition spatiale des arbres presque régulière. Les valeurs moyennes de

l'indice  $R$  pour chaque exposition varie de  $1,2 \pm 0,1$  pour les placettes d'exposition Nord à  $1,6 \pm 0,1$  pour les placettes orientées vers l'Ouest.

**Tableau 15.** Valeurs des indices  $R$ ,  $Mi$  et  $Tij$  de peuplements pin d'Alep.

Exposition	Parcelle	$R$	$Mi$	$Tij$
Nord	N1	1,2	1,0	0,3
	N2	1,1	1,0	0,3
	N3	1,1	0,8	0,4
	N4	1,4	0,5	0,7
Moyenne		$1,2 \pm 0,1^b$	$0,8 \pm 0,2^a$	$0,4 \pm 0,2^b$
Est	E1	1,5	1,0	0,5
	E2	1,2	0,3	0,9
	E3	1,3	0,3	0,4
	E4	1,2	0,0	1,0
Moyenne		$1,3 \pm 0,1^{ab}$	$0,3 \pm 0,4^b$	$0,7 \pm 0,3^{ab}$
Sud	S1	1,5	0,8	0,6
	S2	1,5	0,3	0,3
	S3	0,8	0,8	0,6
	S4	1,5	0,5	0,9
Moyenne		$1,3 \pm 0,3^{ab}$	$0,5 \pm 0,2^{ab}$	$0,6 \pm 0,3^{ab}$
Ouest	O1	1,7	0,5	1,0
	O2	1,6	0,8	0,9
	O3	1,4	0,8	0,9
	O4	1,5	0,8	0,9
Moyenne		$1,6 \pm 0,1^a$	$0,6 \pm 0,1^{ab}$	$0,9 \pm 0,005^a$

(Dans une colonne, les moyennes suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes d'après le test de Fisher).

L'indice de mélange des espèces  $Mi$  dans sa formulation pour les 4 arbres les plus proches examine la probabilité que l'arbre le plus proche soit de la même espèce que l'arbre de référence.

L'indice  $Mi$  de 16 parcelles de pin d'Alep de la forêt de Bénis Oudjana est compris entre 0,3 et 1, et il a été calculé pour chaque arbre séparément. Les valeurs moyennes de l'indice pour les placettes de chaque exposition ont été calculées à partir des indices moyens des arbres individuels. Lorsque trois arbres voisins, les plus proches ont été pris en compte ; les résultats indiqués étaient des valeurs d'indice allant de  $0,3 \pm 0,4$  pour les peuplements exposés à l'Est à  $0,8 \pm 0,2$  pour les peuplements exposés au Nord.

L'indice de différenciation des diamètres  $Tij$  a été calculé pour tous les arbres. Pour l'ensemble de la placette, sa valeur est prise comme un indice moyen des arbres individuels de la placette. Comme pour l'indice de mélange des essences, les calculs sont faits à partir de 4 arbres les plus proches les uns des autres. Les valeurs de l'indice sont comprises entre 0,3 et 1 pour les 16 parcelles. Nous constatons que les moyennes de l'indice les plus faibles sont obtenues pour les parcelles d'exposition Nord ( $0,4 \pm 0,2$ ) et les plus importantes sont enregistrées pour les peuplements des parcelles d'exposition Ouest ( $0,9 \pm 0,005$ ).

L'analyse statistique par le biais du test de Fisher (Tableau 15), montre une différence significative entre les expositions pour les indices  $R$  et  $T_{ij}$ . Les résultats obtenus indiquent qu'il existe trois groupes homogènes dont le premier groupe (a) avec les plus grandes valeurs et sont respectivement  $1,6 \pm 0,1$  et  $0,9 \pm 0,005$  ; il présente les peuplements à exposition Ouest. Un second groupe (ab) qui est intermédiaire caractérise les peuplements à exposition Est et Sud ; alors que le troisième groupe (b) avec les moyennes les plus faibles ( $R = 1,2 \pm 0,1$  et  $T_{ij} = 0,4 \pm 0,2$ ), se manifeste dans les peuplements à exposition Nord. Contrairement aux résultats précédents, le même test appliqué sur l'indice  $M_i$  montre que les peuplements à exposition Nord appartiennent au groupe (a) caractérisé par la moyenne la plus élevée ( $0,8 \pm 0,2$ ). Le groupe (b) est affecté aux peuplements à exposition Est avec la moyenne la plus faible ( $0,3 \pm 0,4$ ). Dans notre cas, les peuplements exposés au Sud et à l'Ouest qui appartiennent au groupe (ab) et la même lettre ne sont pas statistiquement significatives.

L'ANOVA indique une différence non significative des indices d'agrégation de Clark et Evans et de mélange des espèces entre les expositions du massif (Tableau 16). Alors que l'indice de différenciation des diamètres indique une différence significative.

**Tableau 16.** ANOVA à un facteur fixe (expositions) et les variables  $R$ ,  $M_i$  et  $T_{ij}$ .

Paramètre	Source	DDL	SCE	CM	F	P	S
<b>R</b>	Exposition	3	0,2927	0,09755	1,92	<0.1	N.S
	Erreur	12	0,6105	0,05088			
	Total	15	0,9032				
<b>M<sub>i</sub></b>	Exposition	3	0,4180	0,13932	1,75	<0.2	N.S
	Erreur	12	0,9531	0,07943			
	Total	15	1,3711				
<b>T<sub>ij</sub></b>	Exposition	3	0,4926	0,16419	3,44	0,05	*
	Erreur	12	0,5724	0,04770			
	Total	15	1,0650				

(\* : Différence significative; N.S : différences non significatives selon l'ANOVA). (DDL : degré de liberté ; SCE : somme des carrés des écarts ; CM : carrés moyens ; F : Fisher ; P : probabilité ; S : signification).

Les valeurs de l'indice d'agrégation de Clark et Evans sont interprétées en termes de différents types d'agencements spatiaux. Les valeurs de l'indice sont toutes supérieures à 1 avec une légère différence entre les expositions du massif forestier et cela était prouvé par l'ANOVA, où il n'y a pas de différence significative entre eux. En effet, cet indice augmenterait avec la densité des parcelles. On note que les parcelles qui ont un effectif élevé des arbres sont les plus régulières. Pour la forêt de Bénis Oudjana, les parcelles orientées vers l'Ouest sont les plus denses et donc les plus régulières avec  $2010 \pm 1390$  pieds/ha, où l'indice

est 1,6. Cependant, les peuplements orientés vers l'Est et le Sud semblent aussi être réguliers et avec des densités moins importantes que l'exposition Ouest (725 et 755 pieds/ha respectivement) ; leur indice d'agrégation est 1,3. Les parcelles exposées au Nord sont les moins denses avec  $430 \pm 105$  pieds/ha et montrent une légère tendance à la régularité avec un indice d'agrégation égal à 1,2.

Dans ce contexte, Gonçalves *et al.* (2010) citent qu'il y a une corrélation importante entre l'indice d'agrégation, la densité et la régénération naturelle des semences de pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton) et de chêne anglais (*Quercus robur* L.) dans la forêt de Serra da Lousã au Portugal. Ngo Bieng (2007), dans ses investigations portant sur la construction des modèles de structure spatiale des peuplements mélangés de chêne sessile et de pin sylvestre de la région centre de France, montre que le faible nombre d'individus dans les placettes mélangées est lié aux faibles valeurs de  $R$ , qui à son tour la cause d'une tendance à la répulsion ou à la forme grégaire dans ces peuplements mélangés. Et cela était citée dans plusieurs études sur des peuplements mélangés feuillus-résineux (Mosandl et Kleinert, 1998 ; Hiura et Fujiwara, 1999 ; Lookingbill et Zavala, 2000).

Les valeurs de l'indice global  $M_i$  sont toutes inférieures à 1, avec une légère différence entre les expositions du massif forestier et cela est illustré dans le tableau 16 ; l'ANOVA à un critère fixe indique qu'il n'existe pas des différences significatives entre les quatre expositions du massif forestier.

Les résultats de  $M_i$  montrent que l'action anthropique est importante dans les parcelles d'étude où les coupes illicites de *Quercus ilex* et de *Juniperus oxycedrus* ont été observées surtout sur celles orientées à l'Est. La population locale depuis longtemps utilise le chêne vert, qui est un symbole de force et de longévité, il a été intensivement exploité pour le chauffage, le tanin et le charbon de bois. Il est même considéré comme l'un des meilleurs bois de feu car il permet l'un des meilleurs rendements calorifiques (Hani *et al.*, 2021). L'utilisation du bois de *Juniperus oxycedrus* pour la fabrication des poteaux de clôture est très répandue dans toute la zone. Les exploitations anarchiques des espaces naturelles par ces actions affectent non seulement le mélange des espèces forestiers, mais ils changent aussi la structure et la dynamique de ces écosystèmes (Pommerening, 2002 ; Hani *et al.*, 2021), cela est justifié par la présence des espèces indicatrices de ces perturbations telles que l'Asphodèle (*Asphodeline lutea*), espèce indicatrice du surpâturage (Menasri, 2014). Cependant, ces formations végétales sont soumises à un pâturage extensif non contrôlé. Les troupeaux des ovins, de caprins et de bovins séjournent en forêt plusieurs mois durant l'année sans surveillance, empêchant en particulier les jeunes pousses de chêne vert, de genévrier, de pin d'Alep, de

cèdre de l'Atlas et d'autres espèces de se développer (Rached-Kanouni *et al.*, 2020). Et c'est parce que il y a un déséquilibre entre les ressources fourragères disponibles, et les besoins du cheptel, étant donné que l'essentiel de l'alimentation dans la forêt de Bénis Oudjana provient de ces ressources naturelles.

Il a été prouvé par plusieurs scientifiques forestiers cités par Pommerening *et al.* (2017) et Keren *et al.* (2020), que les actions anthropozoïques (coupes illicites en particulier et le pacage intensif) exercées sur les forêts du monde entier ont un effet important sur la mixité de ces derniers.

L'indice de différenciation de diamètre n'a pas permis de tirer aucune conclusion précise, il augmente peut-être avec l'âge des peuplements de pin d'Alep dont la majorité ne sont pas des peuplements équiens. Dans ce contexte, Pommerening *et al.* (2011) et Indir *et al.* (2013) rapportent que *Tij* est en fonction de l'âge des peuplements. L'indice *Tij* augmente avec la différence entre les classes d'âge au sein d'un peuplement, donc la différenciation de la structure diamétrique devient importante, ceci est d'un côté et la faible différenciation du diamètre se rencontre chez les peuplements équiens de l'autre côté, cela est largement soulignée par plusieurs auteurs dans la littérature (Pretzsch 2009 ; Indir *et al.*, 2013 ; Keren *et al.*, 2020 ; Hani *et al.*, 2021).

Les valeurs de l'indice de différenciation de diamètre peuvent être classées et interprétées selon la différence de taille entre les arbres voisins. Une faible valeur de l'indice indique que les voisins ont des tailles proches (Ngo Bieng, 2007 ; Indir *et al.*, 2013 ; Pommerening *et al.*, 2017 ; Pommerening et Grabarnik, 2019), En effet, dans la présente étude, les valeurs moyennes de l'indice sont partiellement différentes entre les expositions cardinales du massif forestier de Benis Oudjana, cela est également représenté dans le tableau 16, où l'ANOVA donne une valeur  $p = 0,05$  reflétant une différence significative entre les principales expositions.

Pour la majorité des peuplements étudiés, l'indice *Tij* a pris des valeurs approximatives comprises entre 0,4 et 0,9 pour les quatre expositions. Les peuplements exposés au Sud appartiennent à la troisième classe de différenciation (grande différenciation), ce qui signifie que l'arbre ayant le petit Dhp est de 30 à 50 % de la taille de l'arbre de référence. D'autre part, dans les peuplements exposés à l'Ouest et à l'Est, les arbres avec le petit Dhp, sont moins de 30% de la taille du voisin parce que l'indice de différenciation de diamètre pour les deux expositions est  $(0,9 \pm 0,005)$  et  $(0,7 \pm 0,3)$  respectivement ; ce qui représente une très grande différenciation. Dans l'exposition Nord, un niveau de différenciation moyen avec un *Tij* de  $0,4 \pm 0,2$ , où l'arbre avec le plus petit Dhp est 50 à 70% de la taille de l'arbre de référence.

Dans le cadre de la présente étude, les résultats de l'ANOVA sont en contradictoires avec ceux de test de Fisher. Notons que la comparaison multiple significative est suivie par une ANOVA non-significative pour certains indices (l'indice d'agrégation de Clark et Evans et l'indice de mélange des espèces). Ces résultats sont constatés, quand la valeur  $p$  du tableau d'ANOVA est supérieure au niveau de significativité alpha (Tableau 16). Et quand au moins une valeur  $p$  associée aux comparaisons multiples par paires est inférieure au niveau de significativité alpha (Annexes IV, Tableaux 1, 2 et 3). Hsu (1996), a souligné que dans certains cas, le test de comparaisons multiples peut être plus puissant que le test d'ANOVA. Il est donc possible de détecter des différences significatives malgré que la valeur  $p$  d'ANOVA soit supérieure au niveau de significativité. En général, nous pouvons nous fier aux résultats des comparaisons multiples malgré un effet global non significatif.

### **1.5. Structure démographique des peuplements naturels de pin d'Alep**

L'aménagement des peuplements forestiers nécessite la maîtrise de la structure en diamètre et en hauteur des arbres (Van Laar et Akça, 2007). Ces structures sont révélatrices des événements liés à la vie des peuplements (Rondeux, 1999 ; Feeley *et al.*, 2007).

Il est évident que la structure démographique des peuplements peut être décrite et analysée au moyen d'autres distributions telles que la distribution de Weibull assez couramment citée dans la littérature forestière spécialisée (Bailey et dell, 1973 ; Kozak et Yang, 1978 ; Burk et Newberry, 1984 ; Shifley et Lentz, 1985 ; Rondeux, 2021). Cette distribution est utilisée pour apprécier la structure de la végétation. Par ailleurs, la définition des options d'aménagement d'un peuplement suppose d'abord l'établissement de ces structures en diamètre et en hauteur (Glèlè Kakaï *et al.*, 2016).

La distribution des arbres en classes de diamètre montre une situation différente en fonction des quatre expositions pour les peuplements de pin d'Alep dans la forêt de Bénis Oudjana. Les valeurs du coefficient de forme  $c$  de la distribution de Weibull sont comprises entre 0,812 et 1,323 (Tableau 17).

**Tableau 17.** Valeurs des trois paramètres de la distribution théorique de Weibull.

<b>Exposition</b>	<b>Forme c</b>	<b>Echelle b</b>	<b>Seuil a (cm)</b>	<b>Forme de la distribution</b>
<b>Nord</b>	1,323	23,15	5	En cloche
<b>Est</b>	1,241	18,06	5	En cloche
<b>Sud</b>	0,979	28,87	5	En J-renversé
<b>Ouest</b>	0,812	9,870	5	En J-renversé

Pour les peuplements exposés au Sud et à l'Ouest, la répartition des arbres selon le diamètre présente une forme en J-renversé, avec un paramètre de forme  $c$  prenant une valeur

inférieure à 1 (0,979 et 0,812 respectivement). Les tiges de diamètres compris entre 5 et 15 cm sont largement représentées dans les peuplements de pin d'Alep pour les deux expositions Sud et Ouest (Figures 31 et 32). Ce qui explique la dominance des gaulis et des perchis. En plus les diamètres inférieurs à 5 cm sont importants pour l'exposition Ouest. Cette structure est donc caractéristique des peuplements naturels à fort potentiel de régénération, traduisant une dynamique progressive des populations de *P. halepensis* pour ces deux expositions.

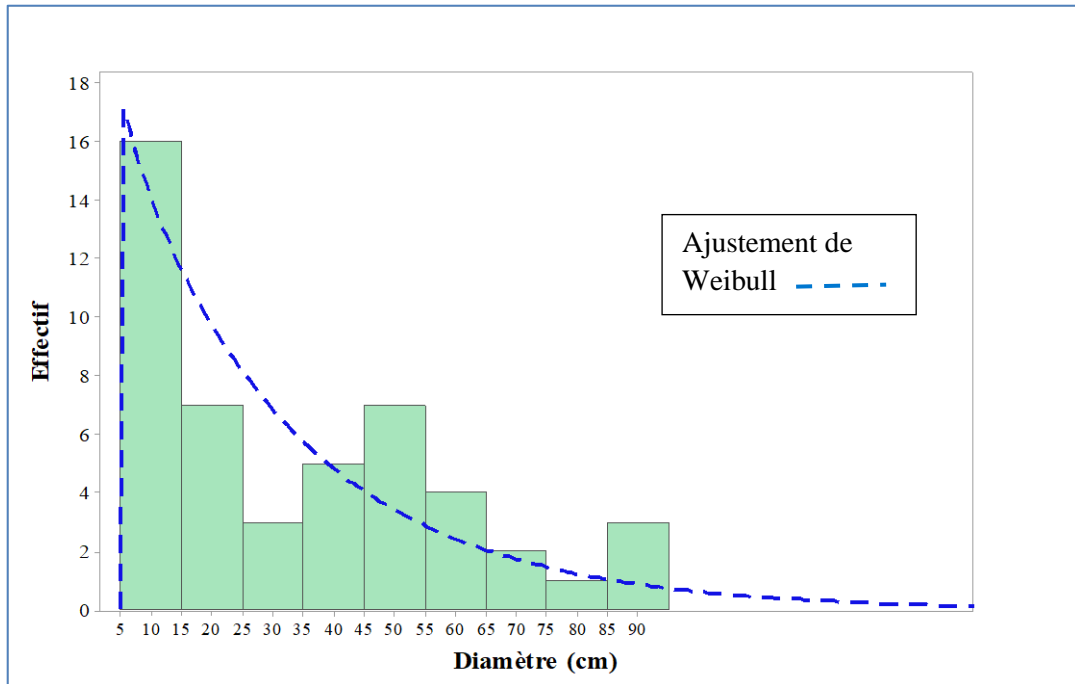


Figure 31. Structure en diamètre des groupements de pin d'Alep exposés au Sud.

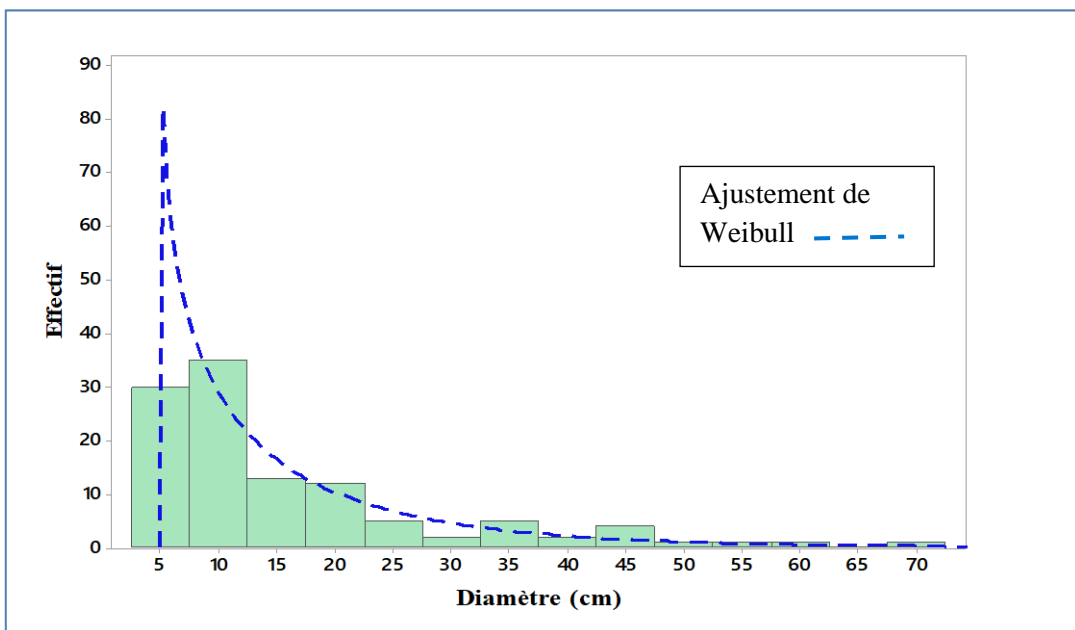


Figure 32. Structure en diamètre des groupements de pin d'Alep exposés à l'Ouest.

Les deux expositions Nord et Est présentent une distribution dont l'allure s'apparente à une courbe en forme en cloche avec une dissymétrie droite (Figures 33 et 34), avec un paramètre de forme  $c$  légèrement supérieur à 1 (1,323 et 1,241 respectivement). Cette distribution exponentiellement décroissante centrée sur la classe de diamètre [10-20 cm], par ailleurs, les individus de diamètre supérieur à 70 cm sont quasi-totalement absents pour les deux expositions. Cette distribution est caractéristique des populations à fort potentiel de régénération mais présentant un problème de survie lors de la transition entre les stades de développement.

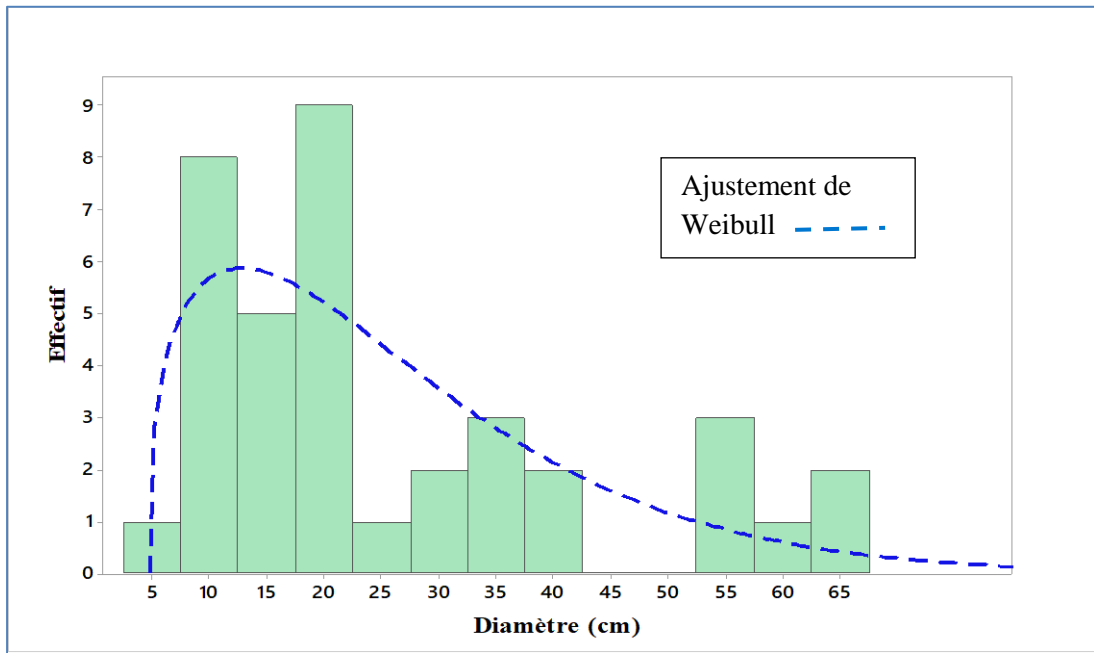


Figure 33. Structure en diamètre des groupements de pin d'Alep exposés au Nord.

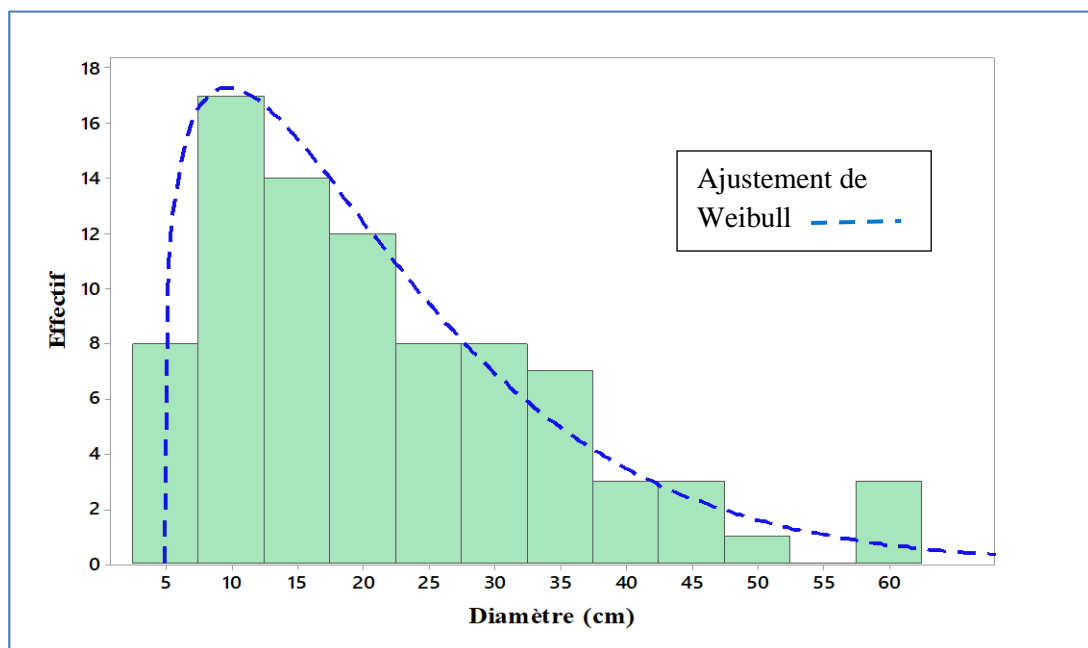


Figure 34. Structure en diamètre des groupements de pin d'Alep exposés à l'Est.

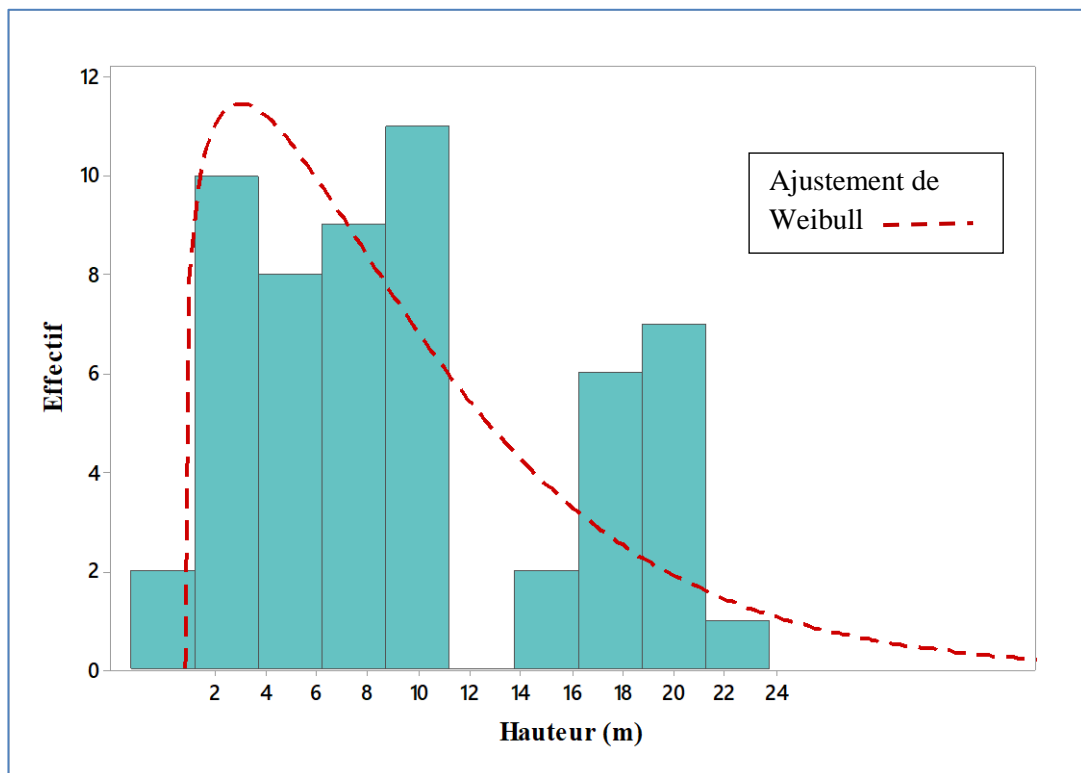
Les résultats de la structure en hauteur des peuplements naturels du pin d'Alep du massif forestier des Béni Oudjana sont illustrés dans le tableau 18. Le paramètre (c) est inférieur à 3,6 pour toutes les expositions de cette forêt. Comme dans le cas de la structure diamétrique, les valeurs du coefficient de forme c de la distribution de Weibull sont comprises entre 0,807 à 1,282.

**Tableau 18.** Valeurs des trois paramètres de la distribution théorique de Weibull.

Exposition	Forme (c)	Echelle (b)	Seuil (a) m	Forme de distribution
Nord	1,207	9,187	1,30	En cloche
Est	1,282	8,476	1,30	En cloche
Sud	0,807	7,104	1,30	En J-renversé
Ouest	0,849	6,447	1,30	En J-renversé

La répartition des arbres inventoriés par classes de hauteur totale à 2 m d'amplitude selon l'exposition des placettes est illustrée par les figures 35 et 36.

Les graphiques de ces figures présentent une distribution en cloche dissymétrique déplacée vers la droite et centrée sur la classe de hauteur (2 à 6 m) pour l'exposition Nord (Figure 35) et de (2 à 8 m) pour les arbres dans les placettes exposées à l'Est (Figure 36). Par ailleurs, les individus à hauteur supérieure à 28 m sont absents pour l'exposition Nord et faiblement représentés dans l'exposition Est. Cette dissymétrie droite indique la prédominance dans le peuplement d'individus jeunes.



**Figure 35.** Structure en hauteur des groupements de pin d'Alep exposés au Nord.

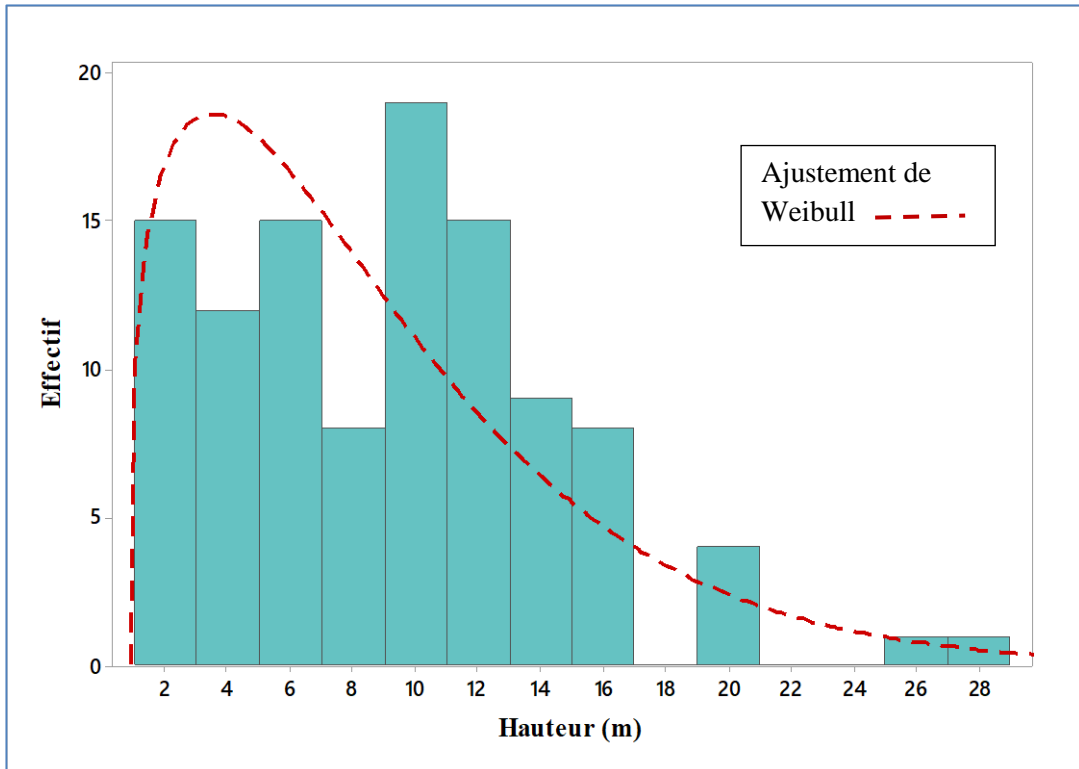


Figure 36. Structure en hauteur des groupements de pin d'Alep exposés à l'Est.

Par contraste, les peuplements exposés au Sud et à l'Ouest, la répartition des arbres présente une forme en J-renversé (Figures 37 et 38), avec un paramètre de forme  $c$  de la distribution théorique de Weibull prenant des valeurs inférieures à 1.

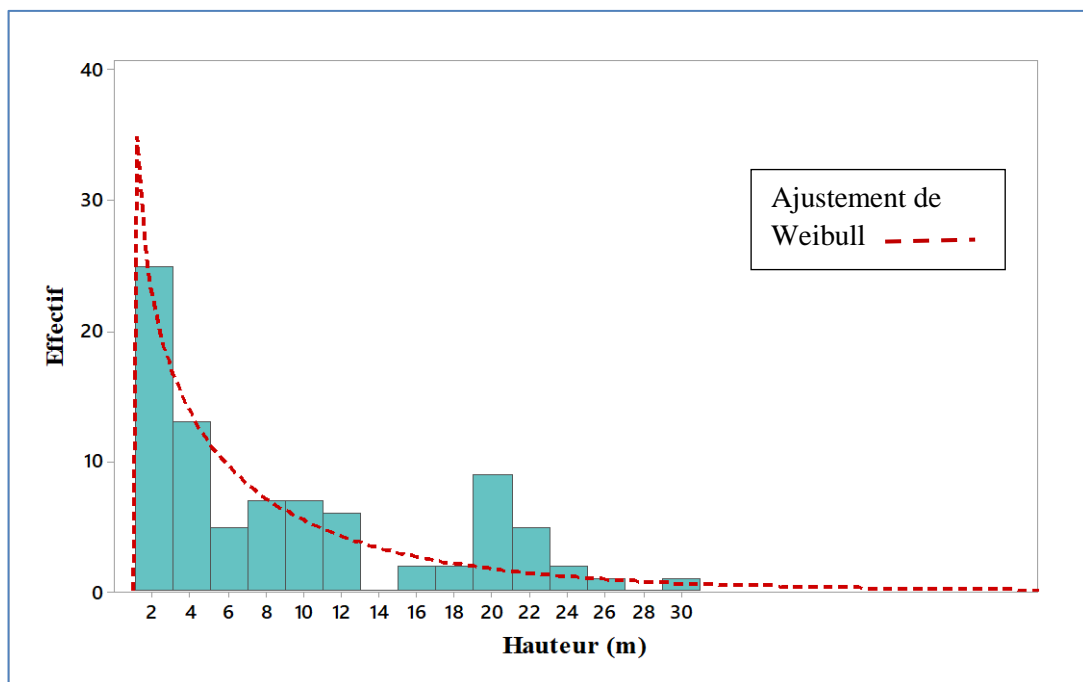
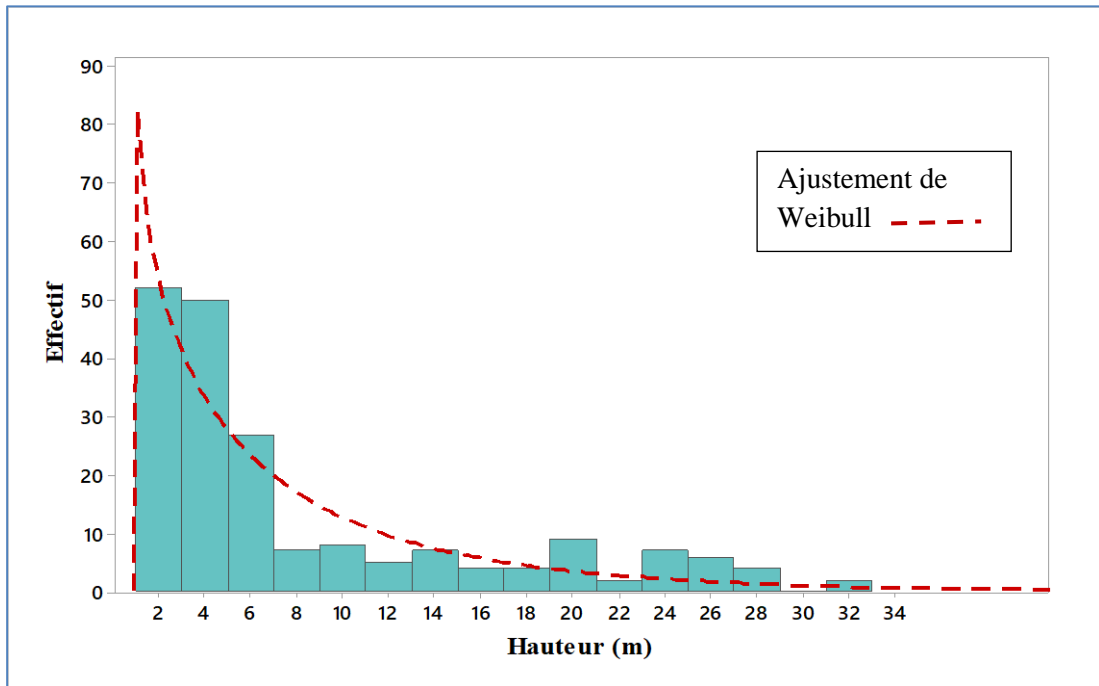


Figure 37. Structure en hauteur des groupements de pin d'Alep exposés au Sud.



**Figure 38.** Structure en hauteur des groupements de pin d'Alep exposés à l'Ouest.

Les arbres ayant la hauteur comprise entre 2 à 4 m sont les mieux représentés. Par ailleurs, les individus à hauteur supérieures à 28 m sont aussi observés avec des effectifs assez faibles. La distribution est donc asymétrique et caractéristique des peuplements naturels à prédominance des individus jeunes traduisant une dynamique progressive des populations de pin d'Alep dans ces expositions du massif.

Les structures en diamètre et en hauteur des peuplements naturels montrent une prédominance de jeunes individus ( $c < 1$  ;  $1 < c < 3,6$ ) pour les différentes expositions du massif forestier de Bénis Oudjana. Les structures en diamètre, établies sur la base de la répartition des individus en classes de diamètre (5-10 cm), sont caractérisées par un grand nombre de petits arbres et une réduction régulière du nombre d'individus d'une classe à la suivante. Par ailleurs, la structure démographique des arbres en classes de hauteur révèle une prédominance d'arbres de taille moyenne (2 à 8 m). Ces structures montrent une évolution positive des peuplements de *P. halepensis* dans ce massif où le renouvellement du peuplement est assuré du fait de son pouvoir d'expansion extraordinaire et de ses faibles exigences (Quezel, 1986 ; Bentouati, 2006 ; Feeley *et al.*, 2007).

La forme classique de la structure d'un peuplement inéquienne ou multispécifique est caractérisée par une fréquence élevée de jeunes individus dans les petites classes de diamètre et une diminution progressive des individus au fur et à mesure que le diamètre devient grand (Glèlè Kakai *et al.*, 2016). La distribution par classe de diamètre est utilisée pour comprendre

la dynamique des arbres et peut être utilisée pour évaluer l'impact de la pression anthropique sur les peuplements forestiers (Cunningham, 2001).

La distribution par les classes de diamètre et de hauteur montre des variations en fonction des versants. Selon la littérature, les adaptations aux conditions écologiques, la concurrence pour les ressources, les activités anthropozoïques et l'exploitation seraient à la base de cette variabilité structurale (Herrero-Jáuregui *et al.*, 2012 ; Sandjong Sani *et al.*, 2018 ; Kouyate *et al.* 2020).

La structure en diamètre et en hauteur des peuplements naturels de *P. halepensis* dans le massif forestier de Bénis Oudjana révèle globalement une grande représentativité des individus jeunes dans tout le massif. Le pin d'Alep présente des histogrammes de distribution en allure de J-renversé pour les versants Ouest et Sud. Ces structures montrent une évolution positive des peuplements naturels de cette espèce dans ce massif où le renouvellement des peuplements est assuré (Feeley *et al.*, 2007). Cela traduit une bonne capacité d'adaptation de l'espèce aux contraintes du milieu telles que les incendies et le pâturage. Par contre, les allures en cloche des histogrammes de distribution en diamètre et en hauteur pour les versants Nord et Est, sont donc indicatrices de perturbation, le plus souvent causées par l'homme à la recherche de la satisfaction de ses besoins qui sont parfois vitaux (Dan Guimbo *et al.*, 2012). De nombreuses études ont également conclu que les allures en cloche traduisent des peuplements instables ou dégradés par des causes anthropiques ou naturelles (sécheresse successive, pâturage et feux de forêts), caractérisé par une absence ou une faible proportion d'individus dans une ou plusieurs classes (Kebenzikato *et al.*, 2014 ; Zounon *et al.*, 2019 ; Kagambega *et al.*, 2019 ; Rached-Kanouni *et al.*, 2020 ; Hani *et al.*, 2020).

A l'instar de l'étude menée sur la forêt de Chettaba (Constantine), Rached-Kanouni *et al.*(2020) concluent que la forte représentativité des individus de grand diamètre selon la structure diamétrale des peuplements naturels de *P. halepensis* est expliquée par les facteurs anthropiques tels que le surpâturage ou les incendies répétés qui sont susceptibles d'entraver la survie des jeunes plants et rendre la régénération naturelle très faible, voire nulle.

L'établissement et l'interprétation judicieuse des structures en diamètre des peuplements forestiers donnent une idée relativement précise des conditions de vie des peuplements et permet d'en déduire des options d'aménagement (Glèlè Kakai *et al.*, 2016). Toutefois, ces structures ne peuvent pas remplacer un suivi à long terme des paramètres structuraux d'un peuplement (Rondeux, 1999 ; Glèlè Kakai *et al.*, 2016 ; Rondeux, 2021). Il est toujours plus utile de prévoir la stabilité écologique d'un peuplement dans le long terme afin de mieux adapter les options d'aménagement. En effet, un peuplement forestier naturel

présente une structure en diamètre qui évolue dans le temps suivant différents facteurs autres que la seule croissance des arbres (Glèlè Kakaï *et al.*, 2016). Toutefois, du fait que les données à long terme sont rarement disponibles, l'analyse de la structure en classes de diamètre constitue une bonne alternative (Rondeux, 1999 ; Glèlè Kakaï *et al.*, 2016 ; Zounon *et al.*, 2019 ; Kagambega *et al.*, 2019 ; Rached-Kanouni *et al.*, 2020 ; Hani *et al.*, 2020 ; Rondeux, 2021).

## **2. Qualité des peuplements naturels de pin d'Alep**

### **2.1. Stabilité**

La stabilité des peuplements de *P. halepensis* Mill. est mesurée à l'aide du rapport hauteur/diamètre (H/D). Ce rapport est utilisé à l'échelle du peuplement ; on l'appelle alors parfois « facteur de stabilité » pour quantifier les risques de chablis importants (Oswald, 1984). Dans le second cas, on l'appelle plutôt « facteur d'élancement » ; il ne s'agit pas seulement d'un facteur de forme mais, il permet de caractériser la stabilité d'un peuplement et donne une idée sur la dynamique de sa croissance (Rajoelison *et al.*, 2008). Il renseigne également sur le statut social des arbres (Pardé et Bouchon, 1988).

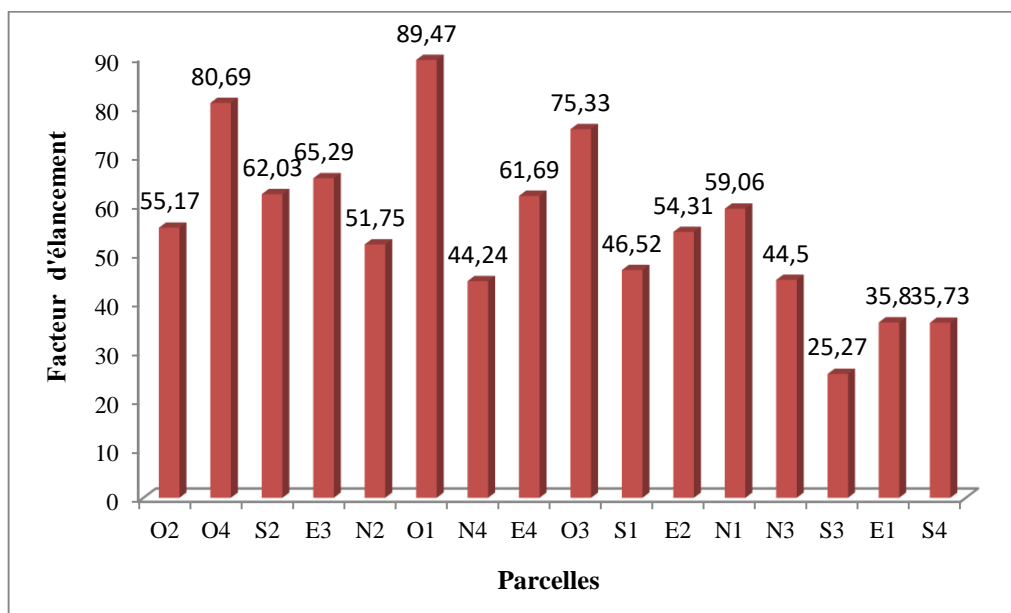
Le tableau 19 résume les résultats obtenus pour chaque exposition du peuplement de pin d'Alep du massif forestier de Béni Ouadjana (Tableau 19).

**Tableau 19.** Valeurs moyennes de FE des parcelles étudiées.

<b>Parcelle</b>	<b>H (m)</b>	<b>D (cm)</b>	<b>FE</b>	<b>g-gh (cm<sup>2</sup>)</b>
<b>O2</b>	3,19	5,78	55,17	0,38
<b>O4</b>	6,13	7,59	80,69	0,97
<b>S2</b>	5,57	8,99	62,03	1,90
<b>E3</b>	7,65	11,72	65,29	0,73
<b>N2</b>	6,61	12,78	51,75	0,98
<b>O1</b>	12,80	14,31	89,47	1,09
<b>N4</b>	6,85	15,49	44,24	0,85
<b>E4</b>	9,60	15,56	61,69	2,27
<b>O3</b>	12,14	16,12	75,33	2,01
<b>S1</b>	8,86	19,05	46,52	3,57
<b>E2</b>	10,42	19,18	54,31	1,66
<b>N1</b>	13,17	21,33	59,06	2,16
<b>N3</b>	9,55	21,47	44,50	4,16
<b>S3</b>	6,79	26,87	25,27	8,88
<b>E1</b>	11,17	31,19	35,80	1,14
<b>S4</b>	12,70	35,54	35,73	6,82

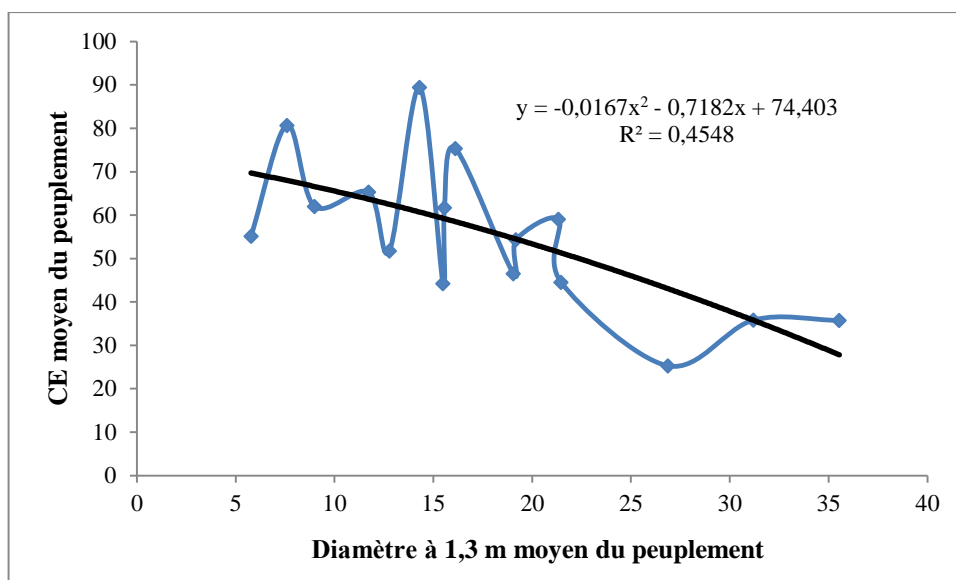
La valeur de (g - gh) de ces peuplements de *Pinus halepensis* varie de 0,38 à 8,88 cm<sup>2</sup>. Toutes les parcelles ayant un diamètre moyen compris entre 5,78 cm (placette O2) et 26,87 cm (placette S3) ont tous un (g - gh) positif. Ce qui signifie que dans ces peuplements les arbres sont en moyenne plus gros que l'arbre moyen. Ces états de développement correspondent alors à un stade où les arbres renforcent leur stabilité en se développant dans le sens de la largeur. La variation de (g - gh) est irrégulière entre 5,78 cm et 26,87 cm. Cependant, on constate que la valeur de ce paramètre diminue avec le diamètre moyen entre le diamètre de 31,19 cm (placette E1) et le diamètre de 35,73 cm (placette S4).

Parmi les 12 placettes, ayant un diamètre moyen compris entre 5,78 et 21,33 cm, dix (O2, O4, S2, E3, N2, O1, E4, O3, E2 et N1) présentent des facteurs d'élanement moyens compris entre 51,75 et 89,47% ; alors que les deux parcelles N4 et S1 ont des FE inférieurs à 50 % (Figure 39). Entre les placettes N3 ; S3, E1 et S4 qui ont respectivement 21.47 cm, 26,87 cm, 31,19 cm et 35,54 cm de diamètre moyen, la variation de H /D est irrégulière et inférieure à 50%. Le facteur d'élanement des peuplements le plus faible est de la placette S3. La figure 39 montre le facteur d'élanement en fonction du diamètre moyen du peuplement ; ainsi que la courbe de tendance polynomiale de la fonction.



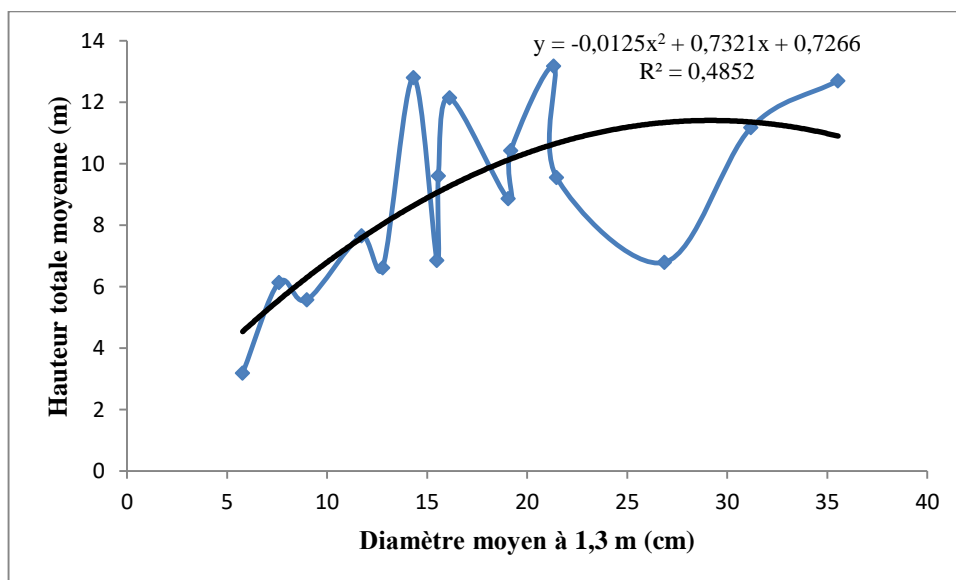
**Figure 39.** Parcelles en ordre croissant de diamètre moyen.

D'après la figure 40, le facteur d'élanement est une fonction négative du diamètre moyen. Le facteur de détermination  $r^2 = 0,4548$  de la courbe de tendance signifie que 55% des valeurs observées ne sont pas expliquées par la courbe de tendance.



**Figure 40.** Facteur d'élanement en ordre croissant du diamètre moyen.

Il y a donc une légère relation entre le diamètre moyen et la hauteur moyenne du peuplement de régénération naturelle que nous allons essayer de formaliser grâce au graphe illustré dans la figure 41. D'après le facteur de détermination, 48 % des valeurs observées de la hauteur sont expliquées par la courbe de tendance. Nous pouvons alors utiliser cette courbe pour la prévision de la hauteur moyenne d'un peuplement de régénération naturelle livré à lui-même si le diamètre moyen est connu.



**Figure 41.** Hauteur totale moyenne en fonction du diamètre à 1.3 m du peuplement.

Les facteurs d'élanement des peuplements du pin d'Alep sont significativement différents ( $P < 0,02$ ) (Tableau 20). Les peuplements exposés à l'Ouest ont un facteur d'élanement élevé ( $FE = 75,1 \pm 14,5$ ) donc une stabilité faible et peu résistants à l'éventuel risque du chablis, les peuplements exposés à l'Est, au Nord et au Sud ont des facteurs

d'élancements moyens inférieurs à 55 donc ces peuplements sont plus stables et plus résistants au risque du chablis.

**Tableau 20.** ANOVA testant la variation du facteur d'élancement.

Paramètre	Source	DDL	SCE	CM	F	P	S
FE	Exposition	3	2367	789,1	4,64	0,022	*
	Erreur	464	2041	170,1			
	Total	467	4408				

Le facteur d'élancement donne une idée sur la stabilité écologique de la strate des peuplements forestiers. Les peuplements de pin d'Alep à exposition Ouest possèdent les valeurs les moins favorables (75%). Les valeurs dénotent des risques par rapport au vent, à la neige et aux bris qu'elle peut occasionner. Cela pourrait se justifier par la présence de quelques spécimens chablis (arbres renversés par le vent ou la neige) trouvés dans les placettes O1 et O4 (Figure 42). Par conséquent ces peuplements subissent une compétition trop importante et ne devraient pas bien résister au vent. Ils ont une hauteur bien trop élevée par rapport à leur diamètre. Cette vitesse de croissance s'explique par leur fort pouvoir compétiteur (Becker, 1992 ; Rajoelison *et al.*, 2008). À ce niveau là, on peut faire des éclaircies faibles de 20 à 25% des tiges au maximum (Massenent, 2010).



**Figure 42.** Spécimen d'un chablis dans la parcelle O1.

Les parcelles des autres expositions présentent des facteurs d'élanement comprises entre 42 et 54% et donc inférieurs à 80, cela signifie que ces peuplements sont stables et réguliers (Erlbeck, 2002).

Le facteur d'élanement d'un arbre apparaît un bon intégrateur des conditions moyennes de compétition auxquelles cet arbre a été soumis tout au long de sa vie ; ces conditions de compétition englobent à la fois le statut social de l'arbre au sein du peuplement et la densité de ce dernier. Pour cela, il faut faire des éclaircies au niveau des peuplements exposés à l'Ouest pour stabiliser la croissance de ces derniers.

### **2.2. Degré de couverture des peuplements naturels du pin d'Alep**

Les résultats obtenus montrent que les placettes (N3, E2, E3 et O2) ayant un degré de couverture compris entre 10% et 30% ce qui signifie que ces pinèdes sont dispersées vu la faible densité de la strate des arbres émergents et que la plupart des surfaces sont occupées par d'autres essences forestière. Le degré de couverture des placettes (N1, N2, N4, E1, E4, S2, O1) est compris entre 30 et 50% (Tableau 21), témoigne d'un peuplements forestier claire et ouvert (Forster *et al.*, 2001). Alors que la placette O3 où la végétation forestière est trop dense et continue, le degré de couverture atteint un maximal de 90.15% de la surface totale.

**Tableau 21.** Valeurs moyennes des surfaces des houppiers et degré de couverture.

<b>Parcelle</b>	<b>SH (m<sup>2</sup>/ha)</b>	<b>Moyenne (m<sup>2</sup>/ha)</b>	<b>Degré de couverture (%)</b>	<b>Etat</b>
<b>N1</b>	4544,836	3767,73	45,45	Claire
<b>N2</b>	3540,35		35,40	Claire
<b>N3</b>	2670,57		26,71	Dispersée.
<b>N4</b>	4315,145		43,15	Claire
<b>E1</b>	4691,788	3706,02	46,92	Claire
<b>E2</b>	2814,853		28,15	Dispersée.
<b>E3</b>	2492,375		24,92	Dispersée.
<b>E4</b>	4825,081		48,25	Claire
<b>S1</b>	6199,302	4802,47	61,99	Dense
<b>S2</b>	4578,12		45,78	Claire / ouverte
<b>S3</b>	4279,82		42,80	Claire
<b>S4</b>	4152,65		41,53	Claire
<b>O1</b>	4614,387	4957,79	46,14	Claire
<b>O2</b>	1199,48		11,99	Dispersée.
<b>O3</b>	9015,411		90,15	Dense continu
<b>O4</b>	5001,863		50,02	Dense

L'importance du degré de couverture est due à la grande étendue des houppiers des arbres. Ce paramètre a été estimé afin de déterminer l'influence du facteur « lumière » sur la dynamique de la régénération de pin d'Alep.

### 2.3. Régénération naturelle et mortalité des peuplements

La régénération naturelle correspondante au stade de plantule lorsque les jeunes plants n'ont pas encore dépassé la strate herbacée et qu'ils ont 20 cm à 30 cm d'hauteur, les individus de cette strate ont été comptés dans les 16 placettes. La densité de régénération varie de 120 pieds/ha à 1940 pieds/ha dans les 16 sites étudiés (Tableau 22).

Nous notons, cependant, une forte densité (soit 1940 semis/ha) dans la placette E2 (peuplement incendié en 2009). Cette différence de densité peut être due à l'influence du feu de forêt sur la dynamique du pin d'Alep. Néanmoins, cette densité des semis est tout aussi bonne, quand on considère que le nombre de pins adultes présents avant l'incendie dans cette placette était seulement 160 pieds/ha.

En générale, la régénération naturelle dans le massif forestier de Bénis Oudjana est élevée, elle est de 2260 pieds/ha pour les peuplements exposés à l'Ouest. À l'Est et au Sud, elle est respectivement 980 pieds/ha et 820 pieds/ha ; alors qu'elle est satisfaisante pour les peuplements exposés au Nord avec 215 pieds/ha.

**Tableau 22.** Taux de régénérations et de mortalité dans les parcelles d'étude.

Parcelles	Na /ha	$\bar{x}$	Tr /ha	$\bar{x}$	Tm /ha	$\bar{x}$
N1	340	430±105	120	215±102	20	3±4
N2	500		180		40	
N3	340		200		0	
N4	540		360		0	
E1	360	410±168	360	980±675	40	12±15
E2	240		1940		80	
E3	640		860		20	
E4	400		760		0	
S1	580	495±340	960	820±485	0	6±12
S2	940		1240		0	
S3	200		120		60	
S4	260		960		0	
O1	840	1010±342	5120	2260±1922	0	2±3
O2	1140		1620		0	
O3	640		1040		80	
O4	1420		1260		60	

Le taux de mortalité est trop faible dans les quatre expositions du massif, il varie de 0 à 80 pieds/ha. Les placettes E2 et O3 possèdent le taux de mortalité le plus élevé 80 pieds/ha comparativement avec les autres placettes vu le nombre des arbres brûlés sur la placette E2 et les chablis remarquables sur terrain dans la placette O3.

La densité énorme des semis de cette essence forestière par rapport au nombre d'individus adultes pourrait être justifié par les caractéristiques biologiques et physiologique de l'espèce (Barbero et Quézel, 1989). Le pin d'Alep est une essence anémochore, elle occupe facilement les cultures abandonnées ou les places vides créées par le feu (Meddour, 1992). Malgré un taux élevé des sujets morts après l'incendie de 2009, l'effectif des semis est important. Plusieurs auteurs citent que le pin d'Alep est une essence pyrophyte active. Il est caractérisé par une propagation, une multiplication ou une reproduction stimulée par le feu (Kuhnholz-Lordat, 1938). Les cônes éclatent au feu projetant les graines à des distances de plusieurs mètres, permettant à une partie d'entre elles d'échapper au feu. D'après de travaux cités par Meddour (1992), il est indéniable qu'après incendie des pinèdes, il s'ensuit très souvent une régénération massive parfois sur d'importantes surfaces avec une densité de plusieurs dizaines de milliers de semis à l'hectare (Boudy, 1950 ; Souleres, 1969 ; Sari, 1978). Ce phénomène a suscité la réalisation de nombreuses recherches, dans diverses régions du bassin méditerranéen (Karschon , 1973 ; Abbas *et al.*, 1984 ; Trabaud *et al.*, 1985 ; Barbero *et al.*, 1987 ; May 1987). Tous ces auteurs s'accordent pour la reconnaissance d'une rapide recolonisation des pineraies brûlées par une abondante régénération de cette espèce colonisatrice. Il apparaît également que la régénération naturelle du pin d'Alep est assurée après le feu grâce à un grand nombre de graines fertiles qui restent dans les vieux cônes (4-5 ans), très lignifiés et indéhiscent dits "cônes sérotineux" qui ne s'ouvrent qu'après avoir subi un choc thermique du feu (Abbas *et al.*, 1984). L'effet protecteur des écailles du cône qui leur permet d'échapper au feu et de participer à la régénération de cette essence (Meddour, 1992). Ces deux faits sont essentiels dans le processus de recolonisation par le pin d'Alep des pineraies brûlées. Cependant, des études comparables montrent que l'ensemencement naturel du pin d'Alep après incendie obtenues est nettement supérieur. Notamment, en Algérie à Meurdja (42000 semis/ha), à Djurdjura (52000 semis/ha) (Meddour, 1992), en France à Montpellier et en Provence (15000 semis/ha et 50000 semis/ha) respectivement (Trabaud *et al.*, 1985 ; Abbas *et al.*, 1984) et en Espagne (22000 semis/ha) (May, 1987). L'activité anthropique et le surpâturage exercés sur la zone d'étude justifient l'effectif faible de semis dans les peuplements exposés au Nord.

### **3. Les pressions exercées sur les peuplements naturels de pin d'Alep**

Le suivi des pressions est très important en matière de suivi écologique. Malheureusement, les massifs de la forêt domaniale de Bénis Oudjana n'échappent pas à la règle de dégradation accrue des ressources naturelles à cause des pratiques irresponsables.

Le défrichage, l'exploitation abusive et illicite des produits forestiers ligneux constituent l'une des principales causes de la déforestation. Celles-ci sont des indicateurs à considérer pour le plan de suivi et la méthode d'aménagement. Le relevé des pressions a également été effectué afin de recenser, de quantifier et d'ordonner les pressions par ordre de menaces. La méthode adoptée est l'observation directe des pressions sur les parcelles de la forêt de Bénis Oudjana.

Le tableau 23 présente le degré d'intensité de chaque pression de la forêt. Les pressions sont d'origines anthropiques et biologiques (incendies, coupes illicites, dépérissement, pâturage, ravageurs et maladies). Ces pressions peuvent modifier la structure forestière et posent des problèmes pour l'aménagement et le développement de ce massif forestier.

**Tableau 23.** Inventaire des pressions des parcelles d'étude dans la forêt de Bénis Oudjana.

Exposition	Parcelles	Feux	Dépérissement	Pâturage	Coupes illicites	Pathogènes
Nord	N1	-	-	+++	+++	Polypore
	N2	-	-	-	-	Chenille / Polypore
	N3	-	-	-	-	Polypore
	N4	-	-	-	+++	Polypore
Est	E1	-	-	-	-	-
	E2	+	-	+++	Assainissement	-
	E3	-	-	+++	+	-
	E4	-	-	-	-	-
Sud	S1	-	+++	-	-	Polypore
	S2	-	-	-	+++	-
	S3	-	-	++++	-	Balai de sorcière
	S4	-	-	++++	-	-
Ouest	O1	-	-	-	-	-
	O2	-	-	++	-	Balai de sorcière
	O3	-	-	-	+++	-
	O4	-	-	-	-	-
	++++	Pressions et menaces	++	Pressions et menaces	-	Aucunes
	+++	Pressions et menaces	+	Pressions et menaces faibles		

Nos observations faites sur le terrain ont démontré la présence de nombreux pathogènes (champignons, insectes et les maladies cryptogamiques). Nous avons également observé plusieurs types d'aléas (pâturage, coupes illicites, dépérissement...).

Les peuplements forestiers à pin d'Alep de Benis Oudjana subissent depuis fort longtemps une pression anthropique plus ou moins importante selon les zones. L'équilibre naturel a été rompu. C'est le cas en particulier des peuplements exposés au Sud où les placettes d'échantillonnage se situent dans des conditions partiellement défavorables. A

l'exception des parcelles (N1, E1, S1, O1 et O4), l'intensité des actions anthropozoïques (pâturage et coupes illicites) est forte voire très forte dans toute la zone d'étude.

Le dépérissement par tous ses symptômes (jaunissement, branches mortes, défoliation, sujets dépéris) est marqué seulement sur le peuplement à exposition Sud (placette S3) de la forêt de Bénis Oudjana. Un taux de 30% de sujets adultes de cette parcelle sont quasi-totalement dépéris soit 60 pieds/ha. 30 pins avec des branches mortes sont également remarqués soit 15% du total de sujets adultes. Un total de 100 pins défoliés est dénombré (50%) et les arbres sains sont rares (5%).

Un incendie daté de 2009 est observé dans le peuplement de la parcelle 2 d'exposition Est. En plus, le pâturage a aggravé la menace par la destruction des jeunes semis ; les coupes à blanc des arbres faites en 2015, sont nécessaires pour l'assainissement forestier.

La forêt de Bénis Oudjana est une forêt irrégulière. Certains arbres âgés sont atteints d'une maladie due à un champignon « polypore » (Figure 43). Le polypore des pins, dont l'agent causal est *Xanthocrous pini* ou *Trametes pini* ou encore appelé la pourriture alvéolaire du bois des pins, c'est un champignon qui altère profondément le bois du cœur. C'est aussi un champignon qui rend le bois absolument inutilisable.



**Photo 43.** Polypore du pin d'Alep observé dans la station N1 (Hani, 2018).

Bien que les jeunes pins ne soient pas victimes de l'infestation, il conviendrait, cependant, de préciser ultérieurement l'âge minimal à partir duquel ils sont susceptibles d'être infestés. On peut dire que, normalement, c'est une altération consécutive de la vieillesse (Anonyme, 1941).

Ce champignon fait des ravages plus ou moins importants en fonction de l'âge, c'est-à-dire que plus le peuplement est âgé, plus le champignon n'est abondant. Cette maladie se traduit par la pourriture intérieure du tronc de l'arbre où il devient inutilisable (Menasri, 2014). Les conditions d'installation du champignon l'expliquent ; avec l'âge, les grosses branches tuées par élagage naturel deviennent plus nombreuses et chaque année amène de nouvelles chances d'infection. Le polypore du pin est d'ailleurs inégalement fréquent suivant les régions ; son abondance paraît en relation avec l'insuffisante vigueur des peuplements et par conséquent avec les conditions de sol et de climat (Anonyme, 1941).

Les observations sur le pin d'Alep ont montré que la pourriture est due à *Xanthocrous pini*, caractérisé par la présence d'épaulettes sur les troncs des arbres, est une maladie de la vieillesse du pin d'Alep qui s'accroît en fonction des diamètres des arbres. Les blessures provoquées sur les troncs des arbres représentent un critère principal facilitant l'installation du pathogène (Delatour, 1969). Les pertes occasionnées sur le bois d'œuvre, dues à la pourriture, dépassant les 78%, ce qui les rend inutilisables.

Dans le massif forestier de Béni Imloul (Khenchela), ce champignon est aussi plus abondant en altitude et sur les versants Nord, caractérisés par des conditions froides et humides. Il est très rare de le trouver sur les versants sud à cause de la sécheresse (Kherchouche, 2003).

Les remèdes possibles sont purement préventifs, la suppression des réceptacles et l'exploitation des arbres atteints sont recommandées, il importe surtout de ne pas laisser trop vieillir les peuplements et d'éviter les élagages (Anonyme, 1941). Comme c'était le cas dans la pinède de Béni Imloul où Frantz et Forster (1979) ont appliqué une éclaircie forte, ce choix est justifié principalement par l'âge de la majeure partie de la pinède et par l'état sanitaire des arbres, fortement attaqués par ce champignon (Bentouati, 2006).

De plus, nous avons rencontré une maladie cryptogamique très peu développée, c'est le Balai de sorcière qui se caractérise par l'apparition d'une pousse qui se ramifie et qui constitue ainsi une formation anormale au niveau de l'arbre ayant l'aspect d'un petit arbre (Figure 44). Sur le massif forestier de Béni Imloul, la rencontre fréquente d'arbres de pin d'Alep avec des balais de sorcières est aussi remarquable (Kherchouche, 2003).



**Figure 44.** Balai de sorcière observé chez les peuplements E3 et O2 (Hani, 2018).

La maladie du balai de sorcière est le nom de différentes maladies s'attaquant à différents types de plantes ligneuses, souvent des arbres. Elles peuvent survenir toute l'année et être provoquées par des champignons, des phytoplasmes, des plantes, voire des virus ou des bactéries qui stimulent la production de cytokinine, provoquant ainsi le développement incontrôlé de bourgeons axillaires (Anonyme, 1941 ; Gomez *et al.*, 1996). Cette maladie hypertrophiante forme une agglomération de branches et de rameaux, appelée « balai de sorcière », étant en quelque sorte une galle très étalée qui implique des bourgeons (Purdy et Schmidt., 1996 ; Paragi et Rodman, 2020).

Typiquement, un balai de sorcière dure de nombreuses années, souvent pour la vie de la plante hôte et croît lentement d'année en année. Vous verrez souvent des balais de sorcière énormes sur les conifères (les sapins, épinettes, pins) et ils peuvent être vieux de plusieurs décennies (Anonyme, 1941 ; Gomez *et al.*, 1996).

Les balais de sorcière constituent un habitat de nidification pour les oiseaux et les mammifères (Paragi et Rodman., 2020).

Ajouter à cela, la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) qui n'est pas très développée dans les peuplements naturels du massif. Elle existe dans les peuplements artificiels, et elle est très rare (Figure 45). La même observation a été faite pour le massif forestier de Béni Imloul (Kherchouche en 2003).



**Figure 45.** La chenille processionnaire du pin observée dans la placette N2 (Hani, 2018).

Le pin d'Alep est une essence du pourtour méditerranéen (Mezali, 2003 ; Harfouche *et al.*, 2004). De par ses vastes étendues, il s'adapte à plusieurs types de sols et d'altitudes (Kadik, 1987 ; Zamoum, 1998). Dans le Sud de l'Europe, il occupe des altitudes qui varient de 0 à 1000 m. En revanche, en Afrique du Nord, il culmine jusqu'à 2000 m d'altitude dans les reliquats des forêts de l'Atlas saharien (Kadik, 1987), témoignant ainsi d'une grande plasticité climatique (Zamoum, 2002 ; Mezali, 2003). Il est observé depuis les chaînes littorales de Catalogne, en Espagne, avec un climat humide, jusqu'aux limites du Sahara en Afrique du Nord, avec un climat semi-aride (Zamoum *et al.*, 2008 ; Nahal, 1962). Entre ces larges étendues méditerranéennes, le pin d'Alep peut refléter une grande variation démographique et dendrométriques liée aux caractéristiques stationnels de chaque région (Mezali, 2003). En plus du stress climatique lié à l'exposition à des hautes températures (Jacquet *et al.*, 2013 ; Linares *et al.*, 2014), le pin d'Alep est exposé à un ennemi biologique agressif, en l'occurrence la chenille processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.), qui en est le principal ravageur (Huchon et Demolin., 1971 ; Battisti *et al.*, 2005). Elle est responsable de la défoliation de la cime (Hoch *et al.*, 2009 ; Robinet *et al.*, 2010), elle réduit la croissance radiale et la croissance en hauteur de plusieurs espèces de conifères (Jactel *et al.*, 2006 ; Cayuela *et al.*, 2011). Elle diminue, de ce fait, la productivité du bois (Rondeux, 1993 ; Romani *et al.*, 2006), et elle affecte les paramètres de reproduction (Battisti *et al.*, 2005).

La plupart des études (Rondeux, 1993 ; Quézel et Médail 2003 ; Tereschuk *et al.*, 2004 ; Boizot et Charpentier., 2006) se focalisent ainsi sur l'effet de ce ravageur sur l'état de santé des espèces du genre *Pinus* et du genre *Cedrus* et sur son impact sur la croissance et la productivité sylvicole.

La chenille processionnaire du Pin (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) est le principal ravageur défoliateur dans tout le bassin méditerranéen. En Algérie, cet insecte ravageur est présent dans l'ensemble des forêts résineuses. Les attaques massives sont apparues après les grands efforts de reboisement dans le cadre de « barrage vert ». En effet la monoculture exclusive à base du pin d'Alep, a engendré une explosion démographique des populations de cette chenille par rapport à d'autres insectes ravageurs (Kadik, 1987). Plusieurs travaux ont été réalisés en Algérie portant sur plusieurs aspects à savoir la systématique, l'écologie, les dégâts et les moyens de lutte contre cet insecte (Zamoum, 1998 et 2002 ; Khadoumi, 2014).

La chenille processionnaire du pin *Thaumetopoea pityocampa* (Denis et Schiffermüller, 1775) est un des plus grands défoliateur des forêts résineuses dans le sud de l'Europe et le Nord de l'Afrique (Ziouche *et al.*, 2017 ; Mechri *et al.*, 2018), en termes de répartition temporelle et géographique ainsi que l'impact socioéconomique (Robinet, 2006 ; Hódar *et al.*, 2012). Les larves se nourrissent des aiguilles de pin pendant l'automne et l'hiver. Cela diminue considérablement la croissance des arbres à court terme, même à faibles niveau de défoliation (Jacquet *et al.*, 2012). Cependant, les arbres semblent pouvoir se restituer à long-terme si la défoliation n'est pas fréquente (Jacquet *et al.*, 2013).

On rencontre ce ravageur dans tous les pays de la méditerranée occidentale (Linares *et al.*, 2014) et se répand actuellement dans les latitudes supérieures probablement en réponse au changement climatique avec des températures hivernales croissantes (Huchon et Demolin, 1971 ; Battisti *et al.*, 2005). Les chenilles sont capables de s'adapter afin de compenser d'éventuelles variations climatiques, comme l'illustre la construction et l'orientation du nid d'hiver, permettant d'allier effet de masse (atténuation de fortes variations de température par regroupement de nombreux individus) et insolation maximale (Robinet *et al.*, 2010 ; Ziouche *et al.*, 2017 ; Mechri *et al.*, 2018).

Les pullulations de ce ravageur sont temporaires, considérables dans les forêts naturelles mais les attaques les plus sévères sont observées dans les reboisements (Zamoum, 2002 ; Zamoum *et al.*, 2008). Ces infestations concernent toutes les pinèdes et céderais du pays, causant des dégâts conséquents et très significatifs en régions semi-arides qui selon Zamoum (2002), s'élèvent à un taux d'infestation moyen de 2,6 nids/arbre dans ces zones.

Les pratiques irresponsables notamment les feux de forêts ont aussi endommagé le milieu forestier. Ainsi, tout incendie a un impact immédiat sur les principales fonctions de la forêt (environnementales et socioéconomiques). Les coupes d'assainissement ont été réalisées en 2015 (Figure 46), afin de restaurer l'écosystème forestier endommagé par les feux.



**Figure 46.** Coupe d'assainissement du pin d'Alep dans la parcelle E2 (Hani, 2018).

Les impacts néfastes des feux sont multiples. Les feux endommagent un grand nombre d'arbres et les détruisent progressivement. Les arbres brûlés sont les plus sujets au processus de pourrissement et ensuite à l'attaque de peste végétale et de maladies. Le brûlage des forêts signifie, évidemment, la perte de ressources naturelles. Il réduit la densité des formations végétales qui alimentent le bétail et les animaux sauvages. En plus, les feux détruisent aussi les sols par la disparition de l'humus et des matières organiques ainsi que par l'exposition de ces sols au soleil, au vent, et à la pluie. Les sols brûlés sont plus érosifs et plus vulnérables au lessivage et au dessèchement. Les incendies répétés aux mêmes endroits épuisent définitivement les couches arables des sols essentielles à leur fertilité.

Les pins, connus comme " pyrophytes actifs" sont, selon Kuhn-holtz - Lordat (1938), des plantes dont la propagation, la multiplication ou la reproduction est stimulée par le feu (Meddour, 1992). Trabaud (1970) admet comme "véritables pyrophytes", les plantes qui sont à la fois résistantes au feu et favorisées par lui. L'influence du feu se résume pour les pins dans les quelques éléments positifs suivants :

- La désarticulation des cônes sous le coup de chaleur et la dissémination des graines (Franclet, 1970 ; Le Houérou, 1974). Le Houérou (1980) cite, en particulier, le pin d'Alep dont les cônes éclatent au feu projetant les graines à des distances de plusieurs mètres, permettant à une partie d'entre elles d'échapper au feu. Il est intéressant de noter, qu'en milieu non modifié par le feu, les graines anémochores du pin d'Alep tombent à moins de 30 m de semenciers (Acherar *et al.*, 1984) et celles du cèdre sont disséminées au plus entre 20 et 50 m (Toth, 1978).

- Levée de dormance activée par la chaleur. D'après de nombreux auteurs cités par Trabaud (1980), les températures élevées stimulent le pouvoir germinatif de nombreuses graines. La déshydratation des graines sous l'effet de la chaleur augmente l'énergie et le pourcentage de germination (Karschon, 1973 ; Le Houérou, 1980). Comme le souligne notamment Gausson (1968), la germination du pin d'Alep est accélérée si on chauffe les graines à 60 ou 70°C.

- Elimination de la végétation épigée tant herbacée que ligneuse basse surtout, et donc, de son effet concurrentiel vis à vis des semis (Le Houérou, 1974 ; Toth, 1987).

- Par ailleurs, c'est au niveau des modifications du milieu édaphique en particulier, que se situe l'effet favorable du feu sur la régénération naturelle de nombreuses espèces (Boudy, 1950 ; Nahal, 1962 ; Trabaud, 1980). En effet, la disponibilité d'éléments fertilisants augmente la croissance des semis qui sont particulièrement vigoureux après incendie (Nahal, 1962 ; Abbas *et al.*, 1984).

A ce propos, Letreuch-Belarouci (1972) constate que la croissance du pin d'Alep est plus grande sur les terrains atteints par le feu. Cette meilleure croissance sur une surface incendiée est due à l'activité plus intense du processus de nitrification de l'azote dans le sol. Ainsi, les semis de pins, exigeants en lumière, trouvent dans les zones dénudées par le feu, où la compétition est moins sévère que sous le couvert du maquis, des conditions favorables à leur installation sur des sols enrichis en éléments fertilisants par les cendres (Le Houérou, 1980 ; Meddour, 1992).

Dans les Aurès, le pâturage est la base de l'économie locale dans toutes les régions. En effet, dans les zones forestières qui sont d'ailleurs zones montagneuses, où les cultures sont limitées dans le temps et dans l'espace, l'élevage essentiellement d'ovins et de caprins constitue la première et la seule ressource agricole. Le cheptel est constitué d'ovins, caprins et bovins, il peut pâturer en forêt durant presque toute l'année (Figure 47). Les effectifs de ce cheptel constituent une charge pastorale qui dépasse de loin la charge d'équilibre (BNEDER, 2008). Elle est aussi la principale cause de dégradation des écosystèmes forestiers car le

cheptel prélève directement ou indirectement par émondage effectué par les bergers une quantité très importante de biomasse, et empêche, par le broutage où le piétinement des semis, toute régénération naturelle des essences sylvatiques. .



**Figure 47.** Pâturage de caprins dans le massif forestier de Bénis Oudjana.

Le surpâturage engendré, se traduit par la disparition ou la réduction considérable d'un grand nombre d'espèces appréciées. Il finit par déclencher les processus d'érosion qui ont déjà atteint une portion importante des zones dénudées.

Dans la mesure où il représente, dans les conditions actuelles, la première ressource pour les populations des montagnes des Aurès, mais aussi la principale cause de dégradation des écosystèmes forestiers et le facteur majeur empêchant la régénération de ceux-ci, le problème du pâturage en forêt reste pour le pays, l'une des préoccupations fondamentales des aménagements forestière (Hamel *et al.*, 2019).

L'augmentation observée de la température et la diminution des précipitations dans les régions arides et semi-arides en générale et dans la zone d'étude en particulier au cours de ces dernières années. Cette perturbation climatique engendre une sécheresse successive et prolongée, ce qui conduit à son tour au dépérissement des arbres (Bentouati et Bariteau, 2006). De nombreuses études ont concluent que le dépérissement et les changements climatiques semblent être des phénomènes liés (Landmann et Landeau, 2006 ; Guit *et al.*, 2016). Alors que Fernández-Cancio *et al.*, (2010) et Bentouati (2006) suggèrent que le déclin peut être lié au stress hydrique.

Le dépérissement du pin d'Alep dans le massif de Bénis Oudjana est lié aux facteurs stationels notamment l'exposition du peuplement (Figure 48). De nombreuses études similaires en Algérie (dans le massif de Senalba à Djelfa) ont récemment affirmé que l'exposition sud est défavorable à la croissance du pin d'Alep dans les zones semi-arides où l'eau est le principal facteur limitant (Sanchez-Salguero *et al.*, 2010 ; Guit *et al.*, 2015 ; Guit

*et al.*, 2016). Les autres paramètres stationnels, (pentes, profondeur, pH du sol et taux de calcaire, la texture des sols ou la fracturation de la roche-mère) peuvent aussi avoir un effet déterminant sur le phénomène de dépérissement (Guit *et al.*, 2016), car l'état hydrique de la forêt est conditionné par sa topographie (Linares *et al.*, 2009 ; Sánchez-Salguero *et al.*, 2012).



**Figure 48.** Dépérissement du pin d'Alep dans le massif de Bénis Oudjana (parcelle S3).

Nos observations sur terrain ont montré que les arbres totalement dépéris sont des arbres à gros diamètre ce qui traduit l'âge avancé de ces derniers. Les pins dans ce stade de vieillissement, sont physiologiquement affaiblis, ce qui les rend plus sensibles. À ce sujet, Guit *et al.*, (2016) citent, comme facteur prédisposant au dépérissement l'âge avancé des peuplements. Dans ce contexte, Bréda et Peiffer (1999) ; Lemaire *et al.* (2010) affirment que l'âge est l'un des causes possibles de dépérissement.

La densité n'a aucun effet sur le dépérissement. Ce résultat est contradictoire avec celui de Bentouati (2006). En effet, cet auteur note que la forte densité d'un peuplement peut être la cause du ralentissement de l'accroissement par suite de la concurrence des jeunes plants entre eux et provoque un dépérissement du peuplement.

L'activité anthropique dans la zone d'étude, en particulier la production traditionnelle du charbon par les riverains est très répandue dans le massif forestier de Bénis Oudjana, ce qui provoque des dégâts irréversibles (feux de forêts, pollution atmosphérique locale), et peuvent aggraver l'état sanitaire des sujets de pin d'Alep.

#### 4. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée à la matrice des corrélations obtenues à partir des 21 variables centrées réduites, mesurées sur les 16 parcelles des peuplements de pin d'Alep de la forêt de Bénis Oudjana ayant fait l'objet de cette étude.

Les calculs réalisés avec le logiciel Excel Stat (2019) donnent les caractéristiques des 15 axes principaux, dont seuls les premiers ayant chacun une valeur propre égale ou supérieure à l'unité, soit à la contribution moyenne des différentes variables, c'est-à-dire à la moyenne arithmétique de toutes les valeurs propres, ont été retenus. Ces axes retenus serviront par la suite à l'étude de la distribution des individus (parcelles) et des variables (caractéristiques dendrométriques et indices de diversité) dans des plans à deux dimensions.

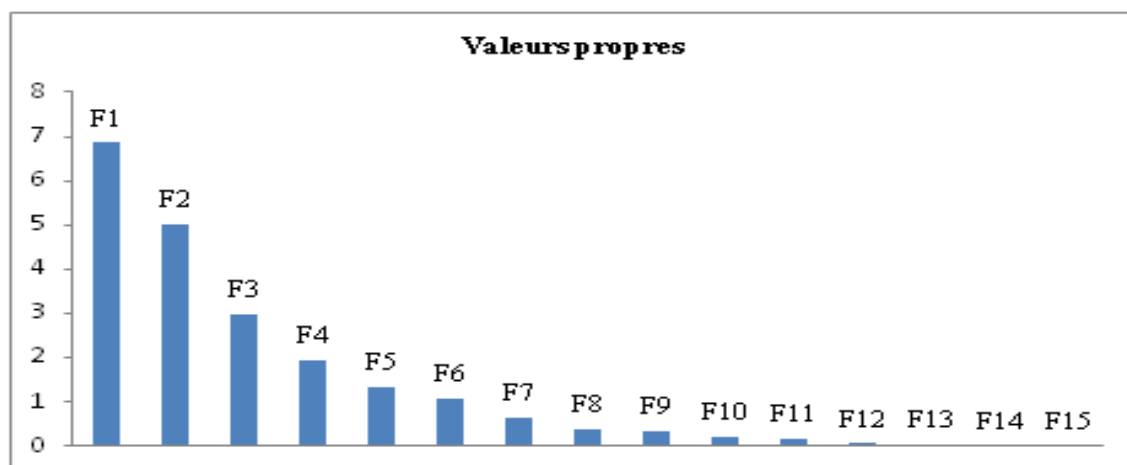
Dans ce cas le tableau 24 donne les valeurs propres, les pourcentages de variation expliquée par chacun de 4 axes retenus, ainsi que les pourcentages cumulés. On voit bien que le premier axe explique à lui seul 32,654% de la variation totale des variables initiales et avec le deuxième axe explique 56,835%, les trois premiers axes expliquent 70,71% et enfin les quatre premiers axes expliquent 79,903%. Ces quatre axes ou indices synthétiques résument l'information apportée par les 21 variables. Il indique une variabilité significative entre les parcelles à différentes expositions du point de vue structure, diversité et caractères dendrométriques.

**Tableau 24.** Valeurs propres des 4 axes principaux.

Paramètres statistiques	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	6,857	5,004	2,988	1,931
Variabilité (%)	32,654	23,827	14,230	9,193
Pourcentage cumulé (%)	32,654	58,480	70,710	79,903

F1 : 1<sup>er</sup> axe principal ; F2 : 2<sup>ème</sup> axe principal ; F3 : 3<sup>ème</sup> axe principal ; F4 : 4<sup>ème</sup> axe principal.

Le graphique des valeurs propres obtenu en fonction des rangs des axes principaux est indiqué dans la figure 49.



**Figure 49.** Histogrammes des valeurs propres en fonction des composantes principales.

Cependant, l'interprétation de ces composantes nécessite le calcul des corrélations entre chacune des composantes principales retenues avec chacune des 21 variables initiales. Ces corrélations sont utiles pour préciser la part de la variance, d'une variable initiale donnée, prise en compte par une composante principale particulière, et seront utilisées pour les représentations graphiques des variables initiales dans les cercles de corrélations (Annexe V, Tableau des corrélations). En effet, la détermination de la part de l'information contenue dans une composante quelconque et relative à une variable initiale quelconque, est donnée par le carré du coefficient de corrélation calculé entre les deux variables en question. Si, d'autre part, on prend en considération les deux premières composantes, l'information prise en compte, pour une variable initiale donnée, est égale à la somme de l'information prise en compte par chacune des 4 composantes. En ce qui concerne les 16 parcelles de la forêt de Bénis Oudjana, les corrélations entre les variables initiales et les quatre premières composantes retenues, ainsi que les corrélations carrées correspondantes sont reprises par le tableau 25.

**Tableau 25.** Valeurs des corrélations et corrélations carrées des variables initiales de 4 premières composantes principales et information prise en compte par le premier plan factoriel représenté par les axes 1 et 2 pour l'ensemble des parcelles.

Variables	CP1		CP2		CP3		CP4		Plan factoriel 1-2
	Corr	Corr <sup>2</sup>	Corr	Corr <sup>2</sup>	Corr	Corr <sup>2</sup>	Corr	Corr <sup>2</sup>	Corr <sup>2</sup> %
<b>D</b>	0,895	80,131	-0,268	7,185	-0,247	6,089	0,017	0,029	93,434
<b>Ht</b>	0,465	21,590	-0,507	25,661	0,198	3,934	0,087	0,757	51,942
<b>Hf</b>	0,339	11,473	-0,493	24,256	0,561	31,471	0,026	0,068	67,268
<b>G</b>	0,880	77,419	-0,245	5,982	-0,290	8,439	-0,208	0,326	92,176
<b>gh</b>	0,845	71,427	-0,327	10,708	-0,337	11,335	0,018	0,032	93,503
<b>G</b>	0,670	44,860	-0,626	39,129	-0,092	0,848	0,015	0,023	84,860
<b>Vt</b>	0,516	26,621	-0,688	47,352	0,102	1,040	-0,111	1,232	76,245
<b>Ve</b>	0,443	19,616	-0,041	0,170	-0,199	3,968	0,777	60,37	84,138
<b>SH</b>	0,257	6,617	-0,468	21,933	0,753	56,641	0,107	1,145	86,336
<b>DC</b>	0,257	6,623	-0,468	21,934	0,753	56,637	0,07	0,490	86,684
<b>N</b>	-0,801	64,103	-0,203	4,108	0,126	1,598	0,146	2,132	71,914
<b>Tr</b>	-0,570	32,479	-0,616	37,902	-0,068	0,463	-0,222	4,928	75,772
<b>Tm</b>	0,204	4,158	0,149	2,209	0,644	41,524	0,066	0,436	48,327
<b>g - gh</b>	0,778	60,499	-0,122	1,499	-0,150	2,258	-0,407	16,56	80,821
<b>FE</b>	-0,718	51,536	-0,293	8,566	0,484	23,395	0,020	0,040	83,537
<b>H'</b>	0,432	18,657	0,764	58,328	0,412	16,946	0,035	0,123	94,054
<b>Ds</b>	0,505	25,550	0,676	45,659	0,334	11,182	-0,277	7,673	90,064
<b>E</b>	0,471	22,164	0,768	58,943	0,389	15,146	-0,092	0,846	97,099
<b>R</b>	-0,533	28,444	-0,688	47,360	-0,163	2,645	0,174	3,019	81,469
<b>Mi</b>	0,275	7,564	-0,021	0,046	0,015	0,022	0,784	61,46	69,098
<b>Tij</b>	-0,205	4,194	-0,561	31,435	0,180	3,243	-0,515	26,22	65,099

L'analyse des corrélations carrées du tableau 25 montre que l'axe 1 est formé principalement par les variables D, g, gh, G, N, g-gh et FE car elles ont les valeurs des corrélations carrées supérieures à 71,914%.

L'axe 2 est corrélé avec les variables Ht, Vt, Tr, H', Ds, E, R et Tij. Les corrélations carrées varient entre 51,942 et 97,099%.

L'axe 3 est corrélé avec les variables Hf, SH, DC et Tm avec les corrélations carrés qui sont supérieures à 48,327%. Enfin, l'axe 4 n'est constitué que par deux variables Ve et Mi qui ont des corrélations 69,098 et 84,138% respectivement.

L'axe 1 est représenté par les paramètres sylvicoles D, g, gh, G, et g-gh et qui sont corrélés positivement, dans la mesure où ces derniers présentent les plus fortes contributions dans un intervalle de (+ 0,670 à + 0,895). À l'opposé de cet axe, les plus faibles contributions sont représentées par les paramètres sylvicoles FE et N (-0,718 et -0,801 respectivement).

L'axe 2 est représenté par les paramètres sylvicoles H', Ds et E, y présentant les contributions moins importantes par rapport à celles de l'axe précédent et qui oscillent entre respectivement (+ 0,676 et + 0,768). Sur le côté négatif de ce même axe, les variables Ht, Vt, Tr, R et Tij sont caractérisées respectivement par les plus faibles contributions et qui varient entre - 0,507 et -0,688).

Les cercles de corrélation permettent parfois de donner une interprétation à certaines composantes principales. Ainsi, l'examen de la figure 50 permet de constater que les variables qui sont proches du cercle de corrélation sont les mieux représentées.

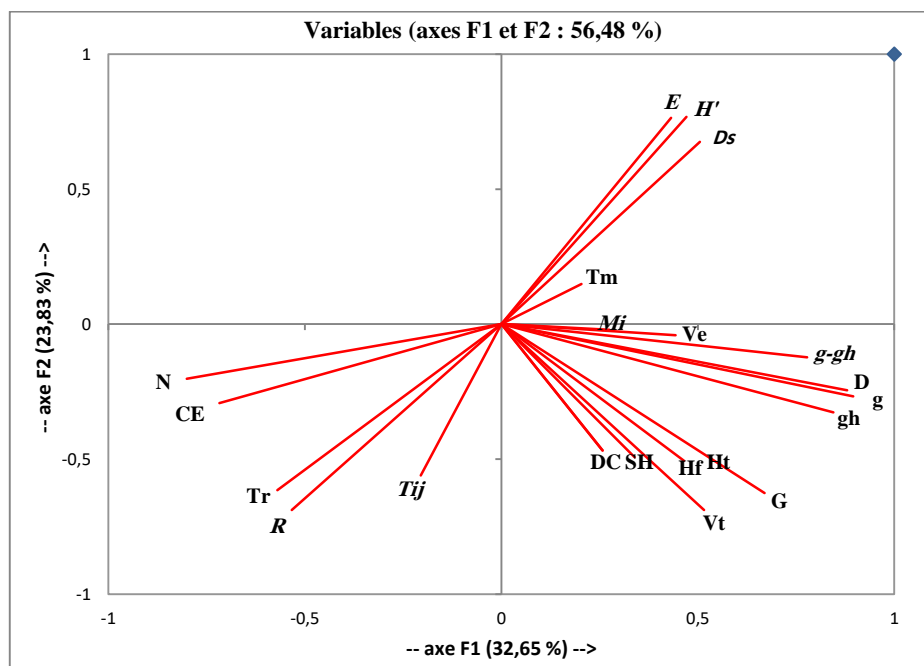
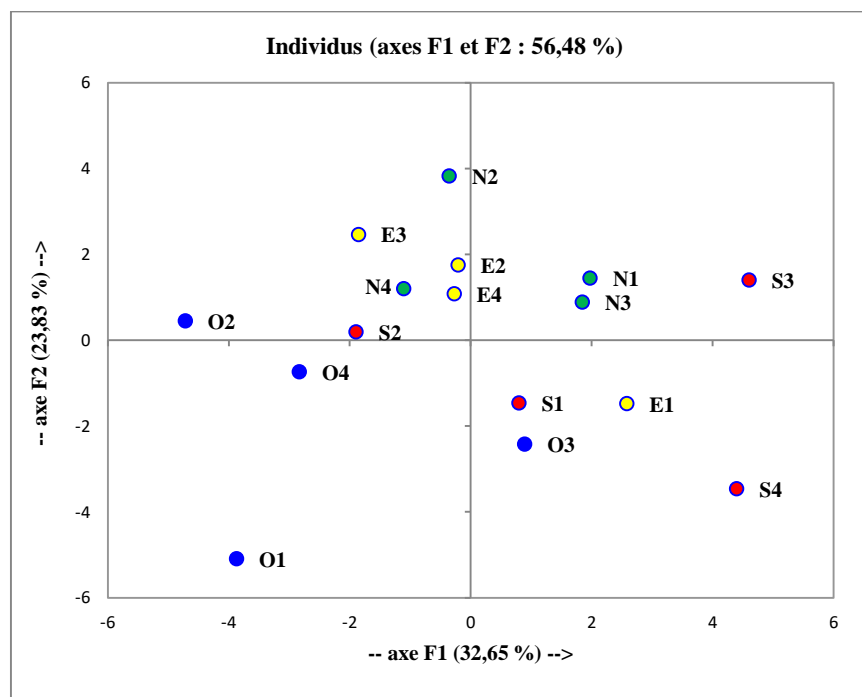


Figure 50. Représentation graphique des paramètres quantitatifs dans le plan factoriel 1-2.

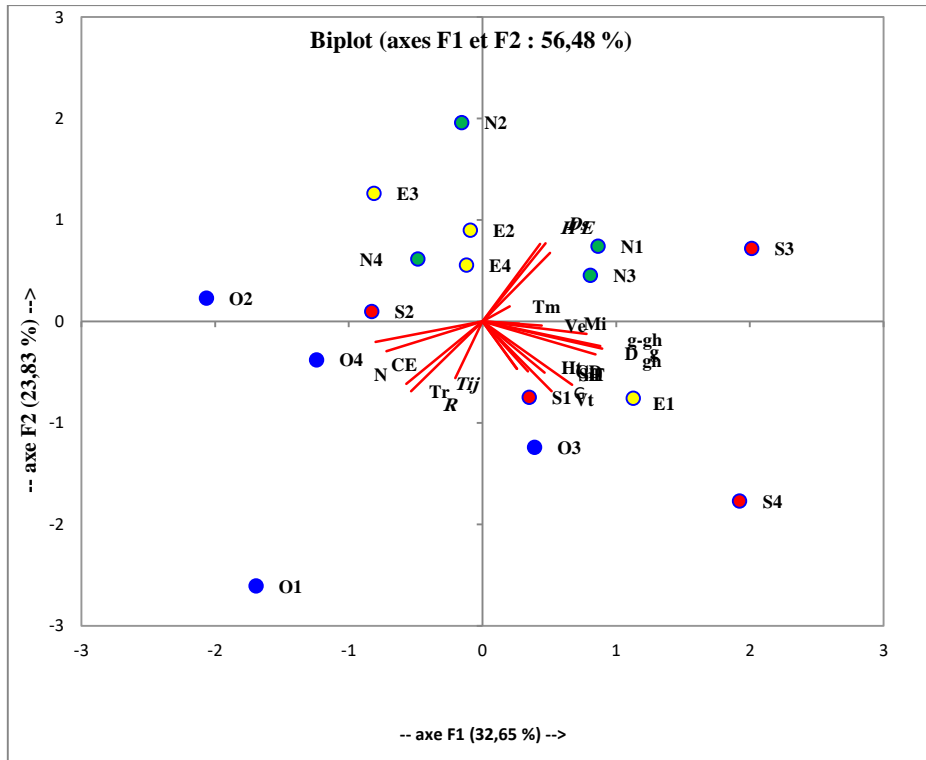
Sachant que le premier plan factoriel 1-2 explique à lui seul un fort pourcentage de 56,48% de l'inertie totale, on va donc tout naturellement représenter graphiquement les parcelles dans ce plan (Figure 51). Les coordonnées de chaque point parcelle sont les valeurs de deux axes 1 et 2.



**Figure 51.** Représentation graphique des points individu (parcelles) dans le plan Factoriel 1-2.

La figure 52 représente le cercle de corrélation permettant de repérer rapidement les groupes de variables liées entre elles ou opposées. La représentation graphique des 21 variables à l'intérieur du cercle de corrélation sur le plan factoriel 1-2 montre que :

L'affinité des différentes variables avec les 16 parcelles étudiées est confirmée par l'analyse en composantes principales (ACP), ce qui met en évidence l'influence des variables étudiés sur la structure, la diversité et la qualité de peuplement de pin d'Alep. En effet, quatre groupes homogènes sont dégagés par l'ACP. Le premier groupe (G1) situé sur le côté positif de l'axe 1 du cercle des corrélations présentant des affinités étroites des variables : D, g, gh, G et g-gh avec les parcelles (N1, N3, E1, S1, S3, S4 et O3). Sur le coté négatif du même axe, se situe le deuxième groupe (G2), caractérisé par les variables N et FE et la parcelle O4. Le troisième groupe (G3) situé sur le côté positif de l'axe 2 du cercle des corrélations présentant des affinités étroites des paramètres sylvicoles  $H'$ ,  $D_s$  et  $E$  avec les parcelles N2, N4, E2, E3, E4, S2 et O2 ; le dernier groupe (G4) corrélé négativement avec l'axe 2, regroupant les variables  $H_t$ ,  $V_t$ ,  $Tr$ ,  $R$  et  $T_{ij}$  avec la parcelle O1.



**Figure 52.** Représentation graphique des 21 variables à l'intérieur du cercle de corrélation sur le plan factoriel 1-2.

### 5. Viabilité des peuplements de pin d'Alep

L'état actuel de la pinède de Bénis Oudjana se traduit par la viabilité de l'ensemble des peuplements de 16 parcelles étudiés. A partir du tableau 26, il en ressort que ces peuplements ont tous une viabilité moyenne à assez bonne avec des conditions de régénération élevée. La contrainte principale qui nuit la viabilité de cette forêt c'est le pâturage qui est la principale activité des habitants de la région et l'absence de toute intervention sylvicole.

A partir des résultats et interprétations précédemment exposés, cette forêt est soumise à des pressions anthropiques et biologiques (pâturage, pathogènes,...). Les coupes illicites ont entamé la richesse spécifique de la forêt, les feux ont détruit une faible superficie de la végétation.

Malgré les pressions, la forêt se reconstitue, concernant la structure, les jeunes bois de diamètre inférieur à 7,5 cm de diamètre sont plus abondants. Le taux de régénération est élevé (76,85%). La forêt reste viable avec un état de santé assez bon par l'intermédiaire des régénérations naturelles de pin d'Alep.

Tableau 26. Evaluation du niveau de viabilité des parcelles.

Catégories	Attributs	Indicateurs	Références	Expositions											
				Nord			Est			Sud			Ouest		
				Etat actuel	Niveau de viabilité	Niveau moyen de viabilité	Etat actuel	Niveau de viabilité	Niveau moyen de viabilité	Etat actuel	Niveau de viabilité	Niveau moyen de viabilité	Etat actuel	Niveau de viabilité	Niveau moyen de viabilité
Taille	Abondance	(N/ha) d > 7,5cm	> 625 tiges Bonne	290	Faible	Faible	275	Faible	Faible	210	Faible	Faible	410	Moyen	Moyen
	Dominance	G (m <sup>2</sup> /ha)	100 m <sup>2</sup> /ha Bonne	17,99	Faible	Faible	17,69	Faible	Faible	33,42	Faible	Faible	19,02	Faible	Faible
Conditions	Régénération	Tr (%)	TR ≥ 60% (BNEIDER, 2008) Bonne	55	Moyen	Bon	82,2	Bon	Bon	82,3	Bon	Bon	87,5	Bon	Bon
	Mortalité	Tm (%)	Indicateur seuil = 5% Bonne	2	Bon	Bon	2	Bon	Bon	1	Bon	Bon	1	Bon	Bon
Qualité	Stabilité	CE (%)	CE < 80 Bonne	66	Bon	Bon	62	Bon	Bon	59	Bon	Bon	35	Bon	Bon
Contexte spatial	Densité des peuplements	DC (%)	100 % Bonne	38	Faible	Moyen	37	Faible	Moyen	48	Faible	Moyen	50	Faible	Moyen
	Espacement moyen /ha	a (m)	4m (Bon)	4,2	Bon	Moyen	4,5	Bon	Moyen	4,5	Bon	Moyen	2,8	Bon	Moyen
Pressions	Feux			-	Bon	Moyen	+	Moyen	Moyen	-	Bon	Moyen	-	Bon	Moyen
	Dépérissement			-	Bon	Moyen	-	Bon	Moyen	+	Moyen	Moyen	-	Bon	Moyen
	Pâturage		Absence (Bon)	+	Moyen	Moyen	++	Faible	Moyen	++	Faible	Moyen	+	Moyen	Moyen
	Coupes			++	Faible	Moyen	+	Moyen	Moyen	+	Moyen	Moyen	+	Moyen	Moyen
Pathogènes			++	Faible	Moyen	-	Bon	Moyen	++	Faible	Moyen	++	Moyen	Moyen	
Niveau de viabilité des parcelles de chaque exposition				Assez bon			Assez bon			Moyen			Bon		
Etat de la forêt				Assez bon											

## II. Valorisation phytochimique du pin d'Alep

Dans la présente partie, notre démarche a consisté, tout d'abord, l'extraction des métabolites secondaires notamment les phénols totaux, les flavonoïdes et les tanins contenues dans les écorces et les aiguilles du pin d'Alep, par deux méthodes d'extraction, et par la suite la quantification de ces métabolites et en fin, l'évaluation de leur activité antioxydante.

### 1. Variabilité du rendement des extractibles

Le rendement d'extraction est le rapport de la quantité de substances naturelles extraites par l'action extractive d'un solvant à la quantité de ces substances contenues dans la matière végétale (Gélébart, 2016). Il dépend de plusieurs paramètres tels que : le solvant, le pH, la température, le temps d'extraction et la composition de l'échantillon (Nait Sidi Ahmed, 2012 ; Quy Diem Do *et al.*, 2014). Dans cette étude, le rendement (l'extrait sec obtenu après l'évaporation du solvant contenant les extractibles) a été déterminé par rapport à 40 g de la matière végétale (écorces et aiguilles de pin d'Alep) pour les deux types d'extraction.

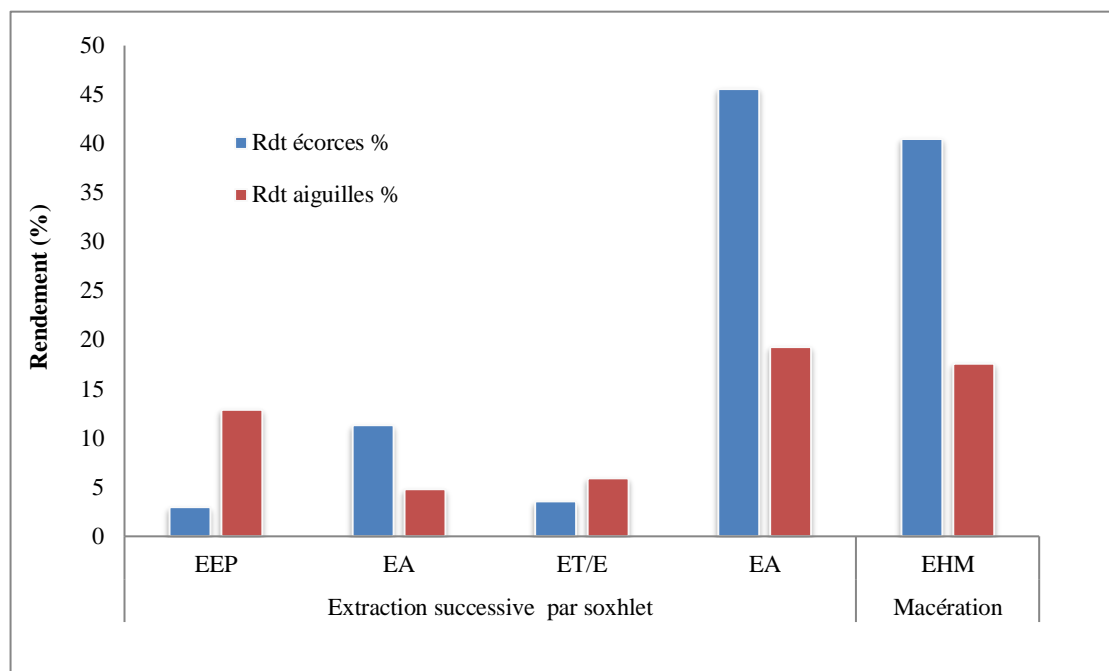
Les rendements d'extraction de différentes fractions sont reportés dans le tableau 27 et représentés par la figure 53. Les résultats montrent une grande variabilité des rendements en extractibles entre les deux méthodes d'extraction et entre les solvants utilisés, avec des pourcentages allant de 2,98 à 45,60% pour l'écorce et de 4,80 à 19,25% pour les aiguilles. Ce résultat présume, au préalable la richesse des écorces et des aiguilles de pin d'Alep en métabolites secondaires et en composés phénoliques.

**Tableau 27.** Rendement d'extraction des composés phénoliques dans les différentes fractions des écorces et des aiguilles de pin d'Alep.

Méthodes	Solvants	Ecorces		Aiguilles	
		M <sub>ext</sub> (g)	Rdt %	M <sub>ext</sub> (g)	Rdt %
Extraction par Soxhlet	Ether de pétrole	1,192	2,98	5,165	12,91
	Acétone	4,529	11,32	1,921	4,80
	Toluène/éthanol	1,432	3,58	2,378	5,94
	Eau	18,24	45,60	7,7	19,25
Macération	Méthanol 70%	16,20	40,51	7,032	17,58

Pour la première extraction, il s'agissait de déterminer l'efficacité de chaque solvant pour l'extraction de composés extractibles des deux parties de la plante (écorces et aiguilles). Ces extractions donnent un aperçu de la proportion des différents types de molécules (apolaires, faiblement/moyennement polaires et polaires) contenues dans les écorces et les aiguilles du pin d'Alep. Des extractions en extracteur Soxhlet ont été réalisées pour plusieurs cycles avec différents solvants mentionnés dans le tableau 27.

Nous constatons que dans le cas de l'extraction successive par Soxhlet, le taux d'extractibles varie d'un solvant à l'autre.



**Figure 53.** Rendement d'extraction des composés phénoliques dans les différentes fractions des écorces et des aiguilles de pin d'Alep.

Le rendement d'extraction à l'éther de pétrole est pratiquement faible, il est de l'ordre 2,98 % pour les écorces. Cela peut être expliqué par le fait que le solvant utilisé en premier dans l'extraction successive est l'éther de pétrole. Ce dernier est un solvant apolaire avec un indice de polarité de 0,1. Ce solvant élimine tous les composés non phénoliques : les caroténoïdes et les pigments chlorophylliens, les graisses, lipides, stérols, cires et résine (Anton *et al.*, 2003 ; Kebièche *et al.*, 2011 ; Saha *et al.*, 2013 ; Saha, 2015) ; ce qui justifier le taux élevé de l'extrait par l'éther de pétrole chez les aiguilles (EEPA) avec 12,91%, les pigments chlorophylliens contenues dans ces derniers sont la cause principale de l'augmentation du rendement pour cette fraction (Tahouo, 2016).

La fraction acétonique chez l'écorce donne un bon rendement de 11,32%, comparativement aux aiguilles qui présentent un faible rendement (4,80%). Concernant la fraction (toluène/éthanol) les écorces possèdent un taux faible d'extractibles qui est 3,58%, tandis que, les aiguilles possèdent un taux légèrement élevé (5,94%). Cette variabilité se justifie par la répartition différente des métabolites dans les parties de l'arbre et la force éluante de chaque solvant (0,56 pour l'acétone et 0,29/0,88) pour le mélange (toluène/éthanol). L'acétone est un solvant moyennement polaire permet d'isoler les molécules polaires et moyennement polaires : terpenoïdes, phénols, lactones, alcaloïdes,

protéines, acide aminés, gommés, mucilage (Anton *et al.*, 2003 ; Tahouo, 2016). Le mélange éthanol/toluène (70/30 v/v) est en contact avec la poudre végétale (écorces ou aiguilles) pendant plusieurs cycles, ce qui a permis d'extraire la totalité des composés apolaires et une grande partie des composés moyennement polaires et polaires solubles dans l'éthanol. Quant à l'eau, qui est le solvant le plus polaire (Gélébart, 2016), elle a permis de finir l'extraction des composés polaires qui ne sont pas solubles dans l'éthanol. Le taux d'extractibles le plus élevé a été remarqué pour cette fraction avec des taux de 45,60% et 19,25% pour l'écorce et les aiguilles respectivement.

Pour la deuxième méthode, l'extraction à froid ou la macération conventionnelle à température ambiante par le méthanol à 70%. Le taux d'extractibles pour l'écorce est plus important (40,51%) par rapport à celui des aiguilles (17,58%). Ce taux élevé peut être justifié par l'utilisation combinée d'un solvant organique (le méthanol) et l'eau, cette combinaison peut faciliter l'extraction des substances chimiques polaires qui sont solubles dans l'eau et/ou dans le solvant organique (Quy Diem Do *et al.*, 2014). Plusieurs auteurs cités par Bartnick *et al.* (2006) ont constaté que le méthanol donne le rendement le plus élevé des extractibles. Dans ce contexte, Rahzi *et al.* (2015) ont observé que le solvant le plus efficace pour extraire les polyphénols à partir des écorces d'*Acacia mollissima* du Maroc est le méthanol (80%) et il est recommandé parmi les solvants utilisés dans leurs investigations.

Selon les résultats cités précédemment, nous pouvons déduire que la nature des molécules extraites est différente en fonction du solvant et de sa polarité. La technique d'extraction est une étape très importante dans l'isolement et la récupération des composés phytochimiques existants dans le matériel végétal (Quy Diem Do *et al.*, 2014). Elle est influencée par sa nature chimique, la méthode utilisée, la taille d'échantillon étudié, ainsi que la présence de substances interférentes (Stalikas, 2007). La variation des résultats d'un extrait à l'autre est due principalement aux solvants d'extraction utilisés, dont les solvants les plus polaires montrent un rendement d'extraction important par rapport aux solvants moins polaires (Bruneton, 1999). La différence de polarité des solvants utilisés permet l'extraction d'une large gamme de métabolites secondaires (Green, 2004).

Par ailleurs, l'extrait ne renferme pas uniquement des polyphénols et des flavonoïdes, il contient également d'autres substances naturelles (Békro *et al.*, 2007 ; Kebièche *et al.*, 2011). Ces substances peuvent influencer directement sur le rendement des extraits.

Les écorces en générale et du pin d'Alep en particulier sont riches en tanins condensés et hydrolysables (Nahal, 1962 ; Doat, 1978 ; Fechtal *et al.*, 1996 ; Benlarbi *et al.*, 1998 ; Chupin, 2014 ; Abdul-Hafeez *et al.*, 2014 ; Salhi, 2020), elles sont présentes en quantité

importante dans cette partie de l'arbre et sont l'un des causes essentielles de l'augmentation du rendement d'extraction quelque soit la méthode d'extraction appliquée (Soxhlet ou macération).

Un autre facteur pourrait également avoir un impact sur le rendement d'extraction, c'est la température qui est généralement très élevée dans le cas de la première méthode (extraction par Soxhlet) par rapport à la deuxième méthode (macération à froid). Selon Penchev *et al.* (2015), la progression de température d'extraction peut augmenter le rendement de l'extrait et cela peut être dû à l'augmentation de l'énergie cinétique du solvant. De plus, cela perturbe les interactions entre le soluté et le solvant, les liaisons hydrogènes et les attractions dipolaires (Richter *et al.*, 1996). Cela diminue également la viscosité des solvants en phase liquide ce qui permet une meilleure interaction entre le soluté et le solvant.

L'extraction successive qui combine les solvants apolaires et polaires permet de partitionner les extractibles en différents fractions et le total d'extractibles donne une idée sur la teneur de ces extractibles. Le total d'extractibles d'écorces étudiées par cette méthode est de 63,48 % comparativement avec l'extraction à froid.

## 2. Dosage phytochimique des extraits

Les teneurs en phénols totaux, en flavonoïdes et en tannins des écorces et des aiguilles du pin d'Alep étudiés ont été déterminées à partir des équations des courbes d'étalonnages réalisées en utilisant des standards couramment utilisés dans la littérature. La quantité des phénols totaux, des flavonoïdes et des tannins a été rapportée en microgramme d'équivalent d'acide gallique, de la quercétine et de la catéchine par milligramme d'extrait (Tableau 28).

**Tableau 28.** Les équations des courbes d'étalonnage des standards utilisés dans le dosage des métabolites.

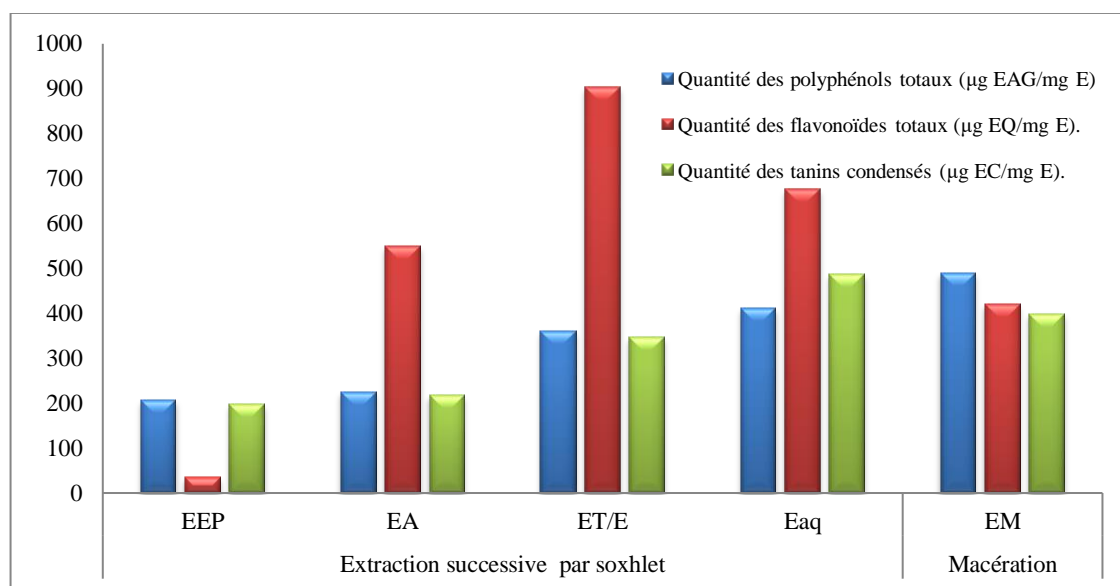
Métabolites	Standards	Équations	Résultats
Phénols totaux	Acide gallique	$y = 0,0029x + 0,032$ ; $R^2 = 0,9985$	µg EAG/mg
Flavonoïdes totaux	Quercétine	$y = 0,0028x + 0,0041$ ; $R^2 = 0,9913$	µg EQ/mg
Tanins	Catéchine	$y = 0,0028x + 0,047$ ; $R^2 = 0,9939$	µg EC/mg

Les résultats de la teneur en polyphénols totaux, flavonoïdes ainsi qu'en tannins des extraits des différents solvants obtenus sont récapitulés dans le tableau 29, et illustrés dans la figure 54.

**Tableau 29.** Teneurs en phénols totaux, flavonoïdes et tanins des différents extraits contenus dans l'écorce et les aiguilles du pin d'Alep.

Composés	Type	Solvants	Ecorces	Aiguilles	Moyenne
Polyphénols totaux (µg EAG/mg)	Extraction successive par Soxhlet	Ether de pétrole	206,90 ± 5,8 <sup>d</sup>	103,4 ± 5,9 <sup>b</sup>	232,03
		Acétone	225,86 ± 5,3 <sup>cd</sup>	122,4 ± 5,3 <sup>b</sup>	
		Toluène/éthanol	360,34 ± 2,9 <sup>bc</sup>	187,9 ± 2,9 <sup>b</sup>	
		Eau	410,92 ± 7,4 <sup>ab</sup>	238,5 ± 7,5 <sup>ab</sup>	
	Macération	Méthanol 70%	489,66 ± 16,4 <sup>a</sup>	317,2 ± 16,4 <sup>a</sup>	403,43
Valeur p (ANOVA)			0,001	0,018	
Flavonoïdes totaux (µg EQ/mg MS)	Extraction successive par Soxhlet	Ether de pétrole	35,96 ± 8,8 <sup>e</sup>	10,96 ± 0,5 <sup>e</sup>	458,37
		Acétone	550,25 ± 3,9 <sup>c</sup>	443,11 ± 3,9 <sup>c</sup>	
		Toluène/éthanol	903,99 ± 5,1 <sup>a</sup>	546,85 ± 5,1 <sup>a</sup>	
		Eau	677,20 ± 1,8 <sup>b</sup>	498,63 ± 1,8 <sup>b</sup>	
	Macération	Méthanol 70%	420,65 ± 2,1 <sup>d</sup>	242,08 ± 2,1 <sup>d</sup>	331,37
Valeur p (ANOVA)			0,000	0,000	
Tanins totaux (µg EC/mg MS)	Extraction successive par Soxhlet	Ether de pétrole	198,21 ± 6,1 <sup>c</sup>	91,07 ± 6,1 <sup>c</sup>	230,06
		Acétone	217,86 ± 5,5 <sup>c</sup>	110,71 ± 5,5 <sup>c</sup>	
		Toluène/éthanol	346,43 ± 3,1 <sup>b</sup>	167,86 ± 3,1 <sup>b</sup>	
		Eau	488,10 ± 15,8 <sup>a</sup>	220,24 ± 7,8 <sup>b</sup>	
	Macération	Méthanol 70%	398,81 ± 7,8 <sup>b</sup>	301,7 ± 17,0 <sup>a</sup>	350,30
Valeur p (ANOVA)			0,000	0,001	

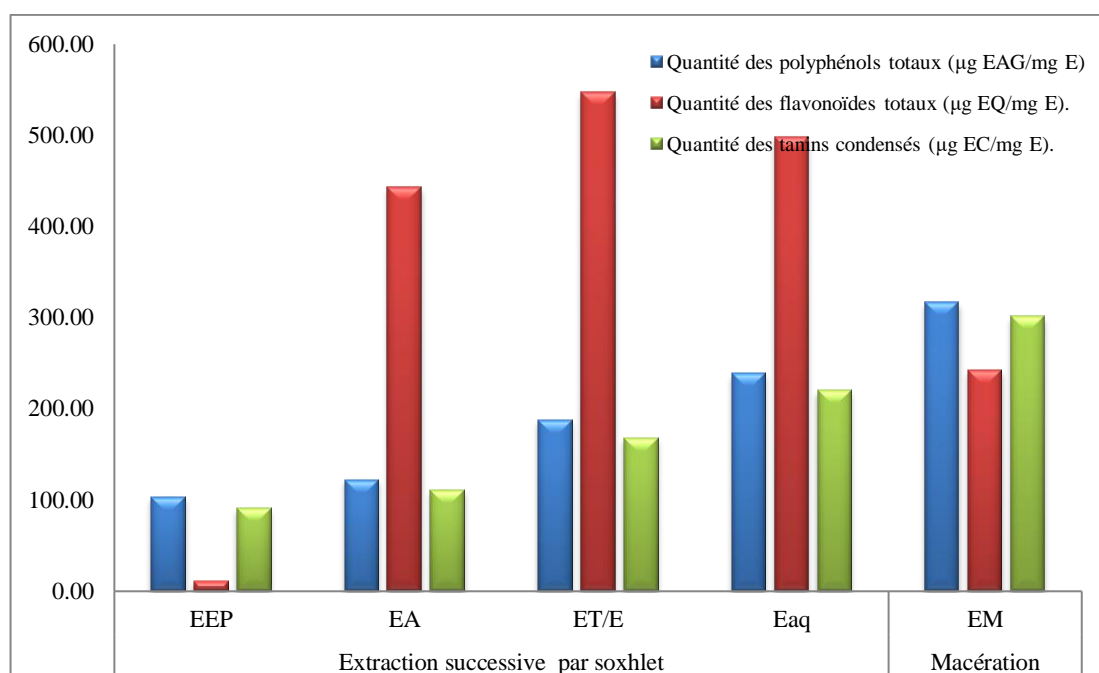
Il ressort que la quantité des composés phytochimiques varie d'un solvant à l'autre et d'une méthode à l'autre (Figures 54 et 55).



**Figure 54.** Teneurs en polyphénols, flavonoïdes et tanins de l'écorce du pin d'Alep.

Concernant la première méthode d'extraction, des faibles teneurs en phénols totaux, en flavonoïdes et en tanins ont été observées dans le cas d'extrait à l'éther de pétrole pour les écorces et les aiguilles de pin d'Alep avec des teneurs de 206,90 ± 5,8 / 103,4 ± 5,9 µg EAG/mgE pour les phénols totaux, 35,96 ± 8,8 / 10,96 ± 0,5 µg EQ/mgE pour les flavonoïdes et 198,21 ± 6,1 / 91,07 ± 6,1 µg EC/mgE pour les tanins respectivement (Tableau

29). Ceci peut s'expliquer par le fait que l'éther de pétrole est le premier solvant apolaire utilisé lors de l'extraction successive des extractibles (Saha Tchinda *et al.*, 2013 ; Saha Tchinda, 2015).



**Figure 55.** Teneur en polyphénols, flavonoïdes et tannins des aiguilles de pin d'Alep.

Suivi par la fraction acétonique avec des taux de  $225,86 \pm 5,3 / 122,4 \pm 5,3 \mu\text{g EAG/mg E}$  pour les phénols totaux et  $550,25 \pm 3,9 / 443,11 \pm 3,9 \mu\text{g EQ/mg E}$  pour les flavonoïdes. Tandis que les tanins enregistrent des valeurs moyennes pour l'écorce et les aiguilles, ces valeurs sont  $217,86 \pm 5,5 / 110,71 \pm 5,5 \mu\text{g EC/mg E}$  respectivement.

Pour la fraction aqueuse, les teneurs en phénols totaux et en tanins sont élevées dans les écorces et les aiguilles pour les deux méthodes d'extraction ; ces teneurs sont respectivement  $410,92 \pm 7,4 / 238,5 \pm 7,5 \mu\text{g EAG/mgE}$  pour les phénols et  $488,10 \pm 15,8 / 220,24 \pm 7,8 \mu\text{g EC/mgE}$  pour les tanins. Des taux moyens sont enregistrés pour la fraction toluène/éthanol dans les écorces et les aiguilles; ces taux sont respectivement de l'ordre  $360,34 \pm 2,9 / 187,9 \pm 2,9 \mu\text{g EAG/mg}$ . Tandis que cette dernière donne la plus haute teneur en flavonoïdes pour les deux parties de l'arbre avec  $903,99 \pm 5,1 \mu\text{g EQ/mgE}$  pour l'écorce et  $(238,5 \pm 7,5 \mu\text{g EQ/mgE})$ , suivi par la fraction aqueuse qui donne des teneurs moyennes  $(677,20 \pm 1,8 \mu\text{g EQ/mgE})$  pour l'écorces et  $(498,63 \pm 1,8 \mu\text{g EQ/mg E})$  pour les aiguilles.

Pour l'extraction à froid, on note des teneurs élevées en phénols totaux, en flavonoïdes et en tanins, avec des valeurs de  $489,66 \pm 16,4 / 317,2 \pm 16,4 \mu\text{g EAG/mgE}$  des phénols enregistrés pour les écorces et les aiguilles respectivement. Alors que les flavonoïdes enregistrent des teneurs moyennes  $420,65 \pm 2,1 \mu\text{g EQ/mgE}$  pour les écorces et  $242,08 \pm 2,1$

µg EQ/mg) pour les aiguilles. Les tanins ont enregistré des valeurs inférieures à celles des phénols et des flavonoïdes pour l'écorce et les aiguilles ( $398,81 \pm 7,8$  µg EC/mg E ;  $301,79 \pm 17,0$  µg EC/mg E) respectivement.

Les teneurs en polyphénols totaux obtenus par les deux méthodes d'extraction illustrées dans le tableau 28, révèlent une différence très hautement significative entre les solvants utilisés ( $p = 0,001$  et  $0,018$ ). Toutefois, la macération semble être la meilleure méthode d'extraction des polyphénols totaux pour les aiguilles et les écorces soit en moyenne  $403,43$  contre  $232,03$  mg EQ AG/g E pour l'extraction au Soxhlet.

Les résultats de la teneur en flavonoïdes des aiguilles et d'écorces par les différents solvants montrent que l'extraction à chaud est préférable pour les flavonoïdes à savoir une moyenne de  $458,37$  mg EQ Q/gE contre  $331,37$  mg EQ Q/gE pour la macération. L'ANOVA indique qu'il existe une différence très hautement significative entre les teneurs en flavonoïdes en fonction des solvants utilisés est significative ( $p < 0,000$ ). La grande distinction entre les parties apparaît au niveau de la richesse de certaines par les flavonoïdes ; l'écorce enregistre un maximum de flavonoïdes ( $517,61$  mg EQ Q/gE) tandis que les aiguilles renferment des teneurs plus faibles ( $348,33$  mg EQ Q/gE).

L'analyse des résultats de la teneur en tanins condensés révèle que la macération est plus efficace pour l'extraction des tanins ( $350,30$  mg EQ C/gE en moyenne) que l'extraction au Soxhlet ( $230,06$  mg EQ C/gE en moyenne). Statistiquement la différence entre les teneurs en tanins condensés en fonction des solvants utilisés est très hautement significative ( $p < 0,001$ ).

Les procédés d'extraction des composés phytochimiques à partir des plantes constituent une étape cruciale, car elles sont déterminantes de la qualité et de la quantité de principes molécules recherchées, qui reflètent directement leurs activités pharmacologiques (Salhi, 2020). Considérant la diversité et les propriétés structurales complexes des composés phénoliques, il est impossible de mettre au point des méthodes exhaustives pour leur extraction (Vercauteren *et al.*, 1998). Ainsi, les conditions de l'extraction, à savoir le type du solvant, la taille des particules, l'état du matériel végétal (sec ou frais) et les conditions thermiques de l'extraction peuvent influencer significativement le taux et la nature des composés extraits (Naczka *et al.*, 2006 ; Lim et Murtijaya, 2007).

Dans la présente étude, après le séchage de l'écorce et des aiguilles à l'air libre, nous avons procédé au broyage et tamisage de la matière végétale de façon à pouvoir récupérer la poudre la plus fine possible, pour augmenter la surface de contact avec le solvant et améliorer le rendement de l'extraction. Sachant que le taux d'extraction des principes actifs est

inversement proportionnel avec la taille des particules obtenues après le broyage (Lim et Murtijaya, 2007).

Les résultats de l'analyse phytochimique ont montré que les deux méthodes avaient des niveaux significatifs en phénols totaux, en flavonoïdes et en tanins condensés, avec des différences importantes entre les solvants utilisés et entre les parties de l'arbre. Ces résultats peuvent être expliqués par la solubilité différentielle des composés phénoliques polaires qui sont solubles dans les solvants polaires et les composés phénoliques apolaires qui sont solubles dans les solvants apolaires d'une part, et d'autre part par la méthode d'extraction.

Des travaux antérieurs ont rapporté que le pin d'Alep possède plusieurs molécules bioactives appartenant à des métabolites secondaires tels que les polyphénols, les flavonoïdes, les tanins et les terpenoïdes (Mouhajir *et al.*, 2001 ; Benouadah *et al.*, 2018 ; Meziti *et al.*, 2019 ; Kotroni *et al.*, 2019 ; Bouyahya *et al.*, 2019 ; Salhi, 2020).

Concernant les phénols totaux, l'extrait méthanolique possède un taux très élevé de ce composé comparativement avec les autres solvants, cela est justifié par le fait que le mélange méthanol/eau est composé par deux solvants polaires. Cette combinaison a pu extraire le maximum de ces composés phénoliques polaires qui comprennent des phénols solubles dans le méthanol et autres sont hydrosolubles. Toutefois, la macération semble être la meilleure méthode d'extraction des phénols totaux. L'extraction de ces derniers par cette méthode, bien que généralement longue et exige des solvants organiques qui sont chers et dangereux pour la santé (Garcia-Salas *et al.*, 2010 ; Mahmoudi *et al.*, 2013) ; elle est la seule méthode utilisable dans le cas de l'extraction d'un ensemble de molécules fragiles (Ben Amor, 2008). Elle permet également une meilleure extraction des composés phénoliques d'autant plus qu'elle peut entraîner d'autres composés non phénoliques et permet de rester fidèle à l'utilisation traditionnelle de la plante (Bruneton, 1999 ; Mueller-Harvey, 2001).

Nos résultats sont comparés avec celles de Salhi (2020), qui vise à étudier la composition phytochimique des extraits aqueux et éthanolique de l'écorce de *Pinus halepensis* marocain et d'évaluer leur potentiel antioxydant et anti-hyperglycémiant. Les teneurs en polyphénols totaux trouvées dans l'extrait éthanolique et aqueux sont de  $(423,51 \pm 1,14 \text{ mg EAG/g d'extrait})$  et  $(401,85 \pm 3,26 \text{ mg EAG/g d'extrait})$  respectivement. Ces valeurs sont inférieures à nos résultats dans le cas de l'extrait méthanolique et aqueux. Et légèrement supérieures aux résultats obtenus dans le cas des premiers extraits. L'étude menée par Abdul-Hafeez (2014), sur l'extrait aqueux des écorces de pin d'Alep égyptien, le résultat de l'estimation des phénols totaux est de  $(145,67 \text{ mg/g d'extrait})$ , ce résultat est inférieur à nos

résultats pour tous les extraits. Cette différence est justifiée par les conditions écologiques, géographiques et climatiques différentes entre les trois pays.

Selon l'étude menée par Kadri *et al.* (2014) faite sur les graines de *P. halepensis* (pin algérien), les teneurs en polyphénols totaux trouvées dans l'extrait méthanolique (50%) sont de 3,71 mg EAG/ g d'extrait. Cette valeur est inférieure à nos extraits obtenus par divers solvants. Lantto *et al.* (2009) ont révélés une teneur plus élevée en phénols totaux (266 mg EAG/ gE) dans l'extrait acétonique des graines de *P. halepensis* (pin Sibérien) mais elle est également inférieure à nos résultats de l'écorce, et supérieure à celle de l'extrait par l'éther de pétrole et l'extrait acétonique. Cette différence peut être expliquée par la répartition inégale des polyphénols dans les différents organes d'une plante (Bruneton, 1993) et dans la différence d'un certain nombre de facteurs intrinsèques et extrinsèques à savoir les conditions de croissance, le processus de maturation, les techniques d'échantillonnage et les conditions de stockage (Bergonzi *et al.*, 2001; Wang et Zheng, 2001) ou bien les facteurs climatiques et environnementaux : la zone géographique, sécheresse, sol..., la méthode d'extraction et de quantification qui peuvent aussi influencer l'estimation de la teneur en composés phénoliques (Ebrahinzadeh *et al.*, 2008 ; kadi *et al.*, 2018).

Les extraits obtenus avec les solvants les plus polaires notamment l'acétone, le mélange toluène/éthanol (30/70 v/v) et l'eau sont les plus riches en flavonoïdes pour les deux parties de la plante (Figures 54 et 55). Ces observations ont été confirmées par les résultats menés par Mahmoudi *et al.* (2013), qui montrent que l'éthanol et l'acétone restent les solvants les plus efficaces d'extraction des flavonoïdes. Et ce n'est pas le même cas pour le méthanol 70% qui est un solvant très polaire, la teneur en flavonoïdes est basse, cela peut se justifier soit par la méthode d'extraction, soit par la nature de certains flavonoïdes qui sont solubles dans l'eau. Selon Bruneton, (1999), tous les flavonoïdes n'ont pas la même propriété de solubilité car certains flavonoïdes sont solubles dans l'eau et l'alcool alors que d'autres ont des propriétés hydrosolubles extrêmement faibles. Hadj Salem, (2009) a confirmé que le méthanol est parmi les solvants les plus efficaces pour l'extraction des flavonoïdes.

Selon l'étude menée par Salhi (2020), faite sur les écorces de *P. halepensis* (pin marocain), la teneur en flavonoïdes obtenue dans l'extrait aqueux est de  $738.97 \pm 1.39$  mg ER/g d'extrait et celle trouvés dans l'extrait éthanolique est de  $865.40 \pm 12.10$  mg ER/g d'extrait. Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues dans l'écorce de pin d'Alep de Béni Oudjana (Algérie).

L'augmentation de la température favorise d'une part la diffusion et la solubilité des substances extraites, d'autre part elle détruit certaines substances fragiles (Jokić *et al.*, 2010).

L'augmentation des teneurs en tanins condensés dans l'extraction à chaud est due par la destruction des polyphénols oxydases (PPO) par la chaleur qui baissent la teneur en polyphénols ; ainsi, la rupture de liaisons entre les polyphénols et d'autres substances (protéines, polysaccharides...) menant à l'accessibilité à ces principes actifs peut expliquer de sa part cette abondance (Lutz et Henri'quez, 2011).

L'efficacité de l'extraction au Soxhlet est liée au fait que le solvant qui se condense et qui vient au contact du végétal est toujours pur, permettant de meilleurs coefficients de partage. Par contre, dans le cas de la macération, le solvant devant extraire la matière végétale peut arriver à saturation et perdre progressivement sa capacité d'extraction au cours du procédé (Hadj Salem, 2009).

Ces valeurs considérables en métabolites seraient responsables de la propriété antioxydante, anti-inflammatoire, antifongiques, antimicrobiennes des écorces de pin d'Alep (Kadi *et al.*, 2018).

La poudre de l'écorce de *P. halepensis* est employée par les herboristes et les tradithérapeutes dans le traitement des brûlures cutanées (Salhi *et al.*, 2019 ; Salhi, 2020). En Algérie la résine de l'écorce est employée dans le traitement de plusieurs maladies (Boulaacheb, 2009).

L'étude menée par Salhi (2020) montre que le *P. halepensis* inhibe les enzymes impliquées dans le diabète ( $\alpha$ -amylase et  $\alpha$ -Glucosidase) à des concentrations très faibles. Ces effets ont été vérifiés dans l'approche *in vivo* notamment le test de tolérance de l'amidon ce qui explique ainsi le mécanisme d'action de la plante. Dans le test de tolérance au glucose, l'extrait éthanolique révèle également une activité anti-hyperglycémiant intéressante et dont le mécanisme d'action reste à déterminer. L'ensemble des résultats obtenus montrent que *P. halepensis* possède un potentiel prometteur anti-hyperglycémiant et antioxydant et constitue une source importante pour identifier des substances bioactives.

Des études ethnomédicinales ont indiqué que *P. halepensis*, est utilisé comme remède protecteur contre les troubles respiratoires et digestifs, l'hypertension artérielle, les infections microbiennes. Ces utilisations médicinales varient en fonction de la partie utilisée et des régions. Les extraits et les huiles essentielles de *P. halepensis*, ont démontré plusieurs effets biologiques, notamment antimicrobiens, antidiabétiques, anti-inflammatoires, cytotoxiques, antiparasitaires et hépatoprotecteurs. Les utilisations traditionnelles et les effets biologiques de *P. halepensis*, ont été attribués aux nombreuses molécules appartenant à différentes classes chimiques telles que les terpénoïdes, les acides phénoliques, les flavonoïdes, les acides gras et les stéroïdes, les aldéhydes et les cétones (El Omari *et al.*, 2021).

### 3. Evaluation de l'activité antioxydante

L'activité antioxydante (AA) de l'ensemble des extraits vis-à-vis du radical DPPH a été évaluée spectro-photométriquement en suivant la réduction de ce radical qui s'accompagne par son passage de la couleur violette à la couleur jaune mesurable à 517 nm. En faisant varier la concentration des extraits et en calculant pour chaque concentration le pourcentage d'inhibition correspondant (PI %) ; nous avons établi les profils d'activité oxydante, et c'est à partir de ces profils que nous avons déduit également les valeurs correspondantes aux concentrations inhibitrices (IC<sub>50</sub>). L'examen du pourcentage d'inhibition des extraits d'écorce et des aiguilles du pin d'Alep a montré différents profils d'activité antioxydante selon le solvant et le type d'extraction. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 30 et l'annexe V. Les concentrations inhibitrices IC<sub>50</sub> sont calculées à partir des équations mentionnées présentées dans le tableau en-dessous, pour mieux caractériser le pouvoir antioxydant.

**Tableau 30.** Équations des courbes d'étalonnage des extraits et d'acide ascorbique.

Organe	Type d'extraction	Solvants	Équations des courbes d'étalonnage
Ecorces	Extraction successive par soxhlet	Ether de pétrole	$y = 21,156x + 10,453 ; R^2 = 0,7129$
		Acétone	$y = -7,4776x + 92,542 ; R^2 = 0,9946$
		Toluène/éthanol	$y = -6,3788x + 83,299 ; R^2 = 0,8182$
		Eau	$y = -32,207x + 87,129 ; R^2 = 0,9859$
	Macération	Méthanol 70%	$y = 15,493x + 48,051 ; R^2 = 0,2098$
Aiguilles	Extraction successive par soxhlet	Ether de pétrole	$y = 6,4231x + 8,0904 ; R^2 = 0,5251$
		Acétone	$y = -4,2186x + 74,062 ; R^2 = 0,2213$
		Toluène/éthanol	$y = -2,5941x + 73,584 ; R^2 = 0,1238$
		Eau	$y = -6,657x + 81,939 ; R^2 = 0,7102$
	Macération	Méthanol 70%	$y = -7,0569x + 89,268 ; R^2 = 0,6554$
Standard		Acide ascorbique	$y = 32,667x + 35,577 ; R^2 = 0,995$

L'activité antiradicalaire des différents extraits et de l'acide ascorbique est exprimée par les concentrations inhibitrices (IC<sub>50</sub>). Les valeurs d'IC<sub>50</sub> de différentes fractions sont reportées dans le tableau 31.

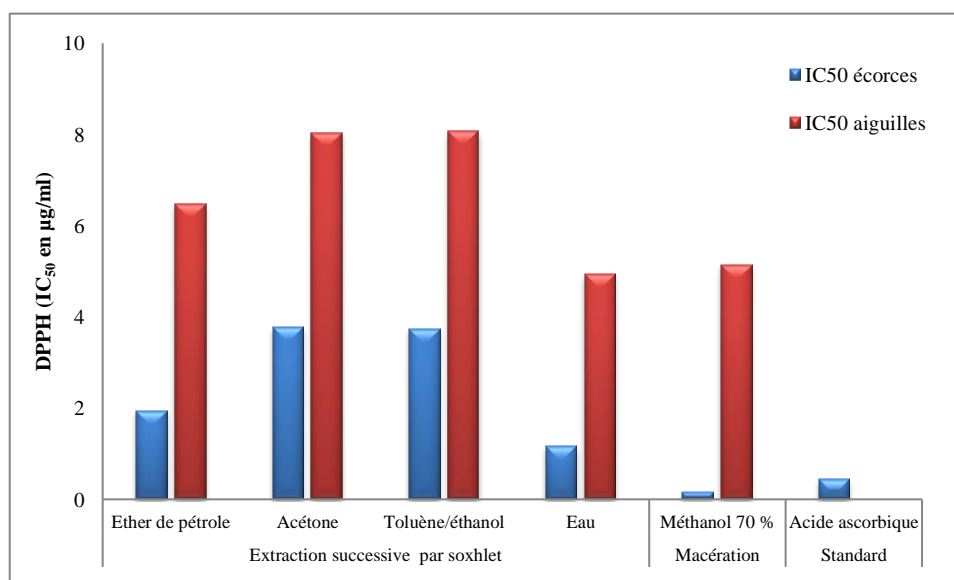
**Tableau 31.** Activité antioxydante des différentes fractions des écorces et des aiguilles du pin d'Alep vis-à-vis du radical DPPH (les valeurs IC<sub>50</sub> sont en µg/ml).

Extraction	Solvants	AA (Ecorces)	Inhibition %	AA (Aiguilles)	Inhibition %
Extraction successive par Soxhlet	Ether de pétrole	1,94 ± 0,07 <sup>ab</sup>	45,55	6,46 ± 0,17 <sup>ab</sup>	18,66
	Acétone	3,79 ± 1,66 <sup>a</sup>	91,88	8,04 ± 2,02 <sup>a</sup>	79,80
	Toluène/éthanol	3,74 ± 2,78 <sup>a</sup>	85,50	8,08 ± 1,95 <sup>a</sup>	79,20
	Eau	1,17 ± 0,02 <sup>b</sup>	83,13	4,93 ± 0,85 <sup>b</sup>	84,55
Macération	Méthanol 70%	0,15 ± 0,11 <sup>b</sup>	78,97	5,15±0,43 <sup>b</sup>	91,40
Standard	Acide ascorbique	0,44 ± 0,03 <sup>b</sup>	100	0,44 ± 0,03 <sup>c</sup>	100
<i>p</i>	-	0,017	-	0,000	-

Les résultats du tableau 31 et la figure 56 montrent que les  $IC_{50}$  varient en fonction du type d'extraction, de solvant utilisé et selon la partie de l'arbre considéré. En effet, la plus faible  $IC_{50}$  est notée chez l'extrait méthanolique avec une  $IC_{50}$  de  $0,15 \pm 0,11 \mu\text{g/ml}$  pour l'écorce, tandis que l'extrait aqueux des aiguilles enregistre la valeur la plus faible de  $IC_{50}$  ( $4,93 \pm 0,85 \mu\text{g/ml}$ ).

Le standard testé (acide ascorbique) a enregistré de bonne concentration inhibitrice avec une valeur de  $0,43 \pm 0,013 \mu\text{g/ml}$ .

La valeur de l' $IC_{50}$  de l'extraction à froid de l'écorce par le méthanol 70% est inférieure que celle des aiguilles. L'ANOVA montre une différence hautement significative entre les solvants utilisés, la méthode d'extraction et les parties de l'arbre avec des valeurs de  $p = 0,017$  pour l'écorces et  $p > 0,000$  pour les aiguilles.



**Figure 56.** Activité antioxydante des différentes fractions des écorces et des aiguilles du pin d'Alep vis-à-vis du radical DPPH.

En comparant la capacité antioxydante de nos extraits des écorces avec celle de l'acide ascorbique à réduire le DPPH ( $0,43 \pm 0,03 \mu\text{g/ml}$ ), on constate qu'il n'existe pas une différence significative selon le test de Fisher entre l'extrait aqueux, l'extrait méthanolique et l'acide ascorbique utilisé comme un antioxydant standard, en effet, ces deux extraits et l'acide ascorbique partagent le même groupe homogène (b) pour l'écorce. Alors que, pour les aiguilles les deux extraits, acétonique et l'extrait par le mélange toluène/éthanol, les résultats sont proches avec des valeurs respectivement ( $8,04 \pm 2,02 \mu\text{g/ml}$  et  $8,08 \pm 1,95 \mu\text{g/ml}$ ) et partagent le même groupe homogène (a). Tandis que le troisième groupe (ab) est uniquement représenté par l'extrait de l'éther de pétrole pour les deux parties de l'arbre (écorce et aiguilles).

L'effet antioxydant des extraits de pin d'Alep a été évalué in vitro par le test DPPH. La capacité antioxydante des différents extraits a été déterminée à partir de l'IC<sub>50</sub>, c'est la concentration nécessaire pour réduire 50 % des radicaux. Notons qu'une valeur faible d'IC<sub>50</sub> implique une forte activité antioxydante d'un composé (Locatelli *et al.*, 2009 ; Kadi *et al.*, 2018 ; Salhi, 2020).

D'après l'analyse des résultats des IC<sub>50</sub>, les extraits de l'écorce du pin d'Alep présentaient une activité antioxydante importante que celui des aiguilles, notamment l'extrait aqueux et l'extrait méthanolique. Nos résultats sont complètement similaires à ceux indiqués dans la littérature. En effet, Abdul-Hafeez *et al.*, (2014) ont montré une activité très importante de l'extrait aqueux de l'écorce du pin d'Alep égyptien avec un pourcentage inhibiteur de 79,93 %. Les résultats obtenus sur l'analyse de l'activité antioxydante des extraits aqueux et éthanoliques de l'écorce de pin d'Alep marocain sont aussi satisfaisants avec  $3,28 \pm 0,37 \mu\text{g/ml}$  et  $3,1 \pm 0,42 \mu\text{g/ml}$  respectivement pour les deux extraits (Salhi, 2020). Salim et ses collaborateurs (2019) ont rapporté une activité antioxydante importante de différents extraits du pin d'Alep palestinien avec  $1,48 \mu\text{g/ml}$  pour l'extrait méthanolique des cônes. L'extrait méthanolique des jeunes cônes du pin d'Alep de la région de Medjana, dans l'est de l'Algérie a également démontré une activité antiradicalaire importante (Meziti *et al.*, (2019).

Les phénols sont des composés organiques qui contiennent un groupe hydroxyle lié directement à l'anneau aromatique et le H-atome du groupe hydroxyle peut emprisonner des radicaux de peroxy, empêchant d'autres composés à s'oxyder (Nguyen *et al.*, 2003). De cette façon, l'activité antioxydante est due à la présence des phénols. D'autres composés tels que l'acide ascorbique, le tocophérol et certains pigments contribuent aussi au pouvoir antioxydant des plantes (Li *et al.*, 2005 ; Tamert et Latreche, 2016).

La plupart des études expliquent la variation du potentiel antioxydant en fonction des solvants d'extraction selon leur polarité (Teh *et al.*, 20014 ; Yang *et al.*, 2014). Sharma et Bhat (2009), Saito et Kawabata (2005) stipulent que la variation de l'activité antioxydante en fonction des solvants d'extraction est due essentiellement à la variabilité dans leurs profils d'absorbance de DPPH. Les résultats révèlent aussi que l'effet antioxydant du pin d'Alep est plus puissant dans la macération que dans l'extraction par Soxhlet pour les deux parties de la plante. Ceci a été confirmé par plusieurs auteurs (Salim *et al.*, 2019 ; Rimawi *et al.*, 2019 ; El Omari *et al.*, 2020).

Falleh *et al.* (2008) ont montré que l'activité antioxydante ne dépend pas seulement à la concentration des polyphénols, mais également à la nature et la structure des antioxydants

dans l'extrait. Généralement, les polyphénols ayant un nombre élevé des groupements hydroxyles présentent une activité antioxydante très importante. La température est l'une des paramètres influençant le profil phytochimique des plantes et leurs activités biologiques diverses (M'Hiri, 2015). Les températures élevées conduisent à l'altération des composés phénoliques.

Nos extraits semblent avoir un potentiel antioxydant prometteur qui peut être utilisé comme traitement complémentaire aux traitements de diverses maladies liées au stress oxydant.

#### 4. Analyse de corrélation

Le traitement des données quantitatives des composés phytochimiques et la concentration inhibitrice des écorces et des aiguilles de pin d'Alep grâce aux matrices de corrélation de Pearson a permis de déduire qu'il n'y a pas une corrélation entre les flavonoïdes, la concentration inhibitrice (IC<sub>50</sub>) et le rendement des extraits (Tableaux 32 et 33). Alors que, il existe une corrélation positive et très significative entre le rendement de différents extraits des écorces et des aiguilles de pin d'Alep et les phénols totaux (0,6 et 0,8) d'une part, et tanins (0,7 et 0,8) d'autre part respectivement. Ces derniers présentent une corrélation négative avec la concentration inhibitrice. Cette corrélation est très hautement significative avec IC<sub>50</sub> (-1, -8) pour le rendement, hautement significative dans les cas de phénols totaux (-7, -6) et les tanins (-0,7, -0,5). Chez les extraits des écorces, la valeur de la corrélation de l'activité antioxydante des phénols totaux est légèrement élevée par rapport à celle des les tanins condensés. Alors que dans le cas des aiguilles, les coefficients de corrélation de deux composés phénoliques précédents sont identiques.

**Tableau 32.** Matrice de corrélation de Pearson (aiguilles de pin d'Alep).

Paramètres	Rendement	Phénols totaux	Flavonoïdes	Tanins	IC <sub>50</sub>
<b>Rendement</b>	1				
<b>Phénols totaux</b>	<b>0,6</b>	1			
<b>Flavonoïdes</b>	-0,3	0,2	1		
<b>Tanins</b>	<b>0,7</b>	<b>1,00</b>	0,2	1	
<b>IC<sub>50</sub></b>	<b>-1,00</b>	<b>-0,7</b>	0,3	<b>-0,7</b>	1

(En gras, les valeurs significatives à alpha = 5%).

**Tableau 33.** Matrice corrélation de Pearson (écorces de pin d'Alep).

Paramètres	Rendement	Phénols totaux	Flavonoïdes	Tanins	IC <sub>50</sub>
<b>Rendement</b>	1				
<b>Phénols totaux</b>	<b>0,8</b>	1			
<b>Flavonoïdes</b>	0,1	0,4	1		
<b>Tanins</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	0,4	1	
<b>IC<sub>50</sub></b>	<b>-0,8</b>	<b>-0,6</b>	0,4	<b>-0,5</b>	1

(En gras, les valeurs significatives à alpha = 5%).

### **III. Proposition d'un plan d'aménagement pour la pinède de Béni Oudjana**

Un plan d'aménagement simplifié (PAS) est proposé afin de montrer d'une manière très simple l'application des pratiques et techniques les plus adaptées pour une gestion rationnelle, effective et durable des ressources naturelles de la pinède de Béni Oudjana.

#### **1. Objectifs d'aménagement**

L'objectif principal de cet aménagement est d'améliorer la pinède de Béni Oudjana. Cette dernière constitue l'abri par excellence des espèces faunistiques et floristiques. Il protège le sol contre l'érosion par ses systèmes racinaires et ses houppiers. Afin d'atteindre cet objectif, les travaux d'aménagement doivent aboutir aux objectifs spécifiques suivants :

- Effectuer des aménagements sylvicoles.
- Réaliser des travaux d'entretien de toutes les infrastructures.
- Suivre systématiquement les pressions sur la forêt.
- Procéder à un suivi écologique de manière continue.

#### **2. Stratégie d'aménagement**

L'aménagement de forêt de Béni Oudjana est surtout sylvicole. Les activités d'aménagement seront effectuées en anticipant le rythme de la dynamique écologique. Autrement dit, les aménagements sylvicoles doivent prévenir et suivre l'évolution naturelle de la végétation. Le suivi fait partie intégrante du plan d'aménagement ; toutefois, l'objectif de cette étude étant la mise en place d'un plan de suivi est élaboré singulièrement.

L'inventaire des pressions servira d'outil de décision pour l'aménagement (repérage des zones sensibles, à aménager à court terme). L'aménagement de la pinède est spécifié à travers le cadre logique.

#### **3. Plan d'aménagement simplifié (PAS)**

Compte tenu des caractéristiques de la pinède et son environnement, les objectifs à assigner à l'aménagement et au développement des pinèdes de Beni Oudjana portent sur :

- Conception d'un aménagement qui s'adapte au contexte social et économique de la zone d'étude tenant compte des droits d'usage des populations concernées et des pratiques locales en matière de gestion des terrains.

- Amélioration du pâturage en forêt à travers une meilleure organisation des usagers, des traitements sylvicoles favorables à l'augmentation des ressources pastorales et des plantations pastorales diversifiées au niveau des vides non reboisables, des terres de parcours et des terrains dégradés dans le cadre d'un zonage agro-sylvo-pastoral.

- Permettre la réalisation des programmes de reboisements et de restauration à travers une meilleure organisation des usagers dans le cadre d'une politique dynamique et soutenue de reconstitution des forêts disparues et dégradées à long terme et d'un aménagement protecteur efficace.

- Définir un programme d'exploitation souple qui tient compte des possibilités de la forêt pour la production de bois d'œuvre et de bois de service, ceci nécessite l'intensification de gestion sylvicole des peuplements.

- Faire participer la population riveraine et enclavée par des méthodes appropriées et cohérentes (démarche participative) en s'appuyant sur l'organisation de celle-ci (associations d'usagers) et en relation avec les contextes socio-économiques et écologiques.

On a déjà souligné la fragilité de la forêt des Beni Oudjana. Il est indispensable de la protéger efficacement par des mesures juridiques et des actes de gestion d'une part, contre les maladies et les risques naturels qui peuvent porter atteinte à son intégrité (invasions insectes, dépérissement, incendies) d'autre part, et également contre toute utilisation irréversible, contre toute exploitation de nature à compromettre sa pérennité, contre toute fréquentation humaine et animale (pâturage anarchique, délits divers) excédant sa capacité de résistance.

#### **4. Recommandations**

À l'issue de ce présent constat, l'état actuel des pinèdes de la zone d'étude appelle à des actions de réhabilitation afin de sauvegarder la biodiversité menacée par cette dégradation. Parmi les recommandations à proposer aux décideurs du domaine forestier :

- Ouverture de la forêt de production au pâturage pendant une certaine phase de son développement (reboisements anciens, forêts jeunes) entraînant une rotation de ce pâturage dans le temps.

- Constitution d'un espace à vocation mixte sylvo-pastoral, exploité lui aussi de façon temporaire afin d'organiser la régénération et le renouvellement de la ressource pastorale.

- Création d'espaces pastoraux par des améliorations et des plantations.

- Lutte contre les incendies commence très en amont des dépôts de feux par une politique volontariste de prévention du risque par :

▪ Création et entretien de réseau des pistes, des points d'eau et des balisages tout au long de l'année.

▪ Création des tranchées pare-feu arborées et cloisonner le massif.

- Repérer l'équipement et former le personnel.
- Impliquer les riverains.
- Procéder à des traitements sylvicoles (coupes d'éclaircies au niveau des placettes à fortes densités, coupes d'assainissement au niveau des sujets sénescents ou morts et ainsi éviter qu'ils soient des foyers de pullulation de xylophages et de maladies).
- Réaliser des programmes de reboisements bien conçus afin de régénérer ce patrimoine forestier. La reforestation doit se faire préférentiellement avec des semences de la même région, en considérant la variation biogéographique comme critère d'échantillonnage et de stratégie de collecte des graines.
- Mettre en défens les plantations en interdisant l'accès aux jeunes semis par le cheptel tout en accentuant les surveillances et mettant en place un gardiennage strict.

Pour terminer cette série de recommandations, voici quelques propositions pouvant contribuer au maintien de la viabilité de la pinède naturelle de Bénis Oudjana :

- Il est proposé de développer des microprojets locaux afin de générer des revenus pour la population de la région (entre autres l'horticulture, l'apiculture, l'arboriculture, etc.), dans une optique d'amélioration des revenus de la population. C'est une forme de mesure de protection indirecte des ressources forestières.

- En considérant l'envergure de la forêt, le développement d'un partenariat en vue de la valorisation des services de l'écosystème forestier peut être envisagé. Exemple des études relatives au marché de bois, graines et écorces pourrait être réalisé.

- Pour le suivi des pressions, même si pour l'état de référence, il est recommandé que le gestionnaire forestier de la pinède de Bénis Oudjana utilise le Global Fires, un programme spatial (télédétection) opéré par l'Université de Maryland USA, avec la Conservation International. Ce programme permet de détecter, suivant une résolution de 50m\*50m, la chaleur émise par les feux. Il est alors nécessaire d'établir un moyen de communication avec le responsable du site (téléphone). Il est à noter que l'abonnement à ce programme est gratuit. Le suivi des pressions se déroule non seulement à l'intérieur des quelques parcelles, mais dans toute la forêt.

- La sensibilisation ou l'Education environnementale (apprendre pour agir, savoir pour préserver), selon une définition convenue en 1992 par le PNUD (Programme des Nations unies pour le Développement), l'UNESCO et l'OCDE Paris, l'éducation environnementale des adultes est « un processus permanent grâce auquel les individus prennent conscience de leur environnement et acquièrent les connaissances, les valeurs, les compétences, les

expériences ainsi que la détermination qui leur permettront d'agir individuellement et collectivement pour résoudre les problèmes environnementaux présents et futurs (...) et pour satisfaire leurs besoins sans compromettre ceux des générations futures ».

- L'éducation environnementale a pour tâche de diffuser le savoir sur l'influence physique et sociale, directe et indirecte, de l'environnement. Elle doit aussi transmettre les connaissances sur l'interaction entre les activités locales et leurs conséquences, qui peuvent se manifester avec un certain décalage. Les effets directs tels que la déforestation, le défrichement, les feux de végétation etc..., qui affectent de manière tangible la vie quotidienne.

Aujourd'hui, en raison des rapports entre l'altération de l'environnement géographique et les problèmes sociaux, l'éducation à l'environnement assume une importante fonction sociale. Relier entre eux les problèmes environnementaux et sociaux, replacer les problèmes écologiques dans le contexte de notre vie et action quotidienne constituent les enjeux importants pour l'éducation environnementale. En réalité, les problèmes écologiques n'existent pas, il existe seulement un grand nombre de problèmes sociaux. Pour qu'elle ait un sens dans la vie quotidienne, l'éducation environnementale doit aborder les problèmes écologiques à partir des facteurs sociaux et économiques qui y sont liés.

La gestion forestière doit être entreprise dans une optique de développement durable. Cette gestion à long terme s'appuie sur le triptyque « protection- exploitation-pérennisation ». Il s'agit, en effet, de prendre conscience que la saine gestion des ressources forestières, et en particulier le maintien de leurs potentialités de reproduction, est une des bases du développement à long terme de l'économie forestière et des sociétés rurales. Parmi les tendances à prendre en compte à moyen et à longs termes, il est raisonnable d'envisager la production du bois. Elle peut présenter un intérêt grandissant, soit pour un approvisionnement local (dans le cadre des usages divers du bois de pin d'Alep), soit sur des sites particuliers (stations forestières fertiles, conditions d'exploitation faciles). Il faut donc redonner une valeur économique aux pinèdes, si on veut pouvoir les entretenir, les améliorer et en conséquence, les sauvegarder.

# *Conclusion*

## **Conclusion**

La forêt de Bénis Oudjana constitue la première chaîne montagneuse de l'imposant massif des Aurès dans la partie orientale. Sa position septentrionale lui confère un statut privilégié des conditions écologiques malgré que certains secteurs apparaissent dégradés.

L'état actuel de cette forêt est le résultat de la superposition de diverses formes d'atteintes sur le milieu forestier au cours du temps. Cette étude a opéré différentes analyses : analyse sylvicole, analyse des pressions, analyse statistique et analyse de viabilité. Ces analyses ont pu ressortir qu'une végétation ligneuse, et plus précisément d'une forêt de type méditerranéen continental. Elle est essentiellement caractérisée par une adaptation à un climat sec en été et relativement humide en saison froide. Les espèces inventoriées représentent le cortège floristique de *Pinus halepensis* (*Cedrus atlantica*, *Juniperus oxycedrus*, *Pistacia lentiscus*, *Quercus ilex*, *Phillyrea angustifolia* et *Rosmarinus officinalis*). Le pin d'Alep est l'essence forestière dominante avec un pourcentage supérieur à 60%, suivie par le genévrier oxycèdre et le chêne vert.

L'analyse dendrométrique révèle une prédominance des individus jeunes dans les peuplements à exposition Ouest. Tandis que, les grands arbres sont observés dans les parcelles à exposition Sud témoignent de la fréquence élevée d'individus âgés. Du point de vue production de bois, la pinède de Bénis Oudjana est peu productive. Dans ce cas, il faut mettre en évidence un programme de production dans les stations fertiles avec des conditions d'exploitation facile pour la population locale et les entreprises. Les résultats de la dendrométrie sur les 16 parcelles d'étude montrent que la meilleure croissance de la pinède est fonction de l'altitude.

L'aspect physiognomique des peuplements naturels de pin d'Alep de la forêt de Benis Oudjana est prépondérant sous trois formes de structures élémentaires : (I) peuplements constitués par un mélange intime d'arbres de toutes les catégories de diamètre ; (II) peuplements formés par une juxtaposition de bouquets de structure régulière jeunes, adultes, mûrs et âgés, cas très fréquents et représentatifs de l'architecture des peuplements naturels du pin d'Alep ; (III) peuplements constitués par une structure régulière et subrégulière.

Concernant l'état de santé de cette pinède, le facteur exposition s'est avéré une des principales causes du phénomène de dépérissement au niveau du massif de Benis Oudjana. Les sujets de pin d'Alep situés sur le versant Sud souffrent plus de dépérissement, ce dernier est peut être lié aux conditions climatiques stationnelles, car ils sont à la limite de leur aire écologique.

La structure actuelle des peuplements naturels de pin d'Alep est extrêmement déséquilibrée car diverses pressions pèsent sur cette forêt. Par ordre de menaces, les coupes illicites, le pâturage et les pathogènes en sont les premières.

N'oubliez pas aussi que le massif se situe dans l'étage semi-aride où ces dernières années de sécheresse provoquent des incendies et la propagation des maladies des arbres. Malgré ces pressions, la forêt est viable. Les essences principales sont composées d'essences héliophiles (pin d'Alep, genévrier et chêne vert) qui sont les plus abondantes.

Depuis plusieurs années, la prise de conscience de l'épuisement des ressources à l'échelle planétaire a donné lieu à une volonté de récupération, recyclage et valorisation des déchets. De nos jours, les procédés dits « durables » sont fortement soutenus et l'exploitation de matériaux naturels bruts ainsi que la minimisation des résidus sont considérés comme les piliers de cette nouvelle façon de penser les procédés industriels.

En raison de ses divers produits, le pin d'Alep occupe une place importante dans l'économie forestière, ces produits tiennent une place prépondérante pour les besoins de la menuiserie commune, de la charpente ordinaire, de la caisserie, des emballages et du coffrage, sans oublier de rappeler la bonne aptitude du bois aux utilisations papetières et à la fabrication de panneaux de particules qui a déjà fait ses preuves. Pour la production d'avenir, il serait possible de corriger en partie la médiocrité du classement et l'aspect des débits en réalisant des boisements plus denses dans leur jeunesse pour obtenir un élagage mature<sup>1</sup> meilleur. Pour les peuplements existants et en cours de développement peut-être devrait-on pratiquer un élagage artificiel. Si les sylviculteurs arrivent à réduire le nombre et l'importance des nœuds sur les grumes qui seront exploitées dans quelques dizaines d'années, les bois pourront alors être utilisés pour la menuiserie plus fine et les charpentes d'une portée plus importante, étant donné leurs bonnes caractéristiques mécaniques et leur excellente aptitude à l'usinage.

La filière bois et, plus particulièrement, l'industrie du papier, génèrent de grands volumes de coproduits tels que des nœuds, des écorces et des souches. Ces résidus sont essentiellement l'objet d'une valorisation directement pour la production d'énergie. Cependant, ce sont des matières riches en extractibles hydrosolubles, tels que les polyphénols, à haute activité biologique.

C'est dans ce contexte, une analyse phytochimique sur quelques produits non ligneux (écorces et aiguilles) de pin d'Alep du massif forestier de Benis Oudjana est réalisée, afin de le valoriser dans le domaine des antioxydants. Les résultats obtenus montrent que les taux d'extractibles varient selon la partie de l'arbre utilisée, le type de solvant utilisé et selon la méthode d'extraction. Cette analyse montre que les extraits des écorces de *P. halepensis* Mill.

sont les plus riches en composés phénoliques et possèdent un pouvoir réducteur très important. La macération semble être la meilleure méthode d'extraction des phénols totaux et des tanins condensés, alors que, le meilleur contenu en flavonoïdes est enregistré chez l'extraction successive par Soxhlet. Les extraits aqueux et méthanolique ont marqué les plus grandes activités antioxydantes pour les écorces et les aiguilles respectivement. Ces valeurs considérables en métabolites seraient responsables de la propriété antioxydante et constituent une source importante pour identifier des substances bioactives de *P. halepensis* Mill.

Pour une valorisation rationnelle de la pinède de Bénis Oudjana, une approche indispensable d'un aménagement global consiste à intégrer toutes les activités que peut offrir cette forêt. La méthode classique de l'approche strictement sectorielle a montrée son inefficacité à court, comme à moyen terme et à long terme. Aujourd'hui, cette approche est révolue et les gestionnaires sont demandeurs de techniques nouvelles, aussi efficaces que dans le passé en y intégrant tous les éléments de l'écosystème forestier.

Cette conception est conforme aux possibilités que peut garantir la forêt par les nouvelles techniques de la « foresterie intégrée » au sens large du terme, celle-ci pouvant participer à la production et à la diversification des usages : agro - sylvo - pastoralisme, agro-foresterie, loisirs, foresterie sociale, etc... .

Ces perspectives remettent en cause non seulement l'actuelle concentration de la décision entre les mains du gestionnaire forestier, mais aussi les modes de traitement en sylviculture et les interventions nettement forestières. Elle implique une gestion associée « forestier-riverain », la prévision de la relation conflictuelle et l'élaboration d'une sylviculture modelée au service d'objectifs spécifiques, spectre très large de l'utilisation des produits et des services que nous offre la forêt dans une conception pluraliste de sa valeur.

# *Perspectives*

## **Perspectives**

Le travail de la présente thèse est une contribution à la mise en œuvre d'une politique réelle du développement durable. Toutefois, cette thèse ouvre la voie vers de nouvelles pistes d'investigation sur le pin d'Alep et sur d'autres espèces forestières de la région semi-aride, qui se résument dans les points suivants :

- Une étude phytosociologique devrait être réalisée sur la superficie totale pour mieux caractériser la structure végétale et les habitats naturels dans le massif forestier de Béni Oudjana.
- En plus des aiguilles et l'écorce, évaluer les propriétés biochimiques des différents des extractibles dans les nœuds de pin d'Alep, qui sont des importantes déchets lors de l'industrie du bois.
- Evaluer les propriétés des extractibles pour des applications dans le domaine médical (activité anti-hyperglycémique).
- Des études toxicologiques approfondies pour mieux investir la toxicité aiguë et chronique du pin d'Alep.
  - Il serait intéressant de déterminer la répartition de la masse moléculaire et de doser d'autres stilbènes, flavonoïdes ou lignanes, de façon à compléter l'analyse chimique des extraits. Par ailleurs, les éventuels composés allergènes doivent être identifiés et éliminés si les extraits sont amenés à être utilisés comme ingrédients cosmétiques, alimentaires ou nutraceutiques.
  - Des étapes de purification peuvent être réalisées sur les extraits, pour retirer les composés inactifs et concentrer les fractions efficaces, tout en essayant de conserver la synergie du mélange, puisque les extraits bruts sont déjà très actifs.
  - D'autres activités plus proches des systèmes biologiques, comme la capacité antioxydante dans le plasma ou des effets sur des cellules tumorales méritent d'être testées de façon à déterminer le profil pharmacologique des extraits.
- Etendre les études sur d'autres espèces forestières et sur d'autres forêts de la région semi-aride.

*Références  
bibliographiques*

## Références bibliographiques

- Abbas, H., Barbero M., Loisel R., Quezel P. (1985). Les forêts de pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français. Analyses écodendrométriques, première partie. *Forêt Méditerranéenne*, 7 (1) : 35-42.
- Abbas, H., Barbero, M., Loisel, R. (1984). Réflexion sur le dynamisme actuel de la régénération du pin d'Alep dans les pinèdes incendiées en Provence calcaire (de 1973 à 1979). *Ecologia Mediterranea*, 10 (3-4) : 85-104.  
<https://doi.org/10.3406/ecmed.1984.1598>
- Abdessemed, K. (1981). Le Cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès et du Belezma -Étude phytosociologique et problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse doctorat, Fac. St. Jérôme, Marseille (France) : 199 p.
- Abdessemed, K. (1984). Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie). 1ère partie : la dégradation, ses origines et ses conséquences. *Forêt Méditerranéenne*, 6 (1) : 19-26.
- Abdessemed, K. (1985). Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie). 2ème partie : les mesures à prendre. *Forêt Méditerranéenne*, 5 (1) : 43-52.
- Abdul-Hafeez, E.Y., Karamova, N.S., Ilinskaya, O.N. (2014). Antioxidant activity and total phenolic compound content of certain medicinal plants. *Int. J. Biosci* 5: 213-222.
- Abi-Ayad, M., Abi-Ayad, F.Z., Lazzouni, H.A., Rebiahi, S.A., Ziani-Cherif, C., Bessiere, H. (2011). Chemical composition and antifungal activity of Aleppo pine essential oil. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5: 5433-36.
- Acherar, M., Lepart, J., Debussche, M. (1984). La colonisation des friches par le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Miller) en Languedoc méditerranéen. (Colonization of old fields by *Pinus halepensis* Miller in a Mediterranean part of France). *Acta oecologica. Série Oecologia plantarum Montreuil*, Vol 5 (2): 179-189.
- Achhal, A., Akabli, A., Barbero, M., Benabid, A., M'Hirit, O., Peyre, C., Rivas-Martinez, S. (1979). A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. *Ecologia mediterranea*, 5 (1) : 211-249.
- Akpo, L. É., Grouzis, M., Bada, F., Pontanier, R., Floret, C. (2000). Effet du couvert ligneux sur la structure de la végétation herbacée de jachères soudaniennes. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 10 (4) : 253-61.
- Anonyme. (1941). La pourriture alvéolaire du bois des pins le polypore du pin. Ministère de l'Agriculture, des Eaux et Forêts (France). <http://hdl.handle.net/2042/33527>
- Bailey, R.L., Dell, T.R. (1973). Quantifying diameter distributions with Weibull function. *Forest Sciences*, 19: 97-104.
- Balasundram, N., Sundram, K., Samman, S. (2006). Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99 (1): 191-203.

- Barbero, M., Quézel, P. (1980). La végétation forestière de Crète. *Ecologia Mediterranea*, 5: 175-210.
- Barbero, M., Bonin, G., Loisel, R., Quézel, P. (1987). Incidence of exogenous factors on the regeneration of *Pinus halepensis* after fires. *Ecologia Mediterranea*, 13 : 51 - 56.
- Bariteau M. (1992). Variabilité géographique et adaptation aux contraintes du milieu Méditerranéen des pins de la section *Halepensis* : résultats (provisoire) d'un essai en plantation comparative en France. *Ann. Sci. Forest*, 49: 261-276.
- Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., Larsson, S. (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15 (6): 2084-2096.  
<https://doi.org/10.1890/04-1903>
- Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., Larsson, S. (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15 (6): 2084-2096.  
<https://doi.org/10.1890/04-1903>
- Bavaresco, L. (2003). Role of viticultural factors on stilbene concentrations of grapes and wine. *Drugs under Experimental and Clinical Research*, 29 (5-6): 181-187.
- Becker., M. (1992). Deux indices de compétition pour la comparaison de la croissance en hauteur et en diamètre d'arbres aux passés sylvicoles variés et inconnus. *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, 49 (1): 25-37. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882786>
- Békro, Y.A., Janat, A., Békro, M., Boua, B.B., Trabi, F.H., And Éhilé, E. (2007). Etude ethnobotanique et screening phytochimique de *caesalpinia benthamiana* (baill.) herend et zarucchi (caesalpiniaceae). *Sciences & nature*. 4 (2): 217-25.
- Belkheiri, N. (2010). Dérivés phénoliques à activités antiathérogènes. Thèse de Doctorat en Chimie-Biologie-Santé. Université de Toulouse, FRANCE, 244p.
- Ben Amor, B. (2008). Maîtrise de l'aptitude technologique de la matière végétale dans les opérations d'extraction de principes actifs : texturation par détente instantanée contrôlée (DIC). Génie des procédés. Thèse de doctorat en Génie des Procédés Industriels. Université de La Rochelle, France, 287p.
- Ben Dhib, K. (2016). Étude expérimentale des procédés de séchage du bois : séchage convectif et séchage par contact sous vide et sous pression. [Thèse de doctorat en physique], Université de Tunis El Manar, Faculté des sciences de Tunis, Tunisie, 137p.
- Ben Dhib, K., Elaieb, M.T., Azzouz, S., Elcafsi, A. (2016). Behavior of Tunisian Aleppo Pine wood during convective drying: Identification of the diffusion coefficient taking into account shrinkage velocity, *J, Mater, Environ, Sci*, 7 (7): 2561-2571.
- Benabid, A. (1985). Les Ecosystèmes forestiers Marocains : Diversité, biogéographie et dégradation. *Forêt méditerranéenne*, Marseille, 7(1) : 53-64.

- Benabid, A. (1994). Biogéographie phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). In : Le cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 7-11 Juin 1993. Annales de la recherche forestière au Maroc 27 : 61-76.
- Benarba, B., Belabid, L., Righi, K., Bekkar, A., Elouissi, A.M., Khaldi, A., Hamimed, A. (2015). Ethnobotanical study of medicinal plants used by traditional healers in Mascara (North West of Algeria). *J. Ethnopharmacol.* 175: 626-637.  
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.09.030>
- Benard C., Gautier H., Bourgaud F., Grasselly D., Navez B., Caris-Veyrat C., Weiss M., Genard, M. (2009). "Effects of Low Nitrogen Supply on Tomato (*Solanum lycopersicum*) Fruit Yield and Quality with Special Emphasis on Sugars, Acids, Ascorbate, Carotenoids, and Phenolic Compounds." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57 (10): 4112-4123. <https://doi.org/10.1021/jf8036374>
- Benlarbi, R., Fechtal, M., Meziane, D., Bouayoun, M. (1998). Analyse des extraits tannants des écorces du pin maritime. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc.* 31 : 110-121.
- Benmessaoud, H. (2009). Etude de la vulnérabilité à la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie). Thèse de doctorat en sciences. Université de Batna 2, Algérie, 227p.
- Benouadah, N., Aliouche, D., Pranovich, A., Willför, S. (2018). Chemical characterization of *Pinus halepensis* sapwood and heartwood. *Wood Material Science & Engineering*, 1-8.  
<https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1448436>
- Bentouati, A., Bariteau, M. (2006). Réflexion sur le dépérissement du Cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, XXVII (4) : 317-322.
- Bentouati, A. (2006). Croissance productivité et aménagement des forêts de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le massif de Ouled-Yakoub (Khenchela-Aurès). Thèse de doctorat. Université El Hadj Lakhdar-Batna. Faculté des sciences. Département d'agronomie. Algérie. 116 p. <http://www.secheresse.info/spip.php?article12870>
- Bergonzi, M., C., Bilia, A.R., Gallori, S., Guerrini, D., Vincieri, F. F. (2001). Variability in the content of the constituents of *Hypericum perforatum* L. and some commercial extracts. *Drug development and industrial pharmacy*, 27 (6): 491-497.  
<https://doi:10.1081/ddc-100105173>
- Bhouri, W., Derbel, S., Skandrani, I., Boubaker, J., Bouhleb, I., Sghaier, M. B., Chekir-Ghedira, L. (2010). Study of genotoxic, antigenotoxic and antioxidant activities of the digallic acid isolated from *Pistacia lentiscus* fruits. *Toxicology in Vitro*, 24(2), 509-515.  
<https://doi.org/10.1016/j.tiv.2009.06.024>
- Blondel, J. (1979). Biologie et écologie. Ed. Masson, Paris, 173 p.
- Boizot, N., Charpentier J-P. (2006). Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. Cah. Tech. INRA: 79-82.  
<https://hal.inrae.fr/hal-02669118>

- Bouaoune, D. (1996). Contribution à l'étude floristique des étages de végétation de l'Atlas blidéen (phytoécologie, phytosociologie et déterminisme climatique). Thèse magister. Ecol.Univ.H. Boumediène, Alger, 188p.
- Bouasla, A., Bouasla, I. (2017). Ethnobotanical survey of medicinal plants in northeastern of Algeria. *Phytomedicine* 36 : 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2017.09.007>
- Boubekri C. (2014). Etude de l'activité antioxydante des polyphénols extraits de *Solanum melongena* par des techniques électrochimiques. Thèse de Doctorat en sciences. Université Mohamed Khider-Biskra. 210p
- Boudy P. (1950). Economie forestière Nord-Africaine, tome 2 (Monographie et traitement des essences forestières). Edit. Larose, Paris, France, 619p.
- Boudy P. (1955). Economie forestière Nord-Africaine, tome 4. Edit. Larose, Paris, France, 199p.
- Bouras, M. (2015). Etude comparative et optimisation de prétraitements des écorces de bois pour l'extraction des composés phénoliques. Thèse de doctorat en Génie des Procédés Industriels. Université de Technologie de Compiègne, 264p.
- Bouyahya, A., Belmehdi, O., Abrini, J., Dakka, N., Bakri, Y. (2019). Chemical composition of *Mentha suaveolens* and *Pinus halepensis* essential oils and their antibacterial and antioxidant activities. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 12(3): 117-122. <http://doi:10.4103/1995-7645.254937>
- Bravo, L. (1998). Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutrition Reviews*, 56 : 317-333.
- Bréda, N., Peiffer, M. (1999). Étude du bilan hydrique des chênaies de la forêt domaniale de La Harth (Haut-Rhin) et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Rapport de convention ONF/INRA.
- Brochiero, F., Chandioux, O., Ripert C., Vennetier, M. (1999). Autécologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire. *Forêt méditerranéenne*, XX (2) : 215-224.
- Bruneton, J. (1999). Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales. In: Technique et Documentation Lavoisier, Paris : 418-419.
- Burk T.E., neWBerry J.D. (1984). Newberry, Notes: A Simple Algorithm for Moment-Based Recovery of Weibull Distribution Parameters, *Forest Science*, 30 (2): 329-332. <https://doi.org/10.1093/forestscience/30.2.329>
- Calamassi, R., Falusi, M., Tocci, A. (1984). Effet de la température et de la stratification sur la germination des semences de *Pinus halepensis* Mill. *Silvaegenetica* 33 (4-5): 133-139.
- Cayuela, H., Cheylan, M., Joly, P. (2011). The best of a harsh lot in a specialized species: breeding habitat use by the yellow-bellied toad (*Bombina variegata*) on rocky riverbanks. *Amphibia-Reptilia*, 32 (4): 533-539. <https://doi:10.1163/156853811x614461>
- Cheikh- Rouhou, S., Hentati, B., Besbes, S., Blecke, C., Deroanne, C., Attia, H. (2006). Chemical composition and lipid fraction characteristics of Aleppo pine (*Pinus*

- halepensis* Mill.) seeds cultivated in Tunisia. *Food Science and Technology International*, 15 (5): 407-415. <https://doi.org/10.1177/1082013206069910>
- Chenchouni, H., (2010). Diagnostic écologique et évaluation du patrimoine biologique du Lac Ayata (Vallée de l'Oued Righ : Sahara septentrional algérien). Thèse de Magister en Biologie, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 120 p.
- Chermat, S., Gharzouli, R. (2015). Ethnobotanical Study of Medicinal Flora in the North East of Algeria - An Empirical Knowledge in Djebel Zdimm (Setif). *J. Mater. Sci. Eng. A* 5. (1-2) : 50-59. <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2015.1-2.007>
- Chohra, D., Ferchichi, L. (2019). Ethnobotanical study of Belezma National Park (BNP) plants in Batna: East of Algeria. *Acta Sci. Nat.* 6 : 40-54. <https://doi.org/10.2478/asn-2019-0017>
- Christel R., Thierry O. (1995). Valorisation du bois de pin d'Alep. Etude bibliographique (PFE G3), Ecole des Arts et Metiers, Centre de Paris.
- Chupin, L. (2014). Etude de l'extraction de tanins d'écorce de pin maritime pour l'élaboration de colles tanins-lignosulfonates. Thèse de doctorat en Chimie des polymères. Université de Pau et des Pays de l'Adour. 182p.
- Cunningham, A.B. (2001). Applied Ethnobotany. People Wild Plant Use and Conservation. People and Plants Conservation. *Earth scan Publications Ltd*: London: 300p.
- Daget, P. (1977). Analyse des formes climatiques par le système d'Emberger. *Vegetatio*, 34 (2) : 87-103.
- Dahman, M. (1986). Les produits du pin d'Alep en Tunisie, Série études - C.I.H.E.A.M 1986/1, *Options méditerranéennes* : 157-161.
- Dalahmeh, S., Pell, M., Vinnerås, B., Hylander, L., Öborn, I., Jönsson, H. (2012). Efficiency of Bark, Activated Charcoal, Foam and Sand Filters in Reducing Pollutants from Greywater. *Water, Air, Soil Pollut.* 223 : 3657-3671. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1139-z>
- Daly-Hassen, H., Ayari, A. (2020). Avantages socio-économiques de la forêt du pin d'Alep. Chapitre 15 de l'ouvrage : Le pin d'Alep en Tunisie : Ecologie, Gestion et Usages, édité par Khouja M.L., INRGREF : 324-348.
- Daly-Hassen H., Hamrouni A. (2007). Identification d'outils de gestion participative des ressources forestières. Projet d'appui à une gestion durable des sols (GDS) à Siliana FEM/FIDA, CRDA Siliana.
- Dan Guimbo I., larwanou M., Mahamane A. Ambouta K J M. (2012). Production fruitière de *Neocaryamacrophylla* (Sabine) Prance, espèce ligneuse alimentaire du Niger. *Journal of Applied Biosciences*. 60 : 4388-4393
- Daoui, A., Douzet, J., Marchal, R., Zerizer, A. (2007). Valorisation du bois de pin d'Alep par déroulage : optimizacion del estufado. *Bois & Forêts des tropiques*, 294: 51-64.
- Debazac, E. (1959). La végétation forestière de la Kroumirie. *Ann. E.N.E.F.*, 16 (2): 1-131.

- Debazac, E., Tomassone R. (1965). Contribution à une étude comparée de Pins Méditerranéen de la section halepensis. *Ann. Eco. Natio. des Eaux et For.*, 27 : 215-256.
- Delatour, C. (1969). Contribution à l'étude du *Caliciopsis pinea* Peck: résultats complémentaires d'inoculations artificielles. *Annales Des Sciences Forestières*, 26 (2) : 285-295. <https://doi.org/10.1051/forest/19690205>
- Deleuze C., Morneau F., Renaud J.P., Vivien Y., Rivoir M.E., Santenoise P., Longuetaud F., Mothe F., Hervé J.C., Vallet P. (2014). Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. *Rendez-vous Techniques*. 44 : 22.
- Derridj, A. (1990). Etudes des populations de *Cedrus atlantica* M. en Algérie. Thèse. Doc : Uni. Paul Sabatier. Toulouse : 112-122.
- Deschênes, H. (1986). Utilisation et transformation des bois, Collection Foresterie. Modulo. DGF (2012). Bilan annuel sur les feux des forêts. Direction générale des forêts, 2012, 78p.
- Djerrad, Z. (2016). Etude phytoécologique des provenances de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) de la partie centrale de l'atlas Saharien, comparaison de la variabilité morphologique et chimique avec les pinedes du semi-arides est algérien. Thèse doctorat en sciences de la nature. USTHB, Fac. Sc. Biol., Alger. 182p.
- Do, Q. D., Angkawijaya, A. E., Tran-Nguyen, P. L., Huynh, L. H., Soetaredjo, F. E., Ismadji, S., Ju, Y-H. (2014). Effect of extraction solvent on total phenol content, total flavonoid content, and antioxidant activity of *Limnophila aromatica*. *Journal of Food and Drug Analysis*, 22 (3): 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2013.11.001>
- Doat, J. (1978). Les tanins dans les bois tropicaux. *Revue bois et forêts des tropiques*. 182: 37-54.
- Dob T., Berramdane T., Chelghoum C. (2007). Essential oil composition of *Pinus halepensis* Mill. from three different regions of Algeria. *Journal of Essential Oil Research*. 19: 40-43.
- Dogan, Y., Baslar, S., Aydin, H., Mert, H. H. (2003). A study of the soil-plant interactions of *Pistacia lentiscus* L. distributed in the western Anatolian part of Turkey. *Acta Bot. Croat.* 62, (2): 73-88.
- Eberhardt, T.L., Reed, K.G. (2006). Strategies for improving the performance of plywood adhesive mix fillers from southern yellow pine bark. *For. Prod. J.* 56: 64-68.
- Ebrahimzadeh, M.A., Pourmorad, F., Bekhradnia, A.R. (2008). Iron chelating activity, phenol and flavonoid content of some medicinal plants from Iran. *African Journal of Biotechnology*, 7 (18): 3188-3192.
- El Omari, N., Ezzahrae Guaouguaou, F., El Menyiy, N., Benali, T., Aanniz, T., Chamkhi, I., Bouyahya, A. (2020). Phytochemical and biological activities of *Pinus halepensis* Mill., and their ethnomedicinal use. *Journal of Ethnopharmacology*. 268 : 122p. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113661>
- Elaieb M.T., Aloui F., Khouja M.L. (2010). Etude des propriétés physico-mécaniques du bois de pin d'Alep en fonction de la provenance et de la densité du peuplement, 1<sup>er</sup> Colloque

- International sur les Ressources Sylvo-Pastorales et Développement Durable en Méditerranée, Tabarka : 19-20.
- Elaieb M.T., Candelier K., Pétrissans A., Dumarçay S., Gérardin P., Pétrissans M. (2015). Heat treatment of Tunisian soft wood species: effect on the durability, chemical modifications and mechanical properties, *Maderas-Cienc Tecnol.*, 17(4): 699-710. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000061>
- Elaieb M.T., Shel F., Elouellani S., Janah T., Rahouti M., Thevenon M.F., Candelier K. (2017). Physical, mechanical and natural durability properties of reforestation *Pinus halepensis* Mill, wood from the Mediterranean basin, *Bois et Forêts des Tropiques*, 331 (1): 7-19.
- Elaieb, M T. Kachouri, H. Azzouz, S. Shel, F. Khouja, M. L., Candelier, K. (2020). Le bois du pin d'Alep Tunisien : propriétés, potentialités et débouchés. Chapitre 14 de l'ouvrage : Le pin d'Alep en Tunisie : Ecologie, Gestion et Usages, édité par Khouja ML, INRGREF : 292-273.
- Emberger, L. (1939). Aperçu général sur la végétation du Maroc : commentaire de la carte phytogéographique du Maroc 1 : 1.500. 000 : 40-157.
- Ezzahiri M., Benghazi B. (2000). Synthèse de quelques résultats sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas (Maroc), *Sci. Change. Planét. / Sécheresse*, 11 : 79-84.
- Falleh, H., Ksouri, R., Chaieb, K., Karray-Bouraoui, N., Trabelsi, N., Boulaaba, M., Abdelly, C. (2008). Phenolic composition of *Cynara cardunculus* L. organs, and their biological activities. *Comptes Rendus Biologies*, 331(5) : 372-379. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.02.008>
- FAO. (2014). Situation des forêts du monde. Mieux tirer parti des avantages socioéconomiques des forêts, FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/a-i3710f.pdf>
- FAO. (2018). L'importance des abeilles dans la biodiversité et leur contribution à la sécurité alimentaire et nutritionnelle. <https://www.fao.org/africa/news/detail-news/en/c/1133066>
- FAO. (2007). Politique forestière nationale et stratégie d'aménagement et de développement durable des ressources forestières et alfatières. Document provisoire. 37p
- Fechtal, M., Aberchane, M., Benlarbi, R., Meziane, I. (1996). La teneur en tanins des écorces du pin maritime *Pinus pinastre* S. *Annales de la Recherche Foresriere au Maroc*, 29 : 95-106. <https://search.emarefa.net/detail/BIM-617439>
- Feeley, K.J., Joseph Wright, S., Nur Supardi, M.N., Kassim, A.R., Davies, S.J. (2007). Decelerating growth in tropical forest trees. *Ecology Letters*, 10 (6): 461-469. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01033.x>
- Fernandez-Cancio, A., Navarro-Cerrillo, R.M., Sanchez-Salguero, R., Fernandez Fernandez, R., Manrique Menendez, E. (2010). Viabilidad fitoclimática de las repoblaciones de pino silvestre (*Pinus sylvestis* L.) en la Sierra de los Filabres (Almería). *Ecosistemas*, 20 : 124-144.

- Forster H., Matar B., Badmokréo B. (2001). Méthodologie et Instruction pour l'Exécution des Inventaires Forestiers Détaillés et Participatifs au Niveau des Marchés Ruraux. Projet Energie Domestique (PED). Agence pour l'Energie Domestique et l'Environnement (AEDE), 41p.
- Francelet, A. (1970). Stimulation de l'ouverture des cônes de pins. Institut Nationale de Recherches forestières Tunisiennes, *Note technique*, 13 : 2-3.
- Frantz, F., Forster, H. (1979). Table de production de pin d'Alep pour les Aurès (Algérie). Chaire de la production forestière de l'université de Munich, 114 p.
- Gadow, K.v., Hui, G. (2002). Characterising forest spatial structure and diversity. In: Bjoerk, L. (Ed.), Proceedings of the IUFRO International workshop 'Sustainable forestry in temperate regions', Lund, Sweden, 20-30.
- García, D.E., Glasser, W.G., Pizzi, A., Lacoste, C., Laborie, M.-P. (2014). Polyphenolic resins prepared with maritime pine bark tannin and bulky-aldehydes. *Ind. Crops Prod.*, 62: 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.010>
- Garcia-Salas, P., Morales-Soto, A., Segura-Carretero, A., Fernández-Gutiérrez, A. (2010). Phenolic-Compound-Extraction Systems for Fruit and Vegetable Samples. *Molecules*, 15 (12): 8813-8826. <http://doi:10.3390/molecules15128813>
- Gaudin, S. (1996). Dendrométrie des peuplements. BTSA Gestion Forestière. Centre de Formation Chateaufarine. France. 66 p.
- Gausson, H. (1968). La résistance à la sécheresse des arbres xérophiles. *Revue forestière française* : 15-19.
- Gélébart, B. (2016). Optimisation de l'extraction, en réacteur « batch », de biomasse énergétique à l'aide d'émulsions ultrasoniques de solvants verts. [Mémoire de maîtrise en génie chimique]. Université de Sherbrooke (Québec) Canada. 138p.
- Glèlè Kakai R., Bonou W., Lykke A.M. (2016). Approche méthodologique de construction et d'interprétation des structures en diamètre des arbres. *Annales des Sciences Agronomiques* 20 : 95-105.
- Gomez, G. G., Conci, L., R., Ducasse, D. A., Nome, S.F. (1996). Purification of the Phytoplasma Associated with China-tree (*Melia azedarach* L.) Decline and the Production of a Polyclonal Antiserum for its Detection. *Journal of Phytopathology*, 144 (9-10): 473-477. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1996.tb00327.x>
- Gomez, G. G., Conci, L. R., Ducasse, D. A., Nome, S. F. (1996). Purification of the Phytoplasma Associated with China-tree (*Melia azedarach* L.) Decline and the Production of a Polyclonal Antiserum for its Detection. *Journal of Phytopathology*, 144 (9-10), 473-477. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1996.tb00327.x>
- Gonçalves, AC., Carvalho, O.A., Dias, SS. (2010). Evolution in multi-species high forest stands in Serra da Lousã: diversity analysis. *Silva Lusitana* 18 : 79-90.
- Grall, J., Coïc, N. (2006). Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier. Institut Universitaire européen de la Mer. Université de Bretagne Occidentale Laboratoire des sciences de l'Environnement Marin : 7-86.

- Green, R.J., (2004). Antioxydant activity of peanut plant tissues. Masters Thesis. Departement Of Food Science. Faculty of North California State University (USA). 78p.
- Guit, B., Nedjimi, B., Chakali, G., Guibal, F. (2016). État sanitaire des peuplements de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le massif forestier de Senalba (Djelfa, Algérie). *Revue d'écologie. (Terre et Vie)*, 71 (2) : 156-167 <http://hdl.handle.net/2042/59913>
- Guit, B., Nedjimi, B., Guibal, F., Chakali, G. (2015). Dendroécologie du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en fonction des paramètres stationnels dans le massif forestier de Senalba (Djelfa – Algérie). *Revue d'écologie. (Terre Vie)*, 70 : 32-43.  
<http://hdl.handle.net/2042/56308>
- Hadef, A., Kanouni-Rached, M., Alatou, D., Oumessaad, T. (2014). Mapping of Land by Vegetation from Satellite Data in the Region of Chetaibi (Algeria) *International Journal of Management Sciences and Business Research*, 3 (6).  
<https://ssrn.com/abstract=2725751>
- Hadj Salem, J. (2009). Extraction, identification, caractérisation des activités biologiques de flavonoïdes de *Nitraria retusa* et synthèse de dérivés acylés de ces molécules par voie enzymatique. Autre. Thèse de doctorat en procédés biotechnologiques et alimentaires. Institut National Polytechnique de Lorraine France. 299p.  
<https://hal.univlorraine.fr/tel-01748769>
- Hagerman, A.E. (2002). Tannin Handbook, Department of Chemistry and Biochemistry, Miami University, USA.
- Hamel, T., Boulemtafes, A., Bellili, A. (2019). L'impact de surpâturage sur les subéraies de la péninsule de l'Edough (Nord-Est algérien). *Geo-Eco-Trop.*, 43(1): 119-128.
- Hani I., Rached-Kanouni M., Khamar H., Menasri A. (2020). Study of the dynamics of natural stands of *Pinus halepensis* in the Beni Oudjana forest (Khenchela, Algeria). *Ecology, Environment and Conservation*, 26(3): 21-26.
- Hani, I., Rached-Kanouni, M., Menasri, A. (2021). Tree Species Diversity and Spatial Distribution of Aleppo Pine Stands in Northeastern Algeria. *South-east Eur for* 12(1): 35-41. <https://doi.org/10.15177/seefor.21-05>
- Harborne, J.B. Williams, C.A. (2000). Advances in flavonoid research since 1992, *Phytochemistry*, 55 (6): 481-504. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00235-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00235-1).
- Harfouche, A., Zanddouche, O., Chebouti, Y., Gadiri, M. N., Djamouh, S. (2004). Bilan des introductions de pin brutia (*Pinus brutia*) en Algérie. *Forêt méditerranéenne*, 25(3): 163-172.
- Herrero-Jáuregui, C., García-Fernández, C., Sist, PL., Casado, MA. (2012). Recruitment dynamics of two low-density neotropical multiple-use tree species. *Plant Ecology*, 212 (9): 1501-1512.
- Hiura, T., Fujiwara, K. (1999). Density dependence and co-existence of conifer and broadleaved trees in a japanese northern mixed forest. *Journal of Vegetation Science* 10(6): 843-850. <https://doi.org/10.2307/3237309>

- Hoch, G., Toffolo, E. P., Netherer, S., Battisti, A., Schopf, A. (2009). Survival at low temperature of larvae of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* from an area of range expansion. *Agricultural and Forest Entomology*, 11(3): 313-320. <https://doi.org/10.1111/j.1461-563.2009.00431.x>
- Hódar, J.A., Zamora, R., Cayuela, L. (2012). Climate change and the incidence of a forest pest in Mediterranean ecosystems: can the North Atlantic Oscillation be used as a predictor? *Climatic Change*, 113 : 699-711. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0371-7>
- Hopkins, W.G. (2003). *Physiologie végétale*. De Boeck Supérieur, p 280.
- Houamel, A. C. (2012). Contribution à l'étude du dépérissement de la cédraie dans la région de Batna cas du Parc National du Belezma. Thèse de magister en Foresterie. Université Aboubeker Belkaïd. Tlemcen (Algérie). 116 p.
- Houwink, R., Salomon, G. (1965). *Adhesion and Adhesives*. Edited by R. Houwink and G. Salomon. Second, completely revised, edition. Elsevier Pub. Co: Amsterdam.
- Hsu, J. (1996). *Multiple Comparisons: Theory and Methods* (1st ed.). *Chapman and Hall/CRC.*, 177p. <https://doi.org/10.1201/b15074>.
- Huchon, H., Demolin, G. (1970). La bioécologie de la Processionnaire du pin : dispersion potentielle, dispersion actuelle. *Revue forestière française*. N° spécial " La lutte biologique en forêt", 220-234.
- Ignat, I., Volf, I., Popa, V.I. (2011). A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. *Food chemistry*, 126(4): 1821–1835. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.026>
- Indir, K., Marjanović, H., Balenović, I., Szivovicza, L., Paladinić, E., Vuletić, D. (2013). Spatial Structure Indices of Mature Pedunculate Oak Stands in NW Croatia. *South-east Eur for.*, 4(1): 13-21. <http://dx.doi.org/10.15177/see-for.13-02>.
- Jacquet, J.-S., Bosc, A., O'Grady, A. P., Jactel, H. (2013). Pine growth response to processionary moth defoliation across a 40-year chronosequence. *Forest Ecology and Management*, 293: 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.003>
- Jacquet, J.S., Bosc, A., O'Grady, A. P., Jactel, H. (2013). Pine growth response to processionary moth defoliation across a 40-year chronosequence. *Forest Ecology and Management*, 293: 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.003>
- Jacquet, J.S., Orazio, C., Jactel, H. (2012). Defoliation by processionary moth significantly reduces tree growth: a quantitative review. *Annals of Forest Science*, 69: 857-866. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0209-0>
- Jactel, H., Menassieu, P., Vétillard, F., Barthélémy, B., Piou, D., Frérot, B., Battisti, A. (2006). Population monitoring of the pine processionary moth (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) with pheromone-baited traps. *Forest Ecology and Management*, 235(1-3): 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.002>
- Jokić, S.D., Velić, M. Bilić, A. Bucić-Kojić, M. (2010). Plan inić and S. Tomas. Modelling of the Process of Solid-Liquid Extraction of Total Polyphenols from Soybeans. *J. Food Sci.* 28 : 206-212.

- Julien C.A. (1951). Histoire de l'Afrique du Nord. Tome 2, Payot, Paris.
- Julkunen-Titto, R. (1985). "Phenolic constituents in the leaves of northern willows: methods for the analysis of certain phenolics" *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, (33): 213-221.
- Jung, M. J., Chung, H. Y., Choi, J. H., Choi, J. S. (2003). Antioxidant principles from the needles of red pine, *Pinus densiflora*. *Phytotherapy research : PTR*, 17(9): 1064-1068. <https://doi.org/10.1002/ptr.1302>
- Adjonou, K., Ali, N., Kokutse, A.D., Novigno. S.K. (2010). Etude de la dynamique des peuplements naturels de *Pterocarpus ericaceus* Poir. (Fabaceae) surexploités au Togo. *Bois et Forêts des Tropiques* 306(1):45-55. <https://doi.org/10.19182/bft2010.306.a2043>
- Kadik, B. (1983). Contribution à l'étude du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Algérie. Ecologie, dendrométrie, morphologie. O.P.U. Alger. 581 p.
- Kadik, B. (1987). Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Algérie : Ecologie, Dendrométrie, Morphologie. Office des publications universitaires (Alger). 585 p.
- Kadik. (1984). Etude phytoécologique des formations à pin d'Alep du Senalba Gharbi et Chergui (Wilaya de Djelfa). Thèse Doct. 3<sup>ème</sup> cycle, U.S.T.H.B., Alger, 300p.
- Kadik, L. (2005). Etude phytosociologique et phytoécologique des formations à pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) de l'étage bioclimatique semi-aride algérien. Thèse doctorat en sciences de la nature. USTHB. Alger. 350p.
- Kadri, N., Khettal, B., Adjebli, A., Creseteil, T., Yahiaoui-Zaidi, R., Barragan-Montero, V. (2014). Antiangiogenic activity of neutral lipids, glycolipids, and phospholipids fractions of *Pinus halepensis* seeds. *Industrial Crops and Products*, 54: 6-12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.051>
- Kadri, N., Khettal, B., Yahiaoui-Zaidi, R., Barragan-Montero, V., Montero, J.-L. (2013). Analysis of polar lipid fraction of *Pinus halepensis* Mill. seeds from North Algeria. *Industrial Crops and Products* 51: 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.0>
- Kagambega, F.W., Kadeba, A., Zampaligre, N., Zongo, B., Sawadogo, L., Boussim, J.I. (2019). Influence de l'anthropisation sur la structure de quatre espèces utilitaires dans le Chantier d'Aménagement Forestier de Cassou, Burkina Faso. *Inter. Jour. of Biological and Chemical Sciences*, 13(6): 2666-2682. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i6.19>
- Karschon, R. (1973). Natural regeneration after fire of Aleppo pine. Forestry direction agricultural research organisation. *La-Yaaran*, 23: 36-38.
- Kebezikato, A.B., Wala, K., Dourma, M., Atakpama, W., Dimobe, K., Pereki, H., Batawila, K., Akpagana, K. (2014). Distribution et structure des parcs à *Adansonia digitata* L. (baobab) au Togo (Afrique de l'Ouest). *Afrique science*. 10(2) : 434-449.
- Kebièche, M., Lakroun, Z., Mraïhi, Z., Soulimani, R. (2011). Effet antidiabétogène et cytoprotecteur de l'extrait butanolique de *Ranunculus repens* L. et de la quercétine sur un modèle expérimental de diabète alloxanique. *Phytothérapie*, 9(5): 274-282. <https://doi:10.1007/s10298-011-0651-4>

- Keren, S., Svoboda, M., Janda, P., Nagel, TA. (2020). Relationships between Structural Indices and Conventional Stand Attributes in an Old-Growth Forest in Southeast Europe. *Forests*, 11(1): 4. <https://doi.org/10.3390/f11010004>.
- Khadoumi, A., Nedjimi, B., Daoudi, B. (2014). Sensibilité à la chenille processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) chez deux espèces de pins (*Pinus halepensis* Mill. ET *Pinus brutia* Ten.) : Cas du reboisement de Senelba Chergui (DJELFA). *Algerian Journal of Arid Environment "AJAE"*, 4(1) : 20-25.
- Khanfouci, M.S. (2005). Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le massif du Belezma. Thèse Magister en science forestière. Université Hadj Lakhdar, Batna (Algérie). 249p.
- Kharchouche, D. (2003). Typologie phytoécologique et croissance des peuplements de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le massif des Béni Melloul (Aurès, Algérie). Thèse de Magister en Agronomie. Université El-Hadj Lakhdar, Batna. 91p.
- Khouja M. (2016). Analyse quantitative et qualitative des extraits de certaines populations de pins Tunisiens : Comparaison inter et intra-spécifique. Mémoire de Master. Institut National Agronomique de Tunisie. 80p.
- Khouja, M., Eleuch, F., Amiri, C., Boulaares, M., Gtari, Y., Fattouch, S., Mezni, F., Bouzaiène, A., Khouja, M.L. (2020a). Valorisation agro-alimentaire et qualités nutritionnelles des graines du pin d'Alep. Chapitre 16 de l'ouvrage : Le pin d'Alep en Tunisie : Ecologie, Gestion et Usages, édité par Khouja ML, INRGREF. 348-366.
- Khouja, M., Taghgouti, I., Elaieb, M.T., Fezzani, T., Souaeh, N., et Khouja, M.L. (2020b). Intérêt forestier et caractéristiques biologiques et écologiques du pin d'Alep en Tunisie. Chapitre 1 de l'ouvrage : Le pin d'Alep en Tunisie : Ecologie, Gestion et Usages, édité par Khouja ML, INRGREF. 8-31.
- Koes, R.E., Quattrocchio, F., Mol, J.N.M. (1994), The flavonoid biosynthetic pathway in plants: Function and evolution. *Bioessays*, 16: 123-132. <https://doi.org/10.1002/bies.950160209>
- Konig, M., Scholz, E., Hartmann, R., Lehmann, W., Rimpler, H. (1994). Ellagitannins and complex tannins from *Quercus patrae* bark. *Journal of Natural Product*, 57: 1411-15.
- Kotroni, E., Simirioti, E., Kikionis, S., Sfiniadakis, I., Siamidi, A., Karalis, V., Vitsos, A., Vlachou, M., Ioannou, E., Roussis, V., Rallis, M. (2019). In Vivo Evaluation of the Anti-Inflammatory Activity of Electrospun Micro/Nanofibrous Patches Loaded with *Pinus halepensis* Bark Extract on Hairless Mice Skin. *Materials (Basel, Switzerland)*, 12(16): 2596. <https://doi.org/10.3390/ma12162596>
- Kouyate, A.M., Diarra, I. (2020). Composition Floristique, Diversité Et Structure Des Espèces Forestières Alimentaires De La Région De Sikasso Au Sud du Mali. *European Scientific Journal*. 16(12): 156-178. <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n12p156>
- Kozak A., Yang R.C. (1978). Height-diameter curves, another application of the Weibull function in forestry. Prepared for: IUFRO Conference, Subject Group S6.02, Statistical methods, mathematics and computers, *Freiburg*, 12 p.

- Kuhnoltz-Lordat G. (1938). La terre incendiée. Essai d'agronomie comparée. La maison carrée, Nîmes, 361 p.
- Laar, A., Van, A., Akça, A. (2007). Forest Mensuration. Managing Forest Ecosystems.
- Laid, B., Khellaf, R., Mouloud, G., Rabah, B., Faiçal, B., Hamenna, B. (2014). Ethnobotanical Study Of Medicinal Plants In Djebel Messaad Region (M'sila, Algeria). *Glob. J Res Med Plants Indig. Med.*, 3(16): 445-459.
- Landmann, G., Landeau, S. (2006). Sécheresse et canicule : premier bilan des connaissances sur les conséquences de l'été 2003 pour les forêts françaises. *RDV techniques*, 11: 46-54.
- Lantto, T.A., Dorman, H.D., Shikov, A.N., Pozharitskaya, O.N., Makarov, V.G., Tikhonov, V.P., Hiltunen, R., Raasmaja, A. (2009). Chemical composition, antioxidative activity and cell viability effects of a Siberian pine (*Pinus sibirica*) extract. *Food Chemistry* 112, 936-943. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.008>
- Lapornik, B., Prošek, M., Wondra, A.G. (2005). Comparison of extracts prepared from plant by-products using different solvents and extraction time. *Journal of Food Engineering*, 71(2): 214-222.
- Le Houérou H.N. (1969). La végétation de la Tunisie steppique. *Ann. Inst. Nation. Rech. Agron. Tunis*, 42 (5): 1-624.
- Le Houérou, H. N. (1974). Fier and vegetation in the Mediterranean basin. 237- 277.
- Le Houérou, H-N. (1995). Considérations biogéographiques sur les steppes arides du nord de l'Afrique. *Sécheresse*, 2(6) : 167-182.
- Le Houérou, N. (1980). L'impact de l'homme et de ses animaux sur la forêt méditerranéenne. *Forêt Méditerranéenne 2* : 155-174.
- Lemaire, J., Lacoutre, Y., Soleau, M., Weben, C., Mounier, M. Guyon, A. (2010). Les chênaies atlantiques face aux changements climatiques globaux : comprendre et agir. *Forêt entreprise*, 191: 50-53.
- Letreuch-Belarouci, N. (1972). Etude de la régénération du pin d'Alep (Djelfa). Techniques sylvicoles. Thèse ingénieur en agronomie. I.N.A., Alger, 89 p.
- Li, J., Ding, S., Ding, X. (2005). Comparison of antioxidant capacities of extracts from five cultivars of Chinese jujube. *Process Biochemistry*, 40(11), 3607-3613. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.03.005>
- Li, K., Li, Q., Li, J., Gao, D., Zhang, T., Han, Z. (2007). Effect of procyanidins from *Pinus koraiensis* bark on growth inhibition and expression of PCNA and TNF- $\alpha$  in mice with U14 cervical cancer. *Therapy*, 4, 685-690. DOI:10.2217/14750708.4.5.685
- Lieutaghi, P. (2004). Le Livre Des Arbres Arbustes & Arbrisseaux. Ed. ACTES. 1328 p.
- Lim, Y.Y., Murtijaya, J. (2007). Antioxidant properties of *Phyllanthus amarus* extracts as affected by different drying methods. *LWT-Food Science and Technology*, 40: 1664-1669. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.12.013>

- Linares, J.C., Senhadji, K., Herrero, A., Hódar, J.A. (2014). Growth patterns at the southern range edge of Scots pine: Disentangling the effects of drought and defoliation by the pine processionary caterpillar. *Forest Ecology and Management*, 315: 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.029>
- Linares, J.C., Camarero, J.J. Carreira, J.A. (2009). Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 18: 485-497. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00465.x>
- Lisein, J. (2011). Inventaire Forestier de Gestion : Développement d'outils de monitoring pour le Domaine royal de Ciergnon. Université de Liège, Belgique, 77p. <http://hdl.handle.net/2268/150644>
- Locatelli, M., Gindro, R., Travaglia, F., Coïsson, J.-D., Rinaldi, M., Arlorio, M. (2009). Study of the DPPH-scavenging activity: Development of a free software for the correct interpretation of data. *Food Chemistry*, 114(3) : 889-897. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.10.035>
- Loisel, R. (1976). Place et rôle des espèces du genre *Pinus* dans la végétation du sud-est méditerranéen Français. *Ecologia Mediterranea*, 2: 131-152.
- Lookingbill, T. R., Zavala, M. A. (2000). Spatial pattern of *Quercus ilex* and *Quercus pubescens* recruitment in *Pinus halepensis* dominated woodlands. *Journal of Vegetation Science*, 11(4) : 607-612. <https://doi.org/10.2307/3246590>
- Lutz, M., Henri'quez, C.M. (2011). Escobar. Chemical composition and antioxidant properties of mature and baby artichokes (*Cynara scolymus* L.), raw and cooked. *J. of Food Compos.* 24 : 49-54.
- Madani, S., Amel, B., Noui, H., Djamel, S., Abderrahim, B. (2015). Flora and ethnobotany of medicinal plants in the southeast of the capital of Hodna (Algeria). *Flora* 11. <https://doi.org/10.48347/IMIST.PRSM/ajmap-v1i1.3255>
- Mahmoudi S., Khali M., Mahmoudi N. (2013). Etude de l'extraction des composés phénoliques de différentes parties de la fleur d'artichaut (*cynara scolymus* l.). *Nature & Technologie. B- Sciences agronomiques et biologiques*, 9 : 35-40.
- Makkar, H.P.S. (2000). In Quantification of tannins in tree foliage. Working document, FAO/IAEA, Vienna.
- Maksimiuk, B. (1970). Occurrence and nature of antibacterial substances in plants affecting *Bacillus thuringiensis* and other entomogenous bacteria. *Journal of Invertebrate Pathology*, 15, 356-361. [https://doi.org/10.1016/0022-2011\(70\)90181-3](https://doi.org/10.1016/0022-2011(70)90181-3)
- Martin-Dupont, F., Gloaguen, V., Granet, R., Guilloton, M., Morvan, H., Krausz, P. (2002). Heavy metal adsorption by crude coniferous barks: A modelling study. *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.* 37: 1063-1073.
- Martin-Dupont, F., Gloaguen, V., Guilloton, M., Granet, R., Krausz, P. (2006). Study of the chemical interaction between barks and heavy metal cations in the sorption process. *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.* 41 : 149-160.

- May T. (1987). L'état de la végétation 9 ans après l'incendie d'un reboisement de *Pinus halepensis* en Andalousie orientale. *Forêt Méditerranéenne*, 9 (2) : 139- 142.
- Mbugua, P., Pell, A.N. (2001). Analysis of condensed tannins a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 91: 21.
- Mecheri, H., Kouidri, M., Boukheroufa-Sakraoui, F., Adamou, A.E. (2018). Variation du taux d'infestation par *Thaumetopoea pityocampa* du pin d'Alep : effet sur les paramètres dendrométriques dans les forêts de la région de Djelfa (Atlas saharien, Algérie). *Comptes Rendus Biologies* : 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2018.08.002>
- Meddour, R. (1992). Régénération naturelle de *Cedrus atlantica* Man. et de divers pins après incendie dans l'arboretum de Meurdja (Algérie). *Forêt méditerranéenne*. 13(4) : 275-287.
- Meharzi M-K. (2010). Forêts, Géosystèmes Et Dynamique Du Milieu : Le cas de l'Aurès. Thèse de Doctorat d'Etat en aménagement du territoire, Université des frères Mentouri-constantine, 233 p.
- M'Hirit, O. (1999). Le cèdre de l'Atlas à travers le réseau "Silva mediterranea" cèdre". Bilan et perspectives. *Forêt méditerranéenne*, 3 : 91-100.
- M'Hirit, N. (2015). Étude comparative de l'effet des méthodes d'extraction sur les phénols et l'activité antioxydante des extraits des écorces de l'orange "Maltaise demi sanguine" et exploration de l'effet inhibiteur de la corrosion de l'acier au carbone. Alimentation et Nutrition. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques. Université de Lorraine. France. 205p.
- Menasri, A. (2014). Etude de la diversité floristique des écosystèmes forestiers du massif forestier de Béni Melloul (Khenchela). Thèse de Magistère en Agronomie. Université Chadli Bendjedid, El Tarf. 131p.
- Merlo M., et Croitoru L. (2005). Valuing Mediterranean Forests: Towards Total Economic Value. *CABI Publication, Cambridge, Mass, USA*, 406 p.
- Mezali, M. (2003). Rapport sur le secteur forestier en Algérie. 3<sup>ème</sup> session du forum des Nations Unis sur les forêts, 9 p.
- Meziti, H., (2019). Effets biologiques des extraits de *Pinus halepensis* et *Quercus ilex*. Thèse de Doctorat en Sciences biologiques. Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie. 108p.
- Meziti, H., Bouriche, H., Kada, S., Demirtas, I., Kizil, M., Senator, A. (2019). Phytochemical analysis, and antioxidant, anti-hemolytic and genoprotective effects of *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* Mill. methanolic extracts. *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research*, 7(4): 260-272.
- Miara, M.D., Bendif, H., Rebbas, K., Rabah, B., Hammou, M.A., Maggi, F. (2019). Medicinal plants and their traditional uses in the highland region of Bordj Bou Arreridj (North east Algeria). *J. Herb. Med.* 16 (100262): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2019.100262>
- Montero, G., Canellas, I., et Ruis-Peinado, R. (2001). Growth and Yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.*, 10 (1): 23p.

- Mosandl, R., Kleinert, A. (1998). Development of oaks (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) emerged from bird-dispersed seeds under old-growth pine (*Pinus silvestris* L.) stands. *Forest Ecology and Management* 106(1): 35-44. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00237-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00237-5)
- Motz, K., Sterba, H., Pommerening, A. (2010). Sampling measures of tree diversity. *Forest Ecology and Management*, 260(11): 1985-1996. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.>
- Mouhajir, F., Hudson, J., Rejdali, M., Towers, G., (2001). Multiple antiviral activities of endemic medicinal plants used by Berber peoples of Morocco. *Pharmaceutical biology*, 39: 364-374. <https://doi.org/10.1076/phbi.39.5.364.5892>
- Mueller-Harvey, I. (2001). Analysis of hydrolysable tannins. *Animal Feed Science and Technology*, 91(1-2): 3-20. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00227-9](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00227-9)
- Naczk, M., Oickle, D., Pink, D., Shahidi, F. (1996). Protein Precipitating Capacity of Crude Canola Tannins: Effect of pH, Tannin, and Protein Concentrations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(8): 2144-2148. <https://doi.org/10.1021/jf960165k>
- Naggar, M., Iharchine, K. (2015). Pour une valorisation durable des produits forestiers non ligneux. Cas des faciès à romarin de l’Oriental du Maroc. XIVeme CONGRES FORESTIER MONDIAL, FAO, Durban, Afrique du Sud. (hal-01208545)
- Naggar, M., Iharchine, K. (2016). Pour une approche d’aménagement et de gestion durable des territoires à romarin dans la région de l’Oriental (Maroc). *Forêt méditerranéenne*. T. XXXVII(1) : 63-70.
- Nahal, I. (1962). Le pin d’Alep, Etude taxonomique, phytogéographique, écologique et Sylvicole. *Annales de l’Ecole Nationale des Eaux et Forêts*, 19 (4): 533-627 ; 487-554.
- Naima, R., Oumam, M., Hannache, H., Sesbou, A., Charrier, B., Pizzi, A., Charrier-El Bouhtoury, F. (2015). Comparison of the impact of different extraction methods on polyphenols yields and tannins extracted from Moroccan *Acacia mollissima* barks. *Industrial Crops and Products*, 70: 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.016>
- Nait Sidi Ahmed, A. (2012). Mise en place d’un procédé d’extraction et de pré-purification de molécules bioactives à partir d’une culture énergétique « *Salix miyabeana* SX67 ». [Mémoire de maîtrise en génie chimique]. Université de Sherbrooke, Canada. 105p.
- Nergiz, C., Dönmez, İ. (2004). Chemical composition and nutritive value of *Pinus pinea* L. seeds. *Food Chemistry*, 86(3), 365-368. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.09.009>
- Ngo Bieng, M.A. (2007). Construction de modèles de structure spatiale permettant de simuler des peuplements virtuels réalistes. Application aux peuplements mélanges chêne sessile -pin sylvestre de la région centre. Thèse de doctorat en science forestière. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF) (AgroParisTech) France. 214p. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00003350>

- Nguyen, M.T., Kryachko, E.S., Vanquickenborne, L.G. (2003). General and Theoretical Aspects of Phenols. *The Chemistry of Phenols*, 1-198.  
<https://doi.org/10.1002/0470857277.ch1>
- Nicault A. (1999). Analyse de l'influence du climat sur les variations inter et intra annuelles de la croissance radiale du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille III. France, 254 p.
- Oosterhoon, M., Kappelle, M. (2000). Vegetation structure and composition along an interior-edge-exterior gradient in a Costa Rica montane cloud forest. *For. Ecol. Manage.* 126 : 291-307. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00101-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00101-2)
- Oswald H. (1984). Production et sylviculture du Douglas en plantations. *Rev For Fr.* 36 : 268-278.
- Ouldache, E.H. (2021). Le barrage vert : bilan physique et perspectives. *Ann. Rech. For. Algérie*, 11(01): 7-20.
- Paragi, T., Rodman, S. (2020). Maintaining wildlife habitat in the boreal forest of Alaska. A guide for land owners, developers, and timber harvesters. Department of Fish and Game. (Alaska) : 18-19.
- Pardé J., Bouchon J. (1988). Dendrométrie. 2<sup>e</sup> édit., ENGREF, Nancy, 328 p.
- Penchev, P., Angelov, G., Condoret, J-S. (2010). Extraction des agents antioxydants (acide rosmarinique) à partir de la mélisse (*Melissa officinalis* L.). *Revue de génie industriel*, 5 : 115-123.
- Penchev, P.I. (2010). Étude des procédés d'extraction et de purification de produits bioactifs à partir de plantes par couplage de techniques séparatives à basses et hautes pressions, Thèse de doctorat en Génie des Procédés et de l'Environnement. Université de Toulouse, France, 239p.
- Pitman, N.C.A., Terborgh, J.W., Silman, M.R., Núñez V.P., Neill, D. A., Cerón, C.E., Aulestia, M. (2001). Dominance and distribution of tree species in upper amazonian terra firme forests. *Ecology*, 82(8): 2101-2117.  
[https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[2101:DADOTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[2101:DADOTS]2.0.CO;2)
- Pommerening, A. (2002). Approaches to quantifying forest structures. *Forestry* 75(3): 305-324. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.3.305>.
- Pommerening, A., Gonçalves, AC., Rodríguez-Soalleiro, R. (2011). Species mingling and diameter differentiation as second-order characteristics. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 182(7-8): 115-129.
- Pommerening, A., Grabarnik, P. (2019). Individual-based Methods in Forest Ecology and Management. *Springer International Publishing Switzerland*, 411 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-24528-3>.
- Pommerening, A., Uria-Diez, J. (2017). Do large forest trees tend towards high species mingling? *Ecol Inform*, 42: 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.10.009>.

- Potta, S. P., Doss, M. X., Hescheler, J., Sachinidis, A. (2005). Epigallocatechin-3- gallate (EGCG): A structural target for the development of potential therapeutic drugs against anti-proliferative diseases. *Drug Design Reviews*, 2: 85-91.  
<https://doi.org/10.2174/1567269053390329>
- Pretzsch, H. (2009). Forest Dynamics, Growth, and Yield. In: Pretzsch H (ed) *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Springer, Berlin, *Heidelberg, Germany*: 1-39.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-481>.
- Purdy, L., Schmidt, R. (1996). Status of cacao witches' broom: Biology, Epidemiology, and Management. *Annual Review of Phytopathology*, 34(1): 573-594.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.34.1.573>
- Quezel P. (1986). Les pins du groupe « *halepensis* ». Ecologie, végétation, écophysologie Options Méditerranéennes. *Série Etude CIHEAM*. 86 (1) : 11-24.
- Quèzel P. (2000). Taxonomy and biogeography of Mediterranean pines (*Pinus halepensis* and *P. brutia*). In: Ne'eman G, Trabaud L, editors. *Ecology, Biogeography and Management of Pinus halepensis and P. brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin* Backhuys, Leiden, *The Netherlands*: 1-12.
- Quézel, P., Médail, F. (2003). Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. *Elsevier Collection Environnement*, Paris, 573 p.
- Rabiou, H., Diouf, A., Bationo, B.A., Segla, K.N., Adjonou, K., Kokutse, A.D., Radji, K., Kokou, R., Mahamane, A., Saadou, M. (2015). Structure des peuplements naturels de *Pterocarpus erinaceus* Poir. Dans le domaine soudanien, au Niger et au Burkina Faso. *Bois et forêts des tropiques*. 325 (3) : 72-83.  
<https://doi.org/10.19182/bft2015.325.a31274>
- Rached- Kanouni M., Hani I., Bousba R., Beldjazia A., Khammar H. (2020). Structural variability of Aleppo pine stands in two forests in northeastern Algeria. *Biodiversitas*, 21: 2848-2853. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210663>
- Rached-Kanouni, M. (2019). Structure indices of aleppo pine in chettaba forest (ALGERIA). 19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings. *Section ecology and environmental studies*.
- Rached-Kanouni, M., Hani, I., Bousba, R., Beldjazia, A., Khammar, H. (2020). Structural variability of Aleppo pine stands in two forests in northeastern Algeria. *Biodiversitas* 21(6): 2848- 2853. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210663>.
- Rajoelison, G., Rabenilalana, F., Rakoto, H. (2008). Rapport final. Suivi écologique et analyse socio-économique d'un aménagement participatif de bassin versant dans la zone de Mandraka Madagascar, 70p.
- Ramade, F. (1984). *Eléments d'écologie, écologie fondamentale*. Auckland, McGraw-Hill, Paris, 397p.
- Rice-Evans C., Miller N., Paganga G. (1997). Antioxidantproperties of phenolic compounds. *Trends in Plant Science* 2(4): 152-159. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)01018-2)

- Richter, B. E., Brian A., Jones, John L., Ezzell, and Nathan L. P. (1996). Accelerated Solvent Extraction : A Technique for Sample Preparation. *Analytical Chemistry*, 68(6): 1033-1039. <https://doi:10.1021/ac9508199>
- Robinet, C., Rousselet, J., Goussard, F., Roques, A. (2010). Modelling the range expansion of an urticating moth with global warming: a case study from France. In: Settele J, ed. Atlas of Biodiversity Risks - From Europe to the Globe, From Stories to Maps. *Pensoft*, Sofia : 82-83.
- Robinet, C. (2006). Modélisation mathématique des phénomènes d'invasion en écologie: exemple de la chenille processionnaire du pin. Thèse de doctorat en Sciences Sociales, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, France, 188p.
- Rohdewald, P. (2002). A review of the French maritime pine bark extract (Pycnogenol), an herbal medication with a diverse clinical pharmacology. *International Journal of Clinical Pharmacology and Therapy*, 40: 158–168. <https://doi.org/10.5414/cpp40158>
- Romani A., Pinelli P., Cantini C., Cimato A and Heimler D. (2006). Characterization of Violetto di Toscana, a typical Italian variety of artichoke (*Cynara scolymus* L.). *J. Food Chem.* 95: 221-225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.013>
- Rondeux, J. (1993). La mesure des arbres et des peuplements forestiers. *Presses agronomiques*, Gembloux, Belgique. 521 p.
- Rondeux, J. (1999). La mesure des peuplements forestiers. Gembloux, Belgique, *Les Presses agronomiques*, Gembloux, 522 p.
- Rondeux, J. (2021). La mesure des arbres et des peuplements forestiers. 3ème édition. Presses Universitaires de Liège - *Presses Agronomiques*, Gembloux. 738p. <http://hdl.handle.net/2268/262622>
- Rowe, J. W. (1989). Natural Products of Woody Plants. *Springer Series in Wood Science*. 1243p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74075-6>
- Kadi, K., Hamli, S., Dib, D., Kabbour, R., Annahli, Y., Boukeria, S., Yahia, A. (2018). Determination of phenolic compounds and antioxidant activity of white henbane (*hyoscyamus albus* L.) Plant treated by kinetin (k) and 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-d) in mila, Algeria. 10(3): 1-12. <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v10i3.1>
- Safar W. (1994). Contribution à l'étude dendroécologique du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans une région semi-aride d'Algérie : l'Atlas saharien (Ouled Nail - Aures-Hodna). Thèse Doct. en Sc. Univ.Aix-Marseille, 215p.
- Saha, J.-B.T. (2015). Caractérisation et valorisation des substances extractibles de cinq essences camerounaises majeures de l'industrie du bois : Ayous, Moabi, Movingui, Padouk et Tali. These de doctorat en science du bois et des fibres. Université de Yaoundé i (cameroun). 162p.
- Saha, J.-B. T., Abia, D., Dumarçay, S., Ndikontar, M. K., Gérardin, P., Ngamveng Noah, J., Perrin, D. (2013). Antioxidant activities, total phenolic contents and chemical compositions of extracts from four Cameroonian woods: Padouk (*Pterocarpus soyauxii* Taubb), tali (*Erythrophleum suaveolens*), moabi (*Baillonella toxisperma*), and movingui

- (*Distemonanthus benthamianus*). *Industrial Crops and Products*, 41: 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.012>
- Saito, S., Kawabata, J. (2005). Effects of electron-withdrawing substituents on DPPH radical scavenging reactions of protocatechuic acid and its analogues in alcoholic solvents. *Tetrahedron*, 61(34): 8101-8108. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2005.06.040>
- Saleem, M., Kim, H. J., Ali, M. S., Lee, Y. S. (2005). An update on bioactive plantlignans. *Natural Product Reports*, 22 : 696-716.
- Salhi, N. (2020). Etude phytochimique et évaluation de l'activité antioxydante et anti Hyperglycémiant des extraits aqueux et Éthanolique de l'écorce de *Pinus Halepensis*. Thèse de doctorat en pharmacie. Université Mohammed V-Rabat Maroc. 178 p.
- Salhi, N., Bouyahya, A., Fettach, S., Zellou, A., Cherrah, Y. (2019). Ethnopharmacological study of medicinal plants used in the treatment of skin burns in occidental Morocco (area of Rabat). *South African Journal of Botany*, 121: 128-142. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.10.038>
- Salim, H., Rimawi, W. H., Shaheen, S., Mjahed, A. (2018). Phytochemical Analysis and Antibacterial Activity of Extracts from Palestinian Aleppo Pine Seeds, Bark and Cones. *Asian Journal of Chemistry*, 31(1): 143-147. <http://doi:10.14233/ajchem.2019.21633>
- Sanchez-Salguero, R., Navarro-Cerrillo, R.M., Camarero, J.J. Fernandez-Cancio, A. (2010). Drought-induced growth decline of Aleppo and maritime pine forests in south-eastern Spain. *Forest Systems*. 19(3) : 458-469.
- Sanchez-Salguero, R., Navarro-Cerrillo, R.M., Camarero, J.J., Fernandez-Cancio, A. (2012). Selective drought-induced decline of pine species in southeastern Spain. *Clim. Change*, 113 : 767-785.
- Sandjong, Sani R.C., Ntoupka, M., Vroumsia, T. Ibrahima, A. (2018). Caractérisation structurale de la végétation ligneuse du Parc National de Mozogo-Gokoro (Cameroun). *Flora et Vegetatio Sudano-Sambesica*, (21) : 7-24.
- Sari, D. (1978). Le reboisement de l'Ouarsenis. In : Recherches sur l'Algérie, Mémoires et documents, vol. 17 : 101 -164.
- Sarmoum, M., Guibal, F., Abdoun, F. (2016). Effet des facteurs stationnels sur la croissance radiale et la réponse du pin d'Alep au climat dans le massif de l'ouarsenis, algérie. *Bois & forêts des tropiques*, 329(329) : 17-27. <https://doi.org/10.19182/bft2016.329.a31308S>
- Sauvage, C. (1963). Etages bioclimatiques. Atlas du Maroc. Notices explicatives, Sect. II, *Physique du globe et Météorologie*, 44 p.
- Schiller, G., Conkle, M.T., Grundwald, C. (1986). Local differentiation among Mediterranean provenances of Aleppo pine in their isozyme. *Silvae Genet.*, 35 : 11-19.
- Schofield, P. Mbugua, D.M. Pell, A.N. (2001). Analysis of condensed tannins a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* (91) : 21.
- Seigue, A. (1985). La forêt circum méditerranéenne et ses problèmes. Maison neuve et Larose Edition. Paris. 502p.

- Seltzer P. (1946). Climats de l'Algérie. Trav. Inst-Mét. Phys. Glo. Algérie. Carbonnel.
- Senouci, F., Ababou, A., Chouieb, M. (2019). Ethnobotanical 1347 Survey of the Medicinal Plants used in the Southern Mediterranean. Case Study: The Region of Bissa (Northeastern Dahra Mountains, Algeria). *Pharmacogn. J.* 11 : 647-659. <https://doi.org/10.5530/pj.2019.11.103>
- Serre, F. (1976) a. Les rapports de la croissance et du climat chez le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). I- Méthodes utilisées. L'activité cambiale et le climat. *Acta Oecologica / Oecologica plantarum* 2 (2) : 143-171.
- Serre, F. (1976b). Les rapports de la croissance et du climat chez le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). II- L'allongement des pousses et des aiguilles et le climat. Discussion générale. *Acta Oecologica / Oecologica plantarum* 2 (3) : 201-224.
- Sharma, O. P., & Bhat, T. K. (2009). DPPH antioxidant assay revisited. *Food Chemistry*, 113(4) : 1202–1205. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.008>
- Shifley, S., Lentz, E. (1985). Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. *Forest Ecology and Management*, 13(3-4) : 195-203. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(85\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0378-1127(85)90034-9)
- Souleres G. (1969). Le pin d'Alep en Tunisie. *Ann. De l'I. N. R. F., Tunis*, 2 (1) : 1-126.
- Souleres, G. (1969). Le pin d'Alep en Tunisie. *Ann. Ins. Hist. Nat. afr. Nord, Alger*, 59 (4), 23-36.
- Spencer D.J.E. (1958). Dry contry pines: provenance evaluation of the *Pinus halepensis-Pinus brutia* complex in the semi-arid region of South-East Australia. *Aust. For. Res.*, 15: 264-279.
- Spencer, J. P. E., El Mohsen, M. M. A., Minihane, A.-M., Mathers, J. C. (2008). Biomarkers of the intake of dietary polyphenols : strengths, limitations and application in nutrition research. *British Journal of Nutrition*, 99: 12-22. <https://doi.org/10.1017/S0007114507798938>
- Stalikas, C. D. (2007). Extraction, separation, and detection methods for phenolic acids and flavonoids. *Journal of separation science*, 30(18) : 3268-3295. <https://doi.org/10.1002/jssc.200700261>
- Stewart, Ph. (1969). Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, Alger*, 59 (4) : 23-36.
- Su, X. Y., Wang, Z. Y., Liu, J. L. (2009). In vitro and in vivo antioxidant activity of *Pinus koraiensis* seed extract containing phenolic compounds. *Food Chemistry*, 117 : 681–686. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.04.076>
- Suga, T., Ohta, S., Munesada, K., Ide, N., Kurokawa, M., Shimizu, M., Ohta, E. (1993). Endogenous pine wood nematicidal substances in pines, *Pinus massoniana*, *P. strobus* and *P. palustris*. *Phytochemistry*, 33(6): 1395-1401. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(93\)85098-C](https://doi.org/10.1016/0031-9422(93)85098-C)

- Sun, B. Richardo-da-Silvia, J.M. Spranger, I. (1998). Critical factors of vanillin assay for catechins and proanthocyanidins. *J. of Agriculture and Food Chemistry*, (46), 4267 p.
- Tahouo, S.F. (2016). Procédures d'extraction globale des composés phytochimiques pour l'évaluation analytique des médicaments à base de plantes. Thèse de doctorat en pharmacie. 141p.
- Takano, T., Murakami, T., Kamitakahara, H., Nakatsubo, F. (2008). Formaldehyde adsorption by karamatsu (*Larix leptolepis*) bark. *J. Wood Sci.* 54: 332-336.
- Tamert, A., Latreche, A. (2016). Activité antioxydante des extraits de six Lamiaceae aromatiques de l'Algérie occidentale. *Phytothérapie* : 1-8.  
<https://doi.org/10.1007/s10298-015-1016-1>
- Teh, S.-S., Bekhit, A., Birch, J. (2014). Antioxydative Polyphenols from Defatted Oilseed Cakes: Effect of Solvents. *Antioxidants*, 3(1) 67-80. <http://doi:10.3390/antiox3010067>
- Tereschuk M., Baigorí M., Figueroa L., Abdala L. (2004). Flavonoids from Argentine Tagetes (Asteraceae) with antimicrobial activity. *Public Health and Microbiology: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology. Humana Press, Totowa*, 268 : 317-330.  
<https://doi.org/10.1385/1-59259-766-1:317>
- Thibaut B., Loup C., Chanson B., Dilem A. (1992). La valorisation du pin d'Alep en zone méditerranéenne française. *Forêt méditerranéenne*. XIII(3). 226-233.
- Tomás-Barberán, F.A. and Espín, J.C. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. *J. Sci. Food Agric.*, 81: 853-876.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.885>
- Tondi, G., Pizzi, A., Olives, R. (2008). Natural tannin-based rigid foams as insulation for doors and wall panels. *Maderas Cienc. y Tecnol.* 10 : 219-228.  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2008000300005>
- Toth, J. (1978). Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Man.) dans le sud de la France. [Thèse doctorat en Sciences du Vivant]. Université Paul Cézanne Aix Marseille 3-France. 136 p.  
<https://hal.inrae.fr/tel-02859780>
- Toth, J. (1987). Installation et développement du semis naturel "pin noir d'Autriche, pin sylvestre et cèdre de l'Atlas "après incendie sur le Mont Ventoux. *Forêt Méditerranéenne*, 9 (1) : 29-34.
- Trabaud, L. (1970). Quelques valeurs et observations sur la phyto-dynamique des surfaces incendiées dans le BasLanguedoc. *Naturalia monrpelesiensia, skie Botanique*, 21 : 231-42.
- Trabaud, L. (1980). Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'organisation, la structure et l'évolution de la végétation des zones de garrigues du Bas-Languedoc. Thèse Doctorat en Sciences. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France, 290 p.

- Trabaud, L., Michels, C., Grosman, J. (1985). Recovery of burnt *Pinus halepensis* mill. forests. II. Pine reconstruction after wildfire. *Forest Ecology and Management*, 13(3-4): 167-179. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(85\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0378-1127(85)90032-5)
- Tsao, R. (2010). Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols. *Nutrients*, (2): 1231-1246.
- Vázquez, G., González-Alvarez, J., García, A.I., Freire, M.S., Antorrena, G. (2007). Adsorption of phenol on formaldehyde-pretreated *Pinus pinaster* bark: Equilibrium and kinetics. *Bioresour. Technol.* 98 : 1535-1540.
- Vennetier, M. Girard, F. Didier, C. Ouamim, S. Ripert, C. Misson, L. Estève, R. Martin, W. Ndiaye-Boubacar, A. (2011). Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique. *Forêt Méditerranéenne*. 32(2): 151-167.
- Vercauteren, J., Chèze, C., Triaud, J. (1998). Polyphenols 96: 18th International Conference on Polyphenols, Bordeaux (France), July 15-18, 1996. Editions Quae.
- Wang, S. Y., Zheng, W. (2001). Effect of Plant Growth Temperature on Antioxidant Capacity in Strawberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10): 4977-4982. <https://doi.org/10.1021/jf0106244>
- Watanabe, K., Momose, F., Handa, H., Nagata, K. (1995). Interaction between Influenza Virus Proteins and Pine Cone Antitumor Substance That Inhibits the Virus Multiplication. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 214(2), 318-323. <https://doi.org/10.1006/bbrc.1995.2290>
- Willför, S. M., Ahotupa, M. O., Hemming, J. E., Reunanen, M. H. T., Eklund, P. C., Sjöholm, R. E., ... Holmbom, B. R. (2003)a. Antioxidant Activity of Knotwood Extractives and Phenolic Compounds of Selected Tree Species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(26): 7600-7606. <https://doi.org/10.1021/jf030445h>
- Willför, S., Hemming, J., Reunanen, M. & Holmbom, B. (2003)b. Phenolic and Lipophilic Extractives in Scots Pine Knots and Stemwood. , 57(4): 359-372. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.054>
- Yahi, D. Redjaimia, L. Haddad, A. Zerrouki, A. Rached-Kanouni, M. (2021). Valorization and characterization of the forest of el Hamimet (Alegria).. SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings *Section ecology and environmental studies*.
- Yang, J., Chen, C., Zhao, S., Ge, F. Liu, D. (2014). Effet des solvants sur l'activité antioxydante des extraits de coquille de noix (*Juglans regia* L.). *Journal of Food and Nutrition Research*, 2 (9): 621-626.
- Yemele, M.C.N. (2008). Développement de panneaux de particules à base d'écorce d'épinette noire et de peuplier faux-tremble. Dr. en Sci. du bois, Département des Sci. du bois la forêt, Fac. For. géomatique, Univ. Laval, Quebec. 174p. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/19763>

- Yen, G. H., Pin-Der Duh, P. D., Huang, D. W., Hsu, C. L., Fu Yu-Chi, T. (2008). Protective effect of pine (*Pinus morrisonicola* Hay.) needle on LDL oxidation and its anti-inflammatory action by modulation of iNOS and COX-2 expression in LPS- stimulated RAW 264.7 macrophages. *Food and Chemical Toxicology*, 46: 175-185. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.07.012>
- Witchl M.R.A. (2003). Plantes thérapeutiques. Tradition, pratique officinale, science et thérapeutique. 1 Volumes. Paris - Cachan, Editions Technique et Documentation. *Editions Médicales Internationales* : 32-33.
- Zamoum, M. (1998). Données sur la bio-écologie, les facteurs de mortalité et la dynamique des populations de *Thaumetopoea pityocampa* Denis et Schiffermüller. (Lep., Thaumetopoeidae) dans les pineraies subsahariennes de la région de Djelfa (Algérie). Thèse de Doctorat], Université des Sciences de Rennes I. 247 p.
- Zamoum, M. (2002). Quelques éléments pour la préservation de la santé des forêts en Algérie. *Revue de la forêt algérienne*, 4 : 4-7.
- Zamoum, M., Gachi, M., Sai, K. (2008). Guide de santé des forêts (Insectes Ravageurs et Champignons pathogènes). *Publication de l'INREF*, Alger.
- Zavala, M., Zea, E. (2004). Mechanisms maintaining biodiversity in Mediterranean pine-oak forests: insights from a spatial simulation model. *Plant Ecol.* 171: 197-207. <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000029387.15947.b7>
- Ziouche, S., Baali, F., Moutassem, D., Djazouli, Z.E. (2017). Stratégies de choix de l'emplacement des nids d'hiver de *Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller, 1775) au niveau de trois pinèdes dans la région de Bordj Bou Arreridj (Algérie). *Rev. Agrobiol.* 7(2) : 412-426.
- Zounon CSF., Tougiani A., Moussa M., Rabiou H., kiari A., Karimou A. (2019). Diversité et structure des peuplements ligneux issus de la régénération naturelle assistée (RNA) suivant un gradient agro-écologique au Centre Sud du Niger. *IOSR-JAVS*, 12(1) : 52-62. <https://DOI:10.9790/2380-1201035262>

# *Annexes*

## Annexe I

Tableau 1. Coordonnées géographiques de 16 parcelles d'étude de Bénis Oudjana.

Parcelles	Latitude	Longitude	Altitude (m)
N1	35°27'22.14"N	6°57'14.00"E	1024
N2	35°27'22.59"N	6°53'57.62"E	1121
N3	35°27'21.14"N	6°52'22.62"E	1106
N4	35°27'21.14"N	6°50'43.65"E	1314
E1	35°27'19.98"N	6°49'5.21"E	1140
E2	35°26'2.53"N	6°45'50.89"E	1333
E3	35°26'2.53"N	6°47'28.83"E	1292
E4	35°26'2.53"N	6°50'44.17"E	1399
S1	35°24'42.10"N	6°52'22.62"E	1383
S2	35°24'43.26"N	6°50'44.17"E	1446
S3	35°23'24.64"N	6°49'5.54"E	1240
S4	35°23'23.49"N	6°50'44.17"E	1339
O1	35°22'4.22"N	6°50'43.65"E	1472
O2	35°20'46.22"N	6°47'28.83"E	1186
O3	35°20'45.07"N	6°49'5.54"E	1434
O4	35°19'25.80"N	6°47'29.52"E	1284






Tableau 2. Date des sorties.

Mois	Jour	Nombre des parcelles
Septembre	24 - 28/2018	3
Octobre	03-20/2018	4
Novembre	06/11/2018	2
Décembre	4-6-13/2018	7

Tableau 3. Fiche terrain

FICHE N° 1 : DESCRIPTION DE LA STATION										
Relevé N° :			Lieu :				Exposition			
Prospecteur :			Type de forêt :							
Date :			Altitude (m) :							
Surface (m <sup>2</sup> ) :			Pente (%) :							
Coordonnées géographiques			X1 :				Y1 :			
			X2 :				Y2 :			
			X3 :				Y3 :			
			X4 :				Y4 :			
N°	Espèce	Cir	H (m)			D Houppier		Coordonnées		Observation
			Ht	Hf	HC	x	y	X	Y	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
N° Parcelle	Feux	Dépérissement	Pâturage	Coupes illicites	Pathogènes					
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
10										
11										
12										

Tableau 4. Matériel utilisé

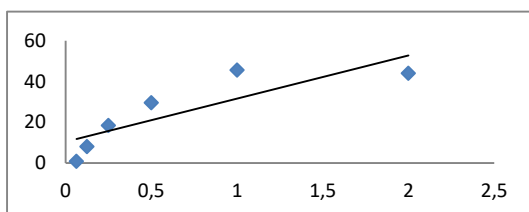
<p><b>Mètre ruban (décamètre)</b></p> <p>Pour mesurer la circonférence, le point de chute de l'arbre et les limites des parcelles.</p>	
<p><b>Un compas forestier</b></p>	
<p><b>Blume-Leiss</b> (Mesure des hauteurs)</p>	
<p><b>Global Positioning System (GPS)</b></p>	
<p><b>Peinture, pinceaux et Flag</b></p> <p>Pour marquer les arbres sur le terrain.</p> <p>Flag ou ruban de balisage (Délimitation des parcelles)</p>	

## Annexes II

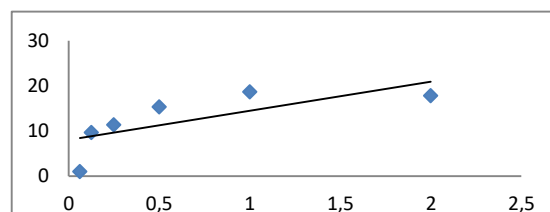
## Matériel utilisé

Spectrophotomètre, Agitateur magnétique, rotovapeur et balance de précision

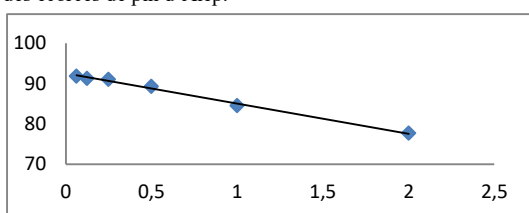
## Annexe III



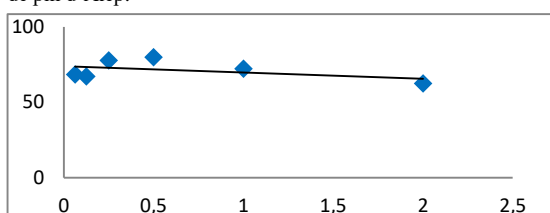
**Figure 1.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait par l'éther de pétrole des écorces de pin d'Alep.



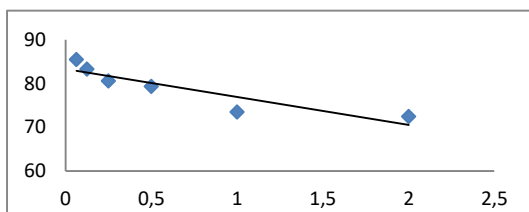
**Figure 2.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait par l'éther de pétrole des aiguilles de pin d'Alep.



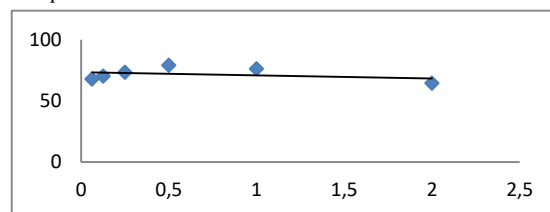
**Figure 3.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait acétonique.



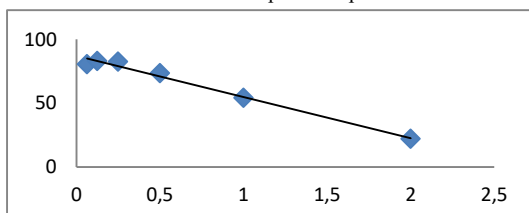
**Figure 4.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait acétonique des aiguilles de pin d'Alep.



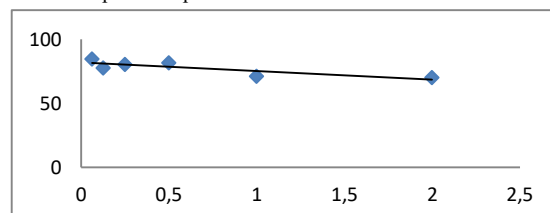
**Figure 5.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait par le mélange toluène/éthanol des écorces de pin d'Alep.



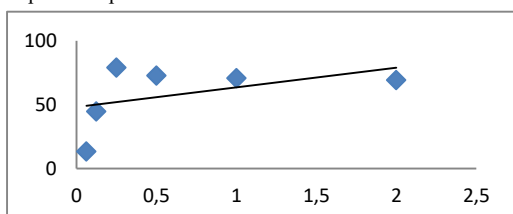
**Figure 6.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait par le mélange toluène/éthanol des écorces de pin d'Alep.



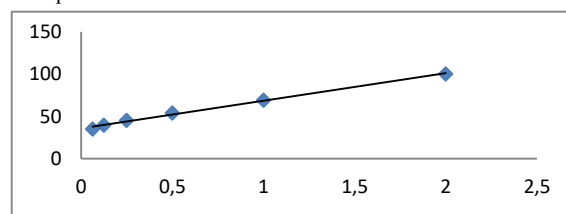
**Figure 7.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait Aqueux des écorces de pin d'Alep.



**Figure 8.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait Aqueux des aiguilles de pin d'Alep.



**Figure 9.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'extrait méthanolique.



**Figure 10.** Pourcentage d'inhibition du radical DPPH en fonction de la concentration de l'acide ascorbique.

## Annexe IV

**Tableau 1.** Tests de Fisher l'indice de Clark et Evans *R*.

Niveaux	Moyennes	Erreur -type	IC à 95 %	Valeur T	p
Est - nord	0,129	0,159	(-0,219; 0,476)	0,81	0,435
Sud - nord	0,137	0,159	(-0,211; 0,484)	0,86	0,407
Ouest - nord	0,375	0,159	(0,027; 0,722)	2,35	0,037
Sud - est	0,008	0,159	(-0,339; 0,356)	0,05	0,960
Ouest - est	0,246	0,159	(-0,102; 0,593)	1,54	0,149
Ouest - sud	0,238	0,159	(-0,110; 0,585)	1,49	0,162

Niveau de confiance simultané = 81,57 %

**Tableau 2.** Tests de Fisher pour l'indice de mélange *Mi*.

Niveaux	Moyennes	Erreur- type	IC à 95 %	Valeur T	p
Est - nord	-0,438	0,199	(-0,872; -	-2,20	0,049
Sud - nord	-0,250	0,199	(-0,684;	-1,25	0,234
Ouest -	-0,125	0,199	(-0,559;	-0,63	0,542
Sud - est	0,188	0,199	(-0,247;	0,94	0,365
Ouest - est	0,313	0,199	(-0,122;	1,57	0,143
Ouest - sud	0,125	0,199	(-0,309;	0,63	0,542

Niveau de confiance simultané = 81,57 %

**Tableau 3.** Tests de Fisher pour de l'indice de différenciation des diamètres *Tij*.

Niveaux	Moyennes	Erreur -type	IC à 95 %	Valeur T	p
Est - nord	0,275	0,154	(-0,061; 0,612)	1,78	0,100
Sud - nord	0,206	0,154	(-0,131; 0,542)	1,33	0,208
Ouest - nord	0,491	0,154	(0,155; 0,828)	3,18	0,008
Sud - est	-0,070	0,154	(-0,406; 0,267)	-0,45	0,661
Ouest - est	0,216	0,154	(-0,120; 0,553)	1,40	0,187
Ouest - sud	0,286	0,154	(-0,051; 0,622)	1,85	0,089

Niveau de confiance simultané = 81,57 %