

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen, Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر

Faculté des Sciences de la Nature et de la vie, de la Terre et de l'Univers

Département des Ressources Forestières

Mémoire de Master
Filière: Sciences Agronomiques
Foresterie: Protection des Forêts

Thème:

Impact de la sécheresse sur la santé du chêne liège: cas de la forêt de Hafir (Tlemcen)

Présenté par:

LALLAM TANI ABLA

Soutenu le :

25/06/2025

Devant le jury composé de :

Président :

HADDOUCHE Driss

Pr. Université de Tlemcen

Encadreur :

BOUHRAOUA Rachid Tarik

Pr. Université de Tlemcen

Examineur :

CHIKH Mohamed

MAA Université de Tlemcen

Année universitaire: 2024-2025

Dédicace

Je dédie ce travail à moi-même, à cette petite fille pleine d'espoir qui rêvait un jour d'y parvenir... et qui a persévéré, malgré les doutes, jusqu'à atteindre son objectif. Que ce mémoire soit le symbole de sa résilience, de sa foi et de sa force.

À mes chers parents

les piliers de ma vie. Votre amour inconditionnel, votre soutien sans faille et vos sacrifices silencieux ont été les fondations de mon parcours. Merci du fond du cœur de m'avoir portée, encouragée, et surtout d'avoir cru en moi, même lorsque moi-même, je doutais. Votre présence lumineuse a guidé chacun de mes pas.

*À mon frère et ma sœur **Rayen et Besma,***

pour votre aide précieux et votre encouragement constant. Votre confiance et votre énergie m'ont portée dans les moments les plus exigeants.

A mon cher mari

je te remercie du fond du cœur, pour ton soutien indéfectible, ta patience, ton amour. Grâce à toi, chaque moment de doute a été allégé, chaque difficulté surmontée, et chaque pas encouragé.

À ma famille et mes amis

pour votre soutien fidèle, vos paroles réconfortantes, vos rires partagés et votre présence à chaque étape. Grâce à vous, cette aventure a eu un goût de chaleur et de bonheur.

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu Tout-Puissant, qui a facilité mon chemin, m'a guidée avec sagesse et m'a donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail et atteindre ce cap important de ma vie.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant **Pr. Bouhraoua Rachid Tarik**, pour ses efforts constants, son accompagnement bienveillant et ses conseils éclairés tout au long de ce projet. Son expertise et sa disponibilité ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.*

*Je remercie également **Pr. Haddouche Driss** et **Dr. Chikh Mohamed** qui ont accepté d'évaluer mon travail et de faire partie du jury de soutenance. Leur regard critique et leurs remarques constructives enrichiront à coup sûr la portée de ce travail.*

*un grand merci à monsieur **Laidouzi Mohamed**, qui a toujours été présent, que ce soit sur le terrain ou au laboratoire, pour m'apporter aide, soutien technique et accompagnement sur le plan pratique.*

*Mes sincères remerciements vont à **Monsieur Benabdallah** pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée dans la réalisation et l'analyse statistique des données de cette étude. Sa générosité et son professionnalisme ont été d'une grande valeur.*

*Un grand merci à ma chère amie **BELARIBI Rania**, pour son aide constante, sa présence rassurante et son soutien moral indéfectible, notamment lors des travaux sur le terrain.*

Je tiens à remercier ma tante et mon oncle, qui m'ont généreusement accueillie chez eux pendant ces cinq années d'études. Un remerciement particulier à ma tante, pour sa présence, son écoute et son soutien moral sans faille. Je lui suis profondément reconnaissante.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des professeurs, enseignants et membres du personnel du Département des Ressources Forestières pour m'avoir offert une base académique solide et pour leur engagement inspirant envers l'éducation et l'excellence.

J'adresse également mes sincères remerciements à mes amis et collègues pour leur soutien constant, les moments partagés entre stress et éclats de rire, et la véritable camaraderie tout au long de ce parcours.

Je n'oublie pas toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont soutenue, encouragée et qui ont cru en moi. Votre présence, vos mots, vos gestes, ont compté plus que vous ne l'imaginez.

Résumé : Impact de la sécheresse sur la santé du chêne liège : cas de la forêt de Hafir (Tlemcen)

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.), est une espèce emblématique des forêts méditerranéennes ; il fait face à une pression croissante liée aux effets du changement climatique. Cette étude menée dans la forêt de Hafir (Tlemcen) vise à évaluer l'impact de la récente sécheresse sur la santé des peuplements de chêne-liège à travers une approche intégrée combinant l'outil architectural des arbres et les analyses climatiques, pédologiques, hydriques et sanitaires. Des mesures de terrain ont été effectuées sur deux stations totalisant 89 arbres représentatifs pour caractériser leur état sanitaire en octobre-février. Elle est complétée par des prélèvements des rameaux pour examen au laboratoire. Les résultats montrent un impact significatif de la sécheresse sur la santé des arbres ; il est caractérisé par une forte défoliation, une mortalité des arbres, manque de débourrement et formation des petites feuilles. L'analyse en composantes principales a permis de dégager 4 réponses adaptatives au climat défavorable. Ce travail met en évidence l'intérêt d'une approche multidisciplinaire pour diagnostiquer l'état des subéraies et souligne la nécessité de stratégies de gestion durable afin de préserver ces écosystèmes face aux changements globaux.

Mots-clés : *Chêne-liège, sécheresse, forêt de Hafir, architecture, réponse adaptative, gestion forestière*

Abstract: Impact of drought on cork oak health: the case of the Hafir forest (Tlemcen)

Cork oak (*Quercus suber* L.), is an emblematic species of Mediterranean forests; it faces increasing pressure linked to the effects of climate change. This study conducted in the Hafir forest (Tlemcen) aims to assess the impact of the recent drought on the health of cork oak stands through an integrated approach combining the tree architectural tool and climatic, pedological, water and health analyses. Field measurements were carried out on two stations totaling 89 representative trees to characterize their health status in October-February. It is supplemented by branch samples for laboratory examination. The results show a significant impact of drought on tree health; it is characterized by strong defoliation, tree mortality, lack of bud break and formation of small leaves. Principal component analysis identified four adaptive responses to the unfavorable climate. This work highlights the value of a multidisciplinary approach to assessing the condition of cork oak forests and underscores the need for sustainable management strategies to preserve these ecosystems in the face of global change.

Keywords: Cork oak, drought, Ahfir forest, architecture, adaptive response, forest management

تلخيص: تأثير الجفاف على الحالة الصحية للبلوط الفليني: حالة غابة أحفير (تلمسان)

يُعد البلوط الفليني من الأنواع الشجرية الرمزية للغابات المتوسطة، وهو يواجه ضغطاً متزايداً نتيجة للتغيرات المناخية المتسارعة. تهدف هذه الدراسة، التي أجريت في غابة أحفير (تلمسان)، إلى تقييم تأثير الجفاف الأخير الفليني، من خلال مقارنة ميدانية متكاملة تجمع بين التحليل المعماري. على الحالة الصحية لمجتمعات البلوط للأشجار والتحليلات المناخية والتربوية والمائية والصحي

تم تنفيذ القياسات على مستويين داخل الغابة، شملت 89 شجرة ممثلة للوضع العام، خلال الفترة الممتدة من أكتوبر إلى فبراير. كما تم أخذ عينات من الأغصان لفحصها في المختبر. أظهرت النتائج أن الجفاف أثر بشكل تساقطات ورقية كبيرة، وموت بعض الأشجار، وغياب التبرعم، وواضح على صحة الأشجار، حيث سُجّلت إضافة إلى تكون أوراق صغيرة الحجم

من تحديد أربع استجابات تكيفية مع المناخ غير الملائم. وتبرز هذه (ACP) مكن التحليل بالمركبات الأساسية الدراسة أهمية النهج المتعدد التخصصات لتشخيص حالة الغابات الفلينية، كما تؤكد على ضرورة اعتماد هذه النظم البيئية في ظل التغيرات المناخية العالمية. استراتيجيات تسيير مستدام من أجل الحفاظ على

الكلمات: البلوط الفليني، الجفاف، غابة حفير، الهندسة النباتية، الاستجابة التكيفية، التسيير الغابي المستدام
المفتاحية

Abréviations

APCOR: Association Portugaise du Liège
B.N.E.D.E.R: Bureau National des Etudes de Développement Rural
BSRF: Bulletin de la Station de Recherches Forestières
CEREMA: centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.
CFT: Conservation des Forêts de Tlemcen
CNIS: Centre National d'Information et de Statistiques
C.O.I.T.: Conservation d'Oran, Inspection de Tlemcen
CRPFC: centre Régional de la propriété Forestière de Corse
DGF: Direction générale des Forêts
D.S.F Direction de santé des Forêts
ERGR: Entreprise Régionale de Génie Rural
FAO Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
IOBC: Organisation Internationale de Contrôle Biologique
PNT: Parc National de Tlemcen,
ONS: Office National des Statistiques
RENECOFOR: (Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers
WWF: Fonds mondial pour la nature

Table des matières

Liste des figures	10
Liste des tableaux	14
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralité sur le Chêne-liège.....	4
1-Systématique et origine	5
2-Aire naturelle et répartition	5
2.1-Dans le monde:	5
2.2- En Algérie :	6
3.1-Dimenssion et longévité :	7
3.2-Bourgeons.....	8
3.3-Ramification	8
3.4-Feuillage.....	9
3.5-Enracinement	10
3.6-Houppier	10
4. Ecologie	11
4.1-Exigences climatiques	11
4.1.1-Précipitations.....	11
4.1.2- Températures	12
4.1.3-Humidité de l'air	12
4.2-Exigences pédologiques.....	13
5- Importance des forêts de chêne liège :.....	13
5.1. Importance économique du liège	14
5.1.1-Dans le monde	14
5.1.2-En Algérie	15
6- Causes de dégradation des subéraies Algériennes	16
Chapitre II:.....	18
Présentation du milieu d'étude: La forêt domaniale de Hafir.....	18
1-Milieu physique.....	19
1.1-Situation géographique.....	19
1.2-Orographie et topographie:	20
1.3- Géologie et pédologie.....	20
1.4-Climat	21
1.4.1-Origine des données.....	21
1.4.2-Précipitations.....	22
1.4.3-Températures.....	24
1.4.4-Autres facteurs climatiques	26

2- Milieu forestier.....	27
3-Importance économique	28
3.1-Epoque coloniale	29
3.2- Epoque post-indépendance	29
Chapitre III: Matériel et méthodes	31
1-Choix des stations d'étude	33
2-Choix des arbres.....	33
3-Données des stations d'étude.....	33
3.1-Characterisation physique des stations	34
3.1.1-Paramètres géographiques	34
3.1.2-Paramètres topographiques.....	34
3.1.3-Paramètres pédologiques.....	34
Selon le pourcentage d'éléments grossiers visibles, nous distinguons trois seuils qualitatifs d'effets sur le sol (Omany and Pasternak, 2005; Schoeneberger et al., 2012; NRCS, 2024).....	37
3.1.4-Paramètres climatiques:	38
3.2-Characterisation forestière des stations	38
3.2.1-Densité du peuplement (Dp).....	38
3.2.2-Structure du peuplement.....	39
3.2.3-Relevés végétatifs et recouvrement du sous-bois	39
4-Données des arbres	39
4.1-Relevés dendrométriques.....	39
4.1.1-Circonférence sur écorce (C)	40
4.1.2-Hauteur totale (Ht)	40
4.2-Relevés d'exploitation.....	41
4.2.1-Epaisseur du liège	41
4.2.2-Hauteur d'écorçage et coefficient d'écorçage	41
5-Relevés sanitaires des arbres.....	42
5.1-Méthode d'observation et d'examen sanitaire des arbres.....	42
5.1.1-Examen de la cime (Houppier).....	43
5.1.2-Examen du tronc	48
5.1.3-Prélèvement et Examen des rameaux:.....	49
5.2-Méthode d'observation de suivi de l'état sanitaire des arbres	54
6-Traitements des données	55
Chapitre IV: Résultats.....	56
1.1-Characteristiques physiques.....	57
1.1.1-Paramètres géographiques et topographiques.....	57

1.1.2-Paramètres pédologiques.....	58
1.1.3-Paramètres climatiques:.....	61
1.2-Caractérisation forestière.....	66
1.2.1-Densité et structure des peuplements	66
1.2.2-Végétation et recouvrement du sous-bois.....	67
1.2.3-Paramètres dendrométriques	68
1.3-Paramètres d'exploitation.....	70
1.3.1-Epaisseur du liège	70
1.3.2-Coefficient d'écorçage	71
2- Caractérisation sanitaire des arbres et des stations	71
2.1-Déficit foliaire ou perte foliaire (DF):	71
2.2-Indice de santé (IS):.....	72
2.3-Autres paramètres sanitaires.....	73
2.3.1-Mortalité des branches (MB) et des rameaux (MR).....	73
2.3.2-Transparence:.....	73
2.3.3-Perte de ramification avant période de stress climatique:.....	74
2.3.4-paramètres des rameaux.....	75
2.3.5- Evolution de la ramification.....	76
2.3.6-Concurrence:	77
2.3.7-Examen du tronc:.....	78
2.3.7-Caractéristiques des cas de mortalités	78
2.4-Analyse des échantillons.....	80
2.4.1-Rameaux nus ou non feuillés	80
2.4.2- Rameaux feuillés	82
3-Reprise végétative ou feuillaison des arbres	84
4-Analyse multivariée des variables.....	85
4.1-Les paramètres dendrométriques et sanitaires.....	85
4.2-Analyse des échantillons des rameaux.....	88
5-Discussion.....	92
Conclusion générale et perspectives.....	96
Références bibliographiques	97

Liste des figures

CHAPITRE I	
Figure 1	Aire de répartition du chêne liège dans le monde
Figure 2	Aire de répartition du chêne-liège en Algérie
Figure 3	Evolution de la superficie productive de chêne-liège en Algérie
Figure 4	Vue générale d'un chêne liège en peuplement et isolé (gauche : Espagne ; milieu : Hafir-Algérie et droite : Mamora-Maroc)
Figure 5	Bourgeon axillaire (a) et sa disposition sur les rameaux du chêne liège (Photos originales, Février 2024)
Figure 6	Quelques jeunes rameaux courts de chêne liège montrant la pubescence, la couleur vert-gris des feuilles et la concavité du limbe (au milieu photo originale, autres photos prises de l'internet : Web2)
Figure 7	Feuillage du chêne liège à Hafir en hiver (Photos Bouhraoua, 2014-2015).
Figure 8	Système d'enracinement du chêne liège (pivotant et latéral) a (Photo originale Roula SE, Jijel, 22 octobre 2022), b (internet) et c (Photo originale, Hafir 5 mai 2025)
Figure 9	Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction des précipitations (Yassad, 2000 in Sauvage, 1961).
Figure 10	Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction de la température (Yassad, 2000).
Figure 11	Comportement du chêne liège par rapport aux caractères édaphiques (Yassad, 2000)
Figure 12	Liège de reproduction sur arbre (gauche), planches de liège de reproduction en pile (milieu) et bouchons naturels (droite) (Photos, Bouhraoua)
Figure 13	Proportion des recettes des exportations mondiales du liège en 2018 (APCOR, 2019)
Figure 14	Evolution annuelle de la production du liège en Algérie durant la période 1965-2020 (DGF, 2021)
Figure 15	Evolution des recettes des exportations de l'Industrie de transformation du liège entre 2000 et 2018 (ONS et CNIS, 2019).
CHAPITRE II	
Figure 16	Situation géographique de la forêt domaniale de Hafir et de ses cantons
Figure 17	Carte géologique du massif Hafir-Zariffet (PNT, 2014).
Figure 18	Carte pédologique du de massif Hafir-Zariffet (PNT, 2014).
Figure 19	Répartition annuelle des pluies dans la forêt de Hafir durant 2 périodes de référence (Histogrammes en rouge indiquent les tranches pluviométriques déficitaires)

Figure 20	Vue générale de la subéraie saine de Hafir (Photos originales, Bouhraoua; a (10 déc. 2014), b (21 jui. 2010), c (22 avr. 2013) et d (14 sept. 2012)
Figure 21	Suberaie de Hafir dégradée en maquis clair (Photos Bouhraoua : canton Byadha, Sabra,7 mai 2012)
Figure 22	Production du liège (quintaux) fournie par la subéraie de Hafir après l'indépendance (trait plein : tendance de la courbe).
Figure 23	Liège de Hafir en pile (a : tronc récolté en été 2013, b : pile de liège récolté en 2013 et c : pile de liège récolté en 2017) (photos, Bouhraoua)
CHAPITRE III	
Figure 24	Vue générale du peuplement du chêne liège à Hafir (photos octobre 2024)
Figure 25	Circonférence sur liège et sous liège dans une section transversale d'une tige
Figure 26	Protocole de notation de déficit foliaire d'un chêne liège (Naggar, 2021).
Figure 27	Différentes classes de transparence du houppier : a (nulle), b(faible), c (moyenne) , d (forte) et e (très forte) (Photos originales, février 2025)
Figure 28	Réduction de la ramification fine dans trois houppiers de chênes lièges (CRPFC, 2014)
Figure 29	Différents états de tronc du chêne liège : a (sain), b (sciure xylophage au collet), c (légèrement crevas), d (présence de charbon de la mère) et e (sévérement crevassé) (Photos originales, octobre 2024)
Figure 30	Observation des racines superficielles des arbres : gauche (présence de racines) et droite (pas de racines) (photos originales, février 2025)
Figure 31	Méthode de prélèvement des échantillons de rameaux des arbres (photos originales)
Figure 32	Différents échantillons de rameaux prélevés des arbres : a-b (rameaux nus non feuillés), c-d(rameaux feuillés) (Photos originales)
Figure 33	Etat des bourgeons en début débourrement : A (bourgeons terminaux avec les yeux latéraux) et B (bourgeons axillaires) (Photos originales, loupe binoculaire février 2025)
Figure 34	Vue générale sur les rameaux feuillés (pousses formées en printemps 2024 : photos originales)
Figure 35	Catégories de taille des feuilles (photos originales)
CHAPITRE IV	
Figure 36	Localisation géographique des deux stations d'étude S1 et S2 dans la forêt domaniale de Hafir sur Google Mapp
Figure 37	Vue générale des affleurements rocheux et pierreux dans la station 1 (A) et station 2 (B) (Photos originales, avril 2025)
Figure 38	Répartition annuelle des pluies entre 2019 et 2024 à Ain Ghoraba

Figure 39	Courbes des températures mensuelles moyenne minimale (m°C) , maximale (M°C) et moyenne (T°C) enregistrées à Ain Ghoraba entre 2020 et 2024
Figure 40	Conditions climatiques mensuelles (m°C, M°C et Pmm) enregistrées dans la forêt de Hafir (chiffres en rouge indiquent les bilans comparatifs négatifs, vert : positifs).
Figure 41	Histogramme de distribution des arbres par type de bois dans les deux stations d'étude
Figure 42	Histogramme de distribution des arbres par classes de diamètre dans les deux station d'étude
Figure 43	Distribution des arbres par classes de hauteurs totales
Figure 44	Carte de récolte du liège de Hafir (Dahmani, Com.pers.) (années en rouge : dates de dernière exploitation du liège)
Figure 45	Distribution des épaisseurs selon le type de liège des 2 stations
Figure 46	Histogramme de distribution des arbres par classes de déficit foliaire dans les deux stations d'étude
Figure 47	Vue de l'état sanitaire général des peuplements de la station 1 (A) et station 2 (B) (Photos originales, octobre 2024)
Figure 48	Histogramme de distribution des arbres par classes de mortalité des branches et rameaux dans les deux stations d'étude
Figure 49	Histogramme de distribution des arbres par classe de transparence dans les deux station d'étude
Figure 50	Classes de transparence des cimes des arbres (Photos originales, octobre 2024) 1-2 (visibilité partielle du squelette), 3-4 (visibilité entière du squelette)
Figure 51	Histogramme de distribution des arbres par classes de perte de ramification dans les deux station d'étude
Figure 52	Histogramme de distribution des arbres par classes de combinaison (rameaux bourgeons- rameaux feuillés) dans les deux stations d'étude
Figure 53	Vue générale de quelques houppiers d'arbres montrant les proportions de rameaux nus par rapport aux rameaux feuillés (Exemple : RB2-RF2 : 50% de rameaux nus et 50% de rameaux feuillés) (Photos originales)
Figure 54	Histogramme de distribution des arbres par classes d'échancrures et fenêtres dans les deux stations d'étude
Figure 55	Histogramme de distribution des arbres par classes de concurrence dans les deux station d'étude
Figure 56	Vue générale de la mortalité des arbres (dessèchement complet du feuillage) avec leur catégorie sanitaire (DF : Déficit foliaire) (Photos originales, Octobre 2024)
Figure 57	Répartition des arbres selon l'importance des bourgeons non débouffés en printemps 2024

Figure 58	Distribution des arbres selon l'importance des bourgeons restés en début débourrement
Figure 59.	Distribution des proportions d'arbres par types de rameaux feuillés
Figure 60	Relation entre la longueur des feuilles (L : cm) et la surface foliaire (SF : cm ²) (n=96)
Figure 61	Histogramme de distribution des arbres (%) par classes de grandeur des feuilles dans les deux station d'étude
Figure 62	Histogramme de distribution des arbres par classes de reprise végétative (RV : feuillaison) des arbres en mai 2025 des deux station d'étude
Figure 63	Représentation dans le plan factoriel (A ₁ x A ₂) des caractéristiques dendrométriques et sanitaires des arbres des deux stations
Figure 64	Classification hiérarchique ascendante des arbres en groupes homogènes d'arbres selon leur situation sanitaire
Figure 65	Représentation dans le plan factoriel (A ₁ x A ₂) des caractéristiques sanitaires et morphométriques des échantillons rameaux d'arbres de la station 1
Figure 66	Classification hiérarchique ascendante (CHA) des arbres en groupes homogènes selon l'examen des rameaux

Liste des tableaux

Tableau 1: Superficie estimée des forêts de chêne-liège dans le monde (APCOR, 2019)

Tableau 2: Localisation géographique de la forêt domaniale de Hafir (Tlemcen)

Tableau 3: Coordonnées des stations météorologiques de référence

Tableau 4: Eléments statistiques sur les précipitations annuelles à Hafir des 2 périodes

Tableau 5: Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) pendant deux périodes à Hafir

Tableau 6: Régime saisonnier des précipitations au niveau de la forêt de Hafir

Tableau 7: Températures minimales mensuelles (m°C) durant deux périodes de référence à Hafir

Tableau 8: Maximums moyens mensuels (M°C) dans 2 périodes de référence à Hafir

Tableau 9: Températures moyennes mensuelle et annuelle « T°C » durant les deux périodes de références dans la forêt de Hafir

Tableau 10: Humidité relative de l'air moyenne mensuelle (%)

Tableau 11: Principaux feux de forêt enregistrés à Hafir après l'indépendance

Tableau 12: Différentes classes de l'épaisseur du liège (Pereira, 2007)

Tableau 13: Classes de notation de déficits foliaires des arbres

Tableau 14: Autres paramètres sanitaires et architecturaux pris en compte

Tableau 15: Différents descripteurs utilisés dans l'examen du tronc

Tableau 16: Différentes classes d'arbres selon l'état de débourrement des bourgeons des rameaux nus: Cas des bourgeons non débourrés (ND) et leur signification correspondante

Tableau 17: Différentes classes d'arbres selon l'état de débourrement des bourgeons: cas des bourgeons restés en état de début débourrement (DD) et leur signification

Tableau 18: Différentes classes d'arbres selon l'importance des bourgeons débourrés (Bd) et signification des rameaux feuillés

Tableau 19: Différentes catégories de taille des feuilles

Tableau 20: Classes de Feuillaison (Fs) des arbres en mai 2025

Tableau 21: Principales caractéristiques géographiques et topographiques des sites d'étude

Tableau 22: Résultats de tests tarière et analyse granulométrique des 2 stations

Tableau 23 : Seuil significatif d'effet des éléments grossiers et Réserve utile en eau (RU) des sols des deux stations

Tableau 24: Résultats de mesures de quelques paramètres du sol

Tableau 25: Relevés pluviométriques de la période 2019-2024 à Ain Ghoraba

Tableau 26: Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) pendant les 6 années à Hafir

Tableau 27: Régime saisonnier des précipitations au niveau de la forêt de Hafir

Tableau 28: Caractéristiques climatiques entre septembre 2024 et mai 2025 à Ain Ghoraba

Tableau 29: Caractéristiques dendrométriques, forestières et d'exploitation des deux peuplements de chêne liège

Tableau 30 : Inventaire et recouvrement de la végétation accompagnatrice du chêne liège dans les deux stations

Tableau 31: Caractéristiques des arbres morts dans les deux stations

Tableau 32: Données statistiques des mesures des feuilles du chêne liège (n=1685)

Introduction générale

Le changement climatique constitue aujourd'hui l'un des principaux défis environnementaux à l'échelle mondiale. L'augmentation des températures moyennes, la modification des régimes de précipitations et la multiplication des épisodes extrêmes (sécheresses, vagues de chaleur) affectent profondément les écosystèmes naturels (IPCC, 2021). Ces changements portent considérablement sur la croissance et la survie des espèces végétales, notamment les forêts méditerranéennes. Celles-ci comptent parmi les écosystèmes forestiers les plus fragiles en raison du climat de la région naturellement soumis à de fortes variations hydriques.

Donc, dans les régions méditerranéennes, reconnues depuis longtemps pour leur sensibilité climatique, ces changements se manifestent par une aridification croissante, une diminution de la disponibilité en eau et une forte variabilité interannuelle des précipitations (Lionello et al., 2012 ; Cramer et al., 2018).

Parmi les écosystèmes forestiers les plus concernés figurent les **subéraies**, formations dominées par le chêne-liège (*Quercus suber* L.). C'est une espèce endémique du pourtour méditerranéen, suscite un intérêt particulier en raison de son importance écologique, économique et culturelle (WWF, 2008).

Grâce à son écorce épaisse et isolante, et à son système racinaire profond, le chêne-liège est relativement bien adapté aux contraintes hydriques. Cependant, les pressions anthropiques (surexploitation, récoltes excessives et incendies de forêt) et aléas climatiques récentes fragilisent son équilibre écologique, provoquant des phénomènes de dépérissement, une diminution de la vigueur et une altération de la productivité (Pausas et al., 2009 ; Aronson et al., 2009 ; Natividade, 1956).

En Algérie, les subéraies occupaient historiquement une superficie importante dans les zones humides et subhumides du pays. Aujourd'hui, elles sont en régression sous l'effet combiné du changement climatique et de la pression humaine (Letreuch-Belarouci, 2002 ; Mecheri et al., 2020). Cependant, la vulnérabilité du chêne-liège face au stress hydrique représente une gravité majeure. En effet, la sécheresse affecte directement sa croissance, sa survie et surtout sa régénération naturelle, compromettant ainsi la pérennité des peuplements forestiers dans les semi-arides. Plusieurs études ont montré que cette espèce développe des mécanismes d'adaptation physiologique et morphologique pour faire face aux conditions de déficit hydrique, notamment par la régulation de l'ouverture stomatique, la modification de la structure racinaire et la capacité à limiter les pertes en eau (David et al., 2007).

La forêt de Hafir, située dans le massif forestier de la wilaya de Tlemcen, est soumise à un climat défavorable, marqué par une saison sèche prolongée, des précipitations irrégulières et déficitaires, et des températures annuelles et estivales élevées, ce qui en fait un milieu idéal pour étudier les réponses écophysologiques du chêne-liège aux

stress environnementaux et les mécanismes d'adaptation du chêne-liège. Dans ce contexte, cette étude permettra de mieux comprendre sa résilience face au stress hydrique et à identifier les stratégies de gestion durable des forêts méditerranéennes. Ainsi, cette recherche vise à analyser le comportement du chêne-liège face à la sécheresse dans cette forêt, en combinant des approches climatologiques, physiologiques et pédologiques.

Dans ce cadre, il devient crucial de mieux comprendre les **relations entre les facteurs climatiques, la dynamique hydrique du sol et le comportement physiologique et structurel du chêne-liège**. Le fonctionnement hydrique de ces peuplements dépend étroitement de la réserve utile du sol (RU), de la profondeur et de la texture de l'horizon racinaire, ainsi que de la variabilité des précipitations saisonnières (Vallejo et al., 2012 ; Costa et al., 2017). Le suivi de l'humidité du sol, associé aux mesures sylvicoles (croissance, état foliaire, reprise végétative), permet d'évaluer le niveau de stress subi par les arbres et d'orienter les choix de gestion forestière.

Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche. Il vise à :

- Analyser les tendances climatiques récentes (2019–2025) dans la région de Tlemcen, en mettant l'accent sur les précipitations, les températures et les jours de pluie ;
- Évaluer l'humidité du sol à différentes périodes et profondeurs, en couplant des mesures gravimétriques et électroniques (humidimètre) ;
- Décrire les caractéristiques pédologiques des placettes étudiées (texture, pH, température du sol) ;
- Étudier la structure, la vitalité et la réponse physiologique du chêne-liège à travers une série de paramètres sylvicoles et dendrométrique (diamètre, hauteur, l'épaisseur de liège, coefficient d'écorçage) ainsi (la transparence de houppier, état des bourgeons, feuilles, reprise végétatif, etc.) ;
- Identifier, à l'aide d'une analyse en composantes principales (ACP), les groupes d'individus selon leur comportement face au stress hydrique.

L'objectif final est de proposer un **diagnostic intégré** de l'état de la subéraie de Hafir, et d'évaluer l'ampleur des effets du stress hydrique sur cette espèce pour mieux comprendre les mécanismes d'adaptation du chêne-liège les réponses adaptatives qu'elle met en place pour survivre dans un environnement contraignant, afin et de formuler des **pistes de gestion durable** face à ce phénomène.

Le document est structuré en quatre chapitre. Le premier chapitre présente des généralités sur le chêne liège dans le monde et en Algérie; ses caractères botaniques et forestiers, son écologie (sole climat), son importance économique et les principales causes de la dégradation forestière et économique en Algérie.

Le second chapitre est réservé à l'étude du chêne liège dans la forêt domaniale de Hafir. Nous présentons les conditions édaphiques et climatiques dans lesquelles évoluent ses

peuplements. Nous présentons aussi la situation actuelle de la subéraie par rapport à la subéraie originelle tant sur le forestier que sur le plan production du liège.

Le troisième chapitre expose le matériel et la méthodologie employée pour décrire les stations retenues sur le plan sylvicole, forestier, édaphique et climatique. Dans ce chapitre, nous présentons une description synthétique du climat de ces cinq dernières années. Les différentes méthodes utiliser pour évaluer la réponse des arbres à l'épisode de sécheresse 'à partir des paramètres morphométriques et architecturaux des arbres.

Le dernier chapitre présente les résultats et la discussion sur l'impact de la sécheresse sur les arbres et les peuplements en essayant d'argumenter ces adaptations par la bibliographie.

Enfin, le document se termine par des conclusions et perspectives de gestion de la forêt afin d'atténuer les effets futurs de la sécheresse.

Chapitre I: Généralité sur le Chêne-liège

1-Systématique et origine

Le chêne liège, (*Quercus suber* L.), est un arbre endémique du bassin méditerranéen occidental où il se rencontre dans sept pays (Quézel & Médail, 2003).

Il fait partie de l'ordre des Fagales et la famille des Fagacées. Cette dernière compte environ 500 espèces du genre *Quercus* selon WARBURG (1933 in NATIVIDADE, 1956).

2-Aire naturelle et répartition

2.1-Dans le monde:

Le chêne liège est un arbre qui occupe une aire naturelle relativement limitée. Sa répartition géographique se concentre principalement dans l'ouest de la méditerranée, tout en s'étendant également sur certains cotés atlantiques. Il se rencontre dans 4 pays d'Europe du sud, notamment le Portugal, l'Espagne, l'Italie et la France, et 3 pays nord-Africains incluant l'Algérie, le Maroc et la Tunisie (Boudy, 1950; Quezel et Santa, 1962) (Fig. 1). La superficie totale qu'il couvre est estimée à environ 2,7 million d'hectares (APOR, 2019).



Figure 1: Aire de répartition du chêne liège dans le monde (Shackleton et al., 2015).

Le tableau 1 suivant consigne la superficie de chêne liège dans chaque pays selon l'association Portugaise du Liège (APCOR, 2019).

Tableau 1 : Superficie estimée des forêts de chêne-liège dans le monde (APCOR, 2019) *

Pays	Superficie (ha)	% de la superficie mondiale
Portugal	736.775	34
Espagne	575.248	27
Algérie	230.000	11
Maroc	383.120	18
Italie	65.228	3
Tunisie	85.771	4
France	64.228	3
Total	2.139.942	100

*Sources: Portugal : IFN6, 2013 ; Espanha : MARM, 2007 ; Itália : FAO, 2005 ; França : IM Liège, 2005 ; Marrocos : HCEF Maroc, 2011 ; Argélia : EFI, 2009 ; Tunísia : Ben Jamaa, 2011

2.2- En Algérie :

En Algérie, les forêts de chêne liège sont localisées dans 23 wilayas (Fig.2). Mais les massifs à chêne liège (grandes superficies) s'étendent le long d'une bande côtière sur des terrains siliceux faisant partie du littoral oriental. Les plus vastes sont localisés à l'est du pays où ils forment un massif continu de plus de 130 000 ha, allant du Bejaia jusqu'aux frontières tunisiennes. Dans cette bande on le trouve surtout dans les wilayas de Bejaia, Jijel, Skikda, Annaba et El Taref.

D'autres peuplements moins compacts sont localisés dans le centre (Chlef, Tipaza, Boumerdes) et quelques îlots bien isolés dans le littoral occidental (Dehane, 2012).

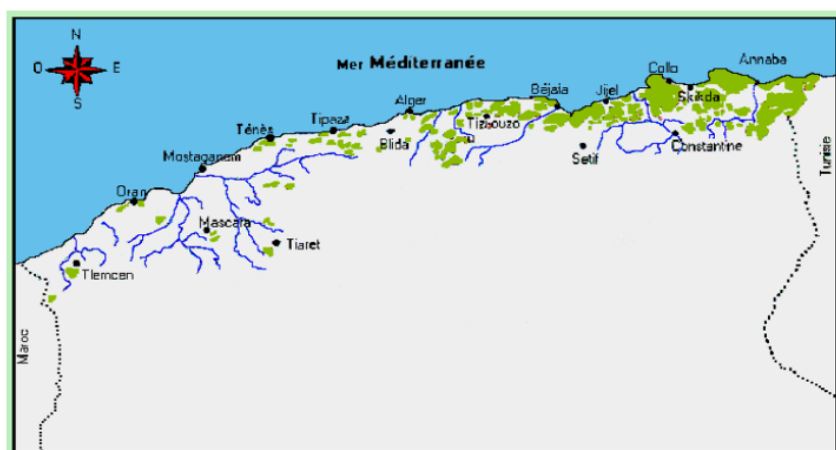


Figure 2 : Aire de répartition du chêne-liège en Algérie (Zeraria, 1981 modifiée par Dehane, (2006)

Dans l'Oranie, le chêne liège se trouve dans 7 wilayas avec une superficie totale de 8347 ha (Lamey, 1893). D'après cet auteur, la plus grande superficie est localisée dans la wilaya de Tlemcen avec 4881 ha.

En Algérie, la superficie productive du chêne liège a connu une régression alarmante au fil du temps. La superficie originelle varie entre 460 000 ha (Lamey, 1893) et 440 000 ha selon le premier inventaire 1933-35 (Saccardy, 1937 ; Boudy, 1950 ; Natividade, 1956). Déjà au début des années 80, le premier inventaire forestier (IFN) post-indépendance de 1983-84, a signalé une superficie productive de près de 230 000 ha (Zine, 1993). Ceci représente une perte d'environ 48% (Fig.3).

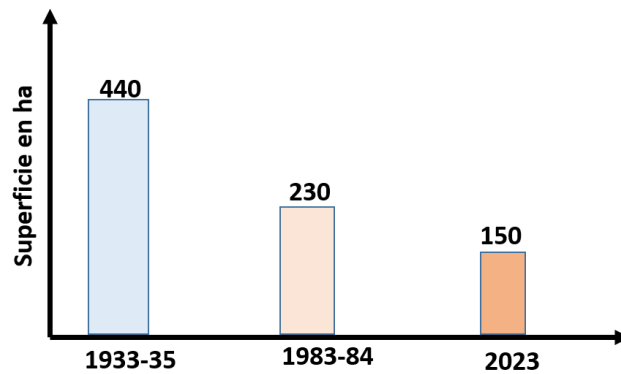


Figure 3 : Evolution de la superficie productive de chêne-liège en Algérie

Les dernières estimations officielles de la Direction Générale des Forêts de 2023 font état d'une superficie productive de 150 0 000 ha soit un peu du tiers de la superficie totale (33%) (Bouhraoua com. Pers.). Le reste de la superficie est transformé en maquis dégradé.

3-Caractères botaniques et forestiers

Le chêne liège est un arbre facilement reconnaissable grâce à son écorce épaisse et crevassée, constituée de liège. Cette écorce est composée de plusieurs couches superposées de cellules mortes remplies de subérine, une substance peu dégradable ce qui la rend imperméable, élastique et résistante aux agressions extérieures (Pereira, 2007).

3.1-Dimensions et longévité : Le chêne-liège est un arbre d'assez grande taille ; il peut atteindre facilement une hauteur de 10 à 14m voire 20 m en peuplement dense. La circonférence du tronc atteint en général 70 cm entre 30 et 40 ans selon les conditions de végétation. Dans les vieux peuplements, certains arbres peuvent atteindre jusqu'à 4 m de circonférence (Fig.4). Il a une grande longévité pouvant vivre jusqu'à 200 ans (Saccardy, 1938 ; Natividade, 1956, Yassad, 2000).

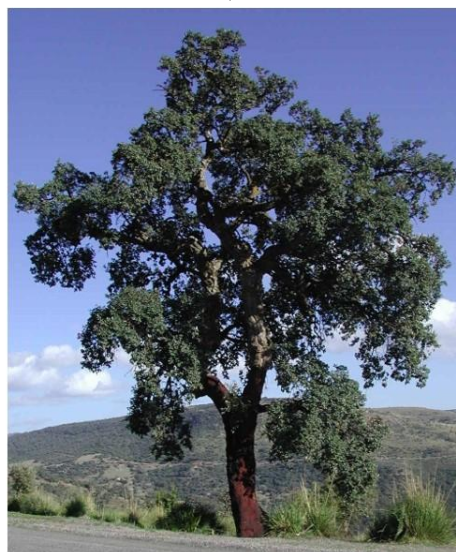
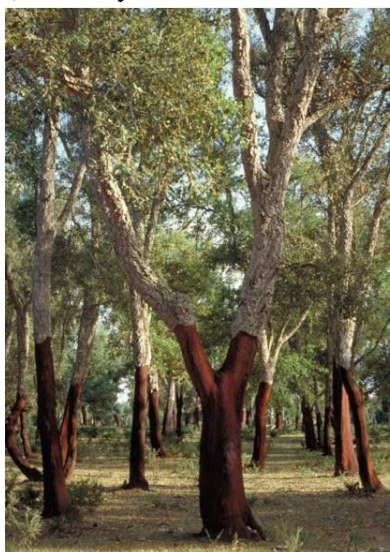


Figure 4: Vue générale d'un chêne liège en peuplement et isolé (gauche: Espagne ; milieu : Hafir-Algérie et droite : Mamora-Maroc, Photos Bouhraoua)

3.2-Bourgeons

Les bourgeons du chêne liège sont d'une couleur brun grisâtre ; ils sont ovoïdes ou arrondis et protégés par des bractées tomenteuses (Fig. 5a, b). Ils sont plus gros et développés dans les parties terminales (Yassad, 2000). Par contre, dans les parties latérales des rameaux et à l'aisselles des feuilles, les bourgeons dits axillaires sont souvent moins développés

La disposition des bourgeons latéraux sur les rameaux n'est pas quelconque. Le plus souvent il y a qu'une feuille insérée au niveau d'un nœud : les feuilles et les bourgeons sont dits alternes (Huchon, 1955). On remarque sur le rameau que les bourgeons sont alignés sur un grand nombre de génératrices ou lignes (souvent trois) ce qui permet de distinguer les *bourgeons alternes à disposition spiralée* (Fig. 5b, c).

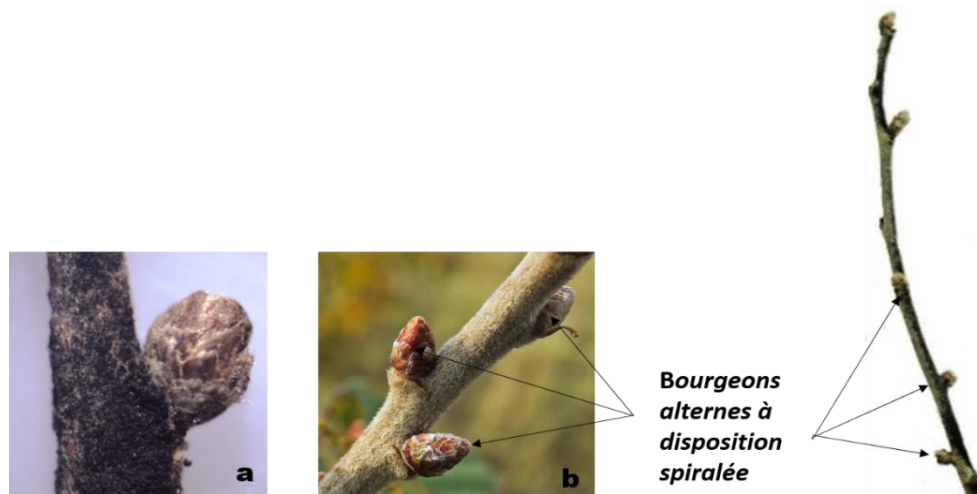


Figure 5: Bourgeon axillaire (a) et sa disposition sur les rameaux du chêne liège (Photos originales, Février 2024)

Le prolongement des rameaux ne se fait pas toujours par le bourgeon de l'extrémité, car celui-ci meurt et est remplacé par les yeux latéraux les plus proches. De là, provient la sinuosité caractéristique de la ramification (Natividade, 1956).

3.3-Ramification

Au printemps, les bourgeons bien nourris par la sève, s'ouvrent et laissent apparaître une jeune pousse avec de nouvelles feuilles, d'abord fixées sur une tige fine et fragile qui s'allongera pendant les quelques semaines qui suivent son apparition. Les jeunes rameaux sont sinueux et souvent pubescents ou tomenteux ; d'une couleur verte ou blanchâtre (Fig.6). Par la suite et avec le temps, ils deviennent gris-clair à gris et lisses (Saccardy, 1938; Natividade, 1956, Jacamon, 1987). Le liège apparaît sur ceux de 3 ou 4 années en forme d'une couche brun-rosée qui se crevasse avec l'apparition du liège (Saccardy, 1938). Les arbres forment souvent de courtes pousses entre 7 à 15 cm de

longueur. Les rameaux sont généralement de petite taille et peuvent être à première vue peu visibles sur les arbres plus âgés.

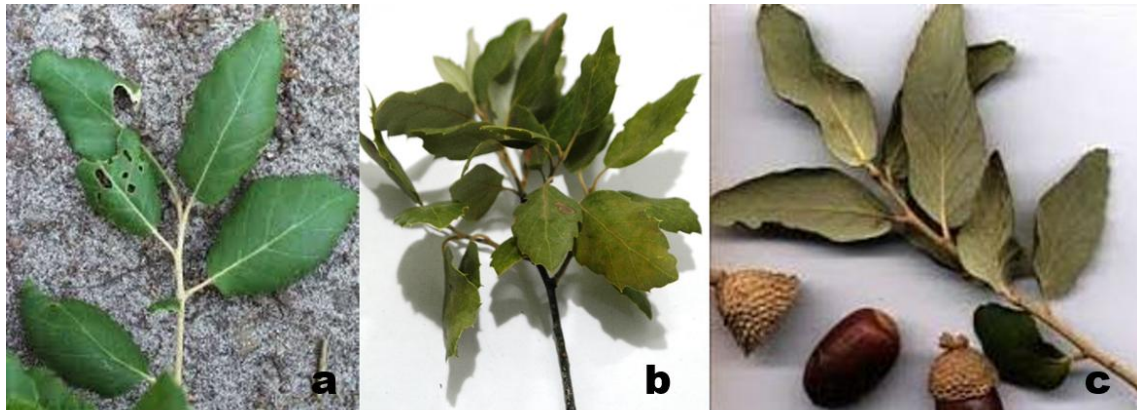


Figure 6 : Quelques jeunes rameaux courts de chêne liège montrant la pubescence, la couleur vert-gris des feuilles et la concavité du limbe (au milieu photo originale, autres photos prises de l'internet : Web2)

3.4-Feuillage

Les feuilles du chêne-liège sont coriaces, alternes et persistantes ; elles peuvent rester plus d'une année entière sur l'arbre. Elles tombent généralement au cours de la 2^{ème} année juste après la formation des jeunes feuilles. Elles peuvent rester rarement en 3^{ème} année. Ceci confère à l'arbre le caractère *sclérophylle sempervirent* (Saccardy, 1938; Natividade, 1956 ; Seigue, 1985). L'arbre reste donc couvert de feuillage vert toute l'année (Fig.7).

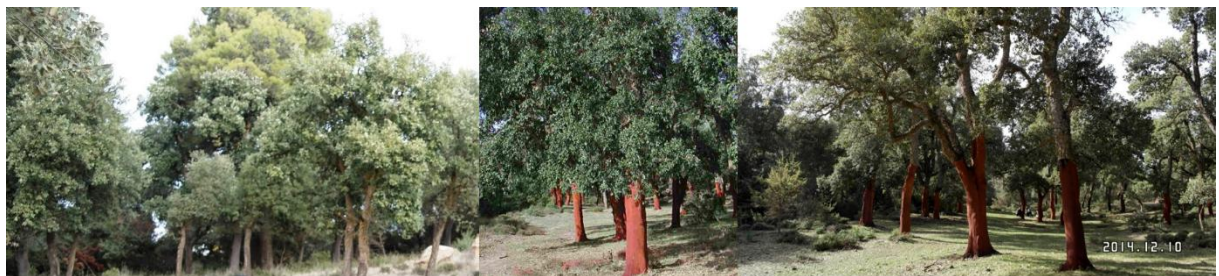


Figure 7: Feuillage du chêne liège à Hafir en hiver (Photos Bouhraoua, 2014-2015).

La forme et les dimensions des feuilles sont très variables d'un arbre à un autre. Sur un même arbre, il y a un polymorphisme foliaire bien caractérisé. Il varie selon l'âge des feuilles et leur emplacement sur la pousse. Elles mesurent entre 3 et 7 cm de longueur selon l'arbre. Elles sont coriaces, possédant un limbe ovale, lancéolé ou oblongue avec des marges légèrement dentées (Saccardy, 1938).

La face supérieure est vert assez foncé et luisante ou glabre à poils épars plus dense vers la base de la nervure principale (Fig.6a, b). Tandis la face inférieure, souvent concave, est plus claire ; elle est pubescente présentant un épais revêtement de feutrage blanchâtre (Natividade, 1956 ; Aime, 1976) (Fig.6c).

Comme tous les sclérophylles, l'épiderme des feuilles de chêne liège est recouvert d'une épaisse couche de cuticule, d'un réseau serré de nervures secondaires à la face inférieure (5 à 7 de chaque côté) et d'un tissu palissade très développé (Saccardy, 1938; Natividade, 1956).

3.5-Enracinement

Le chêne liège dispose un enracinement robuste ; il est constitué de fortes et longues racines qui fixent l'arbre solidement même dans les sols rocheux (Saccardy, 1938). Dans les sols légers et perméables, il forme un pivot long et profond d'où partent de vigoureuses ramifications latérales évoluant horizontalement d'une distance de 22 à 32cm qui est caractéristiques des plantes xérophiles (Lamey, 1894; Natividade, 1956 ; Seigue, 1985) (Fig.8). Cet enracinement pivotant atteint plusieurs mètres de profondeur (Boudy, 1950). Cette disposition permet aux arbres d'utiliser les réserves alimentaires (eau et sels minéraux) superficielles et profondes.



Figure 8 : Système d'enracinement du chêne liège (pivotant et latéral) a (Photo originale Roula SE, Jijel, 22 octobre 2022), b (internet) et c (Photo originale, Hafir 5 mai 2025)

3.6-Houppier

Le houppier du chêne liège est porté par un tronc relativement court et trapu. La tige principale est tortueuse ; elle se ramifie dès la base et sa ramification est peu serrée. Il part du tronc, de grosses branches étalées que dressées (Yassad, 2000).

La cime est généralement irrégulière. Lorsqu'elle pousse dans un peuplement clair, elle est arrondie et large ; mais elle devient fusiforme lorsqu'elle pousse dans un peuplement dense ou chez les jeunes sujets (Fig.4). Elle est étalée chez les sujets isolés. Le chêne liège possède un couvert donc assez léger qui explique l'abondance du sous-bois (Saccardy, 1938, Natividade, 1956).

4. Ecologie

Le chêne-liège est considéré comme l'une des essences forestières dont l'aire naturelle est inextensible et étroitement limitée au bassin méditerranéen occidental Boudy (1950). L'espèce a des exigences écologiques relativement strictes tout en présentant une certaine rusticité qui lui permet de survivre dans des conditions du milieu peu favorables (Boudy, 1950 et Natividade, 1956).

4.1-Exigences climatiques

4.1.1-Précipitations

Le chêne liège requiert une remarquable plasticité à l'égard de la pluviométrie annuelle. Il tolère une grande variation de précipitations comprise entre 440 et 2000mm (Loup, 1962, Yassad, 2000) (Fig.9). Si ces exigences varient dans cette tranche, ceci s'explique en partie par le régime des pluies qui caractérise le climat méditerranéen. En effet, en littoral, le maximum est enregistré en automne-hiver alors qu'en montagne, elle s'observe en hiver- printemps (Yassad, 2000).

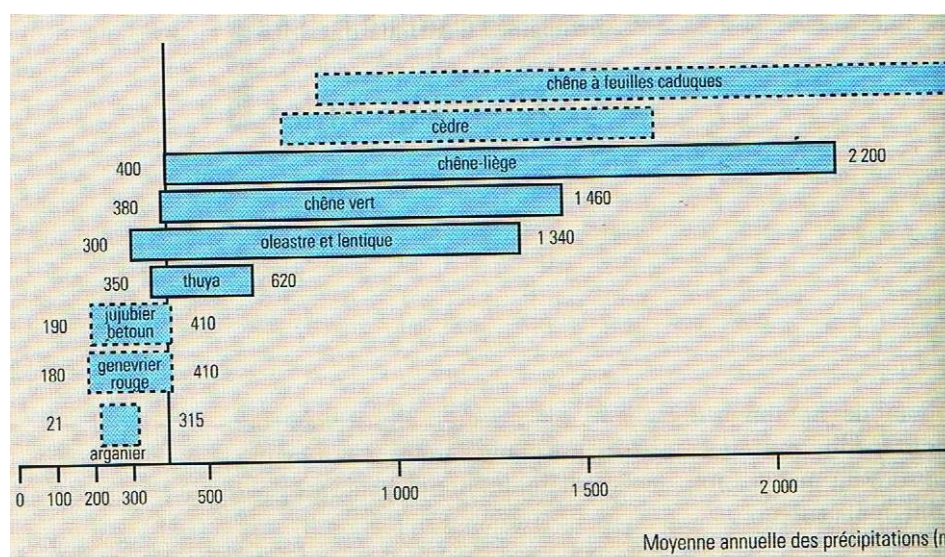


Figure 9: Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction des précipitations (Yassad, 2000 in Sauvage, 1961).

Ainsi, une tranche pluviométrique annuelle comprise entre 600 et 1200mm assure une bonne croissance des arbres. Néanmoins, cette croissance peut être ralentie et la production du liège peut être diminuée dans les régions à faibles pluies (minimum compris entre 600 et 400mm). Lorsque la pluviométrie descend au-delà de 400mm, l'arbre peut toutefois décliner (Boudy, 1950; Natividade, 1956, Vignes, 1990). Mais l'arbre peut supporter cette hauteur faible de pluies que dans les régions à forte humidité relative de l'air (façades atlantique ou littorale) (Loup, 1962).

4.1.2- Températures

Le chêne liège est une espèce mésotherme qui nécessite une température moyenne annuelle douce avec un optimum situé entre 13°C et 19°C (Yassad, 2000). Il est cependant relativement thermophile.

En effet, la moyenne annuelle des maximums du mois le plus chaud oscille généralement entre 22 et 27°C (Fig.10).

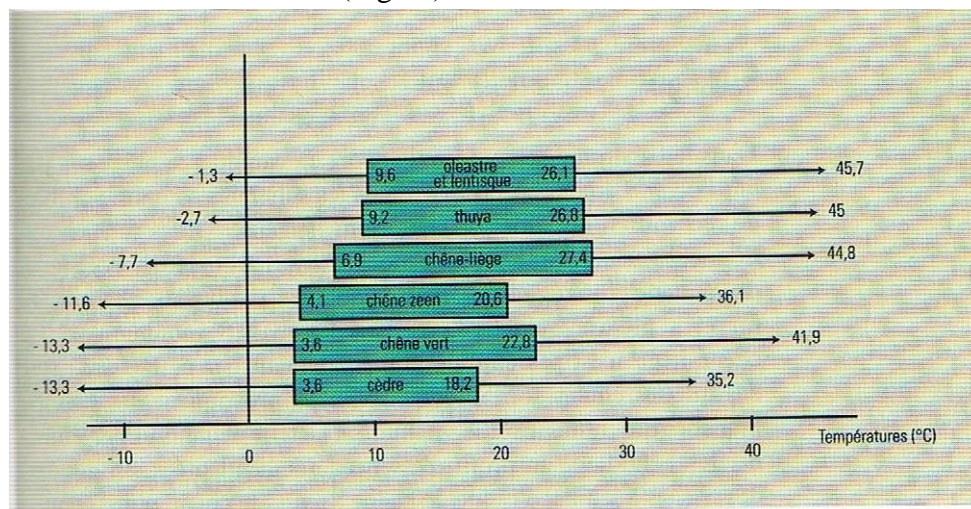


Figure 10: Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction de la température (Yassad, 2000).

L'arbre peut supporter de très fortes chaleurs occasionnelles de quelques jours (35 à 40°C). Les températures maximales extrêmes du mois le plus chaud sont observées à faible altitude (Quezel, 2000 ; Yassad, 2000).

En revanche, les minimums dont la moyenne annuelle du mois le plus froid ne doivent pas descendre au-dessous de 3°C de préférence (Boudy, 1950, Vignes, 1990). Les minimas varient en général entre 6.9°C en altitude et 15°C au bord de la mer (Fig.10). Il ne supporte pas les moyennes inférieures à 0°C ; il redoute donc le froid persistant (gelées). Les températures très froides atteignant -7°C voire -9°C d'un à deux jours sont néfastes (Boudy, 1952).

4.1.3-Humidité de l'air

Bien qu'il soit xérophile, le chêne-liège nécessite une forte humidité atmosphérique de l'ordre de 60% même en saison sèche (Cantat et al., 2005). Le long de la côte, l'humidité relative est forte en toutes saisons avec une moyenne de 75% (Yassad, 2000). D'après ce même auteur, à l'intérieure, l'humidité est très variable selon le lieu, la saison et le moment de la journée. Elle est toujours comprise en été entre 35 et 50%. Mais lorsque le sirocco souffle, cette humidité peut descendre à des niveaux avoisinant 0%.

4.2-Exigences pédologiques

Le chêne liège préfère les substrats légers comme les sols siliceux dont les grès numidiens et les sables pliocènes. La proportion du sable est rarement inférieure à 40%. En littoral, elle varie entre 75 et 95%. Le sol doit être dépourvue de calcaire, frais, aéré, bien drainé et profond. Le pH est légèrement acide ou voisin de la neutralité entre 6 et 6.5 (Fig.11).

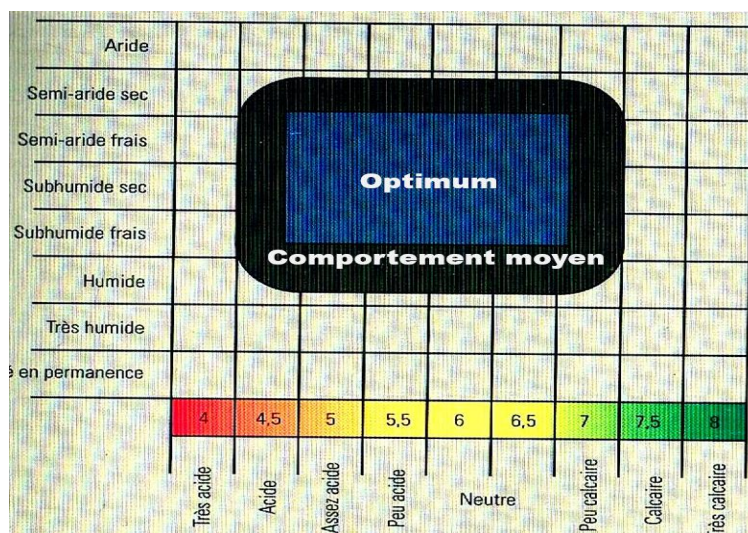


Figure 11- Comportement du chêne liège par rapport aux caractères édaphiques (Yassad, 2000)

Les sols lui convenant le mieux sont les sols bruns forestiers, à texture sablo-argileuse. Les sols les plus favorables sont ceux avec une teneur en sable supérieure à 50%. Par contre, les argiles et les substrats granitiques légèrement argileux lui sont défavorables (argile >15%). Les formations édaphiques adéquates sont plus ou moins imperméables ou comportant des niveaux d'accumulation des eaux souterraines ; le chêne liège est rarement donc sur sol sans eau libre. L'optimum écologique du chêne-liège se trouve satisfait dans les étages bioclimatiques méditerranéens sub-humide et humide. Par contre, il est à sa limite écologique inférieure dans l'étage semi-aride sec (Boudy, 1952 ; Natividade, 1956 ; Quezel, 2000 et Yassad, 2000).

5- Importance des forêts de chêne liège :

L'importance des forêts de chêne liège réside dans son caractère unique en tant d'écosystème forestier particulier dans la région méditerranéenne. En effet, ces forêts constituent dans cette région des paysages typiques, entretiennent des processus environnementaux et créent un système économique diversifié. Ceci est basé sur l'usage d'une vaste gamme de produits forestiers non ligneux (PFNL). Ce système contribue donc aux objectifs de développement durable et de la conservation de la nature (WWF, 2008 ; FAO, 2013) :

- Un monde exceptionnel de biodiversité et de ressources génétiques,
- Une grande variété de flore mellifère pour une apiculture en foresterie,
- Stockage de carbone de près de 14 millions de tonnes de CO₂/an

- Plus de 50 % de plantes méditerranéennes à intérêt économique (PFNL) : 20 espèces de plantes aromatiques et médicinales (PAM),
- Excellent terrain de parcours pour un sylvo-pastoralisme ; glands, feuilles, sous-bois,
- Terrain pour une agriculture extensive,
- Tourisme et autres activités récréatives ;
- Création d'emplois : usines de transformation du liège, travaux sylvicoles et récolte du liège : Les forêts offrent des emplois et des revenus à la population rurale,
- Conservation du sol et régulation des régimes d'eau,
- Récolte de nombreux PFNL : Champignons comestibles, plantes aux propriétés aromatiques, culinaires, ou médicinales, baies sauvages comestibles de myrte, arbousier,

Mais la noblesse du chêne liège réside dans la qualité de son écorce, *le liège*. D'un point de vue économique, il représente l'espèce la plus importante de l'économie Forestière dans l'ouest du bassin méditerranéen. Ce liège est classé comme un produit stratégique, ce qui explique les efforts déployés pour acclimater cette espèce en dehors de son aire naturelle.

5.1. Importance économique du liège

Le chêne-liège doit sa valeur économique à son écorce qui est périodiquement enlevée au cours des opérations d'écorçage. Le liège de reproduction est produit régulièrement tout au long de la vie de l'arbre. C'est un matériau léger, souple, élastique et imperméable et non conducteur de chaleur (Pereira, 2007). Il est utilisé depuis l'antiquité pour diverses applications mais l'utilisation la plus noble est la fabrication de *bouchons* (Boudy, 1950) (Fig.12).



Figure 12- Liège de reproduction sur arbre (gauche), planches de liège de reproduction en pile (milieu) et bouchons naturels (droite) (Photos, Bouhraoua)

5.1.1-Dans le monde

Le liège est le 6^{ème} PFNL exporté au monde. Les exportations génèrent près de 1.7 milliards d'euros de chiffre d'affaire annuel dont 70% provient du bouchon naturel et ce à partir d'une production de 200 mille tonnes (Fig.13) (APCOR, 2019).

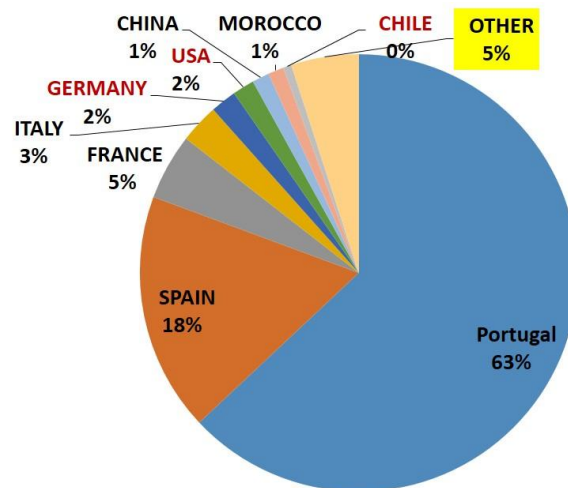


Figure 13 : Proportion des recettes des exportations mondiales du liège en 2018 (APCOR, 2019)

La lecture de cette figure montre que le Portugal occupe la première place dans les valeurs générées par les exportations des produits en liège avec un taux de 63% (1.071 milliard d'euros). Elle est suivie par l'Espagne avec un taux de 18% correspondant à une valeur de 316 millions d'euros. En ce qui concerne, les pays d'Afrique du nord, on ne trouve que le Maroc avec un taux de 1% et une valeur de 19 millions d'euros. Par contre l'Algérie et la Tunisie se retrouvent dans la catégorie « autres » avec des valeurs inférieures à 8 millions d'euros.

Cette figure montre aussi que certains pays non subéricoles comme l'Allemagne, le Chili, la Chine ont généré des recettes non négligeables des exportations des produits à base de liège. Ceci s'explique que ces pays achètent du liège brute (en plaque), trituré ou produits semi-finis des pays à liège pour les transformer par la suite en produits finis ce qui génère des valeurs ajoutées à leur économie.

5.1.2-En Algérie

La production du liège en Algérie montre une tendance régressive dans la production du liège. En effet, durant une période de 57 ans (1964-2020), la forêt a fourni plus de 627 mille tonnes de liège ce qui représente une moyenne annuelle de 11000 tonnes (DGF, 2021) (Fig. 14).

Mais durant la dernière décennie (2009-2020), cette production n'a pas dépassé 6 000 tonnes, soit 52% par rapport la période de référence.

Il convient de signaler que la subéraie algérienne fournissait dans l'ancienne période (1930-1959) une moyenne annuelle de 30 000 tonnes (Marc, 1930 ; Chenel, 1951). La production actuelle représente alors que 37% de la production potentielle de notre forêt. Par rapport à la dernière décennie, ce taux diminue pour atteindre 20% seulement.

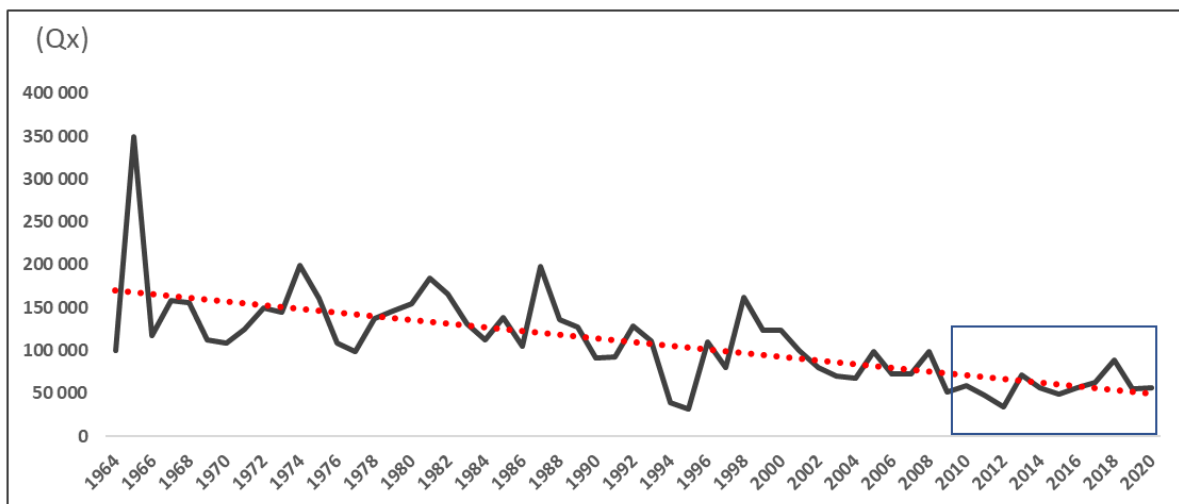


Figure 14: Evolution annuelle de la production du liège en Algérie durant la période 1965-2020 (DGF, 2021)

En ce qui concerne les recettes des exportations de l'Industrie de transformation du liège, la figure 15 suivante montre une tendance régressive de ces recettes durant la période 2000-2018. Celles-ci varient entre 2 million de dollars en 2017 et 16 million de dollars en 2000. Ceci représente une moyenne annuelle de 7.6 million de dollars (ONS et CNIS, 2019). Cette moyenne est beaucoup plus faible par rapport aux capacités productives de nos subéraies.



Figure 15: Evolution des recettes des exportations de l'Industrie de transformation du liège entre 2000 et 2018 (ONS et CNIS, 2019).

6- Causes de dégradation des subéraies Algériennes

La problématique des subéraies algériennes se manifeste par une dégradation significative du couvert forestier et par conséquent la production du liège. Ceci est la résultante d'une combinaison de facteurs adverses de nature biotique et abiotique. Ces

éléments interagissent pour exacerber la détérioration de cet écosystème (Naggar, 1999).

Les principaux facteurs de cette dégradation se résument comme suit (Zine, 1992 ; Bouhraoua et al., 2002 ; Chakali G. et al. 2002 ; Bouhraoua et Villemant, 2005 ; Belhoucine et al., 2011 ; Belhoucine et Bouhraoua, 2012 ; Bediar et al., 2012 ; Bouhraoua et al., 2014 ; Bouhraoua et al., 2019 ; Roula et al., 2020 ; Chekchaki et al., 2020) :

- Vieillessement des peuplements avec une régénération naturelle déficiente,
- Enrésinement des peuplements par le pin d'Alep à l'Ouest et pin maritime à l'Est,
- Envahissement des subéraies par les espèces invasives,

- Absence de travaux sylvicoles conduisant au développement exagéré du sous-bois et abandon des forêts,
- Absence des plans d'aménagement et de gestion : nombreux règlements d'exploitation sont perturbés,
- Echecs des opérations de reboisement surtout du programme PNR (2000-2020),
- Mauvaise exploitation du liège à cause du manque de technicité des ouvriers et de nombreuses blessures sont commises aux troncs d'arbres qui les rends plus vulnérables aux incendies de forêt,
- Attaques parasitaires comme le défoliateur *Lymantria dispar* et surtout le xylophage *Platypus cylindrus*, les maladies phytopathogènes,
- Apparition du phénomène de dépérissement,
- Mauvaises conditions climatiques et changements climatiques marquées par la sécheresse, canicules, ect.,
- Incendies récurrents de forêt et maquisation : les incendies ravagent annuellement 6500 ha en moyenne. Ils contribuent dans une large mesure à la dégradation voire même à la disparition des peuplements surtout lorsque ces feux surviennent juste après la récolte du liège,
- Manque de gestion post-feu visant la récupération des peuplements brûlés

Chapitre II:

Présentation du milieu d'étude:

La forêt domaniale de Hafir

1-Milieu physique

1.1-Situation géographique

Les monts de Tlemcen se distinguent par une importante biodiversité, ce qui a toujours attiré l'attention des chercheurs dans divers domaines. Cette région montagneuse, malgré son aspect dégradé sous forme de formations arbustives, demeure toujours une zone forestière par excellence (Letreuch-Belarouci, 2002).

Dans cette zone montagneuse, se distingue les forêts pure et mixte à *Quercus*. Dans sa partie occidentale, on trouve plus particulièrement la subéraie de la forêt domaniale de Hafir. Cette forêt s'étend sur une superficie de 9872 hectares dont près de 3500 hectares de chêne liège (Boudy, 1955). L'emplacement est défini par les coordonnées Lambert suivantes (Tab.2).

Tableau 2: Localisation géographique de la forêt domaniale de Hafir (Tlemcen)

Forêts	Coordonnées géographiques		Distance à la mère (Km)	Carte d'état major
	Latitude	Longitude		
Hafir	X ₁ = 105.2 km	Y ₁ = 163.6 km	60	Terny (type 1922-feuille n°299 et 300)
	X ₂ = 127.1 km	Y ₂ = 178.3 km		

La forêt domaniale de Hafir est située au sud-ouest et à 15 km du chef-lieu de Tlemcen. Elle est répartie depuis longtemps en 24 cantons (C.O.I.T., 1900) (Fig.16). Elle relève des circonscriptions forestières de Tlemcen (623 ha), Maghnia (7 586 ha) et Sebdu (1 750 ha) (B.N.E.D.E.R., 1979b). Notre zone d'étude fait partie de la commune d'Ain Ghoraba et la circonscription forestière de Tlemcen.

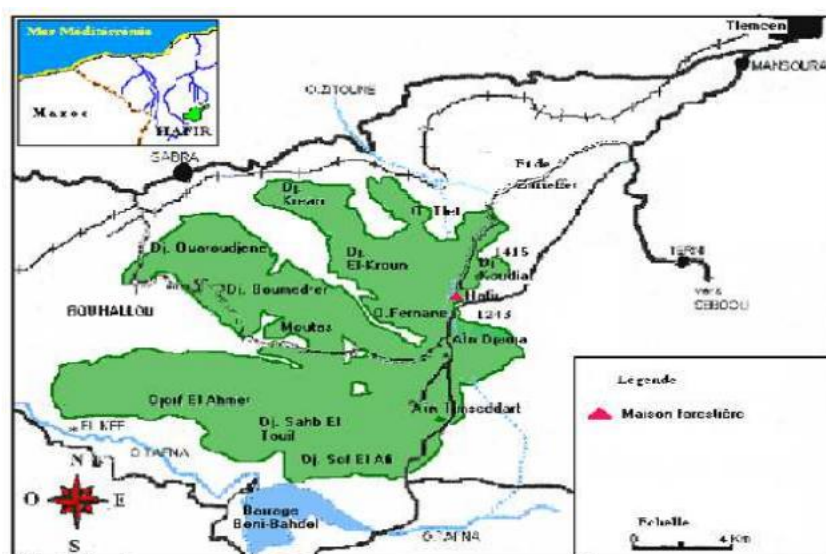


Figure 16: Situation géographique de la forêt domaniale de Hafir et de ses cantons

1.2-Orographie et topographie:

Le relief de la forêt de Hafir est de type tabulaire. Il présente une altitude varie de 800 à 1 418 mètres où elle culmine au Djebel Koudia. Il est incisé par des vallées cultivées ou partiellement boisées, creusées par des oueds et leurs affluents (B.N.E.D.E.R., 1979). Le relief confère à la forêt un caractère accidenté avec des expositions multiples. Les pentes les plus fréquentes sont comprises entre 12,5 et 25%. Les plus faibles (<3%) et abruptes (>50%) sont moins fréquentes.

1.3- Géologie et pédologie

Le substrat géologique sur lequel est issu la forêt de Hafir est constitué essentiellement de grès séquanais ou poudingues (grès de Boumediene ou grès Lutasicas) (PNT, 2014) (Fig.17).

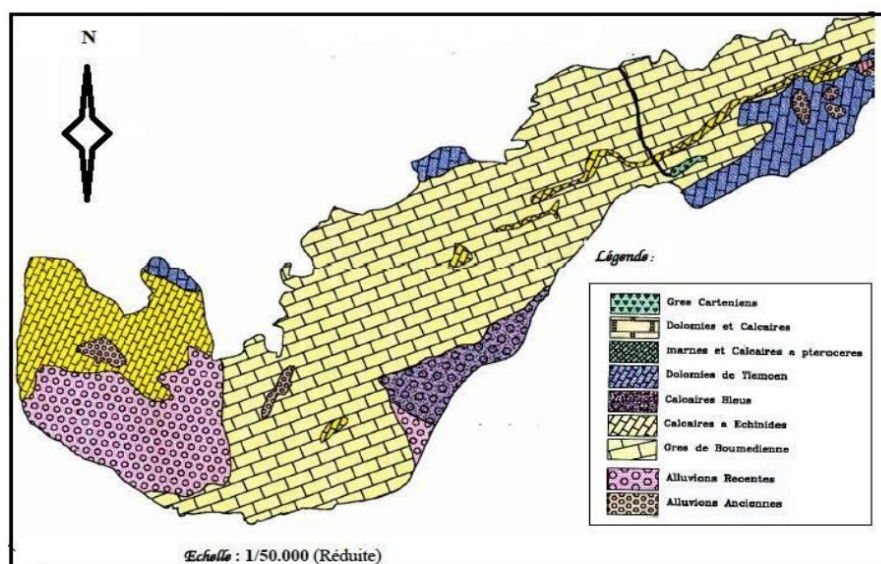


Figure 17: Carte géologique du massif Hafir-Zariffet (PNT, 2014).

Les peuplements du chêne-liège reposent donc sur des formations gréseuses, des sables de décomposition ou des accumulations de produits de décalcification. Ces assises géologiques sont de couleur blanc roussâtre ou grise, plus ferrugineux en surface et dépourvus de calcaire (Boudy, 1950, 1955; Gaouar, 1980; Yassad, 2000).

Du point de vue pédologique, la subéraie de Hafir se caractérise par des sols humides, à profondeur variable par endroits. Ces sols sont entre meubles et profonds et superficiels, secs et rocaillieux. La majorité du chêne liège se retrouve sur les sols de type brun fersiallitique (PNT, 2014) (Fig.18). Ce sont les meilleurs sols forestiers du chêne liège et la brunification est le principal facteur de genèse de ces sols (Yassad, 2000). D'après cet auteur, ces sols sont profonds (plus d'un mètre) favorables à la croissance de diverses essences feuillues.

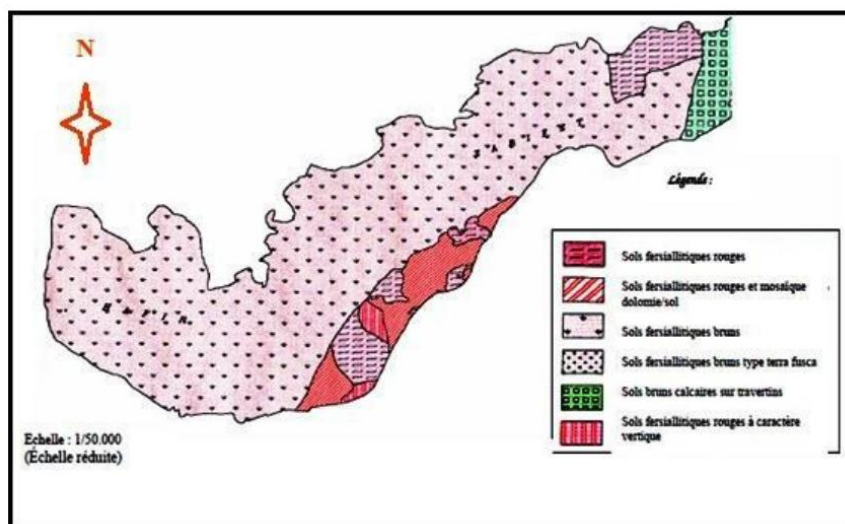


Figure 18: Carte pédologique du de massif Hafir-Zariffet (PNT, 2014).

1.4-Climat

Notre étude basée sur l'impact des conditions climatiques actuelles sur la situation sanitaire des peuplements de chêne-liège, requiert une attention particulière à l'étude climatique de la zone d'étude. Cette 'étude locale et de son évolution à long terme est essentielle pour comprendre le fonctionnement de l'écosystème forestier, notamment en relation avec les principaux facteurs climatiques tels que la température et les précipitations. Pour caractériser au mieux ce climat, nous avons jugé pertinent d'utiliser donc ces deux facteurs climatiques couramment employés en bioclimatologie. Pour cela, nous nous sommes basés sur les données météorologiques anciennes et récentes provenant des stations de références les plus proches du milieu d'étude.

1.4.1-Origin des données

Pour analyser les conditions climatiques et déceler tout changement ou évolution dans le temps, nous avons utilisé des données continues sur des périodes de plus de 20 ans. Deux périodes de référence ont été distinguées: i) une période ancienne (1914-1938), principalement basée sur les données de Seztzer (1946) mais aussi du bulletin de la Station de Recherches Forestières du Nord de l'Afrique pour les périodes (1915-1924) et (1925-1934) (BSRF, 1937) et ii) une période récente (1961-2017), issue des stations météorologiques les plus proches de la subéraie (Tab.3).

Tableau 3: Coordonnées des stations météorologiques de référence

Station de référence	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Emplacement	Mesure climatique	Période d'observation
Hafir	1°26' W	34° 47'N	1270	Maison Forestière	Pluviométrie	1915-1934
						1961-1996
					Températures	1913-1938
						1925-1934
						1975-1991

Mefrouche	1°16' W	34° 51'N	1100	Barrage	Pluviométrie Températures	1975-2017 1990-2014
Ain Ghoraba			1121	-----	Pluviométrie Température et Humidité	2019-2025

1.4.2-Précipitations

1.4.2.1-Répartition annuelle des précipitations

Le tableau 4 consigne la moyenne annuelle des pluies enregistrées durant les deux périodes de référence dans notre zone d'étude.

Tableau 4: Eléments statistiques sur les précipitations annuelles à Hafir des 2 périodes

Période d'observation	Moyenne (mm)	Ecart type « s »	Coefficient de Variabilité (%)	Nombre de pluies (jours)
1915 - 1934	750,17	177,25	23	75 jours (1915-24) 56 jours (1925-34)
1961 - 2017	643,79	195,89	30	-----

La lecture de ce tableau montre que les précipitations moyennes annuelles durant la période ancienne (20 ans: 1915-1934) sont de l'ordre de 750,17mm. Elles sont comprises entre 763,8mm (1915-1924) et 732,5mm (1925-1934). Durant cette période, la hauteur annuelle des pluies varie peu (CV :23%). Le nombre de jours de pluies oscille entre 56 et 75 jours.

Par contre au cours de la seconde période (56 ans: 1961-2017), les précipitations moyennes annuelles ont connu une légère régression de près de 15% pour atteindre une tranche de 643.79mm. Une variation significative est enregistrée entre les années (CV :30%).

La **figure 19** montre la répartition annuelle des précipitations durant les deux périodes de références.

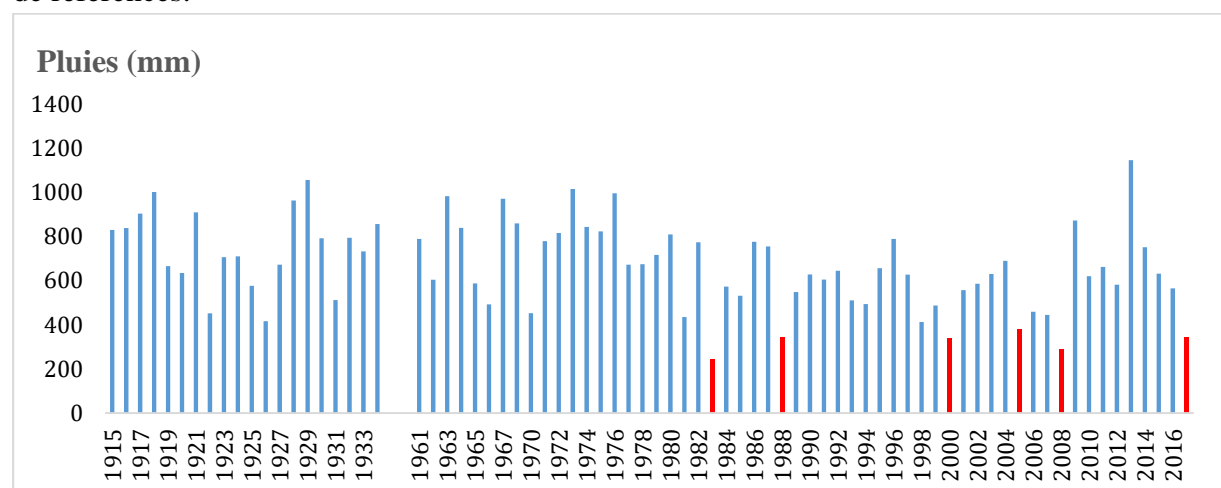


Figure 19: Répartition annuelle des pluies dans la forêt de Hafir durant 2 périodes de référence (Histogrammes en rouge indiquent les tranches pluviométriques déficitaires)

D'après cette figure, nous remarquons que durant l'ancienne période, la pluviométrie annuelle était toujours supérieure à 400mm. Elle est comprise entre un minimum de 415 mm enregistré en 1926 et un maximum de 1050mm en 1929.

Dans la seconde période, les hauteurs annuelles des pluies oscillent 241mm (en 1983) et 1141mm (en 2013). Mais elles sont fréquemment supérieures à 400mm. Néanmoins, la zone a connu 6 années de déficit pluviométrique (<400mm) mais espacées dans le temps (3-12ans). Elles sont enregistrées en 1983 (242mm), 1988 (341mm), 2000 (336mm), 2005 (377mm), 2008 (289mm) et 2017 (343mm).

1.4.2.2-Répartition mensuelle moyenne des précipitations:

Le tableau 5 montre la répartition moyenne mensuelle des pluies enregistrées dans la zone d'étude.

Tableau5: Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) pendant deux périodes à Hafir

Périodes	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Tot
1913-1938	101	106	105	66	63	22	4	4	29	52	96	100	748
1961-2007	79	82	109	80	66	17	3	5	26	48	69	78	660

La lecture de ce tableau montre que les pluies sont plus abondantes entre les mois de décembre et mars dans l'ancienne période. Le mois de décembre se distingue comme le mois le plus pluvieux, avec une moyenne de 100mm. Par contre dans la seconde période, elles sont maximales entre février et avril. La période sèche, avec une pluviométrie la plus basse, se situe dans les deux périodes entre juin et août.

1.4.2.3-Régimes saisonniers des précipitations:

Le régime saisonnier des précipitations des deux périodes est présenté dans le tableau 6 suivant.

Tableau 6: Régime saisonnier des précipitations au niveau de la forêt de Hafir

Périodes/Saisons	Eté*	Automne	Hiver	Printemps	Type de Régime
	(J-JI-A)	(S-O-N)	(D-J-F)	(M-A-M)	
1914 - 1938	30	177	307	234	HPAE
1961 - 2007	26	140	238	254	PHAE

*les trois mois consécutifs secs

L'analyse de ce tableau révèle qu'environ 50 % des précipitations se concentrent en hiver, suivi par la saison printanière avec 31% du total annuel. Ceci caractérise un régime saisonnier de type HAPE. En revanche dans la seconde période, les

précipitations sont plus abondantes en printemps qu'en hiver indiquant un régime saisonnier de type PHAE. L'été reste toujours sec avec des quantités de pluies les plus faibles (3 %).

En somme, durant les deux périodes (près de 80 ans d'analyse), la subéraie de Hafir est plus arrosée, elle reçoit des tranches pluviométriques dont la moyenne dépasse les 600mm. Le maximum du régime annuel des pluies en cette zone montagneuse s'observe au printemps et en hiver. Cette tranche de pluies marque par conséquent une bonne croissance des arbres et une bonne production forestière (dont le liège).

1.4.3-Températures

Pour caractériser les conditions thermiques ayant régné dans la subéraie, nous avons utilisé plusieurs paramètres couramment employés en bioclimatologie, à savoir les températures minimales (m°C : avec le mois le plus froid), les maximales (M°C : avec le mois le plus chaud), ainsi que les moyennes mensuelles et annuelles (T°C). Il est à signaler que les données disponibles en ce paramètre climatique ne sont pas régulières le long des années. Elles sont plutôt fragmentées en différentes périodes de courte à moyenne durées car elles proviennent de différentes sources.

1.4.3.1-Températures mensuelles minimales « m »

Les températures minimales moyennes (°C) enregistrées au niveau de la forêt de Hafir sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Températures minimales mensuelles (m°C) durant deux périodes de référence à Hafir

Années	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Moyenne
1915-1924	1,4	2.0	3,1	4,7	9.0	11,3	16,9	17,1	13,3	8,9	4,9	1,9	7,9
1925-1934	1,8	2.5	3.2	5.7	8.0	12.7	16.3	17.3	13.9	10.2	4.3	2.6	8.2
1914-1938	1,8	2,4	3,5	5,4	8,7	12.0	17.0	17,3	13,6	9,3	5,3	2,2	8,2
1975-1991	3,7	2,8	3,1	5,1	7,4	11.0	17,4	16,8	13,2	9,6	4,5	3,6	8,2
1990-2000	3,5	4,3	5,7	6,9	9,9	13,3	15,3	16.0	13,2	10,6	8,9	5.0	9,7
2008	6,44	8,6	8,2	8,3	14.0	13.0	18,7	18,5	14,4	10,8	3,3	2,5	10,5

D'après l'analyse des données, nous remarquons que les températures minimales mensuelles (m) de la période ancienne varient entre 1.4-1.8°C (janvier : mois le plus froids) et 17.3°C (août) avec une moyenne annuelle de 8.2°C. Le minimum extrême de -7.6°C a été enregistrée en mars (1915-1924) et -6.0°C (février-mars) voire -8.0°C en 1926 (27 décembre) (BSRF, 1937). La moyenne minimale annuelle est de l'ordre de 7.9-8.2°C.

Dans la seconde période, les températures minimales mensuelles ont connu une augmentation de plus d'un degré Celsius. En effet, les mois les plus froids affichent des valeurs comprises entre 2.8°C (février) et 3.5°C (janvier). La moyenne annuelle oscille de 8.2 à 9.7°C.

Ces deux périodes marquent souvent des hivers frais ($m > 0^{\circ}\text{C}$). Mais à partir des années 90, l'hiver est devenu tempéré ($m > 3^{\circ}\text{C}$).

Enfin, les données thermiques particulières de l'année 2008 ont été marquées par un mois de décembre le plus froid, un hiver chaud ($m > 5^{\circ}\text{C}$) et une moyenne annuelle plus élevée de $10,5^{\circ}\text{C}$.

1.4.3.2-Températures mensuelles maximales « M »

Les températures moyennes maximales mensuelles ($^{\circ}\text{C}$) enregistrées au niveau de la forêt de Hafir sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8: Maximums moyens mensuels ($M^{\circ}\text{C}$) dans 2 périodes de référence à Hafir

Années	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Moyenne
1925-1934	9,5	11,2	12,5	16,5	19,0	26,6	30,2	31,4	26,4	20,5	12,0	11,6	19,0
1914-1938	9,4	10,9	13,0	15,8	19,7	24,8	30,6	31,1	25,9	20,6	13,7	10,6	18,8
1975-1991	9,7	10,4	14,0	15,9	20,7	26,0	30,9	28,1	25,1	20,3	14,2	12,2	21,2
1990/2000	10,8	13,1	15,1	16,9	21,0	25,6	30,0	30,7	25,6	20,2	15,7	11,8	19,7
2008	17,9	18,6	19,2	25,3	24,1	30,7	31,5	31,9	24,8	17,7	12,0	8,7	21,9

L'analyse de ce tableau montre que les températures maximales moyennes annuelles varient entre $18-19^{\circ}\text{C}$ durant l'ancienne période pour atteindre 21°C durant la seconde période de référence. Les températures maximales moyennes les plus élevées (mois le plus chaud) atteignent 31°C et enregistrées en août. Les températures maximales extrêmes ont atteint des pics de $39,2^{\circ}\text{C}$ (18 juillet 1926), $38,0^{\circ}\text{C}$ (11 août 1927) et $38,8^{\circ}\text{C}$ (1 septembre 1928).

1.4.3.3-Températures moyennes mensuelles et annuelles « T »

Le tableau 9 suivant consigne les températures moyennes mensuelles et annuelles enregistrées dans la forêt de Hafir durant les deux périodes de références.

Tableau 9 : Températures moyennes mensuelle et annuelle « $T^{\circ}\text{C}$ » durant les deux périodes de références dans la forêt de Hafir

Années	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Moy
1925-1934	5,7	6,9	7,9	11,1	13,5	19,7	23,3	24,4	20,1	15,4	8,1	7,1	13,6
1913-1938	5,8	6,3	8,3	10,6	14,2	18,4	23,8	24,2	19,8	15	9,5	6,4	13,5
1970-1997	8,3	8,8	10,7	12,7	16,1	20,2	25,0	24,4	20,3	16,8	11,7	9,7	15,4
1990-2014	6,4	7,2	9,9	10,7	15,1	20,6	23,9	23,7	19,9	15,8	10,1	7,6	14,7

D'après ce tableau, on constate que la température mensuelle moyenne est de 13°C durant l'ancienne période. Par contre dans la seconde période, elle est relativement supérieure ; elle est comprise entre 14 et 15°C .

En conclusion, nous pouvons dire que le chêne liège à Hafir occupe une position thermique incluse dans les limites correspondant à des moyennes annuelles (13-15°C). Les moyennes des minimums du mois le plus froid sont supportables pour le chêne liège ($m > 0^{\circ}\text{C}$). Les moyennes des maximums du mois le plus chaud sont toujours moins élevées malgré l'altitude ($18 < M < 22^{\circ}\text{C}$).

1.4.4-Autres facteurs climatiques

En plus des deux principaux facteurs climatiques, plusieurs autres éléments peuvent influencer le développement du chêne-liège. Parmi ces facteurs, nous citons l'humidité atmosphérique relative, l'enneigement et le vent qui jouent un rôle déterminant dans certaines fonctions physiologiques des arbres.

1.4.4.1-Humidité relative atmosphérique:

L'humidité atmosphérique relative est essentielle pour la survie du chêne-liège. Elle contre balance fréquemment le déficit pluviométrique annuel (jusqu'à un minimum de 400mm) et le manque de pluies souvent observé pendant la saison sèche (Yassad, 2000).

Le tableau 10, montre l'humidité relative de l'air durant l'ancienne période seulement (BSRF, 1937). Les données de la période récente sont par contre rares et fragmentaires.

Tableau 10: Humidité relative de l'air moyenne mensuelle (%)

Année	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Moyenne
1915-1924	73	72	73	71	67	66	47	48	62	66	71	71	66
1925-1934	79	80	78	73	75	70	65	66	72	78	79	78	75

La zone montagneuse de Hafir s'éloigne à une 60km de la mer. Elle agit souvent comme une barrière à l'influence maritime. La lecture du tableau montre que l'hygrométrie relative moyenne annuelle est relativement constante. Elle est élevée presque en toutes saisons (>60%). Elle varie entre 65 et 80%. La saison estivale reste relativement sèche où le minimum de la moyenne est compris entre 50 et 60%.

1.4.4.2-Enneigement:

À Tlemcen, la neige apparaît à partir de 800 m d'altitude. Dans la forêt de Hafir, la neige était autrefois abondante, variant d'une année à l'autre. Les premières chutes survenaient en hiver, dès décembre, et restent plus fréquentes en janvier-février et rares en mars. Le nombre de jours de neige était de 10jours (1925-1934: BSRF,1937). Duran cette période, nous notons 26 jours de gelée et 25 jours de gelée blanche jamais la grêle.

En absence de données d'enneigement durant la période récente, nous pouvons dire que durant ces dernières décennies, les chutes de neige sont devenues moins fréquentes voire rares dans la région, avec seulement quelques jours d'enneigement par an.

1.4.4.3- Vent:

Dans la forêt de Hafir, les vents soufflent de l'ouest, du sud-ouest et du nord-ouest. En été, le sirocco est fréquent; il est très chaud et sec, car la brise marine arrive atténuée. Ce vent souffle environ 10 jours par an (BSRF, 1937).

2- Milieu forestier

La forêt de Hafir est constituée à l'état naturel, de trois espèces de chênes à savoir le chêne-liège, le chêne vert et le chêne zeen. Les peuplements de chêne-liège s'étendent sur une surface estimée à 3 500 ha (Lamey, 1894). Une grande partie de ces peuplements (environ 2 300 ha) sont purs et le reste est en mélange dans les stations fraîches avec le chêne zeen. Par contre dans les stations plus sèches, il est en mélange avec le chêne vert (Boudy, 1955).

La structure des peuplements, déterminée par leur âge et leur origine, varie du jeune au vieille futaie, avec une physionomie généralement jardinée. Mais la vieille futaie, constitue la structure dominante (Fig.20).



Figure 20: Vue générale de la subéraie saine de Hafir (Photos originales, Bouhraoua; a (10 déc. 2014), b (21 jui. 2010), c (22 avr. 2013) et d (14 sept. 2012)

Une grande partie des peuplements du chêne liège a été façonnée au fil du temps, par les effets du vieillissement, mais aussi de nombreuses perturbations anthropiques, notamment les incendies de forêt récurrents.

Le tableau 11 résume les principaux feux de forêt enregistrés à Hafir.

Tableau 11: Principaux feux de forêt enregistrés à Hafir après l'indépendance

Année	Surface chêne liège	Cantons
-------	---------------------	---------

1961	52	Oued Fernane
1964	30	Oued Fernane
1994	640	Oued Fernane
2001	--	----
2004	270	150 ha Oued Fernane et 120 ha S'Rutou

La lecture de ce tableau montre que la forêt de Hafir a été touchée par 4 principaux feux de forêt ayant parcouru des superficies variables. Mais l'incendie de 1994 reste le plus catastrophique en brûlant au moins 640 ha de chêne liège (C.F.W.T., 1995). Ce feu a été enregistré seulement dans le canton Oued Fernane (canton à chêne liège par excellence).

Un autre incendie catastrophique a été survenu en 2004 où il a anéanti toute régénération (naturelle par semi ou végétative apparues après les incendies antérieure, ect.

Malgré des conditions édaphiques favorables, la régénération naturelle par semis demeure depuis longtemps rare et hétérogène (Boudy, 1955). Les densités du peuplement variaient de 70 sujets/ha dans les zones incendiées à plus de 300/ha dans les secteurs conservant la futaie saine (Bouhraoua, 2003). En conséquence, une grande partie de la subéraie est disparue de manière irréversible et transformée milieu dégradé au sous-bois développé (Appiagyei et al., 2021) (Fig.23).



Figure 21- Suberaie de Hafir dégradée en maquis clair (Photos Bouhraoua: canton Byadha, Sabra, 7 mai 2012)

Le sous-bois est partout présent avec une grande richesse floristique. Il comprend des espèces indicatrices humidité mais aussi de milieux dégradés. Il est très dense dans les secteurs touchés par les incendies (Benabdallah, 2019; Appiagyei et al., 2023) et peu développé dans d'autres. Parmi les espèces fréquentes, nous notons *Hedera helix*, *Lonicera implexa*, *Smilax aspera*, *Rubus ulmifolius*, *Daphne gnidium*, *Arbutus unedo*, *Ruscus aculeatus*, *Lavandula staechas*, *Erica arborea* et *Rosmarinus officinalis*. Dans les zones dégradées et plus xériques, nous observons une dominance d'essences secondaires comme le chêne kermès, les cistes et le Diss (Benabdallah, 2019).

3-Importance économique

L'importance économique de la forêt de Hafir réside essentiellement dans sa production du liège. Ce dernier est de meilleure qualité en Algérie (Boudy, 1955). Les études

réalisées sur ce liège ont confirmé la bonne qualité de ce liège en matière de porosité, accroissement annuel, composition chimique, ect. (Dehane et al., 2014; Ghalem et al., 2016).

Un aperçu historique de cette production est réparti en deux phases: pendant l'époque coloniale et post-indépendance.

3.1-Epoque coloniale

L'analyse de données sur le volume du liège extrait pendant l'époque coloniale a été faite par Bouhraoua (2003). Il ressort de son analyse que durant les années 1940-1957, un volume total de 11000 qx de liège ont été extraits soit une moyenne annuelle de 981qx. Ce liège est récolté presque chaque année.

3.2- Epoque post-indépendance

Les données statistiques sur la production du liège à Hafir fournies par divers documents forestiers (DGF, CFT et ERGR), sont présentées dans la figure 22.

Il ressort de cette, après l'indépendance, les travaux d'exploitation du liège n'ont repris qu'en 1970 avec un volume du liège récolté de 864 qx. Depuis cette date, les campagnes de récoltes ont été réalisées avec un rythme irrégulier souvent entrecoupé de grandes périodes creuses de 5 à 7 ans en l'occurrence celles de 1975-1979, 1988-1994, 1997-2001 et à partir de 2021.

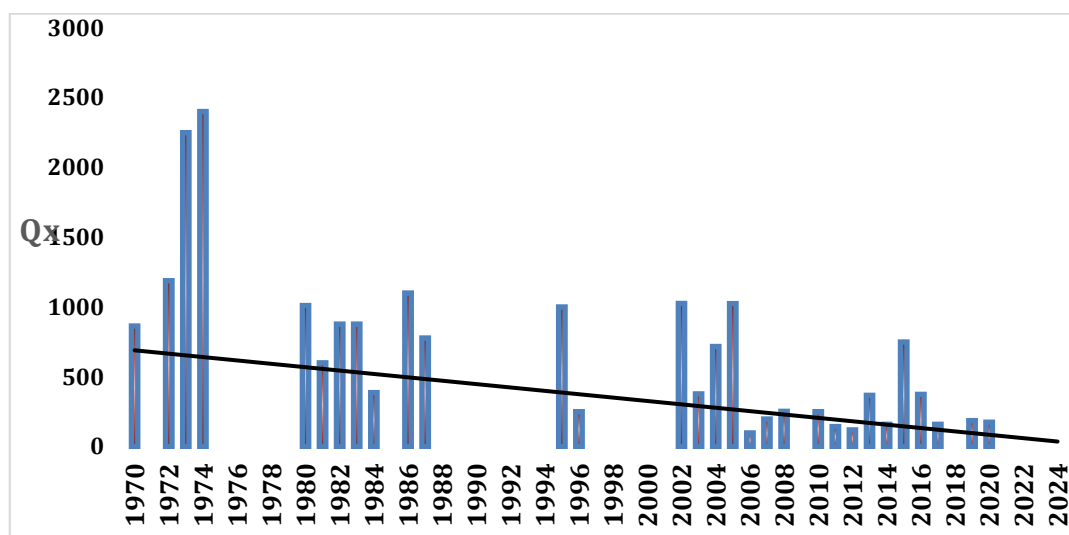


Figure 22: Production du liège (quintaux) fournie par la subéraie de Hafir après l'indépendance (trait plein: tendance de la courbe).

En effet, sur une période de 55 ans (1970-2024), la production du liège à Hafir a connu une tendance régressive. Durant cette période, la subéraie a fourni sur 30 campagnes une quantité d'environ 20 000 qx ce qui représente une production moyenne annuelle

de 362 qx (Fig.23). Ce volume constitue 37% seulement de la production originelle de la forêt.



Figure 23- Liège de Hafir en pile (a: tronc récolté en été 2013, b : pile de liège récolté en 2013 et c : pile de liège récolté en 2017) (photos, Bouhraoua)

Diverses raisons sont à l'origine de cette situation: la réduction de la superficie productive du liège par le fait des incendies récurrents de forêt, vieillissement des peuplements, accidents climatiques qui arrêtent ou retardes les récoltes, apparition des cas de dépérissements, la crise sécuritaire des années 90, ect. (Bouhraoua, 2003; Bouhraoua et al., 2002; Appiagyei et al., 2023).

Chapitre III: Matériel et méthodes

A la fin de la saison sèche de 2024, beaucoup d'arbres de chêne-liège de la forêt de Hafir ont montré visiblement une perte de vigueur et le peuplement s'est présenté alors sous forme d'un paysage inhabituel sinistré (Fig.24).

Les symptômes d'altération sanitaire des arbres sont traduits extérieurement par la perte de la couleur habituelle du feuillage, la réduction de la masse foliaire, la transparence de la cime et l'apparition des cas de mortalité.



Figure 24: Vue générale du peuplement du chêne liège à Hafir (photos octobre 2024)

A l'issue de ces observations enregistrées par Mr Bouhraoua (com. pers.), une étude a été menée dans ladite subéraie à partir du mois d'octobre 2024 et vise plusieurs objectifs:

- ✓ Mieux décrire et analyser le comportement du chêne liège face aux conditions climatiques défavorables (sécheresse et canicules),
- ✓ Mieux évaluer l'importance de l'impact des aléas climatiques récentes ainsi enregistrés sur la santé des arbres,
- ✓ Mieux comprendre des mécanismes d'adaptation des arbres au stress hydrique induit par la sécheresse.
- ✓ Mieux comprendre la manière dont le changement climatique se répercutera sur l'exposition des forêts de chêne liège aux ravageurs et maladies secondaires

Il est essentiel donc d'adopter une méthodologie rigoureuse. Celle-ci combine des observations de terrain, des prélèvements des échantillons et observation de prêt au laboratoire, des analyses situationnelles (climatiques et pédologiques), ainsi que des mesures dendrométriques et paramètres physiologiques des arbres.

L'approche méthodologique adoptée dans cette étude repose essentiellement sur des analyses climatiques, pédologiques et physiologiques (relation eau-sol-arbre). Dans ce cadre, divers matériel et équipements ont été utilisés pour collecter les données et analyser les échantillons.

1-Choix des stations d'étude

Notre étude est menée dans deux stations en pleine subéraie de Hafir. Elles sont choisies de manière aléatoire dans la zone où le paysage montre visiblement des symptômes de perte sanitaire des arbres à savoir cime clairsemé, faible densité foliaire, dessèchement complet de la frondaison. En plus, l'accès facile aux stations est pris en considération dans ce choix. Ces deux stations sont installées en octobre 2024 totalisant 89 arbres répartis entre 25 arbres dans la première station et 64 arbres dans la seconde station.

2-Choix des arbres

Les arbres ont été choisis sans tenir compte ni de leur état sanitaire apparent ou leur âge, démasclé ou non ou leur origine (franc-pied à partir de semis naturel ou cépée à partir de rejets de souche). La sélection de ces arbres-échantillons est donc parfaitement neutre et loin d'être influencée par un quelconque facteur.

A partir du premier arbre repéré indifféremment dans le peuplement, le reste des arbres a été sélectionné par la méthode du plus proche voisin (Bouhraoua, 2003; Naggar, 2021 et Tekkouk, 2022). Cependant certains jeunes sujets dont le tronc est encore recouvert du liège mâle ou naturel ont été pris en considération dans l'étude.

Chaque arbre des deux stations a été numéroté avec de la peinture blanche. Ceci nous permet de localiser facilement les arbres pour suivre les observations, prélèvements et analyses sur terrain.

Cette organisation a été essentielle pour structurer notre travail, garantir la clarté des données collectées et assurer que toutes les catégories d'arbres étaient bien représentées.

Il convient de signaler que nous avons retenu un arbre de référence présentant toutes les caractéristiques de bonne vigueur (forte densité foliaire, cime dense, couleur vert-foncé du feuillage). Ceci nous permettra de comparer l'état de santé et l'architecture de cet arbre avec ceux des arbres-échantillons.

Pour la description et les mesures, nous avons examiné chaque arbre des deux stations minutieusement. Cela nous a permis d'avoir une étude équilibrée et d'obtenir des résultats fiables.

3-Données des stations d'étude

La description physique et forestière aussi précise que possible des peuplements des deux stations implantées dans la forêt revêt une grande importance dans les études de diagnostic sanitaire des arbres. Elles permettent selon EL-TOLBI et al. (1998); de localiser les symptômes de dépérissement, leur importance et par conséquent d'identifier la nature et l'intensité des facteurs responsables de la dégradation de l'état physiologique ou de la croissance des arbres.

Pour caractériser nos stations, nous avons donc effectué plusieurs relevés de différente nature (observations, notes, mesures ou analyses). Beaucoup de ces paramètres prévus

dans le cadre du réseau Européen de surveillance sanitaire RENECOFOR (ULRICH, 1992) sont déjà employés en Algérie sur chêne-liège de l'ouest algérien (Bouhraoua, 2003, Dehane, 2012, Belhoucine, 2013).

3.1-Caractérisation physique des stations

3.1.1-Paramètres géographiques

Ils permettent de déterminer avec précision la localisation des stations d'étude dans la forêt. Ils consistent à des relevés des coordonnées géographiques à l'aide d'un GPS (GPSMAP 64, GARMIN) pris au centre du site. En plus, le lieudit du canton complète ces paramètres.

3.1.2-Paramètres topographiques

Ils fournissent des informations essentielles sur la morphologie du terrain. Il s'agit en particulier de la pente dominante (%) mesurée en utilisant un clinomètre optique (Geometra, Suisse). Les différentes mesures d'inclinaison sont regroupées par classes suivantes correspondant chacune à une situation topographique particulière: classe 1 ($P < 5\%$: pente faible), classe 2 ($P : 5-10\%$: pente moyenne) ; classe 3 ($P : 10-20\%$: pente forte) et classe 4 ($P > 20\%$: pente très forte ou abrupte). Dans les deux dernières classes de pente, le terrain est considéré comme abrupt et accidenté. L'exposition dominante des sites est déterminée avec une boussole-clinomètre (SUUNTO). En montagne, l'orientation des versants joue un grand rôle sur les conditions de la croissance des arbres, les conditions écologiques (lumière et température, humidité du sol, pluviométrie et biodiversité végétale).

L'altitude, autre paramètre topographique, est fournie au moyen d'un GPS. Elle est enregistrée au centre du site d'étude.

3.1.3-Paramètres pédologiques

Ils servent à décrire le sol sur lequel repose le peuplement étudié. Ils comportent dans notre étude certains descripteurs en relation directe avec la capacité de rétention d'eau et la santé des arbres; c'est-à-dire la relation eau-sol-arbre. D'autres éléments pédologiques sont fournis par la bibliographie comme la texture du sol, la roche mère. Ces informations sont cruciales pour comprendre comment le sol peut influencer la rétention de l'eau de pluies et la conséquent la croissance et la santé globale des arbres.

3.1.3.1 -Affleurements rocheux et pierreux

Ils sont estimés par observation en parcourant toute la superficie de la station. Ils sont enregistrés en pourcentage rapport à la couverture du sol. Nous distinguons 4 classes: classe 0 : (0% : pas d'affleurement, pas de pierres), classe 1 (<10% de couverture), classe 2 (15-25%) et classe 3 (>30%).

3.1.3.2- Profondeur du sol

Elle est déterminée à partir des tests tarières appliqués en plusieurs points de la station. On distingue: Classe 1: très superficiel (<15cm), classe 2 ; superficiel (15-30cm), classe 3 : assez profond (30-60cm) et classe 4 : profond (>60cm) (Huchon, 1955).

3.1.3.3-Autres paramètres pédologiques

Afin de décrire au mieux le sol des stations d'étude, nous avons prélevé des échantillons au niveau de quelques points stratégiques dans chacune des deux stations afin de garantir que l'échantillonnage soit représentatif que possible. Il s'agit des prélèvements proches des pieds des arbres ou dans la surface de projection du houppier, autrement dit sous le couvert du houppier. Ces prélèvements du sol sont effectués à différentes profondeurs de 20 cm (0-20, 20-40, 40-60- 60-80 et 80-100cm) à l'aide d'une tarière pédologique à vis hélicoïdale de 20 cm. Les dates des différents prélèvements sont enregistrées afin de corréliser quelques paramètres pédologiques aux pluies (date et quantité).

Tous les échantillons du sol ont été mis dans des sachets en plastique fermés hermétiquement, étiquetés et ramenés au laboratoire.

-Humidité du sol (%): L'humidité du sol ou teneur en eau contenue dans le sol, détermine les caractéristiques de diffusion ou de stockage de l'eau dans ce sol. Il existe différentes techniques de mesure de l'humidité d'un sol:

Méthode gravimétrique Cette méthode consiste à sécher à l'air libre ou à passer dans un four à 105 °C pendant 24 heures, un échantillon de sol et connaître ensuite sa teneur par pesée finale. Ce poids ramené à la pesée initiale détermine le poids d'eau contenu par l'échantillon.

Humidimètres: Sur le marché, il existe plusieurs appareils qui mesurent l'humidité du sol qui utilisent des technologies diverses (capacimétrique sonde à neutrons, TDR (réflectométrie temporelle), conductivité électrique, ect.).

Certains de ces appareils restent particulièrement efficace mais chère et beaucoup trop réglementée (caractère radioactif du principe de l'appareil : Méthode par sonde à neutrons), d'autres très peu précises, et restent fortement influencées par la nature du sol et la salinité des sols (méthode par conductivité électrique), ou au volume d'influence limité (1 à 2 cm autour des pointes du capteur) et influencée par le type de sol, la température et la salinité (Méthode électromagnétique (mesure par capacimétrie ou permittivité diélectrique) (web1).

Dans nos conditions de travail, tous les échantillons prélevés du terrain ont été pesés le lendemain au laboratoire à l'aide une balance électronique (poids humide: Ph). Après, nous les avons soumis à un processus de dessèchement à l'aide d'une étuve à 70°C pendant 48h. Une fois desséché et sorti de l'étuve, les échantillons du sol ont été pesés de nouveau (poids sec: Ps). La différence de poids avant et après séchage indique le poids de l'eau. La teneur en eau du sol ou l'humidité du sol (Hs) se calcule par la formule suivante:

$$Hs (\%) = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100$$

En plus de la méthode gravimétrique, nous avons utilisé un humidimètre du sol qui nous permet de mesurer l'humidité directement sur terrain. Pour cela, nous avons rempli une bouteille en plastique, coupée presque à moitié, avec du sol extrait à la tarière à une profondeur donnée, et puis introduit la sonde de l'humidimètre dans le sol. La lecture est donnée immédiatement de l'Humidité, la température et le pH.

Il convient de noter qu'à chaque prélèvement du sol, nous avons déterminé avec précision la dernière pluie (date et hauteur) tombée dans la forêt afin de relier les résultats obtenus à ces 2 paramètres.

-Texture du sol: elle est déterminée partiellement avec un tamiseur pour quatre profondeurs: 0-20 cm, 20- 40 cm et 40-60 cm et 60-80cm. Au laboratoire, nous avons procédé au tamisage de la matière du sol sèche au moyen d'un tamiseur (CISA) ; ceci permet de séparer les particules du sol selon leur taille (graviers, sables, limons et argiles) :

Graviers	: > 2 mm
Sables grossiers et fins	: 2mm- 50 µm
Limon	: 50-2µm
Argile	: <2 µm

Cette méthode est très efficace pour les fractions grossières uniquement. Elle ne permet pas d'analyser les particules plus fines (limons et argiles) et déterminer par conséquent la texture exacte du sol. Cela doit être complétée avec la méthode de sédimentation à partir des différents éléments obtenus de la terre fine. Elle correspond aux constituants beaucoup inférieurs à 2 millimètres.

Dans notre cas, nous avons procédé au tamisage de tous les échantillons à travers 5 tamis de mailles: 5mm, 2mm, 1mm, 50 µm, 20 µm et 10 µm. Avant le tamisage, les échantillons ont été pesés avec une balance électronique de 0.001g de précision. Après une minute de tamisage (1mn – 10 mn), les échantillons récupérés de chaque tamis ont été récupérés et à nouveau pesés. Cependant, les fractions du sol des 2 derniers tamis (20 et 10 µm) ont été pesés ensemble.

Les résultats des différents pesés sont convertis en pourcentage par rapport au poids total initial.

-Taux d'éléments grossiers: également appelés **fragments grossiers** ou **éléments non fins**, ils ne participent pas directement à la texture du sol mais sa quantité dans le sol influence fortement ses propriétés notamment physiques (drainage, aération et température). Ils nous déterminent sa pierrosité et renseigne sur ses aptitudes de stockage de l'eau et le stress hydrique.

Ces éléments correspondent aux constituants minéraux du sol de diamètre supérieur à 2 millimètres. Ils sont déterminés des quantités d'échantillons récupérés à partir des tamis de 5mm et 2mm.

Selon le pourcentage d'éléments grossiers visibles, nous distinguons trois seuils qualitatifs d'effets sur le sol (Omanya and Pasternak, 2005; Schoeneberger et al., 2012; NRCS, 2024).

1-< 10 % : Présence faible: sol généralement de bonne capacité de rétention d'eau,

2-10–35 % : Présence modérée: impact modéré; baisse progressive de la réserve en eau,

3-> 35 % : Présence forte: sols dits *squelettiques*, très caillouteux ou pierreux

-Taux d'éléments fins.

Pour compléter la granulométrie de nos sols et donner un aperçu même partiel sur leur texture (sans fraction séparée des argiles et limons), nous avons analysé le reste des fractions du sol à savoir:

-Sables: à partir des échantillons récupérés des tamis de 1mm (sables grossiers) et 50 µm (sables fins)

-Limons et argiles: à partir des échantillons récupérés des tamis de 20 µm et 10 µm.

Ces deux fractions sont exprimées aussi en proportion par rapport à l'échantillon global.

- **Réserve utile (RU):** elle est définie comme la quantité d'eau accessible aux plantes dans le sol entre la capacité au champ (sol gorgé mais non saturé) et le point de flétrissement permanent (sol trop sec pour que les racines puissent extraire l'eau). Elle dépend: de la texture du sol (argile, limon, sable), de la profondeur explorée par les racines, et du taux d'éléments grossiers, qui réduisent le volume de sol capable de retenir l'eau.

Elle est obtenue par la formule suivante (CEREMA, 2013):

$$RU_{strate} = RU_f \times (1 - EG/100) \times H \text{ épaisseur exploitable (mm)}$$

Avec: RU_f: Réserve utile fine en eau, en mm/m (selon la texture de la strate), **EG :** Eléments grossiers exprimés en pourcentage (%) de la strate et **H :** Épaisseur exploitable : profondeur racinaire exploitable (m)

Les valeurs moyennes de RU_f (mm/m) selon la texture: 60 (sableux), 90 (Limonosableux), 120 (Limoneux) et 150 (Argilo-limoneux)

L'ensemble des valeurs des RU des strates est sommé pour chaque Unité typologique de sol (UTS):

$$RU_{UTS} = \Sigma (RU_{strate})$$

-pH et température du sol: ils sont fournis au moyen d'un humidimètre

3.1.4-Paramètres climatiques:

3.1.4.1- Caractérisation de la période de sécheresse: 2019-2024

Dans cette étude, nous avons caractérisé au mieux l'aléa climatique qui a régné dans la région durant les cinq dernières années. Cette analyse est déterminante car elle nous permet de mettre en évidence le rôle joué par le climat dans les circonstances sanitaires actuelles de la subéraie de Hafir.

Elle comprend les années de 2019 à 2024. Les paramètres climatiques retenus sont: i) la pluviométrie (mm): journalière, mensuelle et saisonnière), ii) températures (°C): minimale, moyenne et maximales: journalière et mensuelles.

Nous avons comptabilisé comme un "**jour de pluie**" lorsqu'il tombe **au moins 1 millimètre (mm)** de précipitations au cours de 24 heures. Ce seuil est une norme en climatologie couramment utilisée par les services météorologiques dans de nombreux pays (Douguedroit, 1987, Rivoire et al., 2019).

Les données climatiques sont récoltées à partir du site web (<https://www.msn.com/fr-fr/meteo/records>) de la localité d' Ain Ghoraba (zone très proche de Hafir) Il convient de signaler que la station météorologique la plus proche de notre zone d'étude à savoir El Mefrouch ne fonctionne plus et ce depuis plusieurs années.

3.1.4.2- Caractérisation climatique de l'année d'étude: 2024-2025

La caractérisation climatique de l'année d'étude est réalisée à partir des données relevées du même site web précédemment cité. Il s'agit d'une période de l'année hydrologique 2024-2025, allant de Septembre 2024 à la fin mai 2025.

3.2-Caractérisation forestière des stations

Elle comprend plusieurs paramètres qui nous permettent de décrire la structure forestière, le type de peuplement, densité du peuplement, importance du sous-bois, ect.

3.2.1-Densité du peuplement (Dp)

La densité est un descripteur de base de l'état de peuplement d'un site; elle reflète le degré de compétition entre les arbres vers l'eau, les éléments minéraux et la lumière (Rondeux, 1999). Elle a été déterminée en divisant le nombre total d'arbres dans la station par la surface de la station exprimée en hectare.

En fonction du nombre d'arbres et la surface d'échantillonnage, la densité est calculée à partir de la formule suivante:

$$Dp=N/S=\sum ni/ha$$

où N: nombre total d'arbres-échantillons et S: surface de la station

En fonction de la densité ainsi obtenue, le peuplement est réparti entre 5 classes suivantes

Classe 5: Peuplement très dense: > 400 arbres ha^{-1} ;
Classe 4: Peuplement dense: $300 \leq Dp < 400$ arbres ha^{-1} ;
Classe 3: Peuplement moyennement dense: $200 \leq Dp < 300$ arbres ha^{-1} ;
Classe 2: Peuplement clair: $100 \leq Dp < 200$ arbres ha^{-1}
Classe 1: Peuplement très clair: $Dp \leq 100$ arbres ha^{-1}

3.2.2-Structure du peuplement

La structure du peuplement est déterminée à partir de la répartition par hectare des arbres entre cinq catégories de bois selon le diamètre sous écorce. Il s'agit de (IML, 2016):

P: Perchis ($7,5 < \emptyset < 17,5$ cm), PB: Petit bois ($17,5 < \emptyset < 27,5$ cm), BM: Bois moyen ($27,5 < \emptyset < 42,5$ cm), GB: Gros bois ($42,5 < \emptyset < 62,5$ cm) et TGB: Très gros bois ($\emptyset > 62,5$ cm).

3.2.3-Relevés végétatifs et recouvrement du sous-bois

La connaissance de l'abondance de la végétation accompagnatrice du chêne liège (c'est-à-dire le sous-bois) s'avère indispensable car elle nous renseigne sur la dynamique de la végétation (Tekkouk, 2022) mais aussi son comportement vis-à-vis des conditions climatiques défavorables qu'a sévi la région au cours de ces dernières années. Il s'agit d'étudier la structure horizontale de ce sous-bois qui rend compte de la répartition des individus de chaque espèce végétale dans le plan de la station. Cette Distribution horizontale, exprime en fait le taux de recouvrement des plantes (ligneuses, semi ligneuses et vivaces) accompagnatrices du chêne liège par rapport à la surface de la station. Les plantes annuelles ne sont pas prises en considération.

L'échelle utilisée est estimée à l'aide des notes croissantes de Braun –Blanquet (1928): 1 ($< 5\%$: recouvrement très faible), 2 (6-25%: recouvrement faible), 3 (26-50% recouvrement moyen), 4 (51-75: recouvrement fort) et 5 ($> 75\%$: recouvrement très fort).

4-Données des arbres

Plusieurs paramètres à l'échelle de l'arbre-échantillon ont été relevés. Il s'agit de:

4.1-Relevés dendrométriques

Les arbres retenus au sein des unités d'échantillonnage ont fait l'objet de mesures dendrométriques. Elles permettent souvent de déterminer la fertilité des stations (indice de fertilité; Paulo et al., 2014) par la qualité de la croissance des arbres. Elles incluent la circonférence à 1,30 mètre du sol et la hauteur totale.

4.1.1-Circonférence sur écorce (C): c'est une circonférence externe mesurée sur la croûte du liège à 1.30 m du sol à l'aide d'un mètre ruban. A partir de ces mesures, le diamètre interne ou de bois de chaque arbre est déterminé à partir de la formule suivante (Saccardy, 1937) et illustrée dans la figure 25.

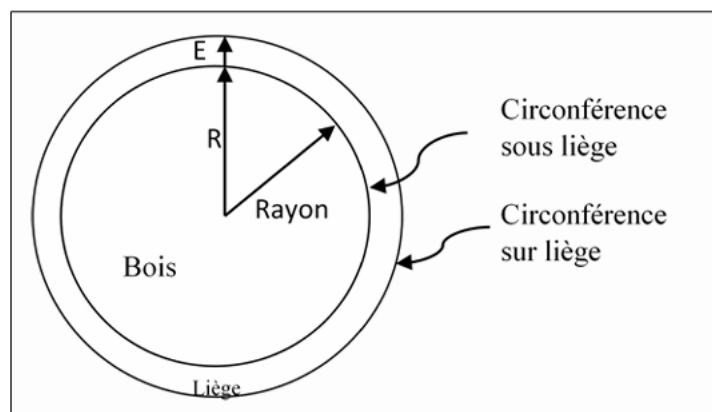


Figure 25: Circonférence sur liège et sous liège dans une section transversale d'une tige

$$\text{Circonférence sur liège} = \text{Circonférence sous liège} + (2\pi * E)$$

Le diamètre (D: cm) du bois est déterminé donc par la formule suivante:

$$D = \frac{C_{ext} - 2\pi E}{\pi}$$

Avec C_{ext} : Circonférence externe sur écorce (cm) prise à 1.30m du sol, E : épaisseur du liège (cm)

Les différentes mesures de diamètre du tronc (cm) sont réparties en classes de 10cm pour déterminer la structure diamétrale du peuplement et en type de bois (Cf 3.2.2) pour terminer la structure du peuplement.

4.1.2-Hauteur totale (Ht)

La hauteur totale de l'arbre est définie comme étant la distance verticale séparant le pied de l'arbre et son bourgeon terminal (Marchal et Rondeux, 1995). Elle est mesurée pour chaque sujet sélectionné dans la station à l'aide d'un Dendromètre Blûme-Leiss.

Les différentes mesures ainsi obtenues sont réparties en quatre classes suivantes: C11: <5m, C12: 6-7m, C13: 7-9m et C14 : >10m

Ainsi la structure verticale d'un peuplement forestier est caractérisée par des étages de végétation, reflétant la variation de la croissance en hauteur des arbres. La position sociale d'un arbre au sein du peuplement, déterminée par sa hauteur et son développement, influence ses chances de croissance et sa capacité à accéder aux ressources (Boudru, 1989; Gaudin, 1997).

On distingue plusieurs classes sociales ou dominance (Dm) (Naggar,2021):

- ✓ C11: **Dominant**: Arbre dont la cime atteint la partie supérieure du couvert, présentant une bonne croissance en hauteur et un houppier symétrique.
- ✓ C12: **Codominant**: Arbre dont la cime atteint la partie supérieure du couvert, mais dont l'extension du houppier est asymétrique, indiquant une vigueur et un équilibre moindres que le dominant.
- ✓ C13: **Dominé**: Arbre dont la cime n'est plus en contact avec la strate principale du peuplement, son sommet étant surpassé par une branche d'un autre arbre.

4.2-Relevés d'exploitation

Ce sont des paramètres liés à la dernière exploitation du liège. Ils permettent de décrire la qualité de la dernière exploitation du liège. Il s'agit des mesures de l'épaisseur du liège (E: mm) et la hauteur d'écorçage (Hd: cm).

4.2.1-Epaisseur du liège

Elle correspond à la moyenne des mesures effectuées sur quatre directions du tronc à l'aide d'une jauge à écorce. La mesure est faite à une hauteur de 1.30 m du sol (Massenet, 2010). Les différents lièges sont classés en catégories selon leur épaisseur atteinte cette année. En général, les couches du liège, en fin de cycle de production, sont réparties en 5 classes (Pereira, 2007) (Tab.12).

Tableau 12: Différentes classes de l'épaisseur du liège (Pereira, 2007)

Classes	Epaisseur du liège
Flotte	< 22mm
Mince	22-27 mm
Juste	27-32 mm
Régulier	32-40 mm
Epais	> 40 mm

4.2.2-Hauteur d'écorçage et coefficient d'écorçage

La hauteur d'écorçage est mesurée à l'aide d'un ruban mètre, ; du collet jusqu'à la partie visible de la dernière exploitation du liège. Ce paramètre permet de déterminer le coefficient d'écorçage « Ce » calculé à partir de la formule suivante (Boudy, 1950; Natividade, 1956) :

$$Ce = \text{Hauteur d'écorçage} / \text{Circonférence sur liège à 1.30m}$$

Il est fixé en 3 catégories selon les conditions de végétation (Saccardy, 1937 et Natividade 1956):

- ✓ 1.5 pour un arbre de végétation médiocre;
- ✓ 2 pour un arbre de végétation moyenne ou normal,
- ✓ 2.5 pour un arbre de végétation vigoureuse.

Selon les normes de la DGF, le C_e est fixé à toujours 2 quel que soit l'état de vigueur des arbres. Les différentes mesures des épaisseurs sont réparties donc entre 3 catégories de qualité de récolte

1- $C_e < 2$: récolte non rentable (sous-exploitation), 2- C_e : 2-2.5: récolte rentable, 3- > 2.5 récolte excessive (sur exploitation)

Ce paramètre nous permet d'évaluer la qualité de la dernière récolte, rentable ou non. Les dates de la dernière exploitation du liège des 2 stations sont tirées des archives forestières comme la carte établie par Dahmani (Conservation des forêts de Tlemcen: com. pers.). Elles permettent de déterminer l'âge du liège et la vitesse moyenne des accroissements annuels du liège.

5-Relevés sanitaires des arbres

Cette étude se concentre sur l'évaluation de l'état sanitaire des arbres impacté par la sécheresse, l'exposition des arbres affectés aux ravageurs de faiblesse, la description de la réponse adaptative des arbres et leur stratégie de gestion de consommation l'eau du sol.

La notation sanitaire des arbres, la description architecturale et la caractérisation symptomatologique de dépérissement se sont basées donc sur une combinaison de méthodes déjà utilisées dans les études sanitaires des arbres forestiers. On cite les méthodes ARCHI et DEPEFEU ou le réseau CEE (DSF, 1991; CRPFC, 2014).

La méthode ARCHI (CRPFC, 2014): cette méthode ARCHI repose sur une **analyse architecturale** du houppier de l'arbre qui renseigne sur son état physiologique mais ne renseigne ni sur les causes du dépérissement qu'ils soient biotiques ou abiotiques, ni sur les raisons des comportements individuels des arbres liés à l'âge ou encore à la sylviculture pratiquée par exemple. Il existe plusieurs types ARCHI basés sur plusieurs paramètres: la concurrence du houppier (moitié supérieure ou entier), le contour du houppier hors concurrence, les unités architecturales sommitales, etc. cette méthode est plus utilisée dans des conditions non soumises à des conditions climatiques extrêmes.

La méthode DEPEFEU (CRPFC, 2014): Elle repose sur **le déficit foliaire** principal facteur retenu pour caractériser l'état sanitaire des arbres. Ce critère repose sur le principe de l'appréciation depuis le sol d'un manque de surface foliaire par rapport à l'arbre de référence qui est à 0 % de déficit.

5.1-Méthode d'observation et d'examen sanitaire des arbres

La méthode ainsi utilisée consiste essentiellement à des observations faites sur l'architecture de l'arbre et de ses différentes parties. Elle repose alors sur l'examen de l'état du houppier des arbres (ramification, architecture, ect.) du tronc et branches et des rameaux des feuilles.

5.1.1-Examen de la cime (Houppier)

L'examen de la cime ou de l'état des houppiers est essentiel dans l'évaluation des écosystèmes forestiers, car il représente souvent le critère le plus pertinent, voire le seul, pour analyser la santé des forêts (Becker, 1987). L'analyse des structures apicales a consisté en la recherche de symptômes et signes de déclin, tels que la décoloration anormale du feuillage, le dessèchement des feuilles, la perte de feuilles et les infestations d'insectes (Garrec et al., 1991).

5.1.1.1-Chronologie des observations

Le chêne liège est un arbre sclérophylle sempervirent c'est-à-dire que sa cime reste toute l'année recouverte de feuilles. Ceci nous permet de faire les observations presque toute l'année (sauf en printemps qui coïncide avec la saison de feuillaison).

Dans nos conditions d'étude, les premières observations et prélèvement des échantillons ont été réalisées en hiver à partir du mois de février 2025 pour évaluer l'état des arbres et peuplements du chêne-liège. Ces observations ont permis de dresser un premier bilan de la santé de l'espèce.

Par la suite, d'autres observations ont été effectuées à la fin du mois d'avril et au début du mois de mai 2025, afin d'enregistrer les premiers éléments phénologiques des arbres à savoir le débourrement, la feuillaison et la floraison.

L'objectif principal de cette observation est d'apprécier la réponse des arbres surtout stressés aux conditions climatiques relativement améliorées dont la pluviométrie. Ce suivi est crucial pour confirmer ou affirmer le dépérissement noté en 2024. Il repose donc sur l'identification des nouvelles repousses et évaluer la dynamique de l'espèce de l'année 2025.

5.1.1.2-Conduite des observations

Dans cette étude, nous avons pris en compte plusieurs paramètres qui nous permettent d'évaluer l'état de la cime des arbres. Elle repose sur le principe de l'appréciation depuis le sol d'un manque de surface foliaire par rapport à l'arbre de référence supposé sain.

1-Déficit foliaire (DF) ou perte foliaire: c'est le principal critère employé pour caractériser l'état sanitaire des arbres (LANDMANN, 1988). Il est combiné secondairement à la décoloration ou la coloration anormale du feuillage (BONNEAU et LANDAMANN, 1988). Ce sont deux descripteurs considérés comme des indicateurs plutôt que de véritables mesures de la vitalité de l'arbre. Ils permettent d'évaluer la présence de conditions favorables ou non favorables de l'activité physiologique des arbres. Ils ont l'avantage principal de pouvoir être répétés plusieurs fois sur le même arbre sans les endommager.

Le déficit foliaire est évalué par rapport à un arbre de référence qui est à 0% de déficit (CRPFC, 2014) ou inférieur à 25% (Bouhraoua, 2003). C'est un arbre à morphologie, architecture et densité foliaire normales placé dans des conditions stationnelles connues

sur le climatiques, pédologique et sylvicoles similaires à celles de l'ensemble du peuplement étudié. Dans nos conditions, nous avons identifié deux arbres de référence dans la première station et deux autres dans la seconde.

Cependant, la sénescence foliaire est caractérisée par la mort des feuilles encore attachées à l'arbre; elle se traduit par une perte progressive de la matière foliaire. Ce processus de dessèchement constitue une perte foliaire potentielle, conduisant à la notion de déficit foliaire. Ce dernier, dans le contexte de cette étude, intègre l'estimation de la perte foliaire et de la sénescence foliaire (Naggar,2021).

L'évaluation du déficit foliaire, exprimée en pourcentage, s'effectue par l'examen de la couronne de l'arbre, divisée en quatre zones homogènes (Fig.26).

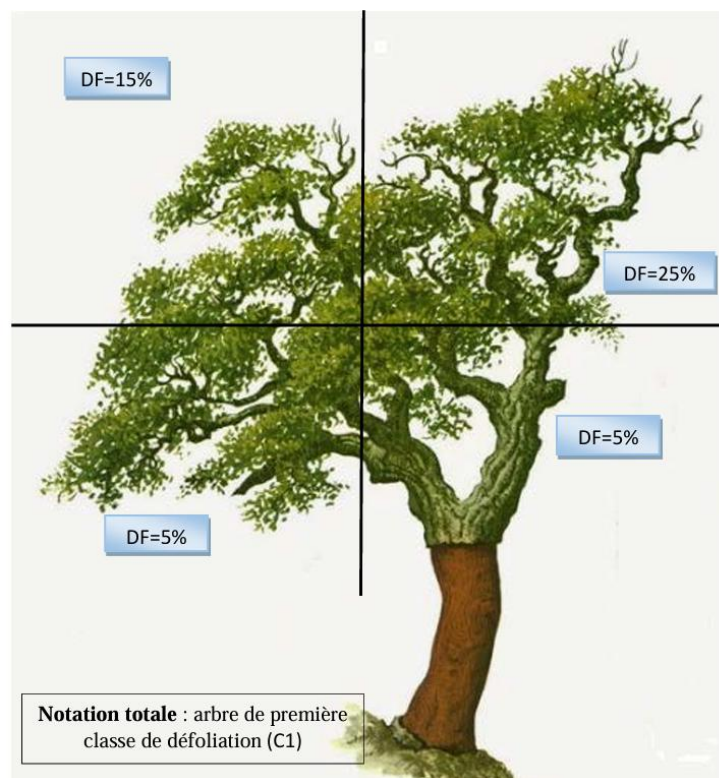


Figure 26: Protocole de notation de déficit foliaire d'un chêne liège (Naggar, 2021).

Les données obtenues sont regroupées en quatre classes distinctes de déficit foliaire, conformément aux travaux de (D.S.F, 1991; Nageleisen, 2002 ; Bouhraoua,2003). Ces classes sont détaillées dans le tableau 13 suivant:

Dans notre cas, nous avons distingué quatre classes de déficit foliaire dont chacune traduit une situation sanitaire particulière. Nous considérons qu'une perte foliaire allant jusqu'à 25% est un seuil facilement évalué à l'œil nu; il peut être dû uniquement à des phénomènes naturels.

Tableau 13: Classes de notation de déficits foliaires des arbres

Classes	Proportions de feuillage affecté	Signification des classes	Catégories sanitaires
1	<25%	Arbre non défolié ou faiblement défolié	Arbre sain
2	30–60%	Arbre modérément défolié	Arbre affaibli
3	65–95%	Arbre fortement défolié ou dépérissant	Arbre dépérissant
4	Mort	Arbre mort ou sec	Arbre mort

La seconde catégorie contient les arbres affaiblis, qui sont moins atteints et correspond à la classe d'alerte. C'est à partir de la troisième classe que les sujets sont qualifiés de gravement atteints ou dépérissants, correspondant à un seuil d'irréversibilité selon BONNEAU et LANDMANN (1988).

Les arbres appartiennent à la classe 2 et au-delà sont considérés comme « atteints » (Bouhraoua, 2003).

2-Indice de santé (IS): C'est une mesure quantitative qui reflète l'état de santé global d'une population d'arbres en considérant l'état individuel de chaque arbre. Développé initialement pour les peuplements de sapins et d'épicéas, Bouhraoua (2003), Bouhraoua et al. (2002), Bouhraoua et Villemant (2005) et Naggar et al. (2019), ont adapté la formule proposée par Bouvarel (1984) pour le chêne liège. L'IS est calculé comme suit:

$$IS = \frac{(n_1 \cdot P_1) + (n_2 \cdot P_2) + (n_3 \cdot P_3) + (n_4 \cdot P_4) + (n_5 \cdot P_5)}{N}$$

n_i : Nombre d'arbres de la classe i

P_i : Poids de la classe i (1 si $i=1$, 2 si $i=2$ etc.)

N : Effectif total d'arbres observés dans la station

Selon les valeurs de cet indice, la santé du peuplement est classée en trois catégories sanitaires (Bouhraoua et Villemant, 2005): 1: $IS < 1.5$ (peuplement sain), 2: $1.6 < IS < 2.0$ (peuplement affaibli ou en début de dépérissement), 3 : $2.1 < IS < 2.5$ (peuplement en dépérissement assez grave) et 4 : $IS > 2.5$ (peuplement en dépérissement grave).

3-Autres paramètres sanitaires

Plusieurs autres paramètres sanitaires et architecturaux sont employés pour évaluer l'état architectural des arbres avant la période climatique défavorable. Ils décrivent en partie l'historique des arbres avant l'évènement climatique. D'autres paramètres complètent et consolident d'avantage l'appréciation de vigueur des arbres.

Lors de la notation d'un arbre, la moitié supérieure du houppier qui est prise en compte et observée. C'est la partie du houppier la plus active, ayant un certain recul par rapport au reste du pied de l'arbre. Nous avons décrit alors l'aspect du houppier en attribuant à chaque paramètre ou variable une note d'intensité qualitative (échelles nominale ou binaire et ordinale) ou une classe d'intensité quantitative (échelle par intervalles: tranches en pourcentage) (Stafford et Bodson, 2006). Les classes sont comprises généralement entre 0 et 4. Le tableau 14 suivant consigne les différentes variables avec leur échelle de mesure. Cet ensemble de paramètres est tiré de différentes méthodes d'évaluation sanitaire des arbres forestiers dont le chêne liège (DSF, 1991, CRPFC, 2014).

Tableau 14: Autres paramètres sanitaires et architecturaux pris en compte

Paramètre/Variables	Code	Classes ou notes et leur signification
Mortalité des branches	MB	0 : nulle (0%) , 1 : faible (25%) , 2 : moyen (<50%) , 3 : forte (<75%) , 4 : très forte (>75%)
Mortalité des rameaux	MR	0 : non (0%) , 1 : faible (25%) , 2 : moyenne (<50%) , 3 : forte (<75%) , 4 : très forte (>75%)
Transparence*	TR	0 : nulle (0%) , 1 : faible (<25%) , 2 : moyenne (25-50%) , 3 : forte (50-75%) , 4 : très forte (>75%)
Perte de ramification avant période de stress climatique	PR	0 : nulle (0%) , 1 : faible (<25%) , 2 : moyenne (<50%) , 3 : forte (<75%) , 4 : très forte (>75%)
Rameau aux bourgeons ou nu	RB	0 : nul (0%) , 1 : faible (<25%) , 2 : moyen (25-50%) , 3 : fort (50-75%) , 4 : très fort (>75%)
Rameau feuillé	RF	0 : nul (0%) , 1 : faible (<25%) , 2 : moyen (25-50%) , 3 : fort (50-75%) , 4 : très fort (>75%)
Combinaison des classes des deux types de rameaux	RB-RF	1-RB ₀ -RF ₄ ; 2-RB ₁ -RF ₃ ; 3-RB ₂ -RF ₂ ; 4-RB ₃ -RF ₁ ; 5-RB ₄ -RF ₀
Taille des feuilles sur le houppier	%	Très petites feuilles (TPF), petites (FP), feuille moyenne (FM), grandes feuilles (FG) et très grandes feuilles (TGF)
Evolution de la ramification		Echancrures (Ech : 0 non, 1 : oui), Fenêtres (Fn : 0 non, 1 : oui)
Visibilité du squelette de l'arbre		0 : Non, 1 : partielle, 2 : totale ou entière
Hors Concurrence	HC	0 : nulle (0%) , 1 : faible (25%) , 2 : moyenne (50%) , 3 : forte (75%) , 4 : très forte (>75%)

*Différentes classes sont illustrées dans la **figure 27**

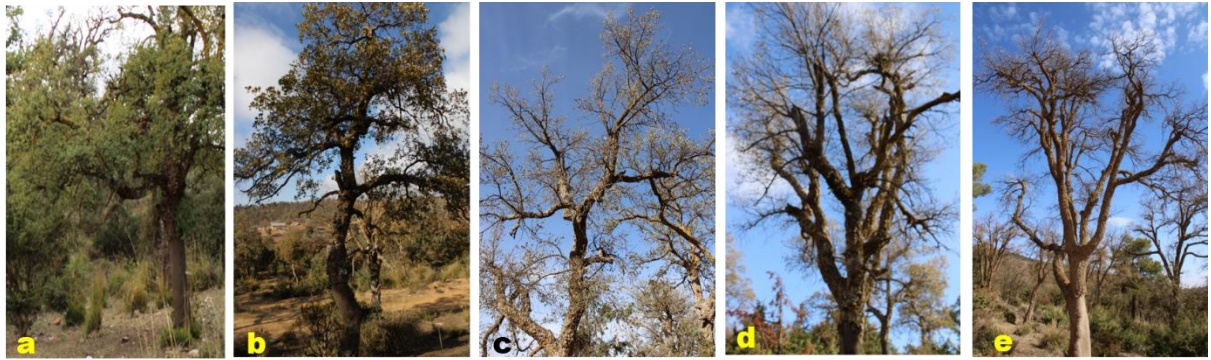


Figure 27: Différentes classes de transparence du houppier: a (nulle), b(faible), c (moyenne), d (forte) et e (très forte) (Photos originales, février 2025)

La majorité de ces descripteurs nous permettra d'expliquer l'indicateur important « *déficit foliaire* » qui peut être induit par plusieurs phénomènes comme la réduction de la croissance en longueur des pousses, la mortalité des rameaux et des branches et la réduction de la ramification fine. Cette dernière peut évoluer en fenêtré et en échancrure dans le houppier (Fig.28).



Fenêtré

Échancrure

Rameaux et branches mortes

Figure 28 : Réduction de la ramification fine dans trois houppiers de chênes lièges (CRPFC, 2014)

En plus, les paramètres descriptifs comme MR, MB, PR, RF et RB nous permettent d'évaluer la visibilité du squelette de l'arbre (absente, partielle ou entière) et d'apprécier par conséquent son architecture.

En ce qui concerne la transparence, quatre classes ont été distinguées, allant de zéro à quatre. La première classe indique une transparence nulle ce qui signifie que l'arbre conserve largement sa masse foliaire. La deuxième classe présente une faible transparence, avec une perte modérée de la masse foliaire. Les deux dernières classes, quant à elles, indiquent une perte foliaire forte et très forte.

Pour le paramètre hors concurrence, il est évalué sur les 4 directions de la moitié supérieure du houppier par rapport aux arbres voisins. Il est noté selon que le houppier soit concurrencé (en contact avec le houppier voisin) sur une, deux, trois ou quatre directions.

5.1.2-Examen du tronc

Chaque tronc d'arbre-échantillon a fait l'objet d'un examen visuel basé sur un ensemble de paramètres déjà utilisés dans le cadre d'évaluation sanitaire (Bouhraoua, 2003, Tekkouk, 2022, Tekkouk et Bouhraoua, 2022), dont la plupart ont été mesurés et enregistrés sous forme de données quantitatives. Le tableau 15 résume les principaux descripteurs utilisés dans cette analyse et la figure 29 illustre cet état de tronc. Ces descripteurs portent principalement sur l'état de la surface du tronc, l'observation de l'écorce et parfois de la zone sous-corticale, ainsi que la recherche de traces d'insectes xylophages et de champignons trachéomycoses.

Tableau 15: Différents descripteurs utilisés dans l'examen du tronc

Descripteurs	Notes	Signification des notes
Présence de crevasses	0 - 3	0 (aucune), 1 (faible : 1-10 % de surface crevassée), 2 (moyenne : 11-25%), 3 (forte : > 25%)
Trous d'insectes xylophages	0 - 1	0 (absence), 1 (présence)
Attaque de <i>Platypus cylindrus</i> (Pc)	0 - 1	0 (absence), 1 (présence)
Croûtes charbonneuses charbon de la mère	0 - 1	0 (absence), 1 (présence)
Autres anomalies	0 - 1	0 (absence), 1 (présence)

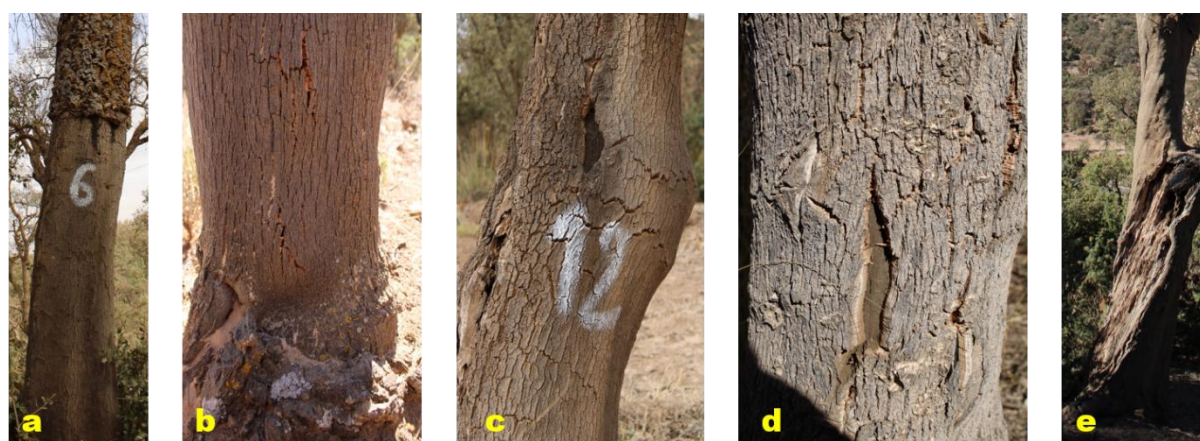


Figure 29: Différents états de tronc du chêne liège: a (sain), b (sciure xylophage au collet), c (légèrement crevas), d (présence de charbon de la mère) et e (sévèrement crevassé)

(Photos originales, octobre 2024)

L'évaluation de l'état du tronc repose principalement sur deux indicateurs clés qui reflètent la santé des arbres à savoir la présence de crevasses et l'activité des ravageurs xylophages.

La présence de crevasses correspond à des pertes de bois; elle a été évaluée en fonction de leur proportion par rapport au volume total du tronc dont sa hauteur est limitée au fût. Un tronc est considéré sain (sans crevasse) ou altéré (avec crevasse). Il est considéré fortement crevassé lorsqu'il perd plus de 25% de son volume (Bouhraoua, 2003).

L'examen minutieux de la surface corticale (liégeuse) permet de détecter des traces d'infestations de xylophages, tels que les orifices de sortie ou de pénétration, la sciure du bois, ainsi que des écoulements de nature variée. Dans notre cas, l'activité du Platype *Platypus cylindrus* est mis en évidence par la présence de sciure de bois rejeté à l'extérieure au niveau du collet et le long du tronc (Fig. 29b).

La présence de nécroses et de croûtes charbonneuses d'origine fongique (charbon de la mère), localisées dans les anfractuosités, est également révélatrice de l'état physiologique de l'arbre.

Sur le tronc, les observations sont complétées au niveau de son collet par la notation des racines superficielles. C'est un paramètre qui nous renseigne sur l'aptitude de l'arbre à épuiser de l'eau au niveau des couches superficielles du sol. Nous avons opté à la notation binaire: 1- présence des racines observées à la surface du sol sur au moins un côté; 0-Pas de racines superficielles (Fig.30)



Figure 30: Observation des racines superficielles des arbres : gauche (présence de racines) et droite (pas de racines) (photos originales, février 2025)

5.1.3-Prélèvement et Examen des rameaux:

Cet examen du prêt des rameaux nécessite l'utilisation de plusieurs méthodes d'observation et de recherche, tant sur le terrain qu'en laboratoire. Pour cela, en hiver 2025 (février-mars), nous avons procédé aux prélèvements des échantillons de rameaux pris de préférence au milieu du houppier. A défaut d'atteindre ce niveau du houppier (tronc élevé et donc houppier plus haut), nous avons été contraint de prélever les échantillons au niveau du tiers inférieure de la frondaison de l'arbre. L'échantillonnage a été effectué dans les deux placettes en utilisant un sécateur télescopique (Fig.31).



Figure 31: Méthode de prélèvement des échantillons de rameaux des arbres (photos originales)

L'objectif de cette méthode est de prélever des échantillons de tous les arbres retenus dans l'étude indépendamment de leur état de santé sauf ceux qui ont montré des symptômes de mortalité. Cette catégorie d'arbres a été donc exclue de l'échantillonnage. Au total, 61 échantillons ont été prélevés ce qui représente près de 70% du total des arbres-échantillons. Ils sont répartis entre 44 échantillons provenant de la station 1 et 17 échantillons de la seconde station. En plus, nous avons examiné des échantillons provenant de 2 arbres de référence sains.

Les différents échantillons ont été mis dans des sachets en plastique dans lesquels on a enregistré le numéro de l'arbre et la placette. L'ensemble des échantillons ont été par la suite ramenés au laboratoire pour des analyses ultérieures. Afin d'éviter toute déshydratation et dessèchement des échantillons et garder surtout les rameaux feuillés dans leur état frais jusqu'aux observations, ils ont été mis dans un frigo-congélateur.

Au niveau du laboratoire, chaque échantillon (fig.32) ainsi prélevé a fait l'objet de plusieurs paramètres de mesures et observations. Tous les échantillons ont été répartis en deux lots:

- ✓ Lot contenant des rameaux nus sans feuillage (sans pousses)
- ✓ Lot contenant des rameaux feuillés ou avec des pousses



Figure 32: Différents échantillons de rameaux prélevés des arbres: a-b (rameaux nus non feuillés), c-d (rameaux feuillés) (Photos originales)

5.1.3.1-Rameaux non feuillés

Les échantillons non feuillés ou les rameaux nus ont fait l'objet de plusieurs mesures et observations suivantes au laboratoire:

- Longueur des rameaux portant les bourgeons avec détermination approximative de l'âge du rameau long (antérieure à 2024),
- Dénombrement de tous les bourgeons axillaires (BA) et terminaux (BT) contenus sur les rameaux,
- Etat de débourrement des bourgeons: non débourrés (ND: écailles encore fermés) ou en début de débourrement (DD: début ouverture de écailles) (Fig.33).
- Etat physiologique des bourgeons: vivant ou mort (desséché), il concerne plus les bourgeons terminaux (BTM),



Figure 33: Etat des bourgeons en début débourrement: A (bourgeons terminaux avec les yeux latéraux) et B (bourgeons axillaires) (Photos originales, loupe binoculaire février 2025)

L'ensemble des observations sur l'état de débourrement des bourgeons ainsi présents sur les rameaux sont rapportés au total de bourgeons observés et dénombrés. Les résultats obtenus sont répartis en six classes selon le taux de débourrement (ND, DD): cl0 (0%); cl1 (<25%), cl2 (25-50%), cl3 (50-75%), cl 4 (>75%) et cl4 (100%) (Tab.16).

Tableau 16: Différentes classes d'arbres selon l'état de débourrement des bourgeons des rameaux nus: Cas des bourgeons non débourrés (ND) et leur signification correspondante

classe	%	Signification des classes
0	0	Pas de bourgeons non débourrés : tous les bourgeons ont débourrée
1	25	Faible présence bourgeons non débourrés : près de 25% des bourgeons n'ayant pas
2	50	Présence moyenne de bourgeons non débourrés : près de 30-50% des bourgeons ayant débourré
3	75	Forte présence de bourgeons non débourrés : près de 60-75% des bourgeons n'ayant pas débourré,
4	>75	Très forte présence de bourgeons non débourrés : >75% des bourgeons n'ayant pas débourré, rameau presque nu
5	100	Tous les bourgeons non débourrés : aucun bourgeon débourré ,

La même méthode a été utilisée pour caractériser les bourgeons observés ayant resté en début de débourrement (Tab.17).

Tableau 17: Différentes classes d'arbres selon l'état de débourrement des bourgeons: cas des bourgeons restés en état de début débourrement (DD) et leur signification

classes	%	Signification des classes
1	25	Début débourrement faible : près de 25% des bourgeons sont restés en début débourrement
2	50	Début débourrement moyen : la moitié des bourgeons sont restés en début débourrement
3	75	Début débourrement fort : près de 75% des bourgeons n'ont pas donné de pousse
4	>75	Début débourrement très fort : >75% des bourgeons débourrés mais restés en stade ouverture des écailles, rameau visiblement presque nu
5	100	Début débourrement total: aucun bourgeon débourré n' a donné de pousses , rameau visiblement nu

Il est à noter qu'on peut trouver sur le même rameau, les deux états de débourrement des bourgeons.

5.1.3.2-Rameaux feuillés

Nous considérons les rameaux feuillés, ceux qui portent des jeunes pousses formées en printemps 2024 après un débourrement complet des bourgeons (axillaire et terminal) (Fig.34).

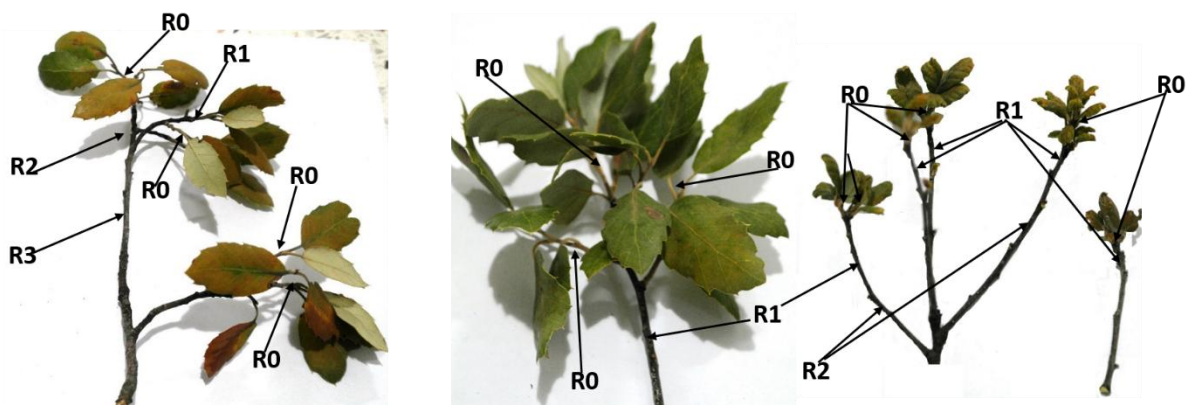


Figure 34. Vue générale sur les rameaux feuillés (pousses formées en printemps 2024: photos originales)

L'ensemble des observations des rameaux avec pousses émises partir des bourgeons sont rapportés aussi au total de bourgeons observés et dénombrés. Il s'agit donc des bourgeons débourrés (exceptés les bourgeons non débourrés et en début débourement). Les résultats obtenus sont répartis en cinq classes de rameaux feuillés à partir des bourgeons terminaux (Btd) et bourgeons axillaires débourrés (Bad): c10 (0%); c11 (<25%), c12 (25-50%), c13 (50-75%), et c14 (>75%) (Tab.18).

Tableau 18: Différentes classes d'arbres selon l'importance des bourgeons débourrés (Bd) et signification des rameaux feuillés

classes	%	Signification des classes
0	0	Pas de pousses : rameaux complètement nus constitués que de bourgeons non débourrée (Bnd) ou en début de débourement (Bdd) ou bourgeons morts (Bm)
1	25	Pousses peu présentes: rameaux avec près de 25% de pousses et rameaux faiblement feuillés ou fortement nus.
2	50	Pousses moins abondantes : rameaux avec près de 50% de pousses ; rameaux partiellement feuillés ou partiellement nus
3	75	Pousses abondantes : rameaux avec près de 75% de de pousses , rameaux feuillés ,
4	>75	Pousses très abondantes : rameaux avec plus de 75% de pousses, rameaux très feuillés

L'ensemble des rameaux feuillés échantillonnés ont fait l'objet de plusieurs observations et mesures à savoir:

-**Mesure de la longueur des rameaux:** Concernant cette mesure, nous avons analysé la ramification des échantillons en distinguant selon leur âge, les rameaux court de l'année en cours et ceux longs des années précédentes.

-les rameaux courts ou pousses de l'année en cours (R0) issus des bourgeons axillaires (R0Ba) ou terminaux (R0Bt),

-les rameaux de l'année 2023 (R1),

-les rameaux des années antérieures à 2023 (R2: 2022, R3: 2021),

La distinction entre les rameaux de l'année de ceux des années antérieures se base sur la couleur, la pubescence et l'apparition de la première enveloppe protectrice (Cf chap. III 3.3). En général, les jeunes rameaux de l'année sont vert-gris à gris clair ou blanchâtres et densément poilus.

-**Comptage du nombre de feuilles** présentes sur chaque pousse,

- **Types de développement des feuilles** sur les pousses: Feuilles en paquets ou séparées,

-Mesure de la taille des feuilles: longueur (L :mm) et largeur (l :mm), ceci nous permet de calculer la surface foliaire de chaque feuille (SF : mm²). La méthode utilisée consiste à enlever toutes les feuilles présentes sur toutes les pousses issues des bourgeons axillaire ou terminal, formées cette année (2024) ou l'année passée (2023) puis les mettre dans un sachet. Selon le nombre de feuilles récoltées de chaque rameau-échantillon, 30 feuilles au maximum ont été tirés au hasard du sachet. Elles font l'objet de mesures de leur taille (Longueur, Largeur et Surface).

Sur la base des résultats de mesure, les feuilles sont classées, selon leur longueur et surface foliaire, en cinq catégories de feuilles consignées dans le tableau 19 et illustrés dans la figure 35. Chaque catégorie marque donc une taille spécifique par rapport à la norme (feuille issue d'un arbre sain).

Tableau 19: Différentes catégories de taille des feuilles

Catégories de taille foliaire	Code	Classe longueur (surface foliaire)
Feuille de très petite taille	TPF	<1,5 cm (<2cm ²)
Feuille de petite taille	PF	1,6 - 2,2 cm (1.8-3.7cm ²)
Feuille de taille moyenne	FM	2,3 - 2,8 cm (3.1-4.8cm ²)
Feuille de grande taille	GF	2,9 - 3,5 cm (5.6-6.9cm ²)
Feuilles de très grande taille	TGF	>3,5 cm (>7.5cm ²)



Figure 35: Catégories de taille des feuilles (photos originales)

-Qualité de feuillaison des arbres: elle est appréciée à partir des différentes proportions calculées des 5 catégories foliaires. Il convient de signaler que les feuilles âgées de plus d'une année (issues en 2023) ont été enregistrées et prises séparément dans l'interprétation des résultats.

5.2-Méthode d'observation de suivi de l'état sanitaire des arbres

L'état sanitaire des arbres évalués pour la saison végétative de 2024 a été suivi pour la saison végétative suivante. Pour cela, nous avons réalisé des observations en début du mois de mai 2025 sur tous les arbres des deux stations d'étude. C'est une période qui coïncide avec la reprise végétative des arbres caractérisée par la formation de nouvelles feuilles ou feuillaison. Un seul critère sanitaire a été retenu à savoir l'importance du démarrage de la feuillaison par débourrement des bourgeons. Ce critère a été évalué en

six classes de reprise suivantes (Tab.20). L'objectif de ces observations est d'évaluer le début de la réponse des arbres à l'amélioration pluviométrique enregistrée au cours de cette année hydrologique.

Tableau 20: Classes de Feuillaison (Fs) des arbres en mai 2025

Classe	Taux reprise	Signification des classes
0	0%	Pas encore de débourrement ou de feuillaison
1	<10%	Début feuillaison très faible
2	10-25%	Début feuillaison faible
3	25-50%	Début feuillaison moyen
4	50-75%	Début feuillaison fort
5	>75%	Début feuillaison très fort

6-Traitements des données

L'ensemble des paramètres mesurés et calculés ont subi des traitements statistiques variés permettant de cerner au mieux la source de variabilité des variables sanitaires utilisées. Parmi les analyses permettant de dégager les principales variables à retenir pour décrire les différentes situations sanitaires ou réponses observées sur terrain, on mentionne l'analyse des composantes principales (ACP). Cette analyse multivariée détecte les relations linaires entre les individus (arbres) ou les variables. La matrice à n relevés (arbres) et p variables (paramètres dendrométriques, sanitaires et de mesures) sont donc traités par une analyse en composante principale. Cette dernière est affinée par une classification hiérarchique ascendante, permettant de tirer les groupes homogènes d'arbres sur la base d'indicateurs dendrométriques mais surtout sanitaire (déficit foliaire, transparence, perte de ramification, débourrement, taille des feuilles, ect.).

L'ensemble des traitements multivariés sont réalisés par le logiciel R, version 4.3.3 (2024-02-29 ucrt) (FactoMineR).

Chapitre IV: Résultats

1- Caractérisation des stations d'étude

1.1- Caractéristiques physiques

1.1.1- Paramètres géographiques et topographiques

Les principales caractéristiques géographiques et topographiques de deux stations d'étude sont résumées dans le tableau 21. La figure 36 illustre l'emplacement des sites d'étude dans la carte d'état-major de la forêt domaniale de Hafir et Google Mapp.

Tableau 21: Principales caractéristiques géographiques et topographiques des sites d'étude

Station	Cordonnées (GPS)	Pente (%)	Altitude (m)	Expo	Canton
Station 1	N 34°46'30,1" W 01°25'59,4"	3	1292	Nord	Oued Fernene
Station 2	N 34°46'42,1" W 01°25'50,4"	10	1263	Sud-ouest	Oued fernene

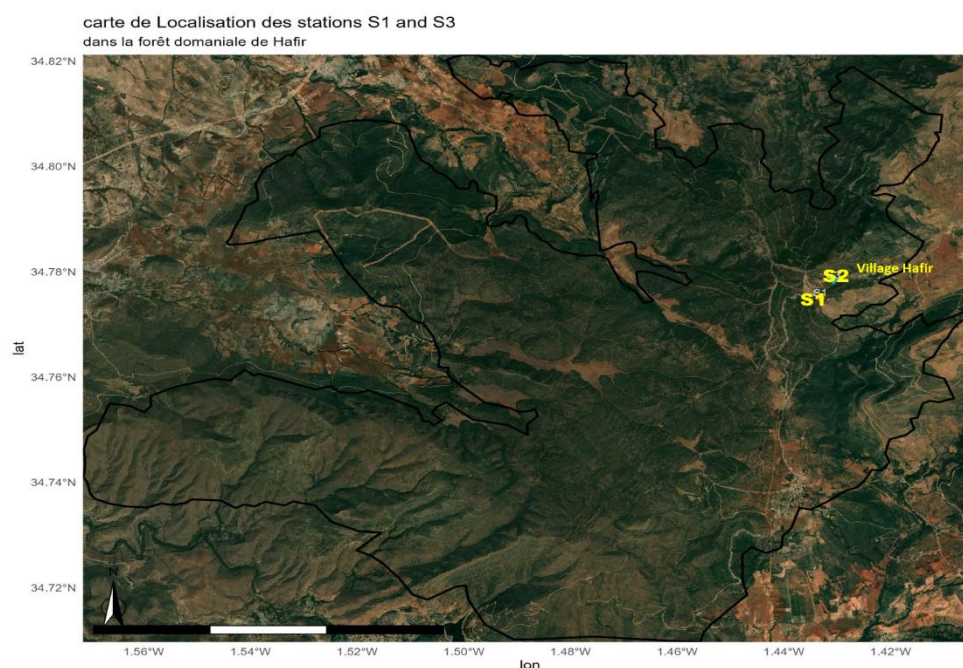


Figure 36: Localisation géographique des deux stations d'étude S1 et S2 dans la forêt domaniale de Hafir sur Google Mapp

Les résultats des relevés géographiques et topographiques montrent que les deux stations sont localisées dans le canton Oued Fernane (canton à chêne liège par excellence) à une altitude peu variable comprise entre 1263 m (P2) et 1292m (P1). Le terrain est de faible pente (P1) à pente moyenne (P2) ce qui favorise l'accumulation de matière organique, créant un substrat profond et riche (Masson, 2005a). La première station est localisée à mi- versant exposée au nord plus frais tandis que la seconde

station se trouve au bas versant exposée au sud-ouest généralement plus chaud (Masson, 2005a).

1.1.2-Paramètres pédologiques

Les résultats des différents paramètres pédologiques retenus dans cette étude sont présentés dans différents tableaux et figures.

1.1.2.1- Affleurements rocheux et pierreux

Les résultats des observations sur les affleurements rocheux et pierreux des deux stations montrent une présence variable de roches affleurantes. En effet, les affleurements rocheux et pierreux de la première station sont moins fréquents et couvrent moins de 10% de la superficie de la station. Par contre la seconde station, affiche une plus forte proportion de substrat rocheux et pierreux; elle appartient donc à la classe 2 (<25%). La figure 37 illustre ces affleurements.

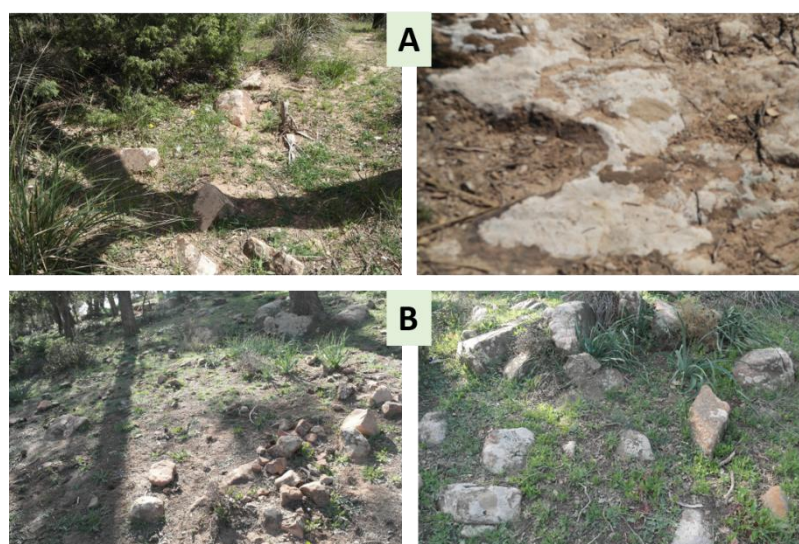


Figure 37: Vue générale des affleurements rocheux et pierreux dans la station 1 (A) et station 2 (B) (Photos originales, avril 2025)

1.1.2.2-Profondeur et texture du sol

Les résultats des tests terrières pratiqués dans différents endroits des stations d'étude pour déterminer la profondeur du sol et des analyses granulométriques sont présentés dans le tableau 22 et détaillés en annexe 1.

Tableau 22: résultats de tests tarière et analyse granulométrique des 2 stations

Station	Prof (cm)	Tests	EG (%)	S (%)	SG (%)	SF(%)	L-A (%)
1	0-20	10	13,01	84,99	14,30	85,70	2,00
	20-40	2	21,77	76,11	10,06	89,94	2,13
	40-60	1	22,54	75,70	32,03	67,97	1,76
2	0-20	2	7,62	87,54	50,42	49,58	4,20

20-40	2	13,78	83,77	5,92	94,08	2,45
40-60	2	16,54	80,41	5,09	94,91	3,59
60-80	2	17,05	76,49	34,40	65,60	6,46
80-100	1	17,01	80,12	9,46	90,54	2,87

La profondeur du sol dans la station 1 est variable. Selon le test terrier, le sol est superficiel par endroit à assez profond voire profond dans d'autres. Par contre dans la seconde station, les 2 tests tarières ont montré un sol profond (>60cm).

L'analyse des caractéristiques des différentes fractions du sol, met en évidence une texture sableuse sur toute la profondeur dans les deux stations. La proportion de ce sable est très élevée ; elle varie entre **75% et 87 % selon la station et la profondeur**. Cette fraction sableuse est fortement **dominée par le sable fin qui dépasse souvent les 60%** ce qui traduit une **texture globale plus sablonneuse**.

La proportion de **sable grossier** reste globalement faible, ne dépassant **15 %** sauf dans certaines profondeurs (>40cm). Les **limon et argile** sont très faibles dans toutes les couches ; de la surface jusqu'au profondeur.

Cette prédominance sableuse indique un sol bien drainé, mais à faible capacité de rétention en

La comparaison entre les différentes stations confirme une texture sableuse dominante à travers l'ensemble des couches et stations étudiées ce qui traduit une certaine homogénéité texturale du sol. Toutefois, les variations entre sable grossier et sable fin pourraient influencer sur la structure du sol et sa porosité et par conséquent sur la dynamique de l'eau et des nutriments.

1.1.2.3-Eléments grossiers et réserve utile en eau du sol

Les résultats de calcul de la réserve utile en eau (RU) du sol à partir des mesures des éléments grossiers et leur signification édaphique sont présentés dans le tableau 23 suivant.

Tableau 23 : Seuil significatif d'effet des éléments grossiers et Réserve utile en eau (RU) des sols des deux stations

Station	Prof moy (m)	EG (%)	Seuil qualitatif	RU (mm)	RU _{UTS} (mm)
1	0.1	13,01	Modéré	5,21	42.54
	0.3	21,77	Modéré	14,08	
	0.5	22,54	Modéré	23,24	
2	0.1	7,62	Bon	5,54	125.75
	0.3	13,78	Modéré	15,52	
	0.5	16,54	Modéré	25,04	
	0.7	17,05	Modéré	34,84	
	0.9	17,01	Modéré	44,82	

L'évolution des éléments grossiers avec la profondeur est peu marquante. Le taux varie entre 13 et 22% dans la première station et 7 et 17% dans la station 2. Mais dans l'ensemble, le seuil qualitatif d'effet de ces éléments sur le sol est modéré. Ceci indique une capacité de rétention en eau moyennement affectée à travers les horizons (baisse progressive de la réserve en eau), un drainage moyen favorisant modérément l'infiltration de l'eau, une porosité globale moyenne. Mais en surface surtout, le taux de ces éléments grossiers peut influencer la température du sol surtout en été ou en période de chaleur ; elle peut être plus chaude et par conséquent moins humide (par évaporation d'eau).

En ce qui concerne, la réserve utile (RU), les résultats de calcul montrent que nos sols peuvent stocker au maximum environ 45mm d'eau utile pour les plantes sur 1m de profondeur racinaire exploitable. En revanche, les couches superficielles (<0.5m) retiennent très peu d'eau (<25mm) surtout pour les plantes à enracinement superficiel.

Le long d'un profil pédologique, le sol assez profond ne peut retenir qu'environ 50mm d'eau au total ce qui est très insuffisant pour les plantes. Mais dans sol profond (<1m), cette réserve en eau ne dépasse pas 125mm.

En somme, les sols analysés de nos deux stations présentent des propriétés physiques favorables pour l'infiltration d'eau (sol sableux : bonne infiltration) mais peu à moyennement favorables à la rétention d'eau (éléments grossiers moyens) et au maintien d'une fertilité durable. Ceci peut jouer un rôle déterminant dans l'état de santé des peuplements de chêne-liège, en période de sécheresse surtout dans le contexte climatique marqué par une sécheresse sévère croissante.

Mais le chêne liège peut surmonter cette situation de stress hydrique en explorant l'eau retenue dans les couches plus profondes par le biais de ses racines pivotantes qui peuvent aller à plusieurs mètres de profondeur. Cependant, les racines latérales n'interviennent pas dans l'absorption hydrique pendant les saisons sèches de l'été ou les épisodes de sécheresse pluviométrique.

1.1.2.4- Autres paramètres pédologiques

Les résultats des autres paramètres pédologiques à savoir l'humidité du sol, le pH et la température sont présentés dans le tableau 24.

Tableau 24: Résultats de mesures de quelques paramètres du sol

Station	date	Profondeur (cm)	Gravimétrie	Humidimètre		
			Humidité %	Température (°C)	pH	Hum (%)
1	30.nov	0-20	3,89			
		0-20	2,64			
	07.déc	20-40	1,58			
		40-60	0,79			

		0-20	14,83			
	17.févr	20-40	12,24			
		40-60	19,75			
2	19.févr	0-20	88,79	15,5	7,1	49,5
		20-40	91,05	14	6,8	53,5
		40-60	91,81	13,5	6,8	59,1
		60-80	91,80	13,5	7,3	68
		80-100	90,44	14	6,1	72

Les résultats de mesure par la méthode de gravimétrie de l'humidité du sol prélevés dans la première station entre 30 novembre au 7 décembre, montrent une l'humidité du sol très faible sur toute la profondeur (0.8-3.9%). Cela suggère un sol très sec en début de la saison automne traduisant une faible disponibilité en eau à cause du manque de pluies et persistance de la sécheresse. Il convient de signaler que les dernières pluies abondantes (>5mm) remontent à 69 jours avant.

En revanche, les données du 17 février 2025 marquent une augmentation relative à travers les différentes couches du sol surtout en profondeur (40-60cm : 19.75%). Cela indique une recharge du sol en eau en raison de la chute des pluies malgré de faible intensité (6 mm le 3 février)

Les données édaphiques de la seconde station, montrent des taux exceptionnels en eau ce qui explique une forte saturation du sol en eau sur toute la profondeur avec une valeur moyenne de 90.8% (88.8-91.80%). Ceci est dû aux fortes chutes de pluies de l'ordre de 19.3 mm. Mais l'humidité mesurée par l'humidimètre est plus inférieure et comprises entre 49.5 et 72.0% (moyenne de 60.42%). Cette humidité augmente avec la profondeur; elle est inférieure à 60% dans les couches superficielles et supérieure à 70% en profondeur.

Cela suggère que la méthode gravimétrique évalue l'humidité massique totale et donne des valeurs plus élevées et plus précises que l'humidimètre. Cette dernière mesure l'humidité volumique instantanée. L'humidité augmente avec la profondeur, ce qui est logique; l'eau s'infiltré et stagne aux couches profondes mais aussi l'eau s'évapore plus en surface sous l'effet des températures élevées.

Pour les autres mesures fournies par l'humidimètre, nous constatons que les sols sont neutres à légèrement acide (pH: 6.1-7.1) sur toutes les profondeurs; valeurs favorables à la végétation du chêne liège et de son cortège floristique.

Enfin, les températures mesurées sont douces; elles varient entre 13.5° en profondeur et 15.5°C en surface.

1.1.3-Paramètres climatiques:

1.1.3.1- Caractérisation de la période de sécheresse: 2019-2024

Précipitations

Les résultats des relevés pluviométriques durant les années de 2019 à 2024 au niveau d'Ain Ghoraba sont regroupés dans la tableau 25. La figure 38 illustre la répartition annuelle des précipitations.

Tableau 25: Relevés pluviométriques de la période 2019-2024 à Ain Ghoraba

Période	Moyenne (déficit)	Valeurs extrêmes	Erreur standard (CV%)	Nombre moyens jours pluies (limites)
2019-2024	412mm (36%)	299-537mm	75.27 (18.27%)	82.67 (61-93)
2020-2024	387mm (40%)	299-459mm	50.14 (12,96)	80.60 (61-91)
2023	299mm (53%)	-----	-----	61

La lecture de ce tableau montre que la pluviométrie moyenne annuelle durant les 6 dernières années (2019-2024) est de l'ordre de 411,95mm. Cette tranche de pluies représente 64% de la moyenne enregistrée dans la zone durant la période récente (Tab.4) ; ceci explique une perte pluviométrique de l'ordre de 36%. Les pluies annuelles varient entre 300 et 537mm. Durant cette période, la hauteur annuelle des pluies varie très peu (CV :18%). Le nombre de jours de pluies oscille entre 61 et 93 jours (82.67 jours en moyenne) dont près de 20% est enregistré en été et 35% en printemps.

L'année 2023 est marquée par le nombre de jours pluvieux la plus faible avec 61 jours dont 12 jours seulement sont enregistrés en printemps (soit 1 jour de pluie par semaine en moyenne).

En plus, la tranche de pluies journalières inférieures à 5mm est la plus dominante avec plus de 60% dont la majorité est notée en naturellement en été.

En plus de ce tableau, la figure 38 montre des bilans pluviométriques déficitaires peu variables de l'ordre de 40% entre 2020-2024. Ce taux est cependant plus supérieur durant les années 2021, 2023 et 2024 où la hauteur totale d'eau est très faible (350mm en moyenne). L'année 2023 était particulière pour le chêne liège car le déficit en précipitations a atteint un niveau alarmant de 53% ce qui est élevé (soit 300mm).

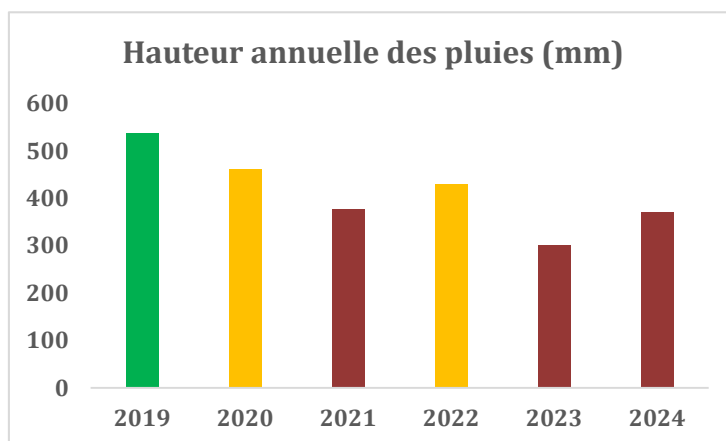


Figure 38: Répartition annuelle des pluies entre 2019 et 2024 à Ain Ghoraba

Le tableau 26 suivant présente la répartition moyenne mensuelle des pluies enregistrées entre 2019 et 2024.

Tableau 26: Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) pendant les 6 années à Hafir

Périodes	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Tot.
2019	63.3	31.6	63.4	75.3	18.1	7.15	19.5	19.1	39.2	44.1	95.0	61.7	537
2020-24	36.9	28.9	69.6	57.7	33.6	26.1	9.5	14.4	37.8	16.6	23.8	31.7	387

D'après ce tableau, nous remarquons qu'en 2019, les mois pluvieux sont enregistrés entre novembre à avril. Par contre dans les années suivantes, ils sont notés en mars-avril seulement.

Le régime saisonnier des pluies durant cette période montre en 2019 un régime particulier de type APHE; il est caractérisé par un excès pluviométrique en automne (Tab.27).

Tableau 27: Régime saisonnier des précipitations au niveau de la forêt de Hafir

Périodes/Saisons	Été*	Automne	Hiver	Printemps	Type de Régime
	(J-JI-A)	(S-O-N)	(D-J-F)	(M-A-M)	
2019	45.72 (+75%)	178.33 (+27%)	156.59 (-34%)	156.84 (-38%)	APHE
2020-2024	50.04 (+92%)	78.20 (-44%)	97.67 (-59%)	160.94 (-37%)	PHAE

Ce tableau montre des bilans saisonniers globalement déficitaires sauf en été où il est excédentaire. La quantité de pluies ainsi enregistrée a presque doublé entre 2020 et 2024. Durant cette période, les autres saisons ont affiché des pertes de pluies élevées comprises entre 37% en printemps et 44% en automne voire près de 60% en hiver.

Globalement, la zone subéricole de Hafir a enregistré durant les 5 dernières années une situation pluviométrique particulière caractérisée par des déficits pluviométriques continus. Les valeurs sont parfois très basses de la limite minimale réclamée par le chêne liège. Ces déficits ont touché pratiquement toutes les saisons surtout l'hiver (saison de stockage de l'eau) et le printemps (saison de reprise phénologique). L'analyse de ce paramètre mis en évidence un épisode de sécheresse hydrique accrue.

-Températures

Les relevés thermiques durant la période de sècheresse sont présentés dans la figure 39 suivante.

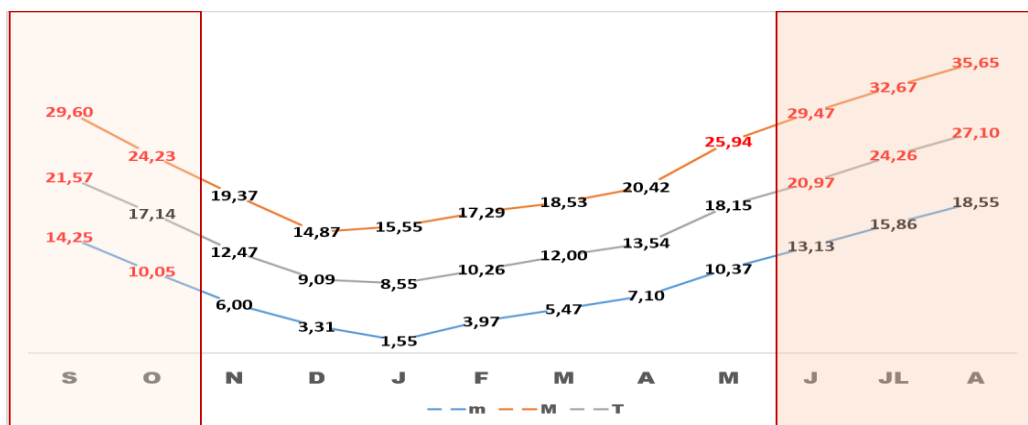


Figure 39: Courbes des températures mensuelles moyenne minimale (m°C), maximale (M°C) et moyenne (T°C) enregistrées à Ain Ghoraba entre 2020 et 2024

Il ressort de cette figure les caractéristiques thermiques suivantes:

- L'automne chaud surtout pendant les mois de septembre et octobre (m>10°C, M>25°C et T>20°C),
- L'été très chaud: les moyennes des maximums sont élevées (M>30°C) durant pratiquement les 3 mois. La température du mois le plus chaud affiche une valeur de 35°C enregistrée en mois d'août avec une valeur extrême de 40°C. En plus, durant cette saison, la température moyenne (T) a avoisiné la limite des valeurs extrêmes entre lesquelles oscillent la moyenne annuelle des températures. Mais cette moyenne annuelle durant cette période est de 16.3°C, ce qui est admis par le chêne liège.
- L'hiver reste globalement frais (m<°C) avec des minimums compris entre 1.6°C en janvier (mois le plus froid) et 3.9°C en février.
- Le printemps est relativement chaud surtout en mois de mai (M>20°C).

La figure 40 suivante récapitule les conditions climatiques (pluies et températures) ayant régné dans la subéraie du massif forestier de Hafir.

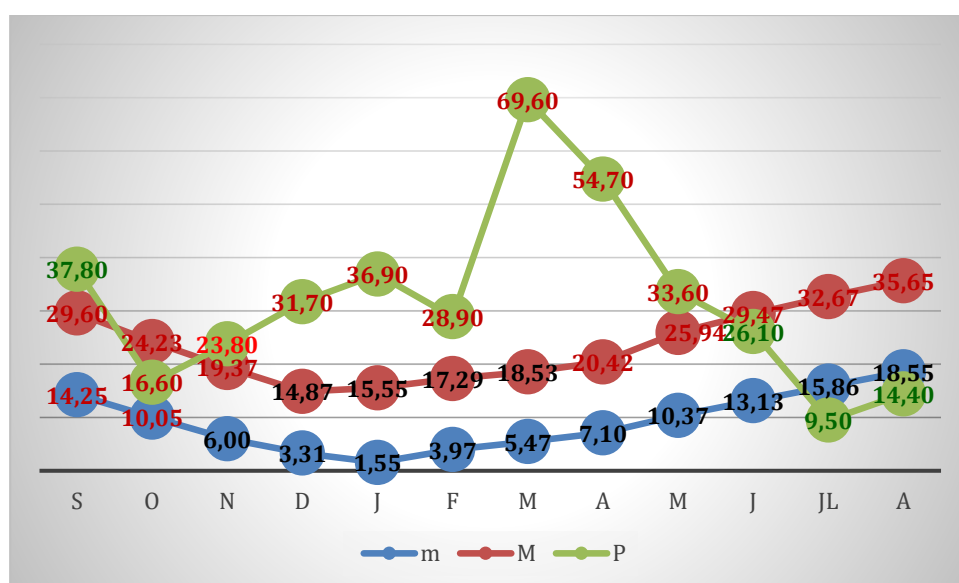


Figure 40: Conditions climatiques mensuelles (m°C, M°C et Pmm) enregistrées dans la forêt de Hafir (chiffres en rouge indiquent les bilans comparatifs négatifs, vert : positifs).

A travers cette figure, nous pouvons déduire que le chêne liège a connu durant les 5 dernières années une période difficile pour le chêne-liège en particulier. La majorité des mois et saisons ont enregistré des déficits en pluies aggravés par des augmentations de températures. Ceux-ci conduisent à un déficit hydrique dans le sol et par conséquent au stress hydrique des arbres.

1.1.3.2- Caractérisation de l'année hydrologique 2024-2025

Les résultats des données climatiques relevées au cours de l'année hydrologique 2024-2025 (soit entre septembre 2024 et mai 2025) sont présentés dans le tableau 28

Tableau 28: Caractéristiques climatiques entre septembre 2024 et mai 2025 à Ain Ghoraba

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	Tot (Moy)
Pluies	102,4	20,9	5,6	13	1,6	30,6	60	32,8	131,6	398,7
Jours pluies	13	6	2	2	1	3	8	6	9	50
jours<5mm	7	5	2	1	1	1	2	4	2	25
m°C	14,5	10,3	7,5	1,5	2,0	3,1	5,0	8,5	10,9	(7,1)
M°C	28,2	23,1	20,6	14,3	13,1	14,9	16,2	20,8	24,3	(19,5)
T°C	20,7	16,7	13,6	7,9	7,6	8,2	10,60	14,2	17,6	(12,9)

La lecture de ce tableau montre une saison automnale légèrement déficitaire de près de 10% par rapport à la période de référence (Tab.6). Mais plus de 80% de cette pluie est enregistré en septembre (102.4mm), ce qui représente 4 fois la quantité moyenne notée en ce mois (Tab.5). Ceci indique que les mois d'octobre et novembre 2024 sont excessivement déficitaires de 56 et 92% respectivement.

L'hiver est presque sec surtout durant les mois de décembre et janvier avec 6 jours de pluies. Le bilan pluviométrique négatif atteint un niveau élevé de 61% (92mm). Enfin, le printemps avec une tranche de précipitations de 224.6mm représente 90% de pluies habituellement notées. Mais le mois de mars 2025 est le plus pluvieux avec 132mm ce qui marque un excès pluviométrique de 21%.

En somme, la quantité de pluies enregistrée durant 50 jours en 9 mois marque une légère amélioration pluviométrique par rapport aux années précédentes.

En ce concerne les températures, nous constatons que l'automne et le printemps sont chauds (m>10°C; M>20°C). L'hiver est frais (m>1°C) avec -2°C de températures extrêmes enregistrées sur plusieurs jours.

1.2-Caractérisation forestière

L'ensemble des résultats de mesures des paramètres dendrométriques, forestières et d'exploitation sont résumés dans le tableau 29 et détaillés dans différentes figures.

Tableau 29: Caractéristiques dendrométriques, forestières et d'exploitation des deux peuplements de chêne liège

Paramètres	Variables	1	2
Forestiers	Densité du peuplement	200 tiges. ha ⁻¹	310 tiges. ha ⁻¹
	Type de peuplement	clair	Moyennement clair
	Structure du peuplement	Subéraie mature au bois moyen	Subéraie jeune au Petit Bois
Dendrométriques	Diamètre moyen du bois (valeurs extrêmes_ES)	25.49 cm (13.92-85.16cm_10.24)	32.82 cm (20.43-49.34cm_6.84)
	Hauteur totale (valeurs extrêmes_ES)	8.3 m	8.0 m
		(4.5-10.5m_5.2)	(5-10.5m_1.63)
Exploitation	Date dernière récolte	2016	2015
	Age du liège	8 ans	9 ans
	Epaisseur du liège	22.4 mm	27.2 mm
	Limites et Ecart-type	13-32 mm_0.49	18-33 mm_3.89
	Coefficient d'écorçage	1.96	1.52
	Limites	1.03-3.0	1.1-1.89

1.2.1-Densité et structure des peuplements

Les résultats de calcul de la densité du peuplement, montrent que la première station présente un peuplement clair avec une structure à dominance en bois moyen. Par contre, le second peuplement est moyennement dense à structure dominante en petit bois (Tab.29).

La figure 41 qui présente la distribution des différents types de bois dans deux placettes forestières, montre dans la **station 1**, une dominance large de la catégorie de **petit bois (PB : 17,5 < Ø < 27,5 cm)** avec un taux de **64%**. Ceci reflète une jeune futaie en pleine phase de croissance.

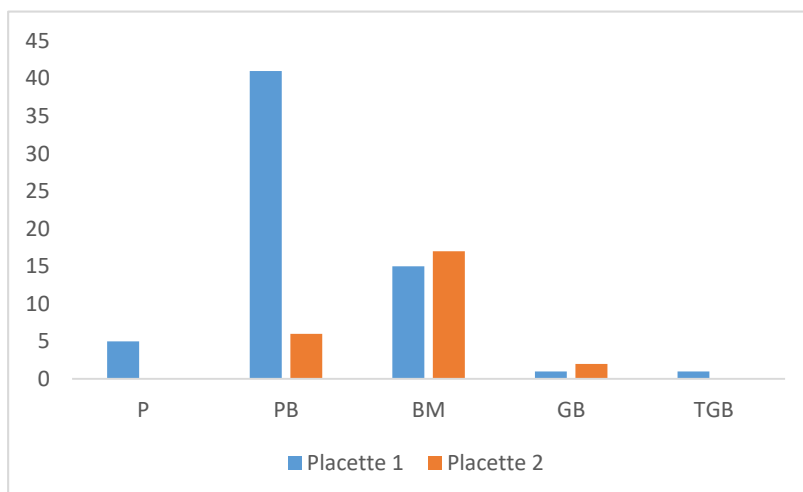


Figure 41: Histogramme de distribution des arbres par type de bois dans les deux stations d'étude

Le **bois moyen** sont présents avec **23,4 %** indiquant une proportion peu significative d'arbres mûres. Les **perches** son **rare** (**7,8 %**), soulignant une dynamique de régénération naturelle défaillante. Les vieux arbres de la catégorie de **Gros bois (GB)** et très **gros bois** sont **très rares** ce qui traduit un faible sénescence du peuplement.

En revanche, le peuplement de la **station 2**, présente une structure différente ; le **bois moyen** qui **prédomine** avec **53 %** ($27,5\text{cm} < \varnothing < 42,5\text{cm}$), témoignant d'une futaie adulte plus avancée dans son développement. Les jeunes sujets à **petit bois (PB)** sont faiblement représentés avec **20 %**. Les vieux sont plus fréquents. Aucun sujet de la catégorie « perche » n'est enregistré ce qui pourrait indiquer un déficit de régénération.

Globalement, ces données révèlent que le peuplement de la station 1 est plus jeune que celui de la station 2.

1.2.2-Végétation et recouvrement du sous-bois

Les résultats de l'inventaire floristique et son importance horizontale sont présentés dans le tableau 30 suivant.

Ceci montre que le chêne liège est accompagné par le chêne zeen dans la station 1 et le pin d'Alep dans la station 2. La flore accompagnatrice du chêne liège est identique et diversifiée dans les 2 stations mais avec un taux de couverture variable. En effet, le sous-bois est plus important dans la station 1 (>75% de recouvrement) dominé par le Diss et le ciste de Montpellier que dans la station 2 (<75%). Dans cette dernière, ces deux espèces sont dominantes avec le chêne vert et le Génévrier oxycèdre.

Tableau 30 : Inventaire et recouvrement de la végétation accompagnatrice du chêne liège dans les deux stations

Strate/Plantes	Station 1	Station 2
----------------	-----------	-----------

Arborescente et Arbustive (<7m)	1	1
Chêne zeen	1	0
Pin d'Alep	0	1
Sous arbustive (<4m)	5	4
Chêne vert	1	2
Chêne kermès	1	1
Bruyère arborescente	1	1
Lavande staechade	1	1
Genévrier oxycèdre	2	2
Diss	3	2
Ciste de Montpellier	3	2
Ascille	1	1
Thym	1	1
Ajonc	1	1

1.2.3-Paramètres dendrométriques

1.2.3.1-Diamètre des arbres:

La figure 42 illustre la distribution des arbres par classes de diamètre des deux stations d'étude. Ceci nous permet d'avoir une vision complémentaire sur la structure diamétrale du peuplement et d'en déduire son état de développement, sa régénération et son évolution potentielle.

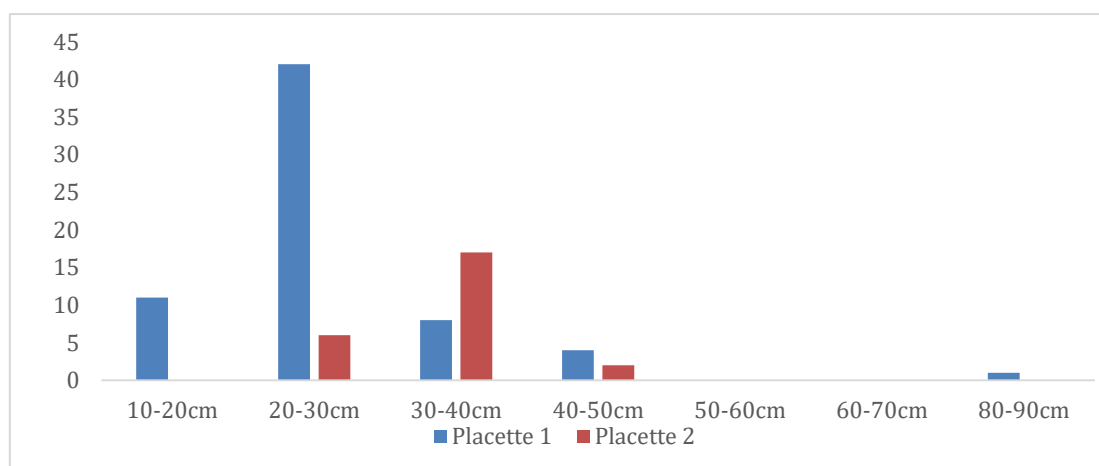


Figure 42 : Histogramme de distribution des arbres par classes de diamètre dans les deux stations d'étude

Dans la station 1, les arbres ont un diamètre moyen de 25.49cm; il varie beaucoup entre 14 et 85cm (CV : 40%). La figure montre une tendance d'une distribution normale asymétrique gauche, c'est-à-dire que la valeur de la moyenne (32cm) se trouve à gauche du centre de la courbe (dominance des arbres dans la classe de

diamètre 20–30 cm). Elle est suivie par deux autres classes consécutives. Les classes de plus de 50cm sont pratiquement absentes.

Cette distribution traduit une structure hétérogène typique d'un peuplement jeune en phase de croissance active.

À l'inverse, le peuplement de la station 2 présente une structure différente à tendance symétrique centrée sur la classe 30–40 cm (moyenne 32cm) entre les classes 1 et 3. La moyenne varie peu entre les arbres ce qui confère au peuplement une structure homogène.

1.2.3.2-Hauteur des arbres:

Les résultats des mesures des hauteurs totales des arbres montrent une moyenne de 8m pour les deux peuplements. Elles oscillent entre 4.5 et 10.5m mais varient fortement dans la station 1 que dans la station 2 (écart-type faible) (tab.29).

La distribution des arbres par classes de hauteur sont présentés dans la figure 43.

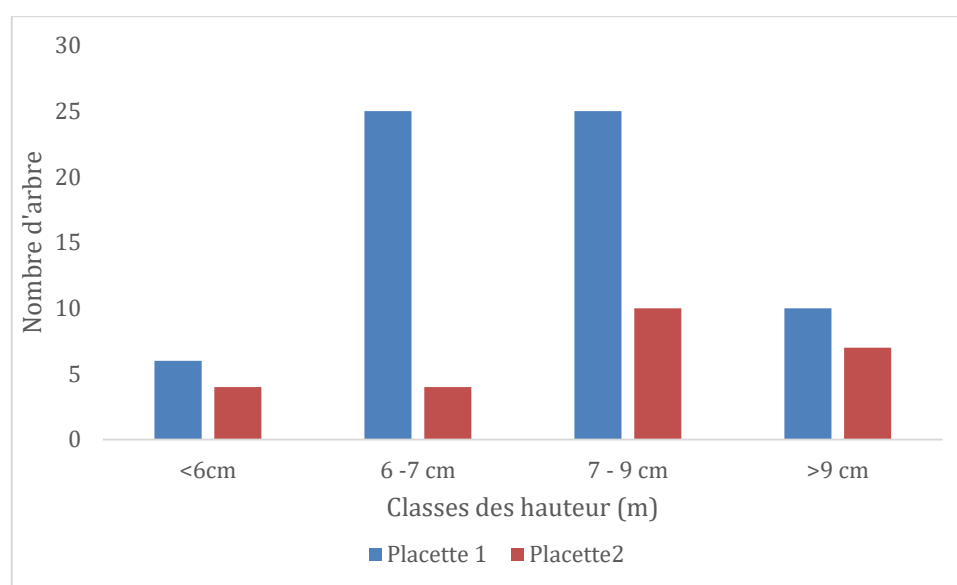


Figure 43 : Distribution des arbres par classes de hauteurs totales

Dans la station 1, la hauteur des arbres est comprise entre 6 et 9 m. Mais la classe dominante se situe dans la tranche de 7-9m (43%). Ce sont des arbres qui occupent le statut social « dominant ». Elle est suivie par la classe des arbres Co-dominants de 6-7m. Les arbres moins hauts (dominés) et plus hauts sont peu fréquents.

La deuxième placette se caractérise par des hauteurs de fréquences proches. La classe dominante (7-9m) est intermédiaire entre la classe 6-7m et >9m. Ceci traduit la faible variabilité entre les arbres. Les arbres dominés (<6m) sont faibles.

1.3-Paramètres d'exploitation

1.3.1-Epaisseur du liège

Selon, la carte de gestion de récolte de liège, nous constatons que le peuplement de la station 1 a connu sa dernière récolte en 2016 et celui de la station 2 en 2015 (Fig.44).

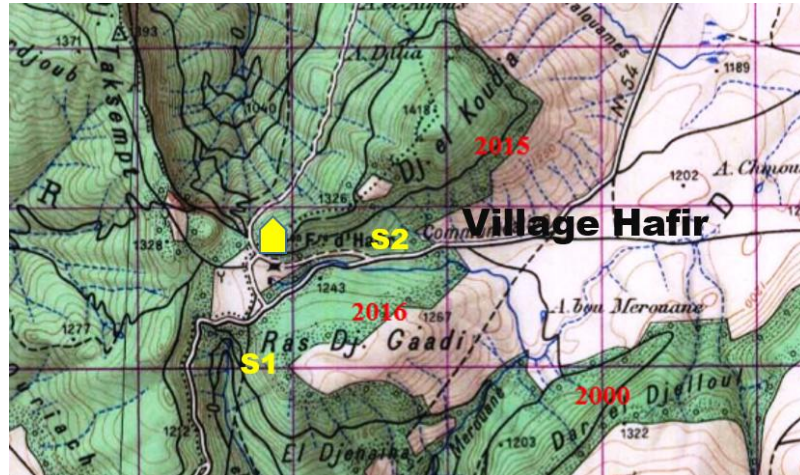


Figure 44: Carte de récolte du liège de Hafir (Dahmani, Com.pers.)
(Années en rouge: dates de dernière exploitation du liège)

Le liège de la station 1 est donc âgé de 8ans et celui de la station 2 de 9 ans. Les épaisseurs moyennes varient entre 22.4 mm (station 1) et 27.2 mm (station2) (Tab.29) ce qui indique un accroissement moyen annuel du liège respectivement de 2.8mm et 3.0 mm.

La figure 45 distribue les mesures des épaisseurs des échantillons selon leur type de liège.

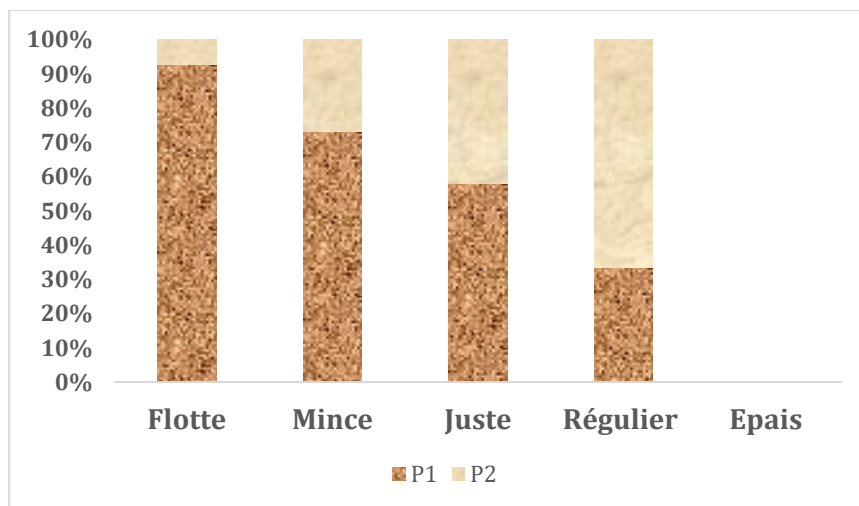


Figure 45: Distribution des épaisseurs selon le type de liège des 2 stations

La lecture de cette figure montre que dans la première station, la majorité du liège est de type flotte (38%) à mince (42%). Le reste des lièges arrivant aux catégories

exploitables (>27mm: juste et régulier) est faible et ce après déjà 8 ans du cycle de production.

En revanche, dans la seconde station, nous enregistrons aussi qu'à 9 ans du cycle, une dominance du liège mince (42%) mais suivi par des lièges exploitables (juste et régulier: 50%).

Bien que le cycle de production n'est pas encore arrivé à termes, la croissance annuelle du liège reste satisfaisante pour les deux peuplements et que la prochaine récolte soit programmée à la fin du 12^{ème} année. Cette rotation permet de récolter au maximum un liège bouchonnable dont l'épaisseur est supérieure à 30mm.

1.3.2-Coefficient d'écorçage

Les résultats de calcul des coefficients d'écorçage de la dernière exploitation du liège montrent que la récolte du liège du peuplement de la station 2 est non rentable car tous les arbres ont été sous-exploités ($C_e < 2.0$) (Tab.29). Cette catégorie d'exploitation non profitable est dominante dans le peuplement de la station 1 (55%). Cependant, près du tiers seulement des arbres qui ont été récoltés convenablement ($C_e = 2$). Les arbres excessivement exploités sont peu fréquents (15%).

Globalement, les deux campagnes de récolte du liège (2015 et 2016) ont été non rentables car la majorité des arbres ont été sous exploités Ceci impacte la production du liège et l'économie du secteur forestier.

2- Caractérisation sanitaire des arbres et des stations

2.1-Déficit foliaire ou perte foliaire (DF):

Le graphique 46 illustre la répartition des arbres selon les classes de déficit foliaire dans deux stations.

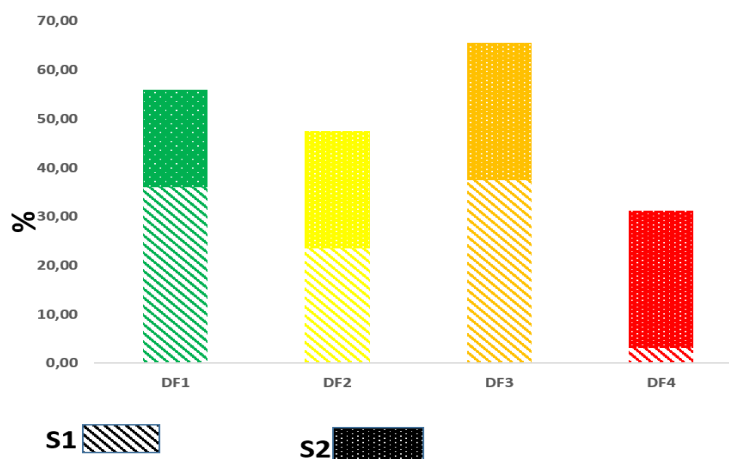


Figure 46: Histogramme de distribution des arbres par classes de déficit foliaire dans les deux stations d'étude

Il ressort de cette figure que la majorité des arbres de la station 1 sont atteints à 65%. Ils sont répartis surtout entre les arbres modérément défoliés (DF2: affaiblis: 23%) et fortement défoliés (DF3: dépérissants: 38%). Le taux de mortalité (DF4) est faible de l'ordre de 3%. Cette distribution indique que la vigueur du peuplement est globalement atteinte car les arbres sains ne constituent que le tiers seulement.

En revanche, la situation sanitaire des arbres est plus préoccupante en station 2 où 80% des arbres sont atteints ayant perdu plus de 25% de leur feuillage au niveau des organes fonctionnels. Ils appartiennent davantage aux classes 3 (28%) et 4 (28%) ce qui un état de santé dégradé à critique. Cette dernière marque une très forte mortalité des arbres.

2.2-Indice de santé (IS):

Les résultats de calcul de l'indice de santé (IS) révèlent un contraste notable entre les deux peuplements étudiés. En effet, la station 1 qui présente un indice de santé de **1,95** se situe dans la classe 2 correspondant à un peuplement affaibli ou en début de dépérissement (Fig.47).

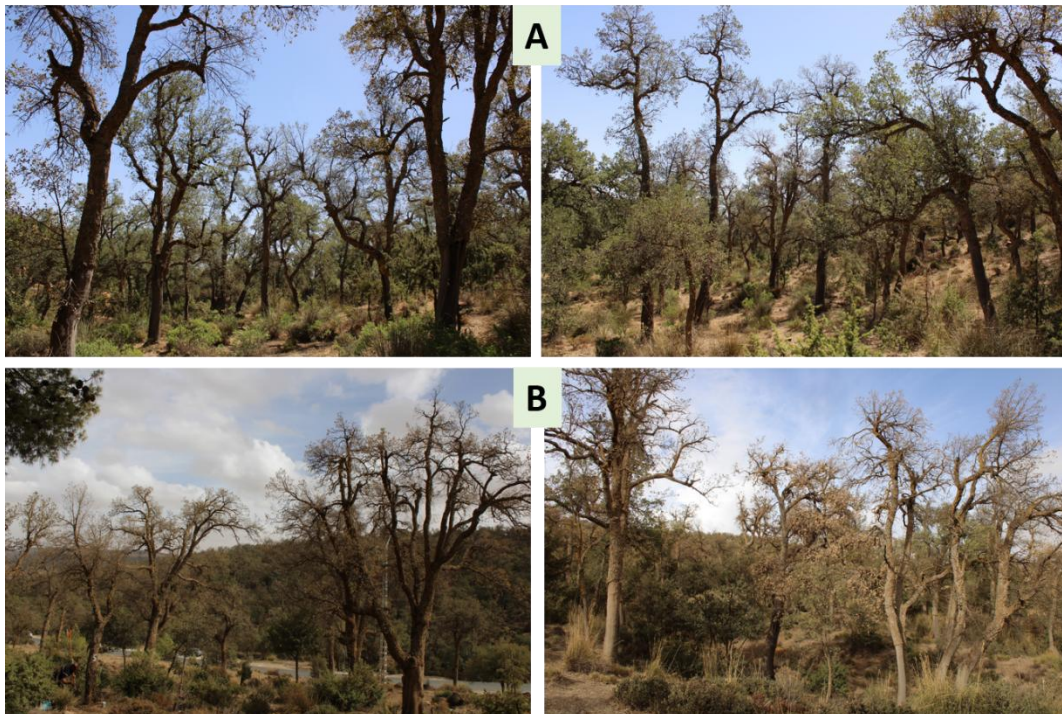


Figure 47 : Vue de l'état sanitaire général des peuplements de la station 1 (A) et station 2 (B) (Photos originales, octobre 2024)

Cela montre bien que la majorité des arbres soient encore dans un état de santé relativement satisfaisant. Par contre, des signes de stress et de dégradation sanitaire apparaissent bien dans le peuplement de la station 2 où affiche un indice de santé plus élevé, à 2,64. Ceci la classe le peuplement dans la catégorie « dépérissement grave ». Cette situation est préoccupante, car elle marquée par dégradation presque générale des arbres.

2.3-Autres paramètres sanitaires

2.3.1-Mortalité des branches (MB) et des rameaux (MR)

Le graphique 48 illustre la distribution des arbres selon les classes de mortalité des organes pérennes (branches (MB) et rameaux (MR) des arbres des deux placettes. D'après cette figure, nous remarquons que la majorité des arbres (82 %) de la station 1 présentent des mortalités de branches et rameaux de faible intensité (<25%). Néanmoins, les arbres de mortalité moyenne des de la classe2 sont fréquents (12,1 %). Rares sont les arbres n'ayant perdu aucun organe de ses organes.

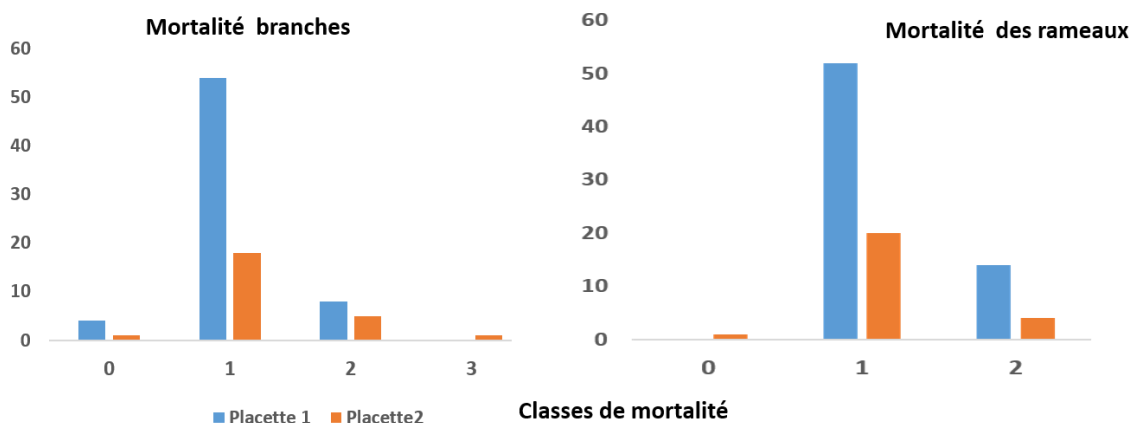


Figure 48: Histogramme de distribution des arbres par classes de mortalité des branches et rameaux dans les deux stations d'étude

2.3.2-Transparence:

La distribution par classe de transparence du houppier des arbres des deux peuplements est présentée dans la figure 49. La figure 50 illustre de près l'éclaircissement de la cime des arbres.

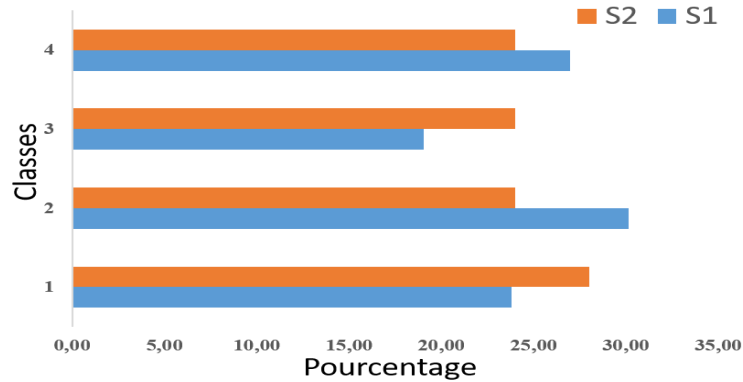


Figure 49: Histogramme de distribution des arbres par classe de transparence dans les deux station d'étude



Figure 50: Classes de transparence des cimes des arbres (Photos originales, octobre 2024)

1-2 (visibilité partielle du squelette), 3-4 (visibilité entière du squelette)

Station 1: La distribution est assez équilibrée entre les quatre classes avec environ 25 % chacune. Cela montre que près de la moitié des arbres présentent un houppier ayant perdu plus de 50% de leur transparence (classes 3 et 4). Ces arbres sont clairsemés presque complètement dépouillés avec une visibilité du squelette totale. Ceci pourrait traduire des conditions de stress variées entre les arbres. Ils indiquent alors un état physiologique préoccupant

Station 2: La distribution suit la même tendance que celle de la station 1. Les arbres à forte, et très forte transparence sont élevés. La visibilité partielle du squelette de l'arbre est partielle pour près de la moitié des arbres (classes 1 et 2).

2.3.3-Perte de ramification avant période de stress climatique:

La figure 51 montre la répartition des arbres selon les classes de perte de ramifications (PR) pour deux stations avant la période de stress climatique.

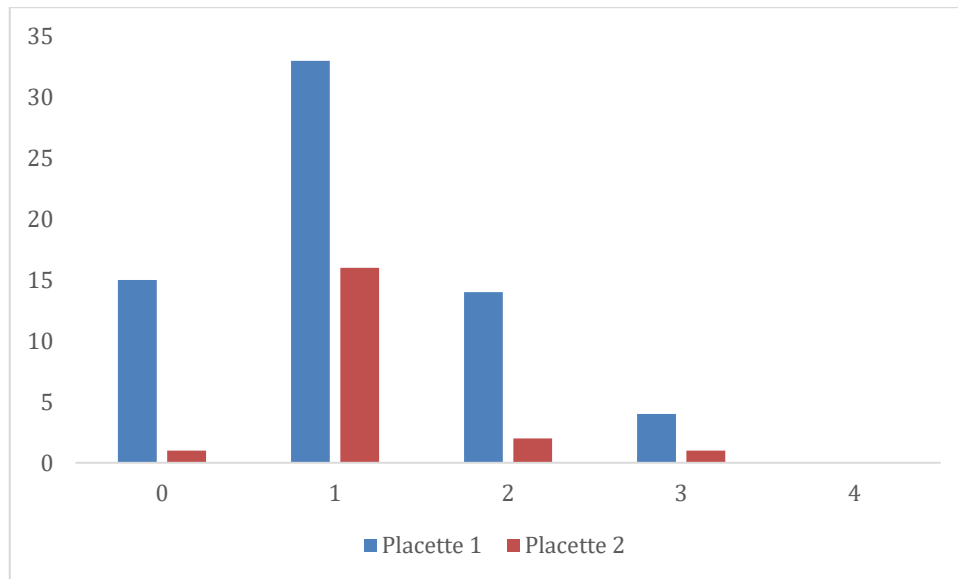


Figure 51: Histogramme de distribution des arbres par classes de perte de ramification dans les deux stations d'étude

Avant la période du stress climatique, la distribution des arbres selon les classes de perte de ramifications montre des différences marquées entre les deux stations. Dans la station 1, la majorité des arbres (50 %) ont perdu faiblement de ramification (<25 % de la longueur normale). La perte moyenne de ramification (<50 %) touche le quart des. Mais une faible proportion d'arbres qui ont perdu fortement de ramification. Cette dernière se présente de rameaux longs de plusieurs années dénudés de feuilles.

En revanche, dans la station 2, la perte de ramification est faible; elle se concentre dans la classe 1 avec 80 % des cas. Les rameaux longs des années antérieures sont plus ramifiés par des pousses.

Ces résultats indiquent qu'avant le stress climatique, la majorité des arbres subissaient peu ou pas de perte de ramification, avec une situation plus favorable dans la station 2

2.3.4-paramètres des rameaux

L'estimation par observation de l'importance dans la frondaison des rameaux encore en bourgeons ou nus (RB) et des rameaux feuillés (RF) est présentée dans la figure 52. C'est un paramètre sanitaire qui explique en partie le déficit foliaire et la transparence des houppiers. La figure 53 illustre quelques combinaisons entre les deux types de rameaux.

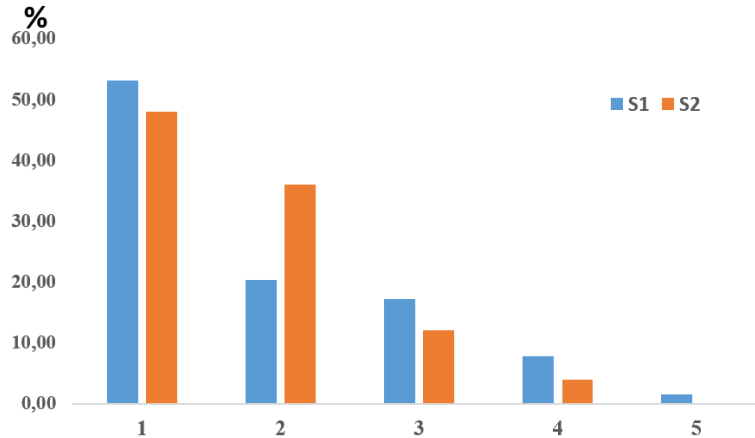


Figure 52: Histogramme de distribution des arbres par classes de combinaison (rameaux bourgeons- rameaux feuillés) dans les deux stations d'étude

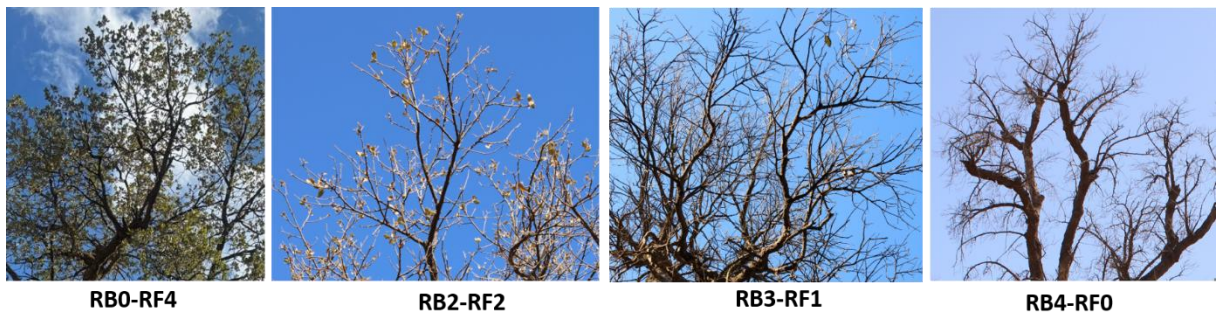


Figure 53: Vue générale de quelques houppiers d'arbres montrant les proportions de rameaux nus par rapport aux rameaux feuillés (Exemple: RB2-RF2: 50% de rameaux nus et 50% de rameaux feuillés) (Photos originales)

La lecture de cette figure montre dans les deux stations, la dominance des rameaux où tous les bourgeons ont donné naissance à des pousses feuillées. Cette catégorie d'arbres varie entre 48 et 53%. Dans les autres classes, les rameaux sont partagés entre nus et feuillés.

En effet, les houppiers aux rameaux à moitié nus (bourgeons non débourrés) sont plus fréquents dans la station 2 (36%) que dans la station 1 (20%). Par contre, les houppiers fortement constitués de rameaux visiblement nus (jusqu'à 75%) sont beaucoup moins fréquents (4-8%). Ces arbres présentent alors un aspect dépouillé ou fortement défoliés. Enfin, les arbres ne présentant aucune feuille sont très rares.

2.3.5- Evolution de la ramification

Les résultats montrent une présence quasi généralisée des échancrures dans les cimes des arbres des deux stations, avec plus de 96 % (Fig.54). Cela indique que la majorité des sujets observés présentent des symptômes visibles de perte de branches latérales ou apicales.

L'échancrure étant souvent un indicateur de stress chronique ou de dommages répétés, sa fréquence élevée suggère que les arbres ont déjà été exposés à des contraintes environnementales ou physiologiques importantes, probablement avant ou indépendamment du stress climatique.

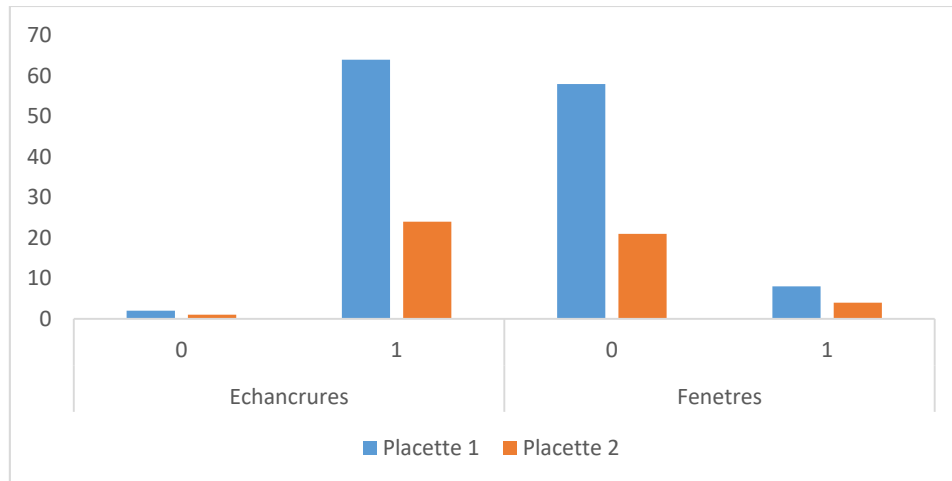


Figure 54: Histogramme de distribution des arbres par classes d'échancrures et fenêtres dans les deux stations d'étude

Concernant les fenêtres, qui traduisent des trous ou manques localisés dans la densité du feuillage, elles sont moins fréquentes mais tout de même notables. En effet, 12 % des arbres de la station 1 et 16 % de ceux de la station 2 en présentent. Ces chiffres indiquent une dégradation partielle du houppier, mais à un stade moins avancé que les échancrures.

La station 2 présente légèrement plus de fenêtres, ce qui pourrait traduire une sensibilité plus élevée au stress.

Ces observations combinées montrent que les arbres de ces deux stations, bien qu'en majorité encore feuillus, portent déjà des signes visibles de stress structurel.

2.3.6-Concurrence:

Les résultats d'observation de la concurrence des houppiers sont présentés dans la figure 55

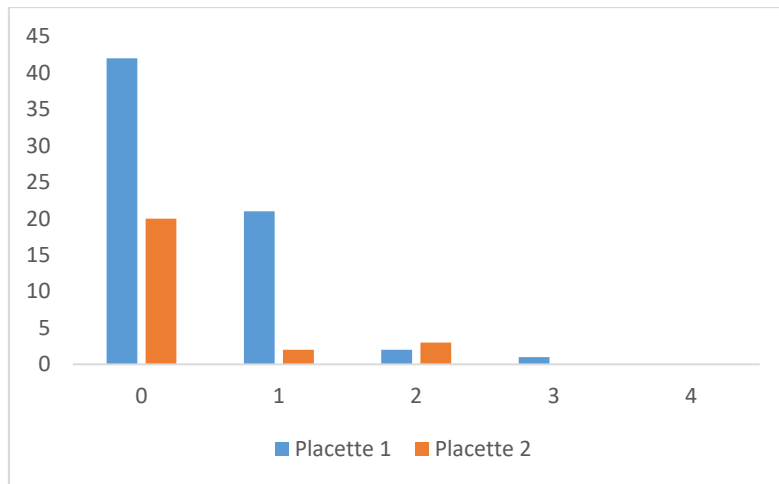


Figure 55: Histogramme de distribution des arbres par classes de concurrence dans les deux stations d'étude

Il ressort de cette figure que la majorité des arbres sont hors concurrence appartenant à la classe 0 (S1: 64 %; S2 : 80%). Ceci signifie qu'ils ne subissent pas de compétition directe pour la lumière, l'eau ou les nutriments, ce qui suggère une faible densité et une bonne dominance. Toutefois, une proportion d'arbres sont soumis à un certain degré de concurrence au niveau de 2 à 4 orientations.

2.3.7-Examen du tronc:

Les résultats de l'examen du tronc montrent la majorité des arbres des deux stations ont un tronc sain. La présence de crevasses est rare et de faible importance appartenant à la classe 1 (faible (1–10 % de surface crevassée). Les autres anomalies sur les troncs sont rarement enregistrées en l'occurrence le charbon de la mère.

En ce qui concerne les attaques de xylophages, nous avons mis en évidence la présence d'une seule espèce à savoir *Platypus cylindrus*.

Les signes de présence de ce ravageur sont enregistrés dans la station 1 sur un arbre seulement mort. En revanche, dans la station 2, cet insecte est plus fréquent. Il est noté sur 16 % des arbres dont la majorité sont morts.

2.3.7-Caractéristiques des cas de mortalités

Les résultats d'inventaire sanitaire de deux peuplements ont mis en évidence une fréquence anormale de mortalité des arbres. Ces arbres présentent un dessèchement complet de leur feuillage (dépérissement aigu) (Fig.56).

Les caractéristiques dendrométriques, d'exploitation, sanitaires et architecturales de ces arbres morts sont résumées dans le tableau 31.

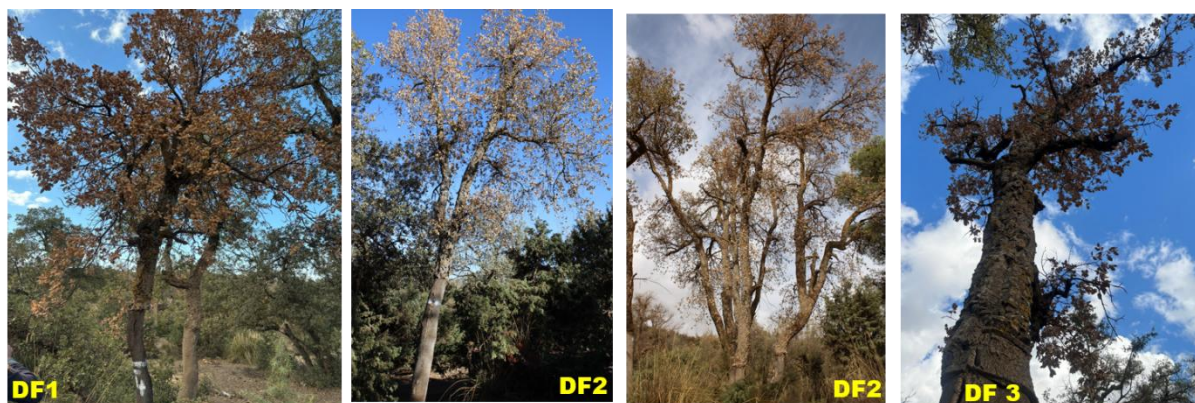


Figure 56: Vue générale de la mortalité des arbres (dessèchement complet du feuillage) avec leur catégorie sanitaire (DF: Déficit foliaire) (Photos originales, Octobre 2024)

Tableau 31: Caractéristiques des arbres morts dans les deux stations

Paramètres/Station	1	2	1 et 2
Taux de mortalité (effectif)	4.7 % (n=3)	24% (n=6)	10.1% (n=9)
Hauteur totale (valeurs limites)	8.5m (8-9m)	9.3 m (7.5-10.5m)	9.0m (7.5-10.5)
Diamètres	53.0cm (26.0-85.2)	32.3cm (26.4-37.1)	39.2cm (26.0-37.1)
Épaisseur du liège	14.7mm (8-18)	25.8mm (20.31)	22.1mm (8-31)
Coefficient d'écorticage	1.6 (1.0-2.3)	1.7 (1.4-1.9)	1.7 (1.0-1.9)
Déficit foliaire (DF) (note)	3	1-2-3	1-3
Transparence du houppier (classe)	2-4	1-3	1-4
Rameaux nus (rameaux feuilles)	0-1 (4)	0-1 (3-4)	0-4
Présence du xylophage le Platypus	33% (DF3)	67% (DF2-3)	55% (DF2-3)

Il ressort de ce tableau que le taux moyen de mortalité est estimé à 10%. Ce taux révèle une dynamique inhabituelle de la mortalité dans la station 2 que dans la station 1.

La majorité des arbres morts sont hauts. Cette mortalité affecte différents âges d'arbres (plus âgés en S1 et plus jeunes en S2). Ces arbres ont déjà produit avant leur mortalité une couche de liège flotte (S1) à mince (S2). Ce sont les mêmes épaisseurs enregistrées sur les arbres vivants ce qui signifie que cette mortalité est récente. Un cas seulement d'arbre mort ayant fourni une couche de liège de 8mm (valeur la plus faible); ceci indique que la mortalité est ancienne (avant la période de sécheresse). Les arbres ont été sous exploités lors de la dernière récolte du liège ($Ce < 2.0$).

Sur le plan sanitaire, la mortalité a affecté plus les arbres déjà en phase d'affaiblissement avancé ou en début dépérissement (DF3: 67%). Néanmoins, près du tiers des arbres affectés anormalement par le dépérissement aigu qui, selon leur état foliaire apparent, semblaient encore en bonne santé (DF1) ou modérément affaiblis (DF2) (Fig.56). Cela suggère une mort brutale, sans passage progressif par les stades de dépérissement habituellement observés chez les arbres forestiers. De tels mortalités soudaines, résultent d'un stress aigu, tel cet épisode de sécheresse extrême. Près de la moitié des arbres morts ont été cibles à l'installation du xylophage secondaire *Platypus*

cylindrus. Ce sont les arbres en phase de dépérissement (DF3) qui sont les plus attaqués par ce ravageur que les arbres affaiblis.

2.4-Analyse des échantillons

Les résultats de l'examen de l'état de débourrement de tous les bourgeons axillaires (n=3021 dont 2845 en S1) et terminaux (n=908 dont 798 en S1) à partir de plus de 500 rameaux prélevés de 46 arbres de la station 1 dont 2 arbres de références et 17 arbres de la station 2 sont présentés dans différentes figures.

2.4.1-Rameaux nus ou non feuillés

2.4.1.1-Bourgeons non débourrés

La répartition des arbres selon les classes de bourgeons axillaires (**Band**) et terminaux (**Btnd**) non débourrés est présentée dans la figure 57.

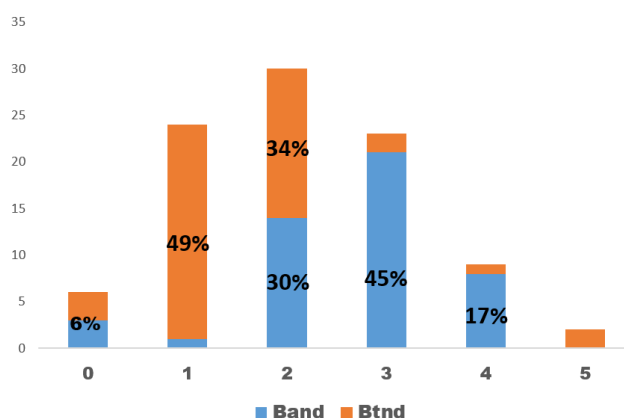


Figure 57: Répartition des arbres selon l'importance des bourgeons non débourrés en printemps 2024

L'analyse de l'absence de débourrement selon les classes de gravité montre une nette différence entre les bourgeons axillaires (Band : 53%) et les bourgeons terminaux (Btnd ; 26%) ce qui est normal car sur un rameau nous trouvons un bourgeon terminal et plusieurs bourgeons axillaires. Dans l'ensemble, 83% des arbres dont les bourgeons terminaux de leurs rameaux sont faiblement (49%) à moyennement (34%) non débourrés ; ils appartiennent donc aux classes 1 et 2. Cependant, nous constatons une part non négligeable d'arbres de la classe 0 dont tous les bourgeons terminaux ont débourré, ils ont donné des pousses. Très peu d'arbres de la classe 5 aux bourgeons terminaux ont resté complètement fermés.

À l'inverse, les bourgeons axillaires présentant une absence de débourrement, sont plus marqués à 75% dans les catégories moyenne à forte. Ceci indique que les bourgeons

axillaires sont restés majoritairement non débouffés. En plus, près de 17% des arbres ont leurs bourgeons axillaires très fortement non débouffés.

2.4.1.2-Bourgeons en début débouffement:

La figure 58 présente la répartition des **bourgeons axillaires (Badd)** et **terminaux (Btd)** qui sont restés en **début de débouffement** selon six classes de gravité. Cette catégorie d'état des bourgeons représente une faible proportion par rapport au total de 16% et 19% respectivement.

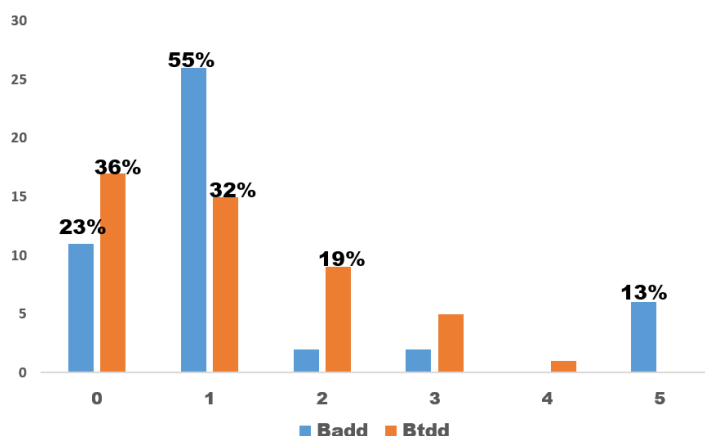


Figure 58: Distribution des arbres selon l'importance des bourgeons restés en début débouffement

L'analyse des données montre que cet état anormal (Fig.33) de débouffement reste majoritairement faible (**classe 1**) chez les bourgeons axillaires (55%) que les bourgeons terminaux (32%). Ceci indique que l'arrêt de débouffement **à son début est généralement faible**. Cela suggère que dans l'ensemble, les deux types de bourgeons ont majoritairement entamé le processus de débouffement, bien que de manière partielle.

Néanmoins, nous enregistrons une proportion non négligeable d'arbres (30%) dont leurs bourgeons terminaux ont moyennement à fortement arrêté leur processus de débouffement (classes 2 et 4). Enfin, la classes 5, qui correspond à une situation très sévère (presque tous les bourgeons restés en leur début de débouffement), est peu présente chez les bourgeons axillaires seulement.

2.4.1.3- Bourgeons morts

Lors des examens des bourgeons au laboratoire, nous avons mis en évidence la mortalité des bourgeons terminaux seulement complètement desséchés avec un taux moyen de 8%. Cette mortalité est enregistrée chez 58% des arbres mais avec des taux variables allant de 3 à 50%.

2.4.2- Rameaux feuillés

2.4.2.1-Bourgeons débourrés

Les résultats de l'examen des bourgeons ayant donné des pousses sont présentés dans la figure 59.

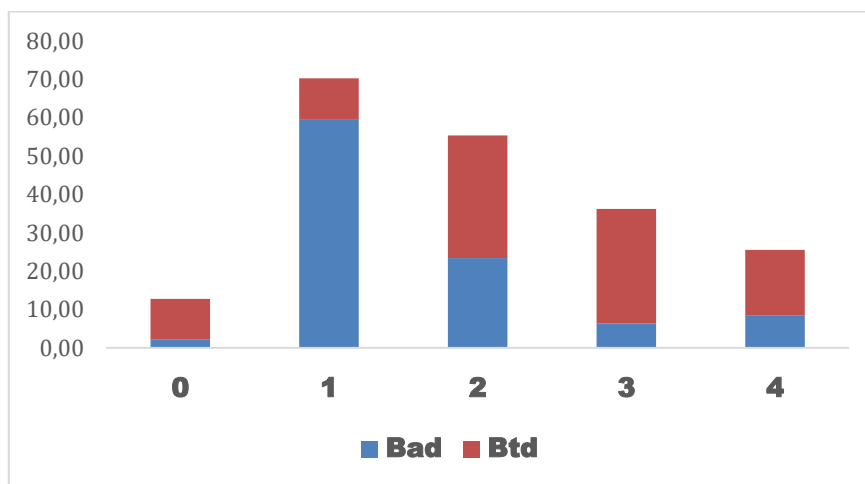


Figure 59: Distribution des proportions d'arbres par types de rameaux feuillés

La lecture de cette figure montre que les arbres aux rameaux peu feuillés ou fortement nus (classe 1) sont dominants avec 60%. Sur ces rameaux, les pousses issues des bourgeons axillaires sont peu fréquentes.

Les rameaux partiellement feuillés ou nus de la classe 2 sont peu présents avec un taux de 23%. Par contre, les arbres aux rameaux bien feuillés sont rares.

En ce qui concerne les pousses issues des bourgeons terminaux, malgré qu'ils contribuent moins dans l'impotence des pousses par rapport aux bourgeons axillaires, elles sont plus marquées dans les classes 2 et 3 avec des taux respectifs de 32 et 30%.

En somme, et à travers les données de l'examen des bourgeons, nous pouvons dire que 93% des bourgeons axillaires ont donné des pousses et le reste (n=171) est resté dans un état non débourré ou début débourement. Par contre chez les bourgeons terminaux, nous enregistrons 20% n'ayant pas débourrés (n=154).

2.4.2.2- Taille des feuilles des pousses

Dimension des feuilles

Le tableau 32 résume les données statistiques des mesures des feuilles (n=1685) issues des bourgeons axillaires et terminaux des arbres des deux stations.

Tableau 32: Données statistiques des mesures des feuilles du chêne liège (n=1685)

Paramètres	Mesures
Longueur moyenne (cm)	2,24
Valeurs limites	0.2-4,9
Ecart-type	0,92
Largeur moyenne (cm)	1,31
Valeurs limites	0,6-2,5
Ecart-type	0,40
Surface foliaire moyenne (cm ²)	3,24
Valeurs limites	0.1-12,44
Ecart-type	2,51
Nombres moyen de feuilles par pousse	2.67 (Ba) – 3.04 (Bt)
Valeurs limites moyennes	1-5.5
Longueur moyenne du rameau court (R0)	0,94

La lecture de ce tableau montre que la longueur moyenne des feuilles est 2.24 cm. Cette valeur classe les feuilles dans la catégorie de petites tailles. Cette longueur est très variable ; elle est comprise entre 0.2 cm et 4.9 cm. La largeur suit la même tendance que la longueur en variant entre 0.6 et 2.5 cm. La surface foliaire moyenne est de 3.2 cm², elle est très variable aussi. Chaque pousse contient en moyenne 2 à 3 feuilles évoluant en petits paquets rarement les feuilles sont séparées sur les pousses.

Distribution des arbres par classes de taille des feuilles.

La figure 61 illustre la distribution des feuilles dans les deux stations selon leur longueur. Il convient de citer qu'il y a une forte corrélation ($r=0.93$) entre la longueur et la surface foliaire. Nous avons choisi la variable « Longueur » dans notre analyse. (Fig.60).

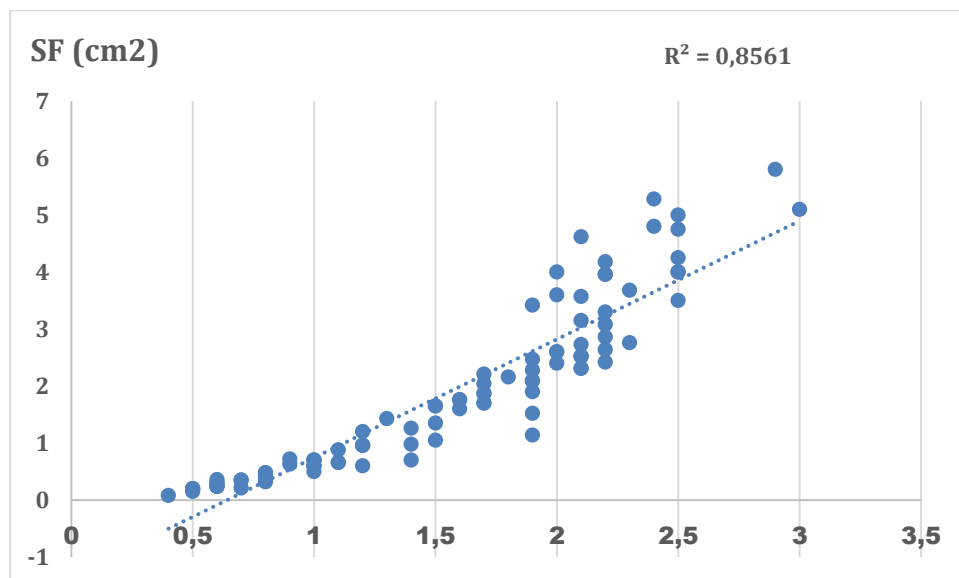


Figure 60: Relation entre la longueur des feuilles (L : cm) et la surface foliaire (SF : cm²) (n=96)

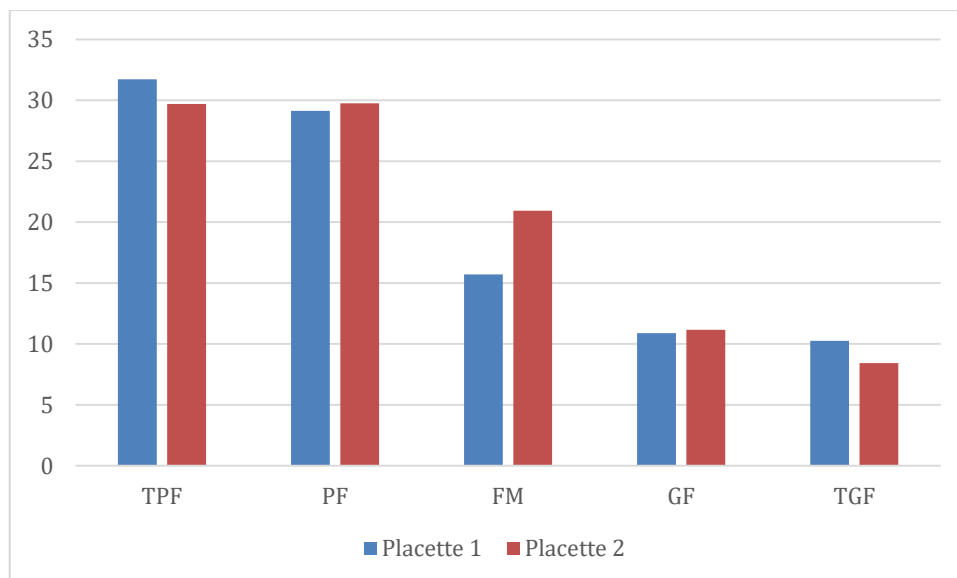


Figure 61: Histogramme de distribution des arbres (%) par classes de grandeur des feuilles dans les deux stations d'étude

D'après cette figure, nous remarquons que la catégorie des feuilles de très petites tailles (TPF) à petites tailles (PF) sont largement majoritaires sur les arbres des deux stations. Le taux cumulé atteint près de 60%. Les feuilles de tailles moyenne (FM) à grandes (GF) sont par contre moins représentées, avec des valeurs de 16 et 11 %.

Globalement, ces résultats traduisent une prédominance des tailles anormales des feuilles (petites dimensions foliaires). Ceci pourrait être lié aux contraintes environnementales, telles que le stress hydrique.

3-Reprise végétative ou feuillaison des arbres

Les résultats des observations de la phénologie des arbres (feuillaison) effectuées dans les deux stations en printemps 2025 sont présentés dans le graphique 62.

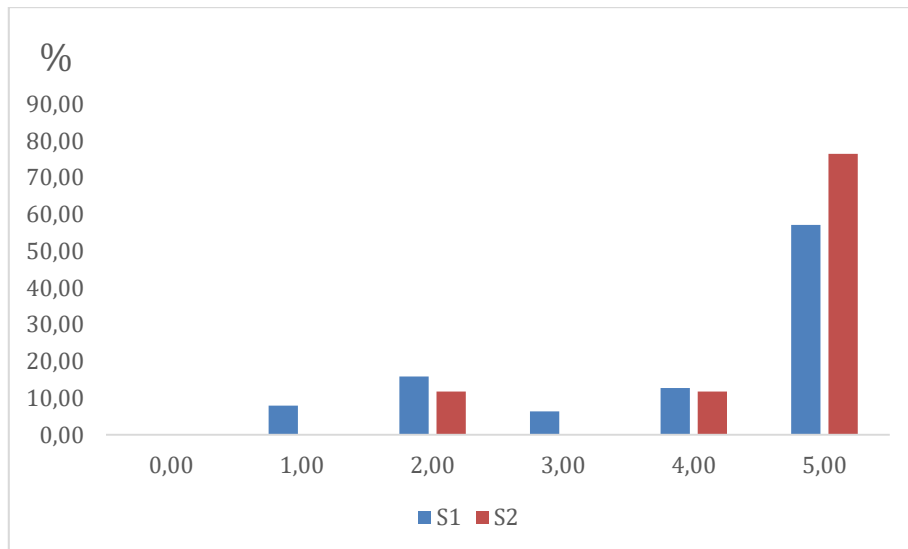


Figure 62: Histogramme de distribution des arbres par classes de reprise végétative (RV: feuillaison) des arbres en mai 2025 des deux stations d'étude

Dans les deux stations, la majorité des arbres appartiennent à la classe 5 caractérisant un fort début de feuillaison. Cette reprise végétative varie entre 57% en S1 et 76% en S2. La concentration des arbres dans cette classe indique une forte dynamique de débourrement et de reprise végétative et par conséquent un bon démarrage sanitaire du peuplement.

Le reste des arbres de la station 1 surtout présente un taux de reprise très variable allant du début de feuillaison très faible à moyen.

En résumé, ces résultats révèlent que les peuplements ont bénéficié d'une meilleure reprise végétative tout au moins pour le moment. Par contre certains arbres conservent toujours des signes de faiblesse physiologique, traduisant une vulnérabilité accrue et un état de dépérissement plus avancé.

4-Analyse multivariée des variables

4.1-Les paramètres dendrométriques et sanitaires

L'analyse en composantes principales réalisée sur les données dendrométriques et sanitaires des arbres issus des deux stations a permis de synthétiser la variabilité multidimensionnelle en un espace réduit. Les deux premiers axes (Dim.1 et Dim.2) représentent une part importante de la variance totale des données (38.7%) et structurent les principales tendances observées (Fig.63).

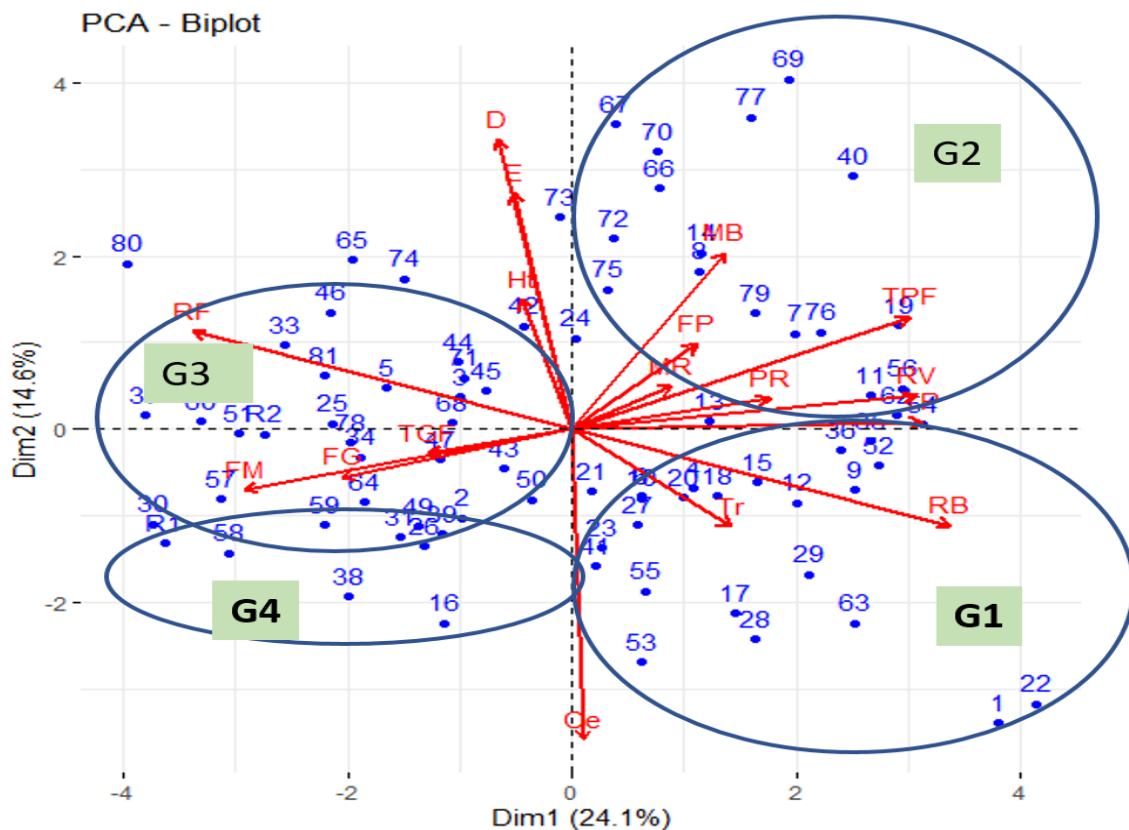


Figure 63: Représentation dans le plan factoriel ($A_1 \times A_2$) des caractéristiques dendrométriques et sanitaires des arbres des deux stations

Le premier axe (Dim.1) avec un taux d'inertie de 24,1% est principalement structuré par les variables physiologiques. Il oppose:

- **Positivement:** les arbres caractérisés par une transparence du houppier (TP) élevée, une présence des rameaux nus avec bourgeons non débourrés ou en début de débourrement (RB), des très petites feuilles (TPF), ainsi une reprise végétative (RV) active. Ces éléments traduisent un état de stress physiologique accompagné de tentatives de renouvellement foliaire ou de récupération.
- **Négativement:** des arbres montrant une canopée plus fonctionnelle avec une prédominance des rameaux feuillés (RF), des feuilles moyennes (FM), signes d'un développement foliaire stable.

Ce premier axe peut ainsi être interprété comme un gradient de réactivité physiologique au stress, allant d'une phase de reprise active à une structure foliaire plus stable.

Le second axe (Dim.2) avec un taux d'inertie de 14,6% est dominé par des variables dendrométriques:

- **Positivement corrélées:** le diamètre (D), l'épaisseur du liège (E), ainsi que la mortalité des branches (MB), suggérant des individus développés mais confrontés à un certain niveau de stress chronique.

- **Négativement corrélée:** le coefficient d'écorçage (Ce), qui peut refléter une faible capacité à reconstituer l'écorce.

Ce second axe décrit donc un gradient structural, différenciant les arbres vigoureux sur le plan morphologique de ceux plus fragiles ou vieillissants.

Le cercle des corrélations montre une organisation claire des variables: les indicateurs de stress ou de reprise foliaire (TP, TPF, RV, RB) sont fortement associés au pôle positif de Dim.1, tandis que les variables traduisant une canopée fonctionnelle (RF, FM) sont situées à l'opposé. Les variables dendrométriques (D, E, Ce) s'organisent selon Dim.2, illustrant une variabilité indépendante de l'état foliaire, en basant sur les paramètres dendrométriques.

La classification hiérarchique ascendante (CHA) a révélé 4 groupes d'arbres homogènes selon leur réponse adaptative aux aléas climatiques (Fig. 64).

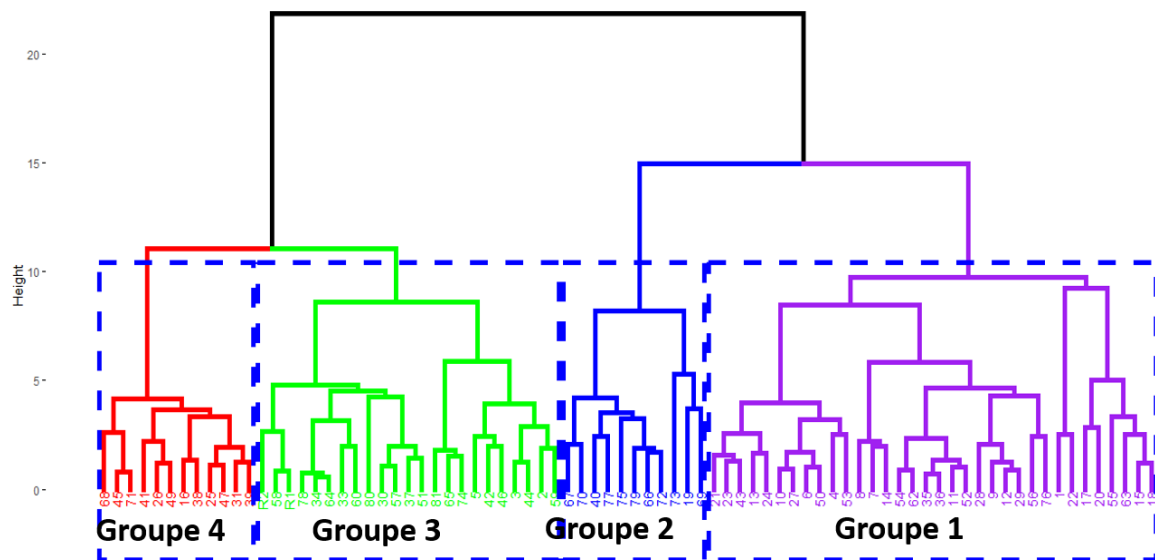


Figure 64: Classification hiérarchique ascendante des arbres en groupes homogènes d'arbres selon leur situation sanitaire

La projection des individus sur le plan (Dim.1, Dim.2) permet de distinguer plusieurs profils:

Groupe1 (40% des cas): les arbres complètement défeuillés: Absence de débourrement ou débourrement très restreint (<10%), rameaux généralement nus ou très peu feuillés, houppier très clair (>90 %), une transparence élevée, le squelette bien visible, une forte proportion de très petites feuilles affecte jeunes arbres (\emptyset :13-34cm), avec très bons signes de reprise végétative

Groupe 2 (12% des cas) – Les arbres sont visiblement nus, une forte transparence du houppier (>70%), rameaux feuillés (>55%) mais avec une elongation très faible des pousses (ramules de l'année: < 1cm), feuilles de taille très réduite (<1.5cm), avec une mortalité des branches élevé

Groupe 3 (25%): Les arbres possèdent une canopée constituée de rameaux feuillés (>90%), le houppier est recouvert de feuillage moyen à assez dense (>50%), transparence moyenne à faible (<25%), les feuilles des taille moyenne (<2.5cm) à grande (>3.5cm). Ils sont probablement en état de fonctionnement stable, mais peuvent aussi être des arbres avec des feuilles de années passée

Groupe 4: Les sont caractérisés par un coefficient de d'écorsage élevé, et une moindre vitalité globale. Ils peuvent correspondre à des sujets défavorisés dans la compétition ou en début de stresse

Ces résultats montrent que les arbres adoptent des stratégies différenciées de réponse aux contraintes environnementales, en particulier face à la sécheresse ou aux stress biotiques. La transparence du houppier, les modifications du développement foliaire (taille, présence de bourgeons) et les signes de reprise végétative forment un ensemble de réponses dynamiques qu'il convient de considérer pour évaluer la résilience des peuplements. En parallèle, la structure dendrométrique reste un facteur explicatif important de la réponse adaptative des arbres.

4.2-Anyse des échantillons des rameaux

L'analyse en composantes principales réalisée sur les mesures sanitaires, morphologiques et phénologiques des échantillons prélevés de 45 arbres de la station 1 révèle une organisation structurée autour de deux axes principaux, représentant des gradients éco physiologiques et de reprise végétative (Fig.65).

feuilles des bourgeons terminaux (NFBt: -0.52), et les très petites feuilles (TPF: -0.80) sont négativement corrélées, indiquant une différenciation très nette de la canopée et de la structure foliaire et que la majorité des feuilles en très petites feuilles sont des feuilles issues des bourgeons terminaux.

Le cercle des corrélations montre clairement que les caractères (bourgeons et feuilles) structurent fortement le plan factoriel. L'axe 1 met en évidence le niveau de reprise foliaire et bourgeonnaire, tandis que l'axe 2 oppose des arbres à feuillage pleinement développé à ceux dont la structure foliaire reste incomplète ou en cours de formation.

La projection des arbres sur le plan factoriel met en évidence quatre groupes fonctionnels dont deux dominants (Fig.66)

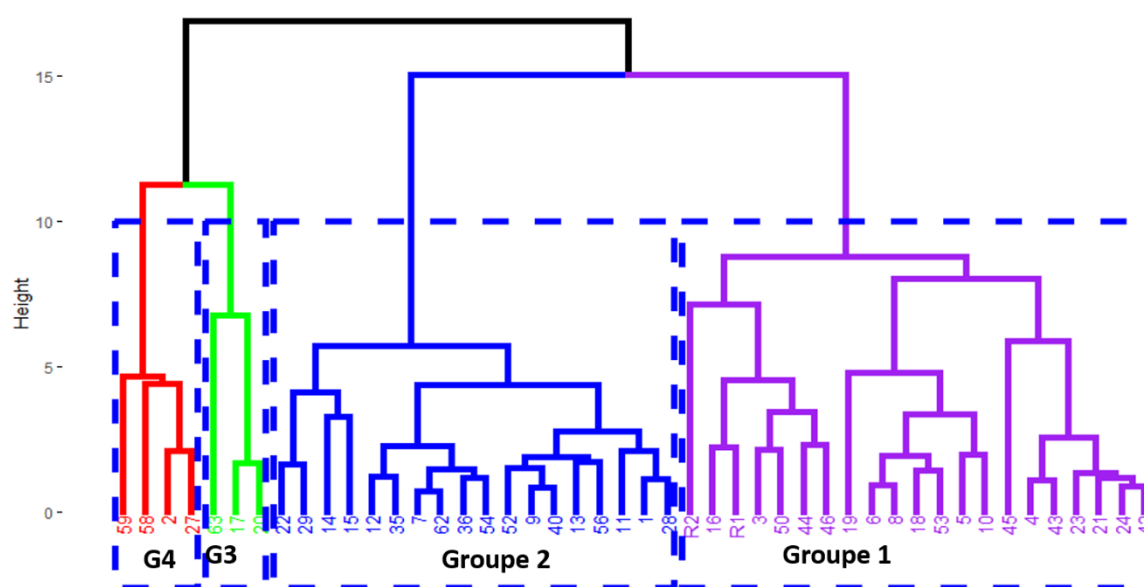


Figure 66: Classification hiérarchique ascendante (CHA) des arbres en groupes homogènes selon l'examen des rameaux

Groupe 1: il contient les arbres présentant un grand nombre de bourgeons débouffés (axillaires et terminaux), un feuillage actif, et un fort potentiel de

Groupe 2: les arbres sont caractérisés par des bourgeons en début de débouffement (Btd, Badd), avec de très petites feuilles (arbres n°11, 22, 29...).

Groupe 3 et 4 : on trouve des arbres riches en grandes et très grandes feuilles, avec une bonne longueur foliaire, traduisant un bon développement.

L'ACP 2 révèle la présence de stratégies écologiques contrastées dans le peuplement. Certains arbres montrent une forte activité de débouffement et développement foliaire,

traduisant une capacité de réaction adaptative aux stress, tandis que d'autres présentent des signes de ralentissement physiologique ou de dépérissement.

L'analyse fine des caractères de croissance et de reprise permet ainsi de distinguer des profils d'arbres à potentiel de survie élevé et d'autres à surveiller ou à prioriser dans la gestion sylvicole.

5-Discussion

Les résultats obtenus dans la forêt de Hafir mettent en évidence l'influence majeure des facteurs climatiques, édaphiques et sylvicoles sur la dynamique et la santé des peuplements de *chêne liège*. La combinaison des analyses de ces paramètres avec celles physiologiques permet d'établir un diagnostic global, mettant en évidence les contraintes écologiques auxquelles fait face cette essence emblématique dans un contexte du stress hydrique et un changement climatique.

Dynamique climatique et disponibilité en eau

Le climat qui a régné dans la zone de Hafir entre 2020 et 2025 révèle une **tendance nette à la sécheresse**, marquée par une **diminution importante des précipitations mensuelles** en particulier durant les saisons automnale et printanière. Cette dernière saison est cruciale pour la reconstitution des réserves en eau du sol, la phénologie et la croissance des arbres. Cette situation est aggravée par un allongement de la période de sèche estivale. Cette évolution climatique se traduit par une augmentation de l'évapotranspiration et une réduction du nombre de jours de pluie, accentuant les épisodes de sécheresse, particulièrement durant la saison estivale (juin-septembre), période critique pour le chêne-liège. En parallèle, les températures maximales estivales ont connu une hausse significative, accentuant davantage l'**évapotranspiration potentielle**.

Cette irrégularité contribue fortement à la contrainte hydrique subie par les peuplements. La réserve utile en eau du sol qui s'est trouvée en situation de stress prolongé, fréquemment inférieure à 50 %, confirme la faible capacité de rétention d'eau dans un sol à texture sableuse, ce qui limite l'alimentation hydrique des arbres. Ces résultats corroborent les travaux de (Hillel,1974) et (Aussenac,1985) sur la relation directe entre la disponibilité hydrique et la dynamique physiologique des végétaux qui sont liées d'une part aux conditions atmosphériques.

Composantes pédologiques et influence sur la disponibilité en eau

Les analyses pédologiques réalisées dans les sites d'étude ont mis en évidence une **texture sablonneuse**. Ce type de sol, bien que facilitant le drainage, **présente une faible capacité de rétention en eau**, ce qui limite fortement la disponibilité hydrique en période sèche.

Les mesures de l'humidité du sol, effectuées par gravimétrie dans plusieurs endroits confirment cette dynamique saisonnière. Avant les premières pluies abondantes de fin automne, les sols étaient très secs avec des taux d'humidité très bas sur toute la profondeur. Ceci a causé un dessèchement de toute la végétation accompagnatrice du chêne liège ayant des racines superficielles comme les cistes, la lavande, le Diss et les jeunes régénérations de Génévrier oxycèdre et le chêne vert.

Cette situation est renversée en hiver et printemps en rechargeant les sols en eau de pluies. Ce phénomène de réhydratation est vital pour le chêne-liège, dont le système racinaire peut puiser l'eau à différentes profondeurs selon la saison (Crombie et al., 1988 ; Carlier et al., 1992).

Réponse sylvicole et état sanitaire du peuplement

Les conséquences de ces conditions hydriques sur la dynamique forestière du chêne-liège sont visibles à travers les paramètres sylvicoles mesurés. Sur le plan sylvicole, les peuplements montrent une **structure dominée par des arbres jeunes**. Cette répartition suggère une dynamique de régénération quasiment absente et un développement freiné, probablement en lien avec les fréquences de glandées aggravées par les contraintes hydriques et climatiques.

En matière de croissance du liège, les premières données montrent que la majorité des arbres traduisent un **ralentissement de la productivité forestière**, conséquence du stress chronique et la sécheresse qui affecte la croissance radiale du bois et le développement du liège, comme en témoignent les faibles valeurs du diamètre (D) et de la croissance du liège. Ceci s'explique par l'impact direct de la sécheresse sur la division cellulaire dans le phellogène (Carlquist 1975 ; Fritts 1976 ; Villar Salvador et al. 1997) et sur la physiologie de croissance.

Le diagnostic sanitaire des arbres met en évidence la dominance de la transparence foliaire et la visibilité de son architecture. Les feuilles ainsi formées sont loin de leur taille naturelle elles sont dominées par les feuilles de taille réduite. Le déficit foliaire révèle une altération significative de l'appareil foliaire chez les arbres soumis à un stress hydrique prolongé. La **fréquence importante de rameaux secs**, la **mortalité des branches**, de rameaux nus à cause de non débourrement des bourgeons sont des réponses des arbres aux contraintes hydriques.

Catégories de réponses adaptatives des arbres à la sécheresse

L'analyse statistique multivariée a permis de distinguer deux grands groupes d'arbres selon leur réponse aux facteurs environnementaux. Le premier regroupe les arbres plus résilients, caractérisés par une meilleure reprise foliaire malgré la contrainte climatique. Il est caractérisé par une forte densité foliaire et une activité végétative soutenue. Le second groupe est composé d'arbres très affectés, montrant un dépouillement complet du feuillage et des signes de dépérissement avancé. Dans certaines conditions climatiques défavorables (grosses chaleurs, sirocco) ou après une exploitation exagérée du liège, l'arbre peut exceptionnellement perdre tout son feuillage en été et rester par conséquent nu (NATIVIDADE, 1956).

Ces résultats confirment la sensibilité du chêne-liège aux conditions climatiques locales. Les peuplements étudiés montrent des signes de déclin, principalement en lien avec le déficit hydrique chronique et la faible capacité de rétention en eau des sols.

Réponses physiologiques au stress hydrique

Les résultats obtenus montrent une corrélation forte entre l'humidité du sol et l'état physiologique des peuplements de chêne-liège. En période sèche, le potentiel hydrique chute de manière significative, limitant la disponibilité de l'eau pour l'arbre. Cette situation induit une fermeture rapide des stomates, ce qui limite la transpiration mais diminue aussi les échanges gazeux nécessaires à la photosynthèse (Cochard & Granier, 1999). D'autre part, la chute du potentiel hydrique foliaire provoque également une embolie des tissus conducteurs, perturbant la circulation de la sève brute (Cochard &

Granier, 1999), un phénomène appelé aussi cavitation (Cruiziat & Tyree, 1990 ; Choat et al., 2018). Si cette embolie devient généralisée, la circulation de la sève est compromise, pouvant conduire à la mort de l'arbre (Cochard et al., 2021).

La dynamique de l'humidité du sol influence directement le comportement hydrique de l'arbre. Le moteur principal de la circulation de l'eau n'est pas la poussée racinaire mais bien l'évaporation foliaire, qui crée une tension dans la colonne d'eau du xylème (Cruiziat & Tyree, 1990). Lorsque l'humidité du sol diminue, les résistances hydrauliques entre le sol et les racines augmentent fortement, ce qui aggrave la contrainte hydrique de l'arbre (Cochard & Granier, 1999).

Selon les travaux d'Aussenac (1985) et Crombie et al. (1988), les réponses des plantes au stress hydrique varient selon l'espèce. Dans le cas du chêne-liège, espèce xérophile mais sensible aux sécheresses prolongées, la baisse prolongée du potentiel hydrique entraîne un ralentissement de la croissance, une réduction foliaire et de la reprise végétative.

Enfin, plusieurs chercheurs confirment que les dépérissements observés dans les subéraies méditerranéennes sont largement attribuables au changement climatique, en particulier à la recrudescence des sécheresses estivales et à l'irrégularité pluviométrique (Sbrescia, 2016).

McDowell et al. (2008) ont identifié trois causes majeures de mortalité induite par la sécheresse, la rupture de l'intégrité hydraulique, la carence en carbone (due à la baisse de photosynthèse) et la vulnérabilité accrue aux pathogènes et ravageurs. Ces phénomènes traduits les résultats observés dans notre étude. Près la moitié des arbres ont été attaqués par le xylophage secondaire ou opportuniste *Platypus cylindrus* causant leur mortalité.

Conséquences à long terme du changement climatique

Les effets du stress hydrique peuvent s'étendre sur plusieurs années. Les travaux de Cailleret et al. (2017) montrent que les sécheresses extrêmes peuvent ralentir la croissance des arbres pendant une décennie, en raison d'un déficit prolongé en glucides non structuraux. De plus, la phénologie des insectes ravageurs est accélérée par le réchauffement climatique, ce qui aggrave la vulnérabilité des forêts (Battisti & Jactel, 2010 ; Buckley et al., 2017).

Implications pour la gestion forestière et perspectives

Les données mettent en lumière la nécessité d'adapter les pratiques sylvicoles en fonction du contexte local. Parmi les recommandations, il est suggéré de réduire la densité des peuplements par des éclaircies afin de limiter la compétition pour l'eau, de favoriser les individus les plus vigoureux.

Conclusion générale et perspectives

L'étude menée dans la forêt de Hafir a permis de mettre en évidence l'influence des facteurs climatiques, hydriques, pédologiques et sylvicoles sur la dynamique actuelle des peuplements de chêne-liège. L'analyse pluviométrique sur la période 2020–2025 révèle une irrégularité importante des précipitations, marquée par des déficits annuels notables et des épisodes de sécheresse prolongée, caractéristiques du climat semi-aride de la région (Lionello et al., 2012 ; IPCC, 2021).

Cette tendance est aggravée par une diminution des jours de pluies efficaces, réduisant la recharge de la réserve utile en eau (RU) du sol. En effet, les mesures d'humidité du sol, obtenues par gravimétrie et par humidimètre, confirment une dynamique saisonnière nette : un assèchement critique en automne, suivi d'une réhydratation progressive à partir de l'hiver. Ces variations influencent directement la disponibilité en eau pour les arbres, et conditionnent leur physiologie et leur croissance (Costa et al., 2016 ; Vallejo et al., 2012). Les profils pédologiques étudiés révèlent une texture majoritairement sableuse, avec une faible capacité de rétention en eau, accentuant la vulnérabilité hydrique des peuplements. Le pH du sol, variant de neutre à légèrement basique, reste globalement favorable à l'activité biologique et à la minéralisation.

Sur le plan physiologique, l'analyse des données de terrain indique une structure déséquilibrée des peuplements, avec un taux élevé de transparence, une fréquence accrue de rameaux morts et une faible vigueur foliaire chez plusieurs individus. Ces symptômes traduisent un stress hydrique chronique. L'analyse en composantes principales (ACP) a permis d'identifier différents groupes d'arbres selon leur comportement écologique, en mettant en relation les variables sylvicoles avec les paramètres climatiques et édaphiques.

Ces constats confirment la sensibilité croissante du chêne-liège face au stress hydrique et à l'aridité croissante dans les zones méditerranéennes (Aronson et al., 2009 ; Pausas et al., 2009). La survie et la productivité de cette essence dans des conditions de plus en plus contraignantes dépendront de la capacité des gestionnaires forestiers à adapter les pratiques sylvicoles. Il est donc essentiel de privilégier des approches de gestion différenciée, incluant des éclaircies ciblées, la conservation de l'humidité du sol, et la sélection d'individus résilients.

Enfin, cette étude met en évidence la pertinence d'une approche intégrée combinant climatologie, hydro-pédologie et écologie forestière pour diagnostiquer l'état des subéraies. À l'avenir, l'intégration de données à plus long terme, incluant des suivis phénologiques et génétiques, permettra d'affiner la compréhension des mécanismes d'adaptation du chêne-liège face au changement climatique, et de guider les politiques de conservation durable des forêts méditerranéennes.

Références bibliographiques

1. Aime, S. 1976. Contribution à l'étude écologique du chêne-liège: Étude de quelques limites.
2. APCOR. 2018. Anuário Estatístico 2018. Associação Portuguesa da Cortiça (APCOR/CORK), 59 p.
3. Appiagyei, B. D., Belhoucine-Guezouli, L., Bessah, E., & Morsli, B. 2023. The impact of recurrent fires on tree species composition and regeneration potential in Hafir-Zariffet cork oak forest, Tlemcen, Algeria. *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC-WPRS Bulletin*, 168, 12–15.
4. Aronson, J., Pereira, J.S., & Pausas, J.G. (2009). *Cork Oak Woodlands on the Edge: Ecology, Adaptive Management, and Restoration*. Island Press.
5. Aussenac G (1985) Le potentiel hydrique de l'arbre: une donnée essentielle pour la compréhension de l'écophysiologie des essences forestières. *Sci Sol* 4, 217-226.
6. B.N.E.D.E.R. 1979a. Étude d'inventaire des terres et forêts de l'Algérie du Nord: Wilaya d'Oran. Ministère de l'Agriculture, *Revue Agricole*, Alger, 34 p.
7. B.N.E.D.E.R. 1979b. Étude d'inventaire des terres et forêts de l'Algérie du Nord: Wilaya de Tlemcen. Ministère de l'Agriculture, *Revue Agricole*, Alger, 156 p.
8. Battisti, A., & Jactel, H. (2010). Populations d'insectes rava geurs et changement climatique dans les forêts du Bassin méditerranéen. *Forêt méditerranéenne*, XXXI (4), 377-384.
9. Becker, M. 1987. Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges: Étude écologique et dendrochronologique. *Annales des Sciences Forestières*, 44(4), 379–402.
10. Beddiar, A., Adouane, M., Merabet, A., & Boudiaf, I. 2012. Le chêne-liège menacé par les acacias introduits. *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC-WPRS Bulletin*, 76, 1–4.
11. Belhoucine, L. 2013. Les champignons associés au *Platypus cylindrus* Fab. (Coleoptera, Curculionidae, Platypodinae) dans un jeune peuplement de chêne-liège de la forêt de M'Sila (Oran, nord-ouest d'Algérie): Étude particulière de la biologie et de l'épidémiologie de l'insecte. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Faculté SNV/STU, Département Agroforestier, 243 p.
12. Belhoucine, L., & Bouhraoua, R. T. 2012. Évolution spatio-temporelle des attaques de *Platypus cylindrus* (Coleoptera, Platypodidae) dans un jeune peuplement de chêne-liège après démasclage: Cas de la subéraie de M'Sila (Nord-Ouest Algérie). *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC-WPRS Bulletin*, 76, 201–204.
13. Belhoucine, L., Bouhraoua, R. T., Dahane, B., & Pujade-Villar, J. 2011. Aperçu biologique du *Platypus cylindrus* (Fabricius, 1792) (Coleoptera,

- Curculionidae: Platypodinae) dans les galeries du bois de chêne-liège (*Quercus suber* L.). *Orsis*, 25, 105–120.
14. Benabdallah, S. 2019. Impact des incendies de forêt sur le couvert forestier du chêne-liège et son cortège floristique: Cas du massif Hafir-Zarieffet. Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Département de foresterie, Faculté SNV-STU, 92 p. + annexes.
 15. Bonneau, M., & Landmann, G. 1988. Le dépérissement des forêts en Europe. *La Recherche*, 205(19), 1542–1556.
 16. Boudru M., 1989-Forêt et Sylviculture: traitement des forêts. Les Presses Agronomiques de Gembloux (Belgique), 356p.
 17. Boudy, P. 1950. Économie forestière nord-africaine. Tome 2(1): Monographies et traitements des essences forestières. Larose, Paris, 525 p.
 18. Boudy, P. 1952. Guide du forestier en Afrique du Nord. La Maison Rustique, Paris, 505 p.
 19. Boudy, P. 1955. Économie forestière nord-africaine. Tome IV: Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Éditions Larose, Paris, 483 p.
 20. Bouhraoua, R. T. 2003. Situation sanitaire de quelques forêts de chêne-liège de l'Ouest algérien: Étude particulière des problèmes posés par les insectes (Thèse de doctorat d'ingénieur). Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 290 p.
 21. Bouhraoua, R. T., & Villemant, C. 2005. Mécanismes généraux de l'altération sanitaire des peuplements du chêne-liège de l'Algérie nord-occidentale. *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC-WPRS Bulletin*, 28(8), 1–8.
 22. Bouhraoua, R. T., Bouzaoui, A., Dehane, B., Belhoucine, L., & Gheffar, M. 2014. Effet de la récurrence des feux sur la dégradation paysagère, l'altération sanitaire et la réduction de la production du liège de la subéraie du massif forestier de Haffir-Zarieffet (Tlemcen, Algérie). *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC-WPRS Bulletin*, 10, 15–23.
 23. Bouhraoua, R. T., Roula, S. E., & Catry, F. X. 2019. Facteurs de vulnérabilité des subéraies algériennes aux incendies de forêts dans le contexte du changement climatique. *Forêt Méditerranéenne*, 40(4), 391–400.
 24. Bouhraoua, R. T., Villemant, C., Khelil, M. A., & Bouchaour, S. 2002. Situation sanitaire de quelques subéraies de l'ouest algérien. *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC-WPRS Bulletin*, 25(5), 85–92.
 25. Bouvarel, P. 1984. Le dépérissement des forêts attribué aux dépôts atmosphériques acides. *Revue Forestière Française*, 34(3), 173–180.
 26. Braun –Blanquet J., 1952-Les groupements végétaux d la France méditerranéenne , CNRS,
 27. BSRF, 1937- Vingt ans d'observation de météorologique forestière en Algérie. *Bulletin de la Station de Recherches Forestières du Nord de l'Afrique*. 2 (3), septembre 1937, 204-270

28. Buckley, L.B., Arakaki, A.J., Cannistra, A.F., Kharouba, H.M., & Kingsolver, J.G. (2017). Insect development, thermal plasticity and fitness implications in changing, seasonal environments. *Integrative and Comparative Biology*, 57(5), 988-998.
29. C.F.W.T. 1995. Fascicule de gestion de la forêt domaniale de Hafir, Canton Oued Fernane. 4 p.
30. C.O.I.T. 1900. Fascicule de propriété de la forêt domaniale d'Hafir, Cantonnement de Tlemcen Est. Non paginé.
31. Cailleret, M., Jansen, S., Robert, E.M.R., Desoto, L., Aakala, T., Antos, J. A., Beikircher, B., Bigler, C., Bugmann, H., Caccianiga, M., Čada, V., Camarero, J.J., Cherubini, P., Cochard, H., Coyea, M.R., Čufar, K., Das, A. J., Davi, H., Delzon, S., ... & Martínez- Vilalta, J. (2017). A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global Change Biology*, 23(4), 1675-1690. <https://doi.org/10.1111/gcb.13535>
32. Cantat R., Piazzetta R., 2005: La levée de liège. Institut méditerranéen de liège.
33. Carlier G, Peltier JP, Gielly L (1992) Comportement hydrique du frêne (*Fraxinus excelsior* L) dans une formation montagnarde mésoxérophile. *Ann Sci for* 49, 207-223
34. Carlquist S (1975) Ecological strategies of xylem evolution. University of California Press, Los Angeles
35. CEREMA, 2013. La réserve utile en eau du sol (RU). CEREMA, France
36. Chakali G., Attal-Bedreddine A. et Ouzani H., 2002-Les insectes ravageurs des chênes *Quercus suber* et *Q. ilex* en Algérie. *Integrated Protection in Oak Forests*, IOBC/wprs Bull. 25 (5), 2002, pp. 93 – 100.
37. Chekchaki, S., Beddia, A., & Zaafour, M. D. 2020. Cartographie par télédétection des milieux envahis par *Acacia mearnsii* De Wild. dans l'extrême Nord-Est algérien. *Bois et Forêts des Tropiques*, 343, 5–16.
38. Chenel, P. 1951. Le liège en Algérie. *Annales de Géographie*, 60(321), 296–299.
39. Choat, B., Brodribb, T.J., Brodersen, C.R., Duursma, R.A., López, R., & Medlyn, B.E. (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 558(7711), 531-539. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0240-x>
40. Cochard, H., & Granier, A. (1999). Fonctionnement hydraulique des arbres forestiers. *Revue forestière française*, 51(2), 121-134. <https://doi.org/10.4267/2042/5425>
41. Cochard, H., Pimont, F., Ruffault, J., & Martin-StPaul, N. (2021). SurEau: a mechanistic model of plant water relations under extreme drought. *Annals of Forest Science*, 78(2), 55. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01067-y>
42. Costa, A., Barbosa, I., Roussado, C., Graça, J., & Spiecker, H. (2016). Climate response of cork growth in the Mediterranean oak woodlands of southwestern Portugal. *Dendrochronologia*, 38, 72–81
43. Cramer, W., Guiot, J., & Fader, M. (2018). Mediterranean Region. In: *Climate Change and Land. IPCC Special Report*.

44. Crombie DS, Tippet JT, Hill TC (1988) Dawn water potential and root depth of trees and understorey species in south-western Australia. *Aust J Bot* 36, 621-631
45. CRPFC. 2014. Étude de la sensibilité du chêne-liège au changement climatique en Corse. Centre Régional de la Propriété Forestière de Corse, Direction Régionale de l'Agriculture de l'Alimentation et de la Forêt, 101 p.
46. CRUIZIAT (P.), TYREE (M.T.). —La Montée de la sève dans les arbres. *La Recherche*, 21, 1990, pp. 406-414.
47. D.S.F. 1991a. Réseaux de surveillance de l'état sanitaire des forêts (réseau CEE et réseau Bleu): Protocole pour les observations. Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (D.E.R.F), Ministère de l'Agriculture et des Forêts, 27 p.
48. David, T. S., Henriques, M. O., KurzBesson, C., Nunes, J., Valente, F., Vaz, M., Pereira, J. S., Siegwolf, R. T., Chaves, M. M., Gazarini, L. C., & David, J. S. 2007. Water use strategies in two cooccurring Mediterranean evergreen oaks: surviving the summer drought. *Tree Physiology*, 27(6), 793–803.
49. Dehane, B. 2006. Incidences des facteurs écologiques sur les accroissements annuels et la qualité du liège de quelques subéraies du nord-ouest algérien. Mémoire de magistère, Département de foresterie, Faculté des sciences, Université de Tlemcen, 129 p.
50. Dehane, B. 2012. Incidence de l'état sanitaire des arbres du chêne-liège sur les accroissements annuels et la qualité du liège de deux subéraies oranaises: M'sila (W. Oran) et Zarrieffet (W. Tlemcen). Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 293 p.
51. Dehane, B., Benrahou, A., Bouhraoua, R., Hamani, F. Z., & Belhoucine, L. 2014. Chemical composition of Algerian cork according to origin and quality. *International Journal of Research in Environmental Studies*, 1, 17–25.
52. DGF, 2021- Statistiques de la production du liège en Algérie, Direction Générale des Forêts, 1p.
53. Douguedroit, A. 1987. The variations of dry spells in marseilles from 1865 to 1984, *Int. J. Climatol.*, 7 (6), 541–551, 1987.
54. El Tolbi, M., Ezzahiri, M., & Belghazi, B. 1998. Apport des techniques d'analyse multivariées à l'évolution de l'état de végétation des peuplements forestiers: Cas du chêne-liège en Mâamora (Maroc Atlantique). *Sécheresse*, 9(3), 219–226.
55. FAO. 2013. L'état des forêts méditerranéennes. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
56. Fritts HC (1976) *Tree rings and climate*. Academic Press, London
57. Gaouar, A. 1980. Hypothèses et réflexions sur la dégradation des écosystèmes forestiers dans la région de Tlemcen (Algérie). *Forêt Méditerranéenne*, 2(2), 131–145.

58. Garrec JP, Laitat E., Richardin I., Rose C. 1991. Dépérissement forestier et perturbations minérales aux niveaux histologiques et cellulaire dans les aiguilles de *Picea abies* L. étude par microanalyse X. *Ann. Rech. For.*, n°48, pp: 321-332.
59. Gaudin S. 1997a. Quelques éléments d'écologie utiles au forestier. *BTSA gestion forestière, Module D41*, 88p
60. Gaudin S. 1997b. L'approche typologique et son utilité en foresterie. *BTSA gestion forestière, Module D42*, 20p
61. Ghalem, A., Barbosa, I., Bouhraoua, R. T., & Costa, A. 2016. Comparing cork quality from Hafir-Zarieffet mountain forest (Tlemcen, Algeria) vs. Tagus basin Montado (Benavente, Portugal). *Cogent Biology*, 2, Article 1236431.
62. Hillel D (1974) *L'eau et le sol, principes et processus physiques*. Vander, Louvain, 257 p
63. Huchon, H. 1955. *Connaissance de la forêt*. Éditions La Maison Rustique, Paris, 142 p.
64. I.M.L., 2016: Actes du colloque VIVEXPO 2016: Demain, quelle économie pour nos suberaies?. 77p.
65. IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Water field, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, editors. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
66. Jacamon, M. 1987. *Guide de dendrologie. Tome 2: Feuillus*. École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), Nancy, 256 p.
67. Lamey, A. 1894. *Chêne-liège: sa culture et son exploitation*. Levrault et Cie, Nancy, pp. 168–209.
68. Landmann G., 1988 - Le dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique à longue distance: Les réseaux d'observation et le programme interministériel DEFORPA. *La Santé des Forêts [France] en 1988*, Min. Agri. For. (DERF), Paris: 13-51.
69. Letreuch-Belarouci, A. 2002. Compréhension du processus de dégradation de la subéraie de Tlemcen et possibilités d'installation d'une réserve forestière. Thèse de Magistère, Université de Tlemcen, 205 p.
70. Lionello P., Abrantes, F., Congedi, L., Dulac, F., Gacic, M., Gomis, D., Ma bonne dame, C., Hoff, H., Kutiel, H., Luterbacher, J., Planton, S., Réal, M., Schröder, K., Struglia, M.V., Toreti, A., Tsimplis, M., Ulbrich, U., Xoplaki, E., Introduction : Climat méditerranéen : Informations générales (2012a) dans Lionello P. (Éd.) *Le Climat de la région méditerranéenne. Du passé au futur*, Amsterdam: Elsevier (PAYS-BAS), XXXV-XXXX, ISBN:9780124160422.

71. Loup, J. Sauvage (Ch.). 1962. Recherches géobotaniques sur les subéraies marocaines [Compte-rendu]. *Revue de Géographie Alpine*, 50(3), 474–475.
72. Massenet JY. 2010. Chapitre III: Forme et âge d'un arbre, épaisseur de l'écorce. *Lycée forestier, Mesnières*, 13p.
73. Nageleisen LM. 2002. Suivi des écosystèmes forestiers et évaluation des contraintes environnementales. *Les cahiers du DSF*, 1.2002 (La santé des forêts. [France] en 2000-2001). Min.Agric. Alim.Pêche Aff.rur (DERF), Paris, pp: 70-84.
74. Nagggar M., 1999: L'aménagement sylvo-pastoral: un outil pour un développement durable des ressources forestières IOBC/wprs Bull. 22 (3): 181p.
75. NAGGAR, O.2021. Etude des potentialités subéricoles de la région Nord Ouest Algérien: Cas de la forêt du Parc National de Theniet-El-Had (W. Tissemsilt). Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.
76. Natividade, J. V. 1956. Subericulture. *École Nationale des Eaux et Forêts, Nancy*, 302 p.
77. NRCS, 2024. Soil Survey Staff. (2024). Field book for describing and sampling soils, version 4.0., U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (NRCS), U.S. Government Printing Office.).
78. ONS, 2019- Evolution des exportations du liège entre 2000 et 2015. Office National des Statistiques, ALGER
79. CNIS, 2019- Evolution des exportations du liège entre 2012 et 2014. Centre National d'Information et de Statistiques, Alger
80. Paulo, J., Palma. J., Gomes. A., et al. 2014. Predicting site index from climate and soil variables for cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal. *New Forests*, DOI 10.1007/s11056-014-9462-4.
81. Pausas, J. G., Vargas, J. M., & others (2009). Fire-related traits for plant species of the Mediterranean Basin. *Ecology*, 90(5), 1420 (erratum ou notice).
82. Pereira, H. 2007. *Cork: Biology, production and uses*. Elsevier, Oxford, UK, 329 p.
83. PJ Schoeneberger, DA Wysocki, EC Benham, 2012-Field Book for Describing and Sampling Soils–USDANRCS, <https://pasternack.ucdavis.edu/application/files/5713/7279/1513/soilsfieldguide.pdf>
84. PNT. 2015. Parc National de Tlemcen – Brochure. 4 p.
85. Quézel, P., & Medail, F. 2003. *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Elsevier.
86. Quézel, P. 2000. *Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen*. Ibis Press, Paris, 117 p.
87. Quézel, P., & Santa, S. 1962. *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales (Vols. 1–2)*. CNRS, Paris, 1170 p.

88. Rivoire, P., Trambly, Y., Neppel, L., et al. 2019. Impact of the dry-day definition on Mediterranean extreme dry-spell analysis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 1629–1638.
89. Rondeux J. 1999. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 251p.
90. Roula, S. E., Bouhraoua, R. T., & Catry, F. X. 2020. Factors affecting post-fire regeneration after coppicing of cork oak (*Quercus suber*) trees in northeastern Algeria. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(4), 371–379.
91. Saccardy, L. 1937. Note sur le chêne-liège et le liège en Algérie. *Bulletin de la Station de Recherches Forestières du Nord de l’Afrique*, 2(2), 271–374.
92. Saccardy, L. 1938. Le chêne-liège et le liège en Algérie (suite et fin). *Revue de botanique appliquée et d’agriculture coloniale*, 18(204), 574–593.
93. Sauvage, C. 1961. Flore des subéraies marocaines: Catalogue des cryptogames vasculaires et des phanérogames. *Travaux de l’Institut Scientifique Chérifien, Botanique*, 22, 252 p.
94. Sbrescia.P. Le chêne-liège face au changement climatique en Corse. *Forêt Méditerranéenne*, 2016, XXXVII (4), pp.319-326. hal-03556686.
95. Seigue, A. 1985. La forêt circumméditerranéenne et ses problèmes. *Techniques agricoles et production méditerranéenne*. Éditions G. P. Maisonneuve et Larose, 496 p.
96. Seigue, A. 1987. La forêt méditerranéenne française: Aménagement et protection contre les incendies. Édisud, Aix-en-Provence, 159 p.
97. Seltzer, P. 1946. Le climat de l’Algérie. La Typo-Litho, Alger, 249 p.
98. Shackleton, C. M., Pandey, A. K., & Ticktin, T. 2015. *Ecological sustainability for non-timber forest products: Dynamics and case studies of harvesting*. Routledge, New York.
99. Tekkouk, F., & Bouhraoua, R. T. 2022. Rythme de récupération sanitaire post-incendie du chêne-liège (*Quercus suber* L.) et aptitude à la récolte précoce du liège flambé. *Revue Agrobiologia*, 12(1), 2941–2950.
100. Ulrich, E. 1992. Le réseau national des écosystèmes forestiers (réseau RENECOFOR). *La Santé des Forêts [France]*, Ministère de l’Agriculture et de la Pêche (DERF), Paris, 61 p.
101. Vallejo, V. R., Arianoutsou, M., & Moreira, F. 2012. Fire ecology and post-fire restoration approaches in southern European forest types. In F. Moreira, M. Arianoutsou, P. Corona, & J. de las Heras (Eds.), *Post-fire Management and Restoration of Southern European Forests* (pp. 93–119). Springer, New York.
102. Vignes, E. 1990. Sylviculture des suberaies varoises. *Forêt Méditerranéenne*, 12(2), 125–130.
103. Villar-Salvador P, Castro Dez P, P rez Rontom C, Montserrat Mart G (1997) Stem xylem features in three *Quercus* (Fagaceae) species along a climatic gradient in NE Spain. *Trees* 12:90–96.
104. WWF. 2008. L’univers du liège, une ressource de richesse pour la nature et les hommes. Fonds Mondial pour la Nature (WWF), Rome, 114 p.

105. Yessad, S. A. 2000. Le chêne-liège et le liège dans les pays de la Méditerranée occidentale. Éditions ASBL Forêt Wallonne, Louvain-la-Neuve, 190 p.
106. Zine, M. 1992. Situation et perspectives d'avenir du liège en Algérie. Actes du Colloque « Les Subérais méditerranéennes », Vives, 98–107.

Site web:

1. Web1 : <https://fr.sdec-france.com/humidite-du-sol-les-differentes-techniques>
consulté le 28 décembre 2024
2. Web2(https://svt.acversailles.fr/IMG/archives/docpeda/banques/arboris/images/Chene%20liege/chen_li.htm,
3. Web3 : <https://www.waldwissen.net/fr/habitat-forestier/climat-et-environnement/climat-et-co2/le-chene-face-aux-changements-climatiques>
(consulté le 31 mai 2025)