

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

تلمسان—جامعة أبو بكر بلقايد

Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEM

كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون

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

Département des Ressources forestières

Labo N°31 : Gestion conservatoire de l'eau, du sol et des forêts et développement durable des zones montagneuses de la région de Tlemcen



MÉMOIRE

Présenté par

Benziane Badia

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Foresterie/ Spécialité : Protection des Forêts

Thème

L'impact de la sécheresse sur la mortalité des arbres et la croissance du liège dans la forêt de Hafir (Tlemcen).

Soutenu le 28 /09 /2026, devant le jury composé de :

Président	MEDJAHDI Boumediene	Prof.	Université de Tlemcen
Examineur	DEHANE Belkhier	Prof.	Université de Tlemcen
Encadreur	BOUHRAOUA Rachid Tarik	Prof.	Université de Tlemcen

Année universitaire 2025/2026

DÉDICACE

Je dédie ce travail, fruit de tant d'efforts et de persévérance, avant tout à moi-même, pour avoir cru en mes capacités et surmonté les obstacles de ce parcours.

*À ma chère **maman**,*

Pour ton amour, tes prières, ton soutien et tes sacrifices. Tu as toujours été ma force, mon refuge et ma lumière. Ce travail est le tien autant que le mien. Merci pour tout, du fond du cœur.

*À mon cher **papa**,*

Absent aujourd'hui, mais présent dans mon cœur chaque jour. Tes valeurs, ton amour et tes enseignements continuent de guider mes pas. Que Dieu t'accueille dans Son vaste paradis. J'espère que, là où tu es, tu es fier de moi.

*À mes frères, **Abd el Jalil, Abd el Rahim et Abd el Adime**,*

Merci pour votre présence, votre soutien et votre affection. Je vous souhaite tout le bonheur et la réussite.

*À mes chères copines, **Sana, Téma, Wafaa et Hadje, Zevil**,*

Merci pour votre amitié, vos encouragements, nos fous rires et tous les beaux moments partagés.

*À mes chères amies, **Sabrina, Zineb et Zohor**,*

Merci pour votre bienveillance, votre aide et les précieux souvenirs que nous avons construits ensemble. Vous êtes parmi les plus belles rencontres de mon parcours.

*À mes chers camarades de promotion, **Nihad, Lydia et Ilyes**,*

Merci pour votre soutien, votre entraide et tous les moments inoubliables. Je vous souhaite beaucoup de succès.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail,

Je vous adresse ma sincère gratitude et mes remerciements du fond du cœur. ♡

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, le **Professeur Bouhraoua Rachid Tarik**, pour son encadrement, ses précieux conseils, sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères remerciements vont à le **Professeur Dehane Belkheir** et le **Professeur Medjahdi Boumedienne**, pour avoir accepté de faire partie du jury et d'évaluer ce travail.

Je remercie également Monsieur **Bachir Bensenane**, Chef du département, pour sa disponibilité, son écoute et ses précieux conseils tout au long de mon parcours universitaire.

Mes chaleureux remerciements s'adressent à Monsieur **Ledouzi Mohamed**, pour son aide précieuse, sa disponibilité et son accompagnement lors des sorties et travaux d'échantillonnage sur le terrain.

Je remercie également **Madame Semia**, technicienne de laboratoire, pour son aide, sa disponibilité et son accompagnement durant le travail expérimental.

À mes chers parents, mes piliers et ma plus grande source de soutien, merci pour votre amour, vos sacrifices, vos encouragements et votre confiance. Cette réussite est aussi la vôtre.

À ma famille, mes collègues et mes amis, merci pour votre présence, votre soutien, votre entraide et tous les beaux souvenirs partagés durant ce parcours.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Chaque geste, chaque conseil et chaque encouragement ont compté.

À vous tous, du fond du cœur, merci.

Résumé : L'impact de la sécheresse sur la mortalité des arbres et la croissance du liège dans la forêt de Hafir (Tlemcen)

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.), essence emblématique du bassin méditerranéen occidental, connaît en Algérie une régression continue de ses subéraies, passées de 450 000 ha à la fin du XIXe siècle à environ 230 000 ha actuellement, soit une perte proche de 49 %. Ce mémoire s'intéresse à l'impact de la sécheresse sur la mortalité des arbres dans la forêt domaniale de Hafir (monts de Tlemcen), l'une des principales subéraies de l'ouest algérien. La caractérisation du milieu montre une aridification progressive du climat local : les précipitations moyennes annuelles sont passées de 750 mm (1915-1934) à 644 mm (1961-2017), avec une irrégularité interannuelle accrue, tandis que les températures moyennes annuelles ont augmenté d'environ 1,5 à 2 °C. Un inventaire sanitaire a été réalisé sur quatre sites du canton d'Oued Fernane (S1, S3, S4, S5), différant par leur exposition, leur pente et la structure du peuplement. Sur un total de 188 arbres suivis, 52 ont été trouvés morts, soit un taux de mortalité de 27,66 %, en nette hausse par rapport à 2024 (15,43 %), avec une forte hétérogénéité spatiale : mortalité faible au site 1 (6,25 %, versant nord) et très élevée aux sites 3 et 5 (44 % et 47,69 %, versants exposés). La majorité des arbres morts appartenaient à la classe de déficit foliaire 3, traduisant un dépérissement chronique, tandis que 10 % présentaient une mortalité subite malgré un état sanitaire initial sain. Les arbres morts se concentrent surtout dans la classe de diamètre 20-30 cm (46 %), et près de la moitié des troncs examinés portaient des traces d'attaque du xylophage *Platypus cylindrus*, agent aggravant opportuniste qui interrompt la circulation de la sève élaborée. Ces résultats confirment le modèle de la « spirale du déclin » de Manion, selon lequel la sécheresse agit comme facteur déclenchant, provoquant embolie xylémique et inanition carbonée chez l'arbre, ce qui prédispose les individus affaiblis aux agents biotiques secondaires et conduit à leur mort. Le stress hydrique chronique affecte également l'activité du phellogène et, par conséquent, la croissance du liège, la vulnérabilité globale des arbres variant fortement selon les conditions stationnelles (exposition, sol, structure du peuplement).

Mots-clés : *Quercus suber* L., sécheresse, mortalité, dépérissement, forêt de Hafir, Tlemcen, déficit foliaire, *Platypus cylindrus*, spirale du déclin, changement climatique.

Abstract: The impact of drought on tree mortality and cork growth in Hafir forest (Tlemcen).

Cork oak (*Quercus suber* L.), an emblematic species of the western Mediterranean basin, is undergoing continuous regression of its stands in Algeria, from 450,000 ha at the end of the 19th century to about 230,000 ha today, a loss of nearly 49%. This thesis examines the impact of drought on tree mortality in the Hafir state forest (Tlemcen mountains), one of the main cork oak forests of western Algeria. Characterization of the study site reveals progressive aridification of the local climate: mean annual rainfall dropped from 750 mm (1915-1934) to 644 mm (1961-2017), with increased interannual irregularity, while mean annual temperatures rose by about 1.5 to 2°C. A health inventory was carried out on four sites in the

Oued Fernane canton (S1, S3, S4, S5), differing in aspect, slope and stand structure. Out of 188 trees monitored, 52 were found dead, a mortality rate of 27.66%, markedly higher than in 2024 (15.43%), with strong spatial heterogeneity: low mortality at site 1 (6.25%, north-facing) and very high mortality at sites 3 and 5 (44% and 47.69%, exposed slopes). Most dead trees belonged to foliage deficit class 3, reflecting chronic dieback, while 10% showed sudden mortality despite an initially healthy status. Dead trees were concentrated mainly in the 20-30 cm diameter class (46%), and nearly half of the examined trunks showed signs of attack by the xylophagous insect *Platypus cylindrus*, an opportunistic aggravating agent that interrupts the flow of elaborated sap. These results support Manion's "decline spiral" model, in which drought acts as the triggering factor, causing xylem embolism and carbon starvation, predisposing weakened trees to secondary biotic agents and ultimately leading to their death. Chronic hydric stress also affects phellogen activity and, consequently, cork growth, with overall tree vulnerability strongly depending on site conditions (aspect, soil, stand structure).

Keywords: *Quercus suber* L., drought, mortality, dieback, Hafir forest, Tlemcen, foliage deficit, *Platypus cylindrus*, decline spiral, climate change.

ملخص: تأثير الجفاف على موت الأشجار ونمو الفلين في غابة حفير (تلمسان)

يشهد بلوط الفلين (*Quercus suber* L.)، وهو نوع مميز لحوض البحر الأبيض المتوسط الغربي، تراجعاً مستمراً في مساحات غاباته بالجزائر، إذ انخفضت من 450 000 هكتار في نهاية القرن التاسع عشر إلى نحو 230 000 هكتار حالياً، أي بخسارة تقارب 49%. تتناول هذه المذكرة تأثير الجفاف على نفوق الأشجار في غابة حفير الدولة (جبال تلمسان)، وهي إحدى أهم غابات الفلين في غرب الجزائر. أظهرت دراسة الوسط الطبيعي جفافاً مناخياً تدريجياً: تراجع معدل التساقطات السنوية من 750 ملم (1915-1934) إلى 644 ملم (1961-2017)، مع تزايد عدم انتظام التساقطات من سنة لأخرى، في حين ارتفع متوسط درجات الحرارة السنوية بنحو 1.5 إلى 2 درجة مئوية. أجري جرد صحي على أربعة مواقع في كانتون واد فرنان (S1 و S3 و S4 و S5)، تختلف من حيث التعرض والانحدار وبنية التجمع. ومن أصل 188 شجرة تمت متابعتها، سجلت 52 شجرة ميتة، أي بمعدل نفوق بلغ 27.66%، وهو ارتفاع ملحوظ مقارنة بسنة 2024 (15.43%)، مع تباين مكاني كبير: معدل نفوق منخفض في الموقع 1 (6.25%، المنحدر الشمالي) ومرتفع جداً في الموقعين 3 و 5 (44% و 47.69%، منحدرات معرضة). وتنتمي أغلب الأشجار الميتة إلى الصنف الثالث من العجز الورقي، وهو ما يعكس تدهوراً مزمناً، في حين أظهرت 10% منها نفوقاً مفاجئاً رغم حالة صحية سليمة في البداية. وتتركز الأشجار الميتة أساساً في فئة القطر 20-30 سم (46%)، كما أظهر نحو نصف الجذوع المفحوصة آثار إصابة بحشرة *Platypus cylindrus* الحفارة الانتهازية التي تقطع مسار انتقال العصارة الناضجة. تؤكد هذه المعطيات صحة نموذج "الحلزون التدهوري" لمانيون، حيث يمثل الجفاف العامل المحفز، مسبباً انسداد الأوعية الناقلة ونفاذ المخزون الكربوني لدى الشجرة، مما يهيئها للإصابة بالعوامل الحيوية الثانوية ويؤدي في النهاية إلى نفوقها. كما يؤثر الإجهاد المائي المزمن على نشاط الفيلوجين وبالتالي على نمو الفلين، مع تفاوت كبير في هشاشة الأشجار حسب ظروف الموقع (التعرض، التربة، بنية التجمع).

الكلمات المفتاحية: بلوط الفلين، الجفاف، النفوق، التدهور، غابة حفير، تلمسان، العجز الورقي، *Platypus cylindrus*، الحلزون التدهوري، التغير المناخي.

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.

CFWT : Conservation des Forêts de la Wilaya 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

EGCB : Ecologie, Gestion et Conservation de la Biodiversité

ERGR : Entreprise Régionale de Génie Rural

FAO Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

IML : Institut Méditerranéen du liège

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

DÉDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
RÉSUMÉ (Français, Anglais, Arabe)	III
LISTE DES ABRÉVIATIONS	VI
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	X
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I : Généralités sur le Chêne-liège et le Liège...	
1. Systématique et origine	4
2. Aire de répartition	5
2.1 Dans le monde	5
2.2 Répartition en Algérie	7
3. Description botanique du chêne-liège	8
4. Écologie du chêne-liège	10
4.1 Exigences climatiques	10
4.1.1 Régime des précipitations	10
4.1.2 Températures	12
4.1.3 Humidité de l'air	13
4.2 Exigences pédologiques	14
5. Importance économique, sociale et écologique des subéraies.....	15
5.1 Fonctions environnementales et services écosystémiques	15
5.2 Importance économique des subéraies	16
5.2.1 Caractéristiques du matériau : le liège	16
5.2.2 Différents usages du liège	17
5.2.3 Marché mondial du liège	18

5.2.4 Situation de la production en Algé.....	19
6. Causes de la dégradation des subéraies algérienn.....	21
7. Formation du liège	23
7.1 Anatomie du liège	24
7.1.1 Le liège mâle	25
7.1.2 Le liège de reproduction	26
7.2 Accroissements du liège	28
7.3 Les assises subéreuses	31
Chapitre II : La santé du chêne-liège et son impact sur la formation du liège : mécanismes de dégradation et dynamique de mortalité	
1. Cadre conceptuel du dépérissement forestier	34
1.1 Genèse et évolution du concept	34
1.2 Le triangle étiologique et le modèle de Sinclair-Manion	36
2. Spécificités du dépérissement du chêne-liège en contexte méditerranéen	38
3. Mécanismes physiologiques de dégradation : de la contrainte hydrique à la rupture fonctionnelle.....	40
3.1 Le continuum sol-plante-atmosphère.....	40
3.2 Seuils critiques du statut hydri.....	41
3.2.1 Le potentiel hydrique foliaire	41
3.2.2 L'eau extractible relative du sol (REW)	42
3.3 Cavitation et embolie xylémique : la rupture de la colonne d'eau	43
3.4 La crise énergétique : inanition carbonée	45
3.5 Effondrement des défenses et invasion entomo-fongique	46
3.6 Réponses morphologiques compensatoires : les pousses épicorniques	48
4. Répercussions de la dégradation physiologique sur le phellogène et la formation du liège.....	49
4.1 Rappel du fonctionnement du phellogène et de la subérification	49
4.2 Saisonnalité de l'activité cambiale subérogène et sensibilité au climat	51
4.3 Le signal du stress abiotique dans le transcriptome du liège	53

4.4 Arbitrage métabolique entre croissance, défense et différenciation	54
4.5 Rhytidome versus liège : quand le stress chronique fait basculer le type d'écorce	56
4.6 Conséquences quantitatives et qualitatives sur la production de liège	57
5. Dynamique de mortalité du chêne-liège	59
5.1 Modèles mécanistes de la mortalité induite par la sécheresse	59
5.1.1 La défaillance hydraulique.....	59
5.1.2 Seuils physiologiques critiques associés à la mortalité	61
5.1.3 Rôle amplificateur des agents entomologiques et fongiques	63
6. Symptomatologie et classification de terrain de l'état sanitaire	65
7. Panorama comparé de la mortalité des subéraies méditerranéennes	67
8. Conséquences écologiques, économiques et sociales du dépérissement du chêne-liège ..	69

Chapitre III : Étude du milieu : la forêt domaniale de Hafir

1. Milieu physique	71
1.1 Situation géographique.....	71
1.2 Orographie et topographie (relief)	72
1.3 Géologie et pédologie	73
1.4 Hydrographie	74
1.5 Climat	75
1.5.1 Précipitations	75
1.5.2 Températures	77
1.5.3 Autres facteurs climatiques	78
2. Milieu forestier	79
3. Production subéricole	81

Chapitre IV : Matériel et méthode de travail

Problématique et principaux objectifs de l'étude	83
1. Choix des sites d'étude	84
1.1 Installation des sites d'étude	84

1.2 Caractérisation des sites d'étude	85
1.2.1 Relevés géographiques	85
1.2.2 Relevés topographiques	86
1.2.3 Relevés forestiers	87
2. Choix des arbres	88
2.1 Sélection des arbres pour l'évaluation sanitaire	88
2.1.1 Inventaire sanitaire des arbres : saison végétative 2025	89
2.2 Sélection et caractérisation des arbres morts	90
2.2.1 Données arbres-échantillons	91
Chapitre V : Résultats et discussion	
1. Caractérisation des sites d'étude	92
1.1 Caractérisation physique	92
1.1.1 Paramètres géographiques et topographiques	92
1.2 Caractérisation forestière	93
2. Caractérisation des arbres	94
2.1 Caractéristiques sanitaires	94
2.2 Caractérisation des arbres morts	95
2.2.1 Caractéristiques géographiques	95
2.2.2 Caractéristiques dendrométriques	96
2.2.3 Caractéristiques d'exploitation	97
2.2.4 Caractéristiques sanitaires	98
2.2.5 État des troncs et attaques du xylophage <i>Platypus cylindrus</i>	99
CONCLUSION GÉNÉRALE	100
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	102

Liste des figures

<u>Chapitre 01</u>	
Figure01	Distribution du chêne-liège dans son aire géographique Méditerranéenne et Atlantique
Figure02	Histogrammes représentant la répartition de la superficie (ha) du chêne liège dans son aire naturelle.
Figure03	Aire de répartition du chêne-liège en Algérie
Figure04	(a) Arbre de chêne liège à Hafir (23/11/2003, Photo Bouhraoua), (b) tronc recouvert de liège mâle à Hafir (en gris) et de reproduction (sombre), (c) : couches de liège à M'Sila (bas) et internet (https://www.aquaportail.com/dictionnaire/définition/14351/phellogène) (haut)
Figure05	Port de chêne liège isolé (Gauche : Hafir en 2003) et en peuplement (milieu : WWF, 2008, droite : Hafir en 2005)
Figure06	Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin Méditerranéen en fonction des précipitations.
Figure07	Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction de la température .
Figure08	Comportement du chêne liège par rapport aux caractères édaphiques
Figure09	Plaques de liège en pile à M'Sila-Oran, bande de liège tubée, sac de bouchons
Figure10	Proportion des recettes des exportations mondiales du liège
Figure11	Evolution de la production nationale du liège entre 1964 et 2021
Figure12	Coupe transversale d'une tige de chêne liège .
Figure13	Coupe transversale schématisée du tronc de chêne-liège illustrant l'organisation des tissus internes, notamment le xylème, le phloème, le phellogène, le phelloderme et le liège
Figure14	Différenciation entre le liège mâle et le liège de reproduction sur un tronc de chêne-liège.
Figure15	Cycle végétatif d'un liège de reproduction constitué de cinq accroissements complets successifs .
Figure16	Chronologie de la formation du liège naturel.
Figure17	Limite d'un anneau de croissance montrant la différenciation entre le liège printanier (à gauche) et le liège automnal (à droite) (Grossissement $\times 1000$)
Figure18	Morphologie des cellules du liège selon les trois plans de coupe. À gauche : alternance de plusieurs anneaux de croissance ; à droite : coupe radiale montrant six années de croissance complète.
<u>Chapitre 02</u>	
Figure 19	La « spirale du déclin » de Manion (1981) appliquée au dépérissement du chêne-liège. Réalisation propre, d'après Manion P.D. (1981), Tree Disease Concepts, Prentice-Hall.

Figure 20	Cavitation et embolie xylémique chez le chêne-liège en situation de stress hydrique sévère. Réalisation propre, d'après Tyree & Sperry (1989).
Figure 21	Seuils physiologiques critiques associés à la mortalité du chêne-liège.
Figure 22	Mécanisme d'« annelage » du cambium par les galeries de <i>Platypus cylindrus</i> .
Figure 23	Coupe schématique de la formation du liège par le phellogène du chêne-liège.
Figure 24	Échelle de classement de l'état du houppier (0 = sain à 4 = mort). Réalisation propre, d'après la méthode standardisée de suivi de la défoliation.
Figure 25	Schéma comparé de l'état sanitaire et de la mortalité des subéraies méditerranéennes
Figure 26	Régression des surfaces de subéraies en Algérie, en Tunisie et au Maroc (Mamora) sous l'effet du dépérissement.
Figure 27	Chronologie comparée des premiers signalements de dépérissement du chêne-liège dans le bassin méditerranéen
<u>Chapitre 03</u>	
Figure 28	Situation géographique de la forêt de Hafir (Tlemcen)
Figure 29	Carte géologique du massif Hafir-Zariffet .
Figure 30	Carte pédologique du massif Hafir-Zariffet .
Figure 31	Carte pluviométrique de l'Algérie, la région d'étude est encadrée
Figure 32	Répartition annuelle des pluies dans la forêt de Hafir durant 2 périodes de référence (Histogrammes en rouge indiquent les tranches pluviométriques déficitaires.
Figure 33	Influence des facteurs climatiques secondaires sur le chêne- liège (élaboration personnelle à partir de la littérature scientifique).
Figure 34	Vue générale d'un peuplement de chêne liège conservé et peuplements embroussaillés post-feu à Hafir
Figure 35	Evolution périodique de la production du liège à Hafir
<u>Chapitre 04</u>	
Figure 36	Etat sanitaire général du peuplement du chêne liège à Hafir en automne en automne 2025 et en Printemps 2026 .
Figure 37	Protocole de notation de déficit foliaire d'un chêne liège
Figure 38	Quelques exemples d'arbres morts à Hafir
Figure 39	Méthode de relevé de la circonférence de l'arbre à 1.30m du sol (a) et l'épaisseur du liège (b) (Photos originales, Février, 2026)
Figure 40	Circonférence sur liège et sous liège dans une section transversale d'une Tige.
Figure 41	Etat des troncs des arbres morts (a : croûte carbonneuse), (b : crevasse du tronc), (c : éclatement de l'écorce) et (d : attaque de platype) (Photos originales, février 2026).

Figure 42	Exemples de l'ancienneté de la mortalité des arbre (a : mortalité ancienne survenue avant 2022), (b : mortalité survenue entre 2022 et 2023) et (c : mortalité récente de classe sanitaire 1) .
Figure 43	Méthode d'extraction du liège d'un arbre mort
Figure 44	Echantillons du liège avant préparation (a) et bandes de liège coupées pour observation et mesures des cernes
Figure 45	Mesures de l'épaisseur du liège d'une bande découpée à l'aide d'un pied à coulisse (a, b, c) et mesure d'humidité du liège à l'aide d'un mesureur d'humidité (d)
Figure 46	Exemples de bandes de liège montrant les endroits de mesures marqués au stylo rouge
Figure 47	Instruments de mesures des cernes Lintab 6 (a et b) et stéréo microscope binoculaire pour prise de photos des cernes
<u>Chapite 05</u>	
Figure 48	Localisation géographique des quatre sites d'étude dans la forêt domaniale de Hafir sur Google Mapp
Figure 49	Évolution de la pluviométrie annuelle et moyenne interannuelle (2019-2025) à la station de Mansourah
Figure 50	Courbes des températures mensuelles moyenne minimale (m°C), maximale (M°C) et moyenne (T°C) enregistrées à Mansourah entre 2019et 2025.
Figure 51	Aperçu général sur la structure des peuplements et l'état sanitaire en automne 2024 des 4 sites d'étude
Figure 52	Répartition des arbres selon les classes de déficit foliaire (DF) dans les 4 sites
Figure 53	Répartition des 30 arbres morts par classe de diamètres (a) et type de bois (b)
Figure 54	Répartition des arbres morts par classe de hauteur d'écorçage (cm) (a) et le coefficient d'écorçage (b)
Figure 55	Répartition des épaisseurs du liège par catégorie de liège des arbres morts
Figure 56	Répartition des arbres morts selon leur statut sanitaire au moment de la mortalité
Figure 57	Anomalies relevés des troncs d'arbres morts
Figure 58	Répartition des échantillons de liège selon la date de mortalité des arbres
Figure 59	Variation annuelles des accroissements complets moyens du liège sur des échantillons récoltés en 2015 et 2016 avant la période de sécheresse (2016-2020). Les demi cernes ne sont pas inclus dans la représentation
Figure 60	Rythme de croissance annuelle du liège au moment et avant la mortalité des arbres
Figure 61	Rythme de croissance du liège des arbres morts récoltés en 2015 (demi-accroissement de 2015 n'est pas inclus)

Liste des tableaux

Tableau 01 : Paramètres dimensionnels des cellules de liège .

Tableau 02 : dépérissement, principaux agents biotiques, symptomatologie, mortalité du chêne liège dans le pourtour méditerranéen

Tableau 03 : Coordonnées des stations météorologiques de référence.

Tableau 04 : Eléments statistiques sur les précipitations annuelles à Hafir des 2 périodes

Tableau 05 : Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) pendant deux périodes à Hafir.

Tableau 06 : Régime saisonnier des précipitations au niveau de la forêt de Hafir.

Tableau 07 : Températures mensuelles minimales des 2 périodes à Hafir

Tableau 08 : Températures mensuelles maximales des 2 périodes de référence à Hafir

Tableau 09 : Températures moyennes mensuelles et annuelles à Hafir

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

Tableau 11 : Classification du déficit foliaire (DF) et statut sanitaire.

Tableau 12 : Autres paramètres sanitaires et architecturaux pris en compte .

Tableau 13 : Principales caractéristiques géographiques et topographiques des 4 sites d'étude

Tableau 14 : Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) durant la période : 2019-2025

Tableau 15 : Répartition saisonnière moyenne des précipitations et détermination du régime pluviométrique (2019-2025).

Tableau 16- Caractéristiques forestières des quatre peuplements de chêne liège.

Introduction générale

Le chêne liège constitue non seulement une ressource économique stratégique par son liège qu'il produit. Il représente une filière de transformation et d'exportation traditionnelle, mais aussi un écosystème forestier d'une richesse biologique remarquable, assurant des services environnementaux fondamentaux : régulation du cycle de l'eau, protection des sols contre l'érosion, séquestration du carbone et maintien de la biodiversité (**WWF, 2008**).

Les forêts méditerranéennes sont aujourd'hui confrontées à une intensification sans précédent des contraintes climatiques, sous l'effet conjugué de l'élévation des températures, de la réduction et de l'irrégularité croissante des précipitations, et de la multiplication des événements extrêmes (**Giec, 2022**). Dans ce contexte de changement climatique global, les subéraies, peuplements dominés par le chêne-liège (*Quercus suber* L.) Ces écosystèmes occupent une position particulièrement vulnérable : espèce à aire de répartition limitée au pourtour méditerranéen occidental (**Natividade, 1956**), le chêne-liège est soumis, dans les peuplements les plus orientales et méridionales de son aire, à des conditions hydriques qui tendent à se rapprocher de ses seuils physiologiques de tolérance (**Matias et al., 2019**).

À l'échelle mondiale, les programmes de surveillance forestière sont largement utilisés pour le suivi de l'état sanitaire des forêts et l'évaluation des impacts des facteurs environnementaux sur leur dynamique. Plus d'une centaine d'exemples de réseaux de monitoring couvrant différents types de formations forestières et contextes climatiques ont été recensés à travers le monde (**Jump et Peñuelas, 2006 ; Allen, 2009**).

Depuis plusieurs décennies, les subéraies du bassin méditerranéen sont affectées par un syndrome de dépérissement généralisé, dont les manifestations vont de la simple perte de vigueur à la mortalité massive de peuplements entiers. Ce phénomène, documenté depuis le début du XXe siècle et considérablement amplifié depuis les années 1980, résulte de l'interaction complexe entre des facteurs climatiques, édaphiques, biologiques et anthropiques (**Landmann, 1994 ; Manion, 1991**).

Dans cette région, plusieurs pays ont développé des systèmes de contrôle et de suivi de la santé des chênaies, en particulier des subéraies. Des études et dispositifs similaires ont été mis en œuvre en Espagne (**Montoya Oliver et Meson Garcia, 1995**), en France (Becker et Levy, 1983), en Sardaigne (**Sechi et al., 2002 ; Angelo Ruiiu et al., 2010**), en Tunisie (**Ben Jamâa et al., 2005**), au Maroc (**Assali, 2009**) ainsi qu'au Portugal (**Conceição Barros et al., 2002**). En Algérie, les travaux de **Bouhraoua (2003)** et **Dehane (2012)**, s'inscrivent dans cette même démarche de surveillance et d'évaluation de l'état sanitaire des subéraies et de croissance du liège.

Comprendre les mécanismes physiologiques qui altèrent la santé des arbres est indispensable non seulement pour anticiper le risque de mortalité, mais également pour appréhender ses répercussions directes sur la physiologie du phellogène et, par conséquent, sur la quantité et la qualité du liège produit.

Le nord-ouest algérien, et en particulier la région de Tlemcen, abrite une part significative du patrimoine subericole national. Dans ce secteur, ce patrimoine est plus présent dans la forêt domaniale de Hafir comme peuplement de référence (**Dehane, 2012**).

Depuis le début des années 2000, la région du nord-ouest algérien connaît une péjoration climatique progressive documentée, marquée par une réduction tendancielle des précipitations annuelles et une élévation des températures (**Frihi & Dahane, 2024**).

Cette évolution s'est traduite, au cours de la période de ces dernières années, par une succession d'années hydriques exceptionnellement déficitaires, avec des cumuls annuels tombant à moins de 200 mm en 2024, soit moins d'un tiers de la normale historique (**Allam, 2025**). Les conséquences de ce stress hydrique chronique sur les peuplements forestiers de la région comme ailleurs sont désormais perceptibles : signes de dépérissement, augmentation de la mortalité et réduction visible de la vitalité des arbres (**Touhami et al., 2019**).

La dynamique de croissance annuelle du liège offre, dans ce contexte, un outil d'analyse biologique exceptionnel. En effet, la particularité anatomique du chêne-liège réside dans la conservation de son phellogène unique et durablement actif tout au long de sa vie (**Perreira, 2007**). Cette assise produit chaque année une nouvelle couche de phellème mesurable conférant à l'épaisseur annuelle des cernes de liège la valeur d'un véritable enregistreur biologique des conditions de croissance (**Camarero et al., 2024**). Cette propriété est au fondement de la dendrochronologie du liège, discipline qui permet de reconstituer, année par année, les réponses physiologiques d'un arbre au cours de sa vie, et de les mettre en relation avec les fluctuations climatiques et les perturbations environnementales (**Camarero et al., 2024**).

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail de recherche, qui vise à analyser l'impact de la péjoration climatique récente sur la subéraie de Hafir et ce à travers deux indicateurs complémentaires et emboîtés : d'une part, la dynamique et l'importance du phénomène de dépérissement et de mortalité des arbres et d'autre part le rythme de croissance radiale du liège mesurée par dendrochronologie sur les arbres morts. En effet, la dynamique de la mortalité du peuplement est suivie dans cette forêt au cours des années végétatives 2024-2025. L'articulation de ces deux sources de données permet d'examiner le rythme de la réduction des accroissements annuels de liège pouvant constituer un indicateur précoce et sensible du dépérissement forestier, précédant l'apparition de signes visuels de mortalité.

Ce mémoire s'organise en cinq chapitres. Le premier chapitre propose une synthèse bibliographique portant sur la biologie et l'écologie du chêne-liège, le fonctionnement du phellogène, les mécanismes d'impact de la sécheresse sur la croissance du liège et les dynamiques de dépérissement documentées dans les subéraies méditerranéennes.

Ce second chapitre se propose d'articuler trois axes complémentaires. Le premier expose les mécanismes de dégradation physiologique de l'arbre, en insistant sur les dysfonctionnements hydrauliques, la cavitation et l'embolie xylémique et sur la crise énergétique qui leur est associée. Le second relie ces altérations physiologiques générales au fonctionnement spécifique du phellogène et à la formation du tissu subéreux, en s'appuyant

notamment sur les données transcriptomiques et dendrochronologiques disponibles pour le chêne liège. Le troisième, conçu comme le cœur de ce chapitre, est consacré à l'analyse approfondie de la dynamique de mortalité du chêne-liège : ses seuils critiques, ses déterminants biotiques, ses manifestations symptomatologiques et son ampleur à l'échelle du bassin méditerranéen.

Le troisième chapitre présente la zone d'étude à savoir la forêt domaniale de Hafir dans ses dimensions géographique, climatique, édaphique, forestières et économique.

Le quatrième chapitre décrit le dispositif expérimental, les méthodes d'échantillonnage et de mesure de la dynamique de la mortalité des arbres et des accroissements, ainsi que les outils d'analyse statistique mobilisés.

Enfin, le cinquième et le dernier chapitre expose les résultats obtenus et leur discussion, en articulant données physiologiques et dendrochronologiques, données climatiques et données de mortalité du peuplement.

À travers cette démarche intégrée, nous espérons contribuer à une meilleure compréhension de la vulnérabilité de la subéraie de Hafir au changement climatique, et fournir des éléments scientifiques utiles à la gestion conservatoire et à l'adaptation sylvicole de la forêt de Hafir face aux défis climatiques à venir.

Chapitre I: Généralités sur le Chêne-liège et le Liège

1-Systématique et origine

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.), est essence forestière qui appartient à la famille des Fagacées. Il est typique du bassin méditerranéen occidental, où il est progressivement adapté aux conditions écologiques propres à cette région. Son évolution au cours des périodes anciennes lui a permis de développer une résistance relative aux étés chauds et secs, aux hivers modérément doux et aux incendies de forêt récurrents (Natividade, 1956 ; Pereira, 2007 ; Moreira et al., 2009).

2-Aire de répartition

2.1-Dans le monde:

La distribution naturelle du chêne-liège est limitée essentiellement aux régions occidentales du bassin méditerranéen. L'espèce est présente dans sept pays : Portugal, Espagne, France, Italie et trois pays du Maghreb à savoir Algérie, Tunisie et Maroc (Natividade, 1956). La figure 1 suivante illustre la répartition géographique du chêne-liège à l'échelle du bassin méditerranéen où elle montre que cette essence pousse dans des façades atlantique et surtout méditerranéenne.



Figure 1 : Distribution du chêne-liège dans son aire géographique Méditerranéenne et Atlantique (Dehane, 2006)

Les subéraies occupent, à l'échelle mondiale, une superficie totale près de 2, 3 million d'hectares (CIB, 2010) (Fig.2). Le Portugal occupe, et ce depuis longtemps, la première place avec une superficie de près de 700 000 ha (soit le tiers de la superficie mondiale) (Natividade, 1956) suivi par l'Espagne avec une superficie de 500 000 ha (22%). L'Algérie occupe historiquement la troisième place avec une superficie de 440 000 ha (Lamey, 1893) ce qui représente un taux de 18%.

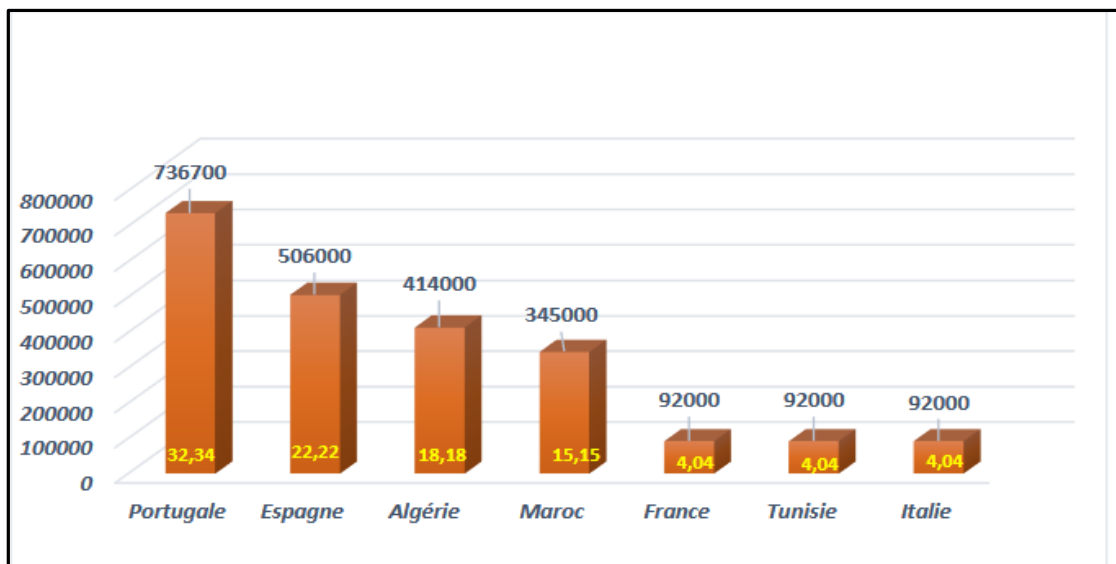


Figure 2 : Histogrammes représentant la répartition de la superficie (ha) du chêne liège dans son aire naturelle (CIB, 2010).

2.2 Répartition en Algérie

Les subéraies algériennes occupaient autrefois près de 440 000 hectares à la fin du XIX^e siècle (Lamey, 1893). Mais cette superficie a fortement diminué au cours du temps sous l'effet des incendies récurrents, des défrichements et des différentes pressions anthropiques (Charlemagne, 1894 cité par Dahan, 2012). Selon les estimations de la FAO, les formations réellement productives ne représentent dans les années 90 qu'environ 229 000 hectares (Zine, 1992 ; FOSA, 2007). Ceci représente une réduction près de la moitié (soit 48%).

En Algérie, les formations de chêne-liège sont comprises entre les frontières marocaine et tunisienne, s'étendent du littoral méditerranéen au nord aux chaînes telliennes au sud, sur une largeur ne dépassant pas les 100 km (Lamey, 1893 ; Boudy, 1950 ; Natividade, 1956). La figure 3 montre la distribution nationale du chêne liège établie par la DGF.



Figure 3: Aire de répartition du chêne-liège en Algérie (DGF ; 2003)

Dans l'Ouest algérien, notamment dans la région de Tlemcen, les subéraies se présentent généralement sous forme de peuplements plus réduits et dispersés comparativement aux grandes subéraies du Nord-Est algérien. Le chêne-liège y est principalement localisé dans les zones humides des monts de Tlemcen, particulièrement au niveau de la forêt de Hafir et des formations forestières avoisinantes. Ces écosystèmes jouent un rôle important dans la protection des sols, la conservation de la biodiversité et le maintien de l'équilibre écologique régional.

Ces subéraies sont soumises à plusieurs facteurs de dégradation, notamment les incendies forestiers, le surpâturage, les mauvaises exploitations du liège, les coupes illicites ainsi que les périodes répétées de sécheresse (Bouhraoua et al., 2019 ; Roula et al., 2020). Ces contraintes fragilisent l'état sanitaire des peuplements favorisant le phénomène de dépérissement du chêne-liège ce qui réduit la croissance du liège et la mortalité des arbres (Dehane et al., 2013 ; Bouhraoua et al., 2019). Les changements climatiques accentuent également le stress hydrique subi par les arbres, entraînant une diminution progressive de leur vitalité et de leur capacité de production subéricole (Messaoudene et al., 2019).

Par ailleurs, l'accumulation de la végétation dans le sous-bois et l'absence d'opérations sylvicoles régulières augmentent considérablement la concurrence vers l'eau et les éléments minéraux mais surtout les risques de déclenchement et de propagation des incendies dans certaines forêts de la région. Ainsi, la préservation des subéraies de Tlemcen nécessite une gestion durable fondée sur la prévention des incendies, la régénération naturelle et la protection des ressources forestières.

3- Description botanique du chêne liège

Le chêne-liège est une espèce forestière facilement identifiable grâce à son écorce épaisse, crevassée et subéreuse constituant le liège. Cette écorce est formée de plusieurs couches de cellules mortes riches en subérine, une substance qui confère au liège des propriétés d'imperméabilité, d'élasticité et de résistance face aux agressions extérieures ainsi qu'aux incendies (Pereira, 2007) (Fig.4.).

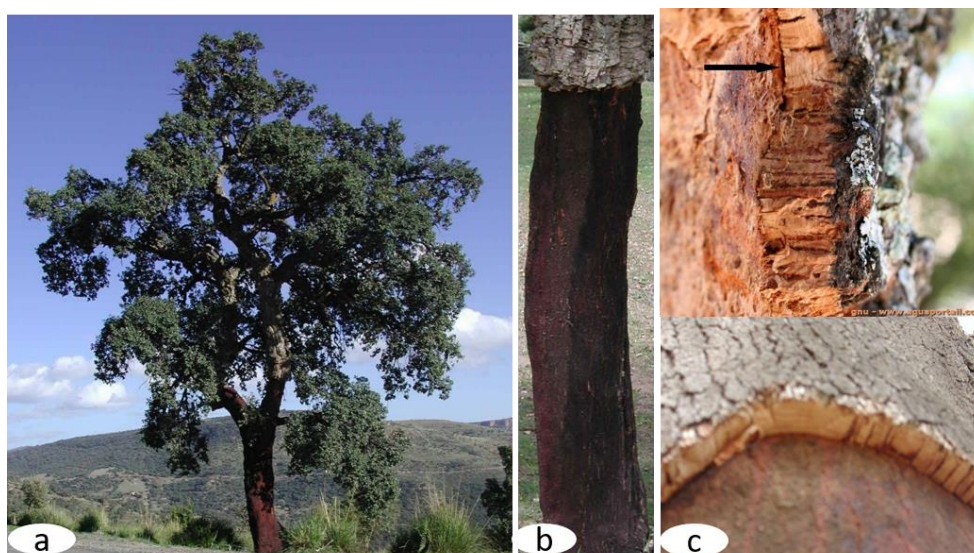


Figure 4- (a) Arbre de chêne liège à Hafir (23/11/2003, Photo Bouhraoua), (b) tronc recouvert de liège mâle à Hafir (en gris) et de reproduction (sombre), (c) : couches de liège à M'Sila (bas) et internet (<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/définition/14351/phellogène>) (haut)

Cette espèce présente également une organisation morphologique bien définie. Les feuilles sont persistantes et coriaces, de 3 à plus de 6 cm (**Natividade, 1956**). Sur le plan architectural, la cime est globuleuse et étalée chez les arbres isolés, alors qu'elle devient plus élancée dans les peuplements denses (Fig. 5).



Figure 5- Port de chêne liège isolé (Gauche : Hafir en 2003) et en peuplement (milieu : WWF, 2008, droite : Hafir en 2005)

Le tronc est généralement droit et peut présenter une hauteur moyenne de 4 mètres avant ramification, variant selon la densité du peuplement. L'écorce, appelée « suber », est particulièrement épaisse, isolante et crevassée, pouvant atteindre jusqu'à 25 cm d'épaisseur, ce qui constitue la principale singularité de cette espèce (Fig.4).(**Pereira,2007**)

L'espèce se caractérise par une grande longévité pouvant atteindre 150 à 200 ans, voire davantage chez certains individus. Sa taille est généralement comprise entre 10 et 14 mètres,

pouvant atteindre jusqu'à 20 mètres dans des conditions écologiques favorables. Le diamètre du tronc augmente progressivement avec l'âge, atteignant environ 70 cm à 30–40 ans et pouvant dépasser 4 mètres dans les vieux peuplements (**Saccardy, 1938 ; Natividade, 1956 ; Yessad, 2000**).

4. Écologie du chêne liège

Le chêne-liège, est une essence forestière caractéristique du bassin méditerranéen occidental. Son aire de répartition naturelle reste limitée à cette région où les conditions climatiques et édaphiques favorisent son développement. Malgré sa capacité d'adaptation à certains milieux difficiles, cette espèce demeure exigeante vis-à-vis de plusieurs facteurs écologiques. (**Natividade, 1950 ; Quézel & Médail, 2003**).

4.1 Exigences climatiques

4.1.1. Régime des précipitations

Le chêne-liège possède une grande capacité d'adaptation face aux variations de la pluviométrie annuelle. Il peut se développer dans des régions recevant entre 440 mm et 2000 mm de pluie par an. Cette tolérance est liée à la répartition saisonnière des précipitations typiques du climat méditerranéen. Dans les régions côtières, les pluies se concentrent principalement en automne et en hiver, alors qu'en montagne elles surviennent surtout entre l'hiver et le printemps (**Boudy, 1950 ; Benabid, 2000 ; Yassad, 2000**) (Fig.6).

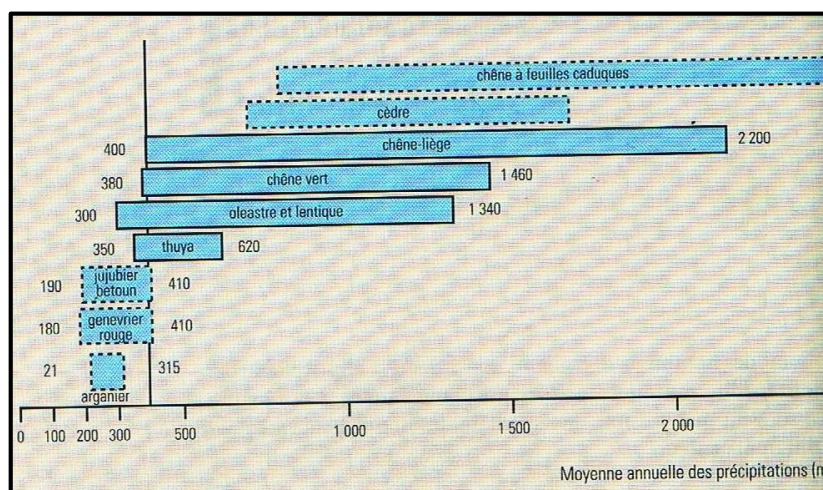


Figure 6: Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin Méditerranéen en fonction des précipitations (**Yassad, 2000**).

Les meilleures performances de croissance et de production du liège sont observées lorsque les précipitations annuelles varient entre 600 et 1200 mm. Lorsque la pluviométrie descend entre 400 et 600 mm, la croissance de l'arbre ralentit progressivement et le rendement en liège diminue. En dessous de 400 mm, le chêne-liège entre généralement en phase de

dépérissement, sauf dans les zones bénéficiant d'une forte humidité atmosphérique. (Natividade, 1956 ; Quézel & Barbéro, 1990).

4.1.2. Températures

Le chêne-liège est considéré comme une espèce mésotherme appréciant des températures modérées. Les températures moyennes annuelles favorables à son développement se situent généralement entre 13°C et 19°C. Durant la saison chaude, il peut supporter des températures élevées atteignant ponctuellement 35°C à 40°C, notamment dans les régions de basse altitude (Boudy, 1950 ; Oliveira et al., 1994).

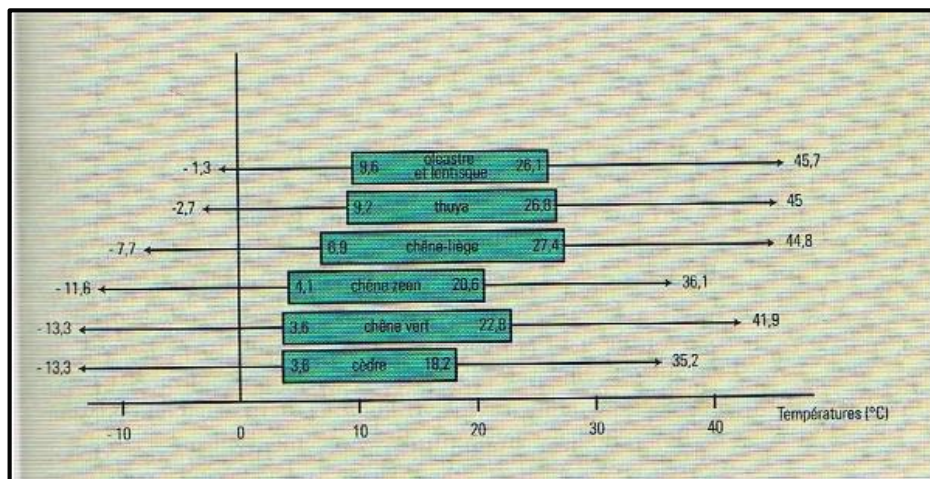


Figure 7: Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction de la température (Yassad, 2000).

En revanche, cette essence reste sensible aux basses températures et aux gelées prolongées. Les températures minimales moyennes du mois le plus froid ne devraient pas descendre en dessous de 3°C. Des épisodes de froid intense compris entre -6°C et -9°C peuvent provoquer des dégâts importants sur les peuplements (Natividade, 1956 ; Quézel & Médail, 2003).

4.1.3. Humidité de l'air

Même s'il possède certaines adaptations à la sécheresse, le chêne-liège dépend fortement d'une humidité atmosphérique relativement élevée, surtout pendant l'été. Un taux moyen avoisinant 60 % est considéré comme favorable à son équilibre physiologique (Boudy, 1950). Dans les régions littorales, l'humidité relative reste élevée tout au long de l'année et peut atteindre environ 75 %. En revanche, dans les régions intérieures, elle varie fortement selon les saisons et le relief, avec des valeurs estivales comprises entre 35 % et 50 %. Lors des épisodes de sirocco, cette humidité peut chuter à des niveaux extrêmement faibles (Médail & Quézel, 1999 ; Benabid, 2000).

4.2 Exigences pédologiques :

Le chêne-liège préfère les sols légers développés sur des substrats siliceux tels que les grès et les sables. Les sols favorables sont généralement pauvres en calcaire, bien drainés, profonds

et correctement aérés. La texture sableuse y est dominante, particulièrement dans les régions littorales (**Boudy, 1950 ; Natividade, 1956**).

Les sols sablo-argileux légèrement acides, présentant un pH compris entre 6 et 6,5, constituent les conditions les plus favorables à son développement (Fig.8).

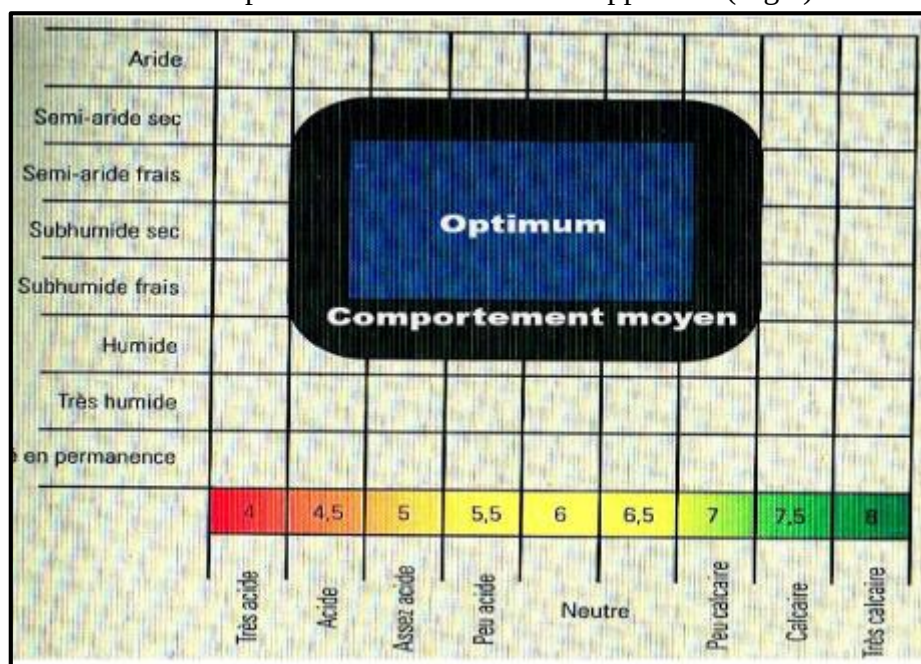


Figure 8 : Comportement du chêne liège par rapport aux caractères édaphiques (**Yassad, 2000**)

À l'inverse, les sols fortement argileux ou calcaires limitent fortement sa croissance. L'espèce se développe également mieux dans les terrains disposant d'une certaine réserve en eau (**Quézel & Médail, 2003 ; Benabid, 2000**).

En général, le chêne-liège atteint son optimum écologique dans les étages bioclimatiques méditerranéens humides et subhumides, tandis que sa présence devient plus limitée dans les variantes semi-arides sèches (**Quézel & Barbéro, 1990**).

5. Importance économique, social et écologique des subéraies :

Les subéraies représentent des écosystèmes forestiers d'une grande importance écologique et économique dans le bassin méditerranéen. Elles contribuent à la conservation de la biodiversité, à la protection des sols et au développement des activités rurales liées aux produits forestiers non ligneux (PFNL) (**WWF, 2008 ; FAO, 2013 ; Plan Bleu, 2020**).

5.1. Fonctions environnementales et services écosystémiques :

Les forêts de chêne-liège abritent une biodiversité végétale et animale particulièrement riche, constituant ainsi un important réservoir génétique méditerranéen (**Médail & Quézel, 1999 ;**

WWF, 2008). Ces écosystèmes jouent également un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique grâce à leur capacité de séquestration du carbone, estimée à plusieurs millions de tonnes de CO₂ chaque année (FAO, 2013).

La flore qui pousse dans les subéraies possède une forte valeur économique et socioéconomique grâce aux plantes aromatiques, médicinales et mellifères exploitées dans différentes activités rurales, notamment l'apiculture (Plan Bleu, 2020).

Les subéraies servent aussi de zones de pâturage pour le bétail et participent à la protection des sols contre l'érosion ainsi qu'à la régulation hydrique des bassins versants. Elles représentent enfin des espaces favorables au tourisme écologique et aux activités récréatives (FAO, 2013 ; Benabid, 2000).

5.2. Importance économique des subéraies

Le chêne liège doit sa noblesse et sa valeur économique à son écorce qui se régénère une fois récoltée périodiquement sans abattre l'arbre ; c'est *le liège*.

5.2.1. Caractéristiques du matériau : Le liège

Le liège est un matériau naturel qui se caractérise par sa légèreté, son élasticité, son imperméabilité et ses propriétés isolantes. Depuis l'Antiquité, il est utilisé dans plusieurs secteurs industriels, notamment dans la fabrication des bouchons (Natividade, 1956 ; Pereira, 2007 ; FAO, 2013) (Fig. 9).



Figure 9- Plaques de liège en pile à M'Sila-Oran, bande de liège tubée, sac de bouchons
(Photos Bouhraoua)

5.2.2-Différents usages du liège

Grâce à ses propriétés physiques et mécaniques remarquables, le liège occupe une place importante dans plusieurs secteurs industriels. Ses principaux domaines d'utilisation sont suivant (Messali, 2003) :

- **Cristallerie** : utilisé pour le ponçage, grâce à son pouvoir abrasif.
- **Construction** : employé pour le ponçage du marbre et du granit, ainsi que pour l'isolation thermique et phonique des espaces restreints ; il présente également un faible encombrement et une bonne résistance au feu.
- **Construction navale** : utilisé dans les circuits de calorifugeage, les gaines de ventilation et les revêtements en caoutchouc, en raison de ses propriétés isolantes, antidérapantes et imputrescibles.
- **Aérospatiale** : utilisé comme isolant thermique pour des épaisseurs de 3 à 15 mm, agissant comme écran thermique.
- **Mécanique** : utilisé pour les jauges de flottaison, les joints mixtes avec caoutchouc, les joints d'étanchéité et les paliers de transmission, grâce à sa flottabilité, sa résistance chimique, son élasticité et sa compressibilité.
- **Maroquinerie** : fabrication de sacs, portefeuilles et accessoires de bureau.
- **Bouchage** : principalement utilisé pour les bouchons de vin, champagne, pharmacie, bouteilles d'huile et tonneaux.

5.2.3. Marché mondial du liège :

Le liège figure parmi les produits forestiers non ligneux les plus commercialisés à l'échelle internationale. Il occupe la 6^{ème} place parmi ces PFNL au monde (APCOR 2015). Les exportations mondiales génèrent un chiffre d'affaires annuel important de l'ordre de 1.6 milliard d'euros dont 70% provient du bouchon naturel et ce à partir d'une production de 200 mille tonnes. Le Portugal occupe la première place avec 63% du total suivi par l'Espagne avec 18% (FAO, 2013 ; APCOR, 2019 ; Plan Bleu, 2020) (Fig.10).

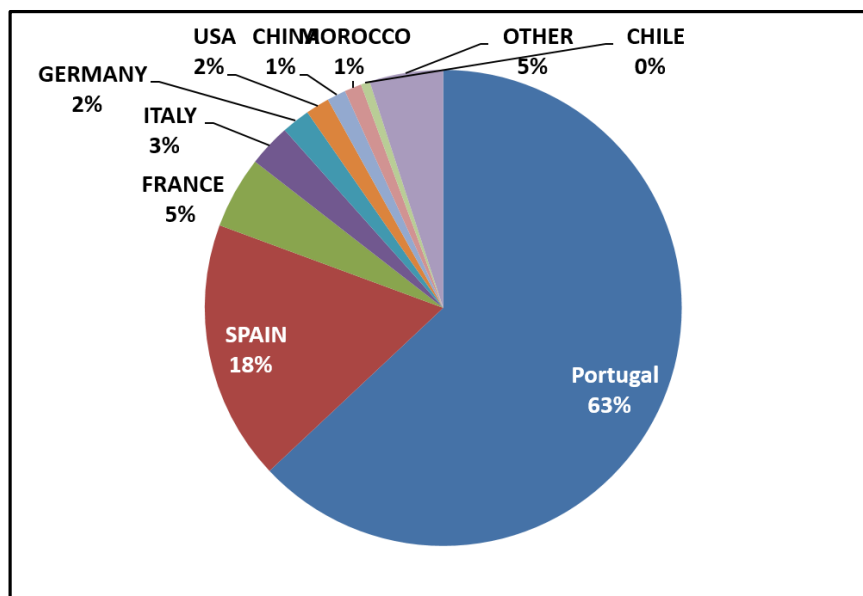


Figure 10 : Proportion des recettes des exportations mondiales du liège (APCOR, 2019)

Le Portugal occupe donc la première place mondiale dans la production, la transformation et l'exportation des produits de liège, suivi par l'Espagne. Par contre, les pays nord-africains restent faiblement représentés sur le marché international (APCOR, 2019) et ce depuis longtemps (FAO, 2013). Dans cette région, le Maroc se place en premier rang (1% des

exportations) par rapport à l'Algérie et la Tunisie. Ces deux pays avec beaucoup d'autres pays non subéricole sont classés dans la catégorie (autres) représentant 5% des chiffres d'affaires.

5.2.4. Situation de la production en Algérie :

La subéraie algérienne connaît une régression importante dans sa production et ce depuis plusieurs décennies par rapport aux niveaux enregistrés durant la première moitié du XX^e siècle (**Chenel, 1951**). Cet auteur a noté une production moyenne de 33 000 tonnes entre 1937 et 1950.

La production nationale de liège postindépendance a connu une tendance régressive au fil du temps. C'est ainsi qu'entre 1964 et 2021, les statistiques fournies par la DGF (2022) montrent une production moyenne nationale estimée à 10.7 mille tonnes par an ce qui représente une diminution de 68% par rapport à l'ancienne période (**Fig.11**). Cependant, la dernière décennie enregistre des valeurs minimales annuelles (moins de 5 mille tonnes). La moyenne décennale (2012-2021) est de l'ordre de 5,4 mille tonnes.

La baisse de production du liège a entraîné une diminution notable des activités générées de toute la filière liège. En conséquence, les revenus liés aux exportations du liège sont faibles, malgré le potentiel important des subéraies algériennes (**Plan Bleu, 2020**).

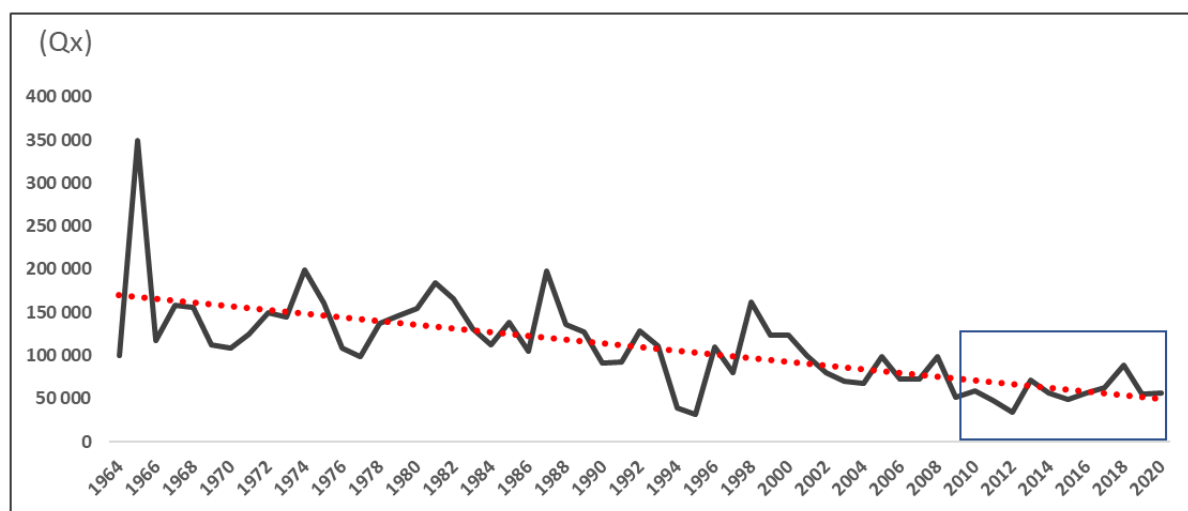


Figure 11- Evolution de la production nationale du liège entre 1964 et 2021 (**DGF, 2022**).

6- Causes de la dégradation des subéraies algériennes

Le dépérissement des subéraies algériennes résultant de l'action combinée de plusieurs facteurs biotiques comme les ravageurs et abiotiques tel que le déficit hydrique et les feux de forêt est à l'origine de la diminution de la superficie productive du liège. Ce phénomène affecte la croissance des arbres, la régénération du peuplement et la productivité subéreuse (**FAO, 2013**).

Le vieillissement des peuplements forestiers et l'insuffisance de régénération naturelle constituent encore l'un des principaux problèmes observés dans les subéraies algériennes.

L'expansion de certaines espèces résineuses, notamment le pin d'Alep et le pin maritime, se fait progressivement au détriment du chêne-liège dans plusieurs massifs forestiers (**Boudy, 1950 ; Bouhraoua et Villemant, 2005 ; Meliani et al., 2021**).

Les insuffisances dans la gestion sylvicole, le manque d'entretien des peuplements et l'absence de plans d'aménagement adaptés favorisent l'embroussaillage et augmentent les risques de dégradation (**FAO, 2013**).

Les pratiques d'écorçage mal maîtrisées provoquent souvent des blessures sur les troncs, rendant les arbres plus sensibles aux maladies et aux incendies. (**Natividade, 1950 ; BenJamaa, 2014**).

Les subéraies subissent également des attaques de ravageurs défoliateurs comme *Lymantria dispar* (**Chakali et al., 2002**) et le xylophage *Platypus cylindrus* (**Belhoucine et al., 2011**). A cela s'ajoute les maladies phytopathologiques responsables souvent de dépérissement progressif des arbres (**Smahi et al., 2017**).

Enfin, les sécheresses répétées et les vagues de chaleur persistantes favorisent le déclenchement des incendies de forêt mais le stress hydrique entraînant le phénomène de dépérissement. Ces facteurs aggravent considérablement la régression des subéraies méditerranéennes dont Algériennes (**FAO, 2013 ; Bouhraoua et al., 2019 ; Plan Bleu, 2020**).

7. Formation du liège :

Le liège est un tissu végétal caractérisé par sa faible densité et ses propriétés isolantes exceptionnelles. L'origine de son appellation serait liée aux termes grec « *phellos* » et latin « *levis* », qui évoquent respectivement la flottabilité et la légèreté (**Freixe, 1915**). Cette dénomination reflète les principales caractéristiques physiques du liège, dont la structure cellulaire particulière lui confère une grande légèreté ainsi qu'une capacité naturelle à flotter.

Il est produit par une assise génératrice appelée phellogène, responsable de la formation d'un tissu protecteur constitué de cellules mortes riches en subérine (IML, 2013) (Fig.12).

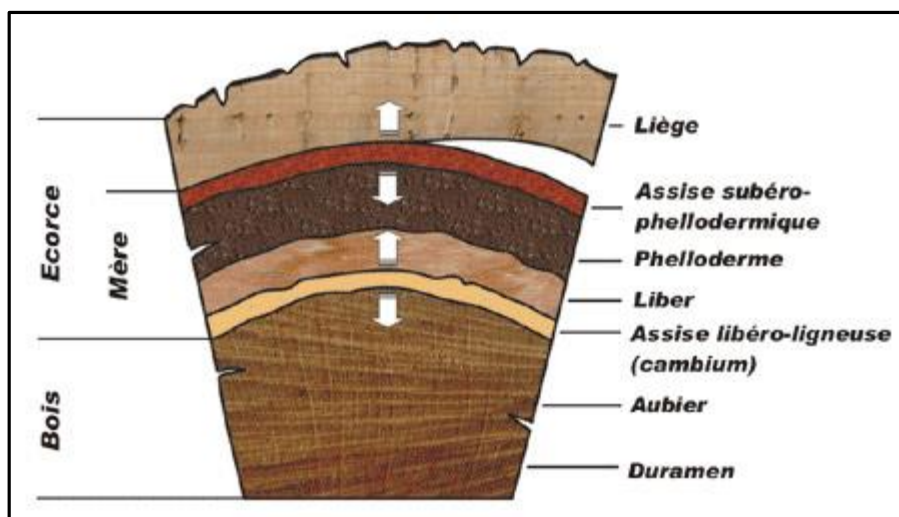


Figure 12 : Coupe transversale d'une tige de chêne liège (IML, 2013).

Ce tissu joue un rôle essentiel dans la protection de l'arbre contre les agressions extérieures et les contraintes environnementales.

La formation des cernes de croissance du liège dépend fortement des conditions climatiques. Pendant les périodes favorables, notamment au printemps, les cellules produites sont généralement larges et peu denses. En revanche, durant les périodes de stress hydrique et de fortes chaleurs estivales, les cellules deviennent plus compactes et plus denses.

L'étude de ces cernes permet ainsi d'évaluer l'impact des variations climatiques sur la croissance du liège (**Pereira, 2007**).

7.1- Anatomie du liège

Du point de vue biologique ou anatomique, la couche du liège correspond à un tissu secondaire formé de cellules produites par un méristème latéral appelé **phellogène**. Ce dernier possède une activité de division cellulaire qui assure la production continue de nouvelles cellules subéreuses. Son fonctionnement dépend étroitement du cycle physiologique de l'arbre ainsi que des conditions environnementales, notamment la disponibilité en eau, la température et les ressources nutritives (**Fortes et al., 2004**).

Au cours de la croissance radiale de l'arbre, le liège se développe au sein d'un ensemble de tissus générateurs organisés en deux assises principales. La première est l'**assise cambiale ou libéro-ligneuse**, responsable de la formation du xylème secondaire (bois) vers l'intérieur et du phloème secondaire (liber) vers l'extérieur. Le xylème assure le transport de la sève brute provenant des racines, tandis que le phloème participe à la circulation de la sève élaborée produite par les feuilles (Fig.13).

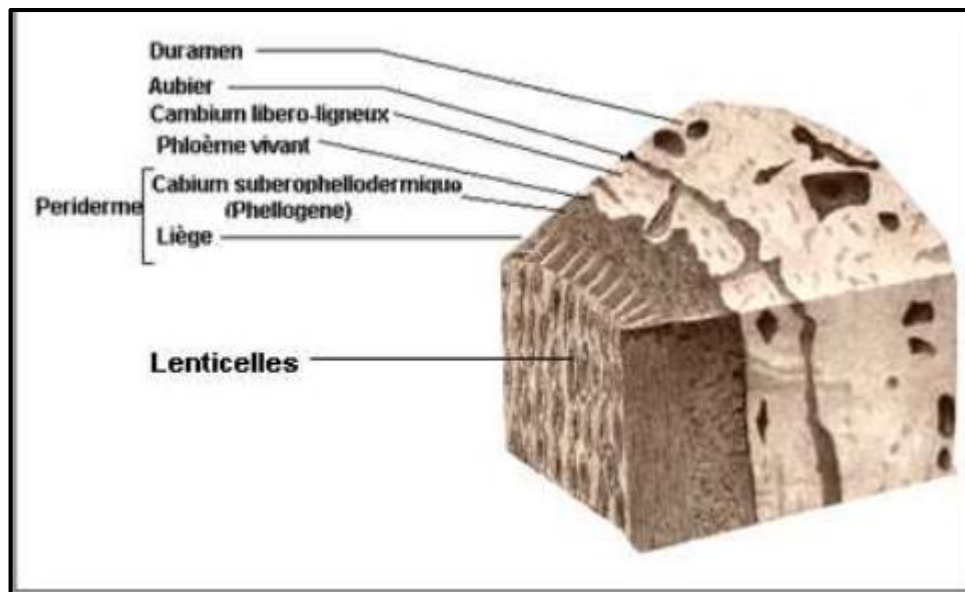


Figure 13 : Coupe transversale schématisée du tronc de chêne-liège illustrant l'organisation des tissus internes, notamment le xylème, le phloème, le phellogène, le phelloderme et le liège (Dehane 2012).

La seconde est l'**assise subéro-phellodermique**, également appelée phellogène. Celle-ci produit vers l'extérieur les cellules du phellème, qui constituent le liège, et vers l'intérieur les cellules du phelloderme. L'ensemble de ces tissus forme le périderme, structure protectrice qui remplace progressivement l'épiderme lors de l'augmentation du diamètre du tronc (Machado, 1935 ; Saccardy, 1937 ; Natividade, 1956 ; Pereira, 2007).

L'origine et les caractéristiques anatomiques du tissu subéreux peuvent varier selon le type de liège considéré. On distingue notamment le **liège mâle** (ou liège vierge), issu de la première formation subéreuse de l'arbre, et le **liège femelle ou de reproduction**, produit après les opérations successives de démasclage. Ce dernier présente généralement une structure plus homogène et des propriétés technologiques supérieures (Fig.14)



Figure 14 : Différenciation entre le liège mâle et le liège de reproduction sur un tronc de chêne-liège (Dehane , 2012).

7.1.1. Le liège mâle

Le premier liège produit naturellement par le chêne-liège est appelé **liège mâle**, **liège vierge** ou encore **liège naturel**. Il résulte de l'activité initiale du phellogène qui se développe à partir des tissus périphériques du tronc et des branches. Ce tissu subéreux est constitué d'un ensemble de cellules produites successivement qui demeurent fortement adhérentes aux tissus sous-jacents et ne se détachent pas spontanément. Son épaisseur est généralement plus importante à la base du tronc et diminue progressivement vers les parties supérieures de l'arbre.

Sur le plan anatomique et technologique, le liège mâle se caractérise par une structure hétérogène, une texture relativement dure, une faible élasticité et une forte présence de fissures. En raison de ces caractéristiques, il est généralement considéré comme impropre à la plupart des usages industriels de haute qualité, notamment la fabrication des bouchons. Il est principalement destiné à la production de matériaux agglomérés et à certaines applications industrielles secondaires (Avila et Bernal, 1998).

La première extraction de ce liège est appelée **démasclage** ou **mise en valeur**. Cette opération sylvicole consiste à retirer le liège mâle afin de permettre l'installation d'un nouveau phellogène et la formation d'un liège de meilleure qualité.

7.1.2. Le liège de reproduction

Le tissu subéreux qui se développe à la suite de l'opération de démasclage ou après la première levée est appelé **liège de reproduction** ou **liège femelle**, et constitue la matière

première la plus recherchée depuis longtemps pour les utilisations industrielles de grande valeur (**Lamey, 1983 ; Boudy, 1950 ; Natividade, 1956**). Bien qu'il présente une organisation anatomique comparable à celle du liège mâle, le liège de reproduction se distingue par une structure plus régulière, une meilleure homogénéité et un nombre réduit de crevasses. Après plusieurs cycles d'exploitation, notamment à partir de la troisième levée, le liège obtenu atteint une qualité supérieure. Ce **liège de reproduction** est particulièrement recherché par l'industrie du bouchon naturel en raison de ses excellentes propriétés technologiques (**Lombardini, 2008**).

Le chêne-liège possède la capacité de produire plusieurs générations successives de liège de reproduction au cours de sa vie. Selon les conditions de croissance et la longévité de l'arbre, le nombre de récoltes peut varier généralement entre six et neuf levées. Dans certaines situations exceptionnelles, ce nombre peut atteindre une quinzaine de récoltes (**Lombardini, 2008**).

Après l'extraction du liège, la surface du liber, appelée couramment « mère », devient visible. Sa coloration évolue progressivement au cours du temps : initialement jaunâtre à saumonée, elle prend ensuite une teinte rouille avant de devenir grisâtre à noirâtre sous l'effet de l'oxydation des composés phénoliques, notamment les tanins.

La régénération des tissus après le démasclage s'effectue par un processus de cicatrisation comprenant deux étapes principales. La première correspond à une **phase passive**, caractérisée par des réactions de protection immédiates telles que l'exsudation de sève et le dessèchement progressif des couches superficielles du liber. Cette couche morte forme une barrière protectrice qui limite les dommages et protège les tissus encore vivants (**Oliveira & Costa, 2012**).

La seconde étape est une **phase active** durant laquelle les tissus vivants du liber reconstituent une nouvelle assise génératrice. Un nouveau phellogène se différencie alors et reprend son activité de division cellulaire. Celui-ci produit progressivement un nouveau liège assurant à nouveau la protection du tronc. À la suite de ce processus, le liber initial se retrouve divisé en deux parties : une couche interne vivante qui conserve ses fonctions physiologiques et une couche externe morte progressivement repoussée vers l'extérieur, constituant la croûte protectrice (**Boudy, 1950 ; Natividade, 1956**).

7.2-. Accroissements du liège :

Une des particularités physiologiques du chêne-liège est que l'activité de l'assise subéro-phellodermique diminue durant la période hivernale, s'étendant sur environ quatre à cinq mois, généralement de la fin octobre-début novembre jusqu'à la fin avril. Ainsi, le cycle végétatif complet responsable de la production du liège dure plus de six mois, pouvant atteindre sept mois (**Cochet, 1971**). Sur cette base, le cycle de formation du liège est subdivisé en quatre phases principales (**Dehane, 2006**) :

1. Phase printanière :

- Subéraie littorale : de mi-mars à fin mai
- Subéraie de montagne : de début avril à fin mai

2. **Phase estivale** : de juin à mi-août pour les deux types de provenances
3. **Phase automnale** : de fin août-début septembre à fin octobre
4. **Phase de repos hivernal** : de début novembre à fin mars-début avril

Les couches subéreuses correspondant aux accroissements annuels présentent des caractéristiques variables selon la saison. Celles formées au printemps sont généralement plus larges et plus claires, tandis que celles produites en été et en automne sont plus sombres et moins épaisses.

En réalité, la formation du liège débute plus précocement en zone littorale qu'en zone de montagne. Dans cette dernière, la régénération du phellogène est retardée en raison du démarrage tardif du printemps et des températures plus fraîches observées durant les mois d'avril et de mai (**Costa et al., 2002**).

De manière générale, le cycle de production périodique du liège correspond au nombre d'accroissements annuels complets formés chaque année, auquel s'ajoutent deux accroissements incomplets encadrant la période de démasclage ou de levée du liège. En pratique, ces demi-accroissements sont considérés comme une seule couche annuelle (**Saccardy, 1937 ; Ferreira et al., 2000**).

Pratiquement, et comme le montre la figure 15, les accroissements annuels du liège apparaissent homogènes et relativement stables. Toutefois, les variations observées entre les épaisseurs des couches annuelles sont principalement liées aux irrégularités climatiques (sécheresses prolongées), aux déficiences physiologiques de l'arbre, aux attaques d'insectes ainsi qu'aux mauvaises pratiques d'exploitation (**Caritat et al., 1996**).

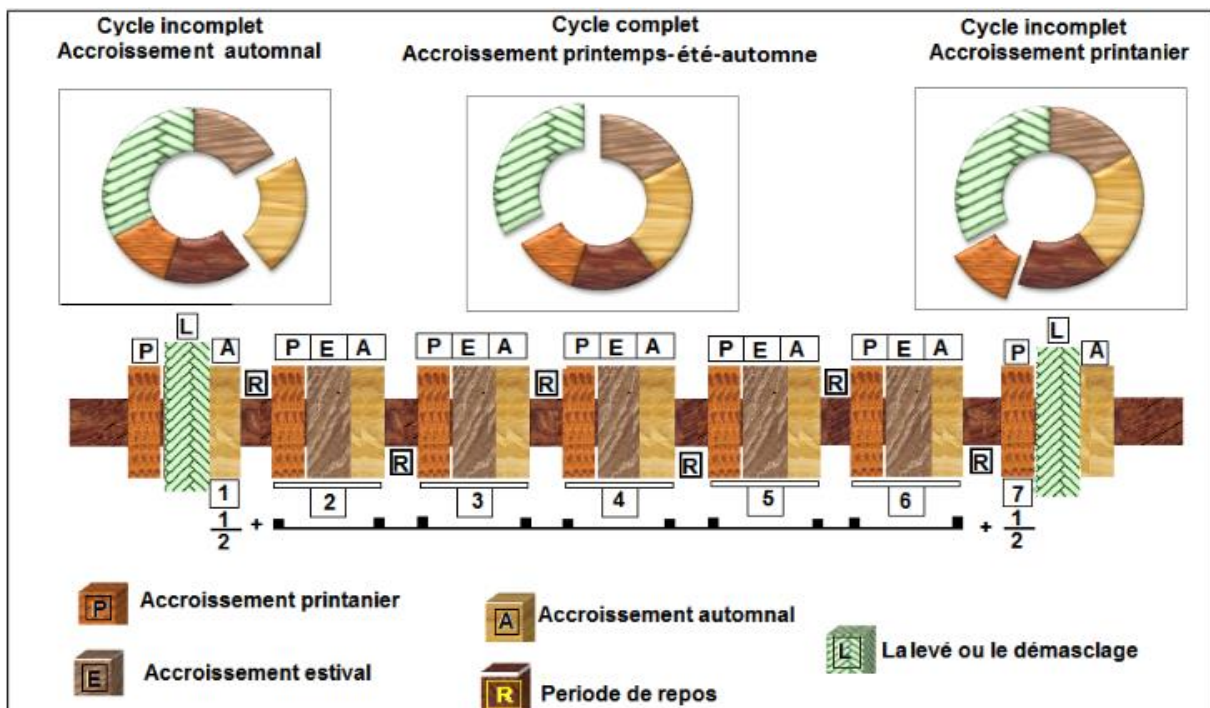


Figure 15: Cycle végétatif d'un liège de reproduction constitué de cinq accroissements complets successifs (Dehane, 2012).

Selon **Poirot (1992)**, dans les zones d'altitude moyenne, l'épaisseur des couches annuelles varie entre 2 et 4 mm, tandis que dans les sols fertiles et les milieux humides, elle peut atteindre 5 à 8 mm.

Chaque année, après la récolte, une nouvelle couche de liège (cerne annuel) se forme en repoussant progressivement les couches précédentes vers l'extérieur (Fig. 16). Ainsi, l'âge du liège peut être déterminé par le comptage de ces cernes ou accroissements annuels.

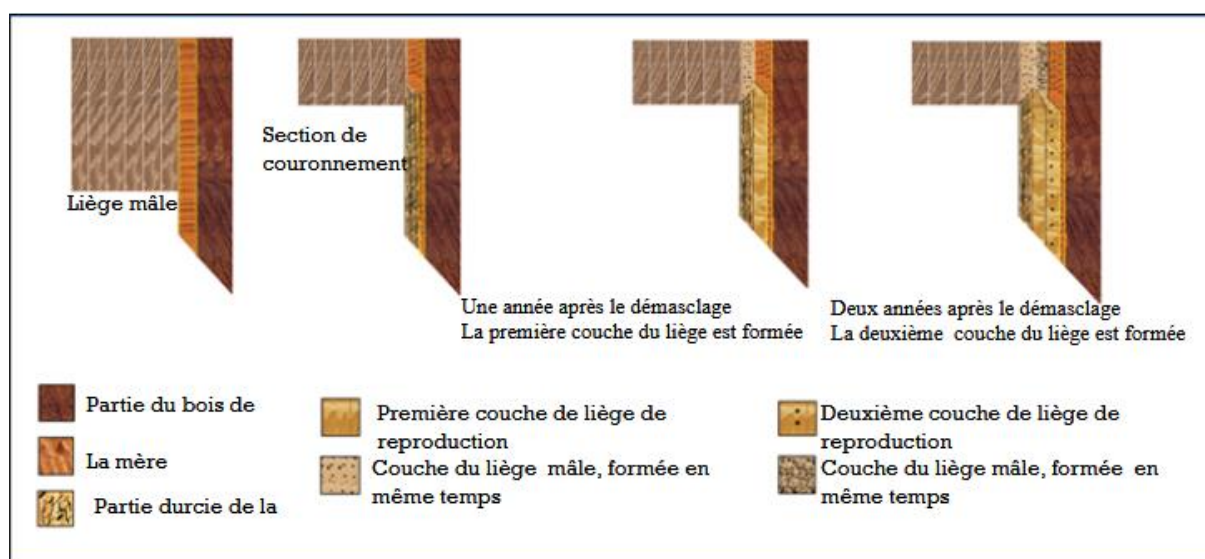


Figure 16 : Chronologie de la formation du liège naturel (Dehane, 2012).

L'accroissement du liège est généralement évalué par la mesure de la distance entre deux cernes successifs correspondant aux formations printanières et automnales. En Algérie, après le démasclage, l'accroissement du liège de reproduction peut atteindre 3,8 mm/an durant la deuxième année, puis diminue progressivement pour atteindre environ 1,5 mm à la dixième année (**Saccardy, 1937**). Au Portugal, l'accroissement est maximal l'année suivant la récolte, avant de diminuer rapidement (**Natividade, 1956**).

Globalement, la croissance du liège varie d'un pays à l'autre et d'une année à l'autre. Elle dépend essentiellement des conditions écologiques et de croissance des arbres.

7.3--Les assises subéreuses :

Les assises subéreuses correspondent à un tissu homogène constitué de cellules mortes de forme prismatique, organisées en rangées parallèles à l'axe radial de l'arbre, avec des bases situées à différents niveaux. Les dimensions cellulaires varient en fonction de la saison de croissance durant laquelle elles se forment. Ainsi, dans chaque accroissement annuel, on distingue un liège de printemps, formé au début de la période végétative, et un liège d'automne, formé vers la fin de cette période (Fig. 17). La proportion de chacun de ces types de liège au sein des anneaux annuels est fortement influencée par les conditions

environnementales, notamment le climat, ainsi que par les facteurs génétiques (**Fortes et Rosa, 1988**).

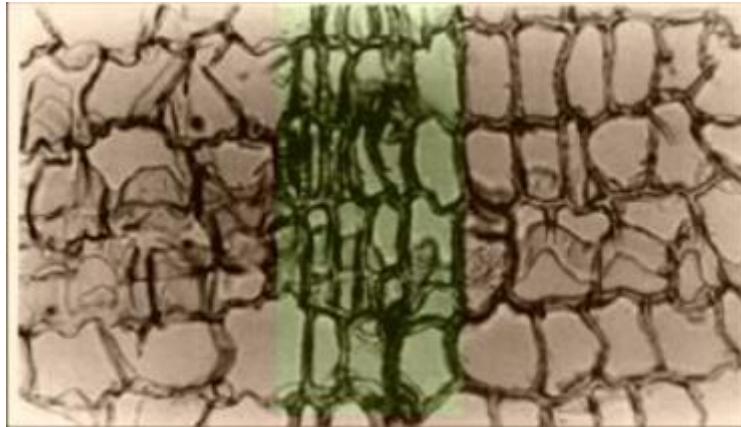


Figure 17: Limite d'un anneau de croissance montrant la différenciation entre le liège printanier (à gauche) et le liège automnal (à droite) (Grossissement $\times 1000$) (**Fos et al., 1994**).

Chaque cellule du phellogène produit entre 20 et 100 cellules de liège par an, ce qui correspond à une épaisseur comprise entre 2 et 5 cm. Toutefois, la durée d'activité du phellogène varie selon les stations et les régions. Elle est pratiquement nulle en hiver et atteint son maximum au printemps. Cette variabilité explique les différences observées au niveau des dimensions cellulaires et de l'épaisseur des parois. Ainsi, les cellules formées au printemps sont plus nombreuses, plus allongées et à parois plus fines, tandis que celles produites en été et en automne sont moins nombreuses mais présentent des parois plus épaisses (**Gibson et Ashby, 1988 ; Krahmer et Wellons, 1973**) (Fig. 18).

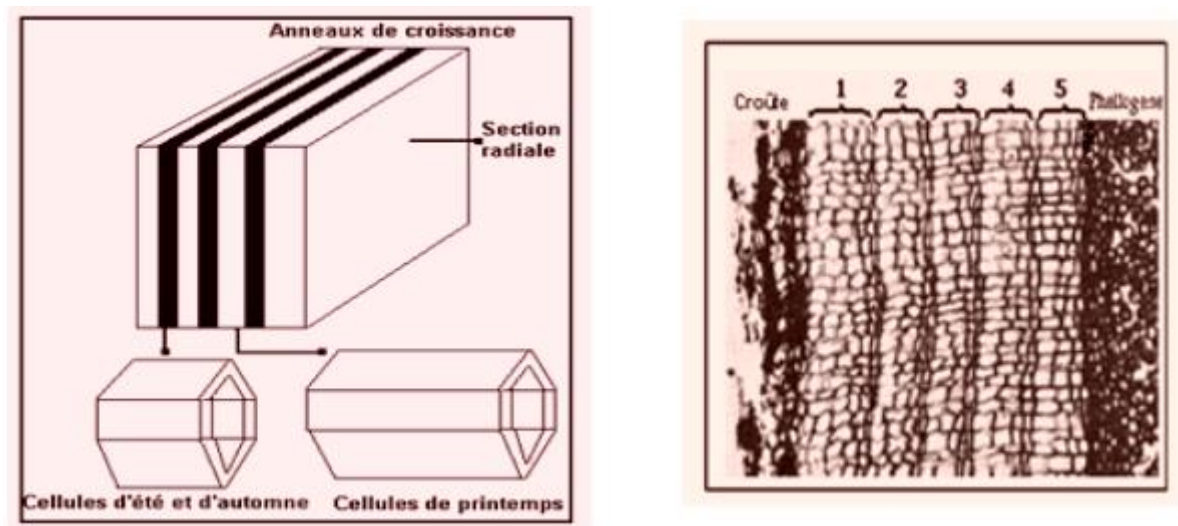


Figure 18: Morphologie des cellules du liège selon les trois plans de coupe (**Remata Gete, 2008**). À gauche : alternance de plusieurs anneaux de croissance ; à droite : coupe radiale montrant six années de croissance complète. (**Dahane, 2012**)

Les cellules du liège présentent des dimensions comparables à celles des cellules végétales, généralement de l'ordre de quelques dizaines de micromètres (μm). Toutefois, leurs dimensions moyennes varient sensiblement selon la saison de formation, notamment entre les cellules produites au printemps et celles formées en été/automne (Tab. 1).

Tableau 1 : Paramètres dimensionnels des cellules de liège (**Pereira et al., 1987**).

	Liège de printemps	Liège été/automne
Hauteur du prisme	30-40 μm	10-15 μm
Bord de la base du prisme	13-15 μm	13-15 μm
Superficie moyenne de la base	4×10^{-6} à $6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$	4×10^{-6} à $6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$
Epaisseur des parois	1-1,5 μm	2-3 μm
Nombre de cellules par cm^3	4×10^7 à 7×10^7	10×10^7 à 20×10^7

Chapitre II :

**La santé du chêne-liège et son impact
sur la formation du liège : mécanismes
de dégradation et dynamique de
mortalité**

Le chêne-liège occupe une position singulière parmi les essences forestières méditerranéennes, en raison de sa capacité exceptionnelle à produire, année après année, un périderme persistant et homogène : le liège. Cette production repose sur l'activité d'un méristème secondaire, le phellogène, dont le fonctionnement continu distingue le chêne-liège de la quasi-totalité des essences ligneuses, qui développent au contraire un rhytidome hétérogène résultant du remplacement successif de périderme éphémères (**Armendariz et al., 2024**).

Or, cette singularité physiologique n'est pas acquise de manière figée : elle dépend étroitement de l'état sanitaire général de l'arbre, lui-même conditionné par la disponibilité en eau, la fertilité stationnelle, l'âge du peuplement, les pratiques sylvicoles et l'intensité des agressions biotiques.

Comprendre les mécanismes physiologiques qui sous-tendent cette dégradation est indispensable non seulement pour anticiper le risque de mortalité, mais également pour appréhender ses répercussions directes sur la physiologie du phellogène et, par conséquent, sur la quantité et la qualité du liège produit.

1- Cadre conceptuel du dépérissement forestier

1.1- Genèse et évolution du concept

Le concept de dépérissement forestier repose sur un cadre théorique élaboré progressivement depuis le milieu du XXe siècle. **Houston (1967)** a formulé l'idée fondatrice d'une « maladie induite par le stress » (stress-induced disease), selon laquelle un arbre soumis à des contraintes répétées s'affaiblit progressivement jusqu'à devenir vulnérable à des agents secondaires, ce qui peut conduire à sa mort. Ce modèle, approfondi au fil des décennies (**Houston, 1973, 1981, 1984, 1992**), définit le dépérissement comme une pathologie complexe qui s'articule autour du triangle classique de la phytopathologie : l'interaction entre l'hôte, l'agent pathogène et le milieu environnemental.

Le dépérissement forestier ne saurait être réduit à une pathologie végétale ordinaire. Il s'agit d'un syndrome multifactoriel caractérisé par une baisse graduelle de la vitalité de l'arbre, qui se traduit par une diminution du feuillage, un ralentissement de la croissance radiale et, à terme, par la mortalité de l'individu (**Manion, 1991**).

Plusieurs caractéristiques le distinguent d'une maladie classique : la cause n'est jamais un agent pathogène unique, mais une combinaison de perturbations cumulées dans le temps ; les facteurs climatiques et stationnels interviennent presque systématiquement comme éléments prédisposants ou déclencheurs (**Landmann, 1994**) ; les champignons et insectes opportunistes agissent comme facteurs aggravants ; et les symptômes persistent et s'intensifient sur plusieurs années, ce qui les distingue d'une réaction transitoire à un stress ponctuel.

1.2-Le triangle étiologique et le modèle de Sinclair-Manion

Le modèle de **Sinclair (1964)**, ultérieurement enrichi par **Manion (1981)** sous la forme désormais classique de la « spirale du déclin » (Fig.19) , structure la mortalité des arbres en trois catégories de facteurs hiérarchisés dans le temps :

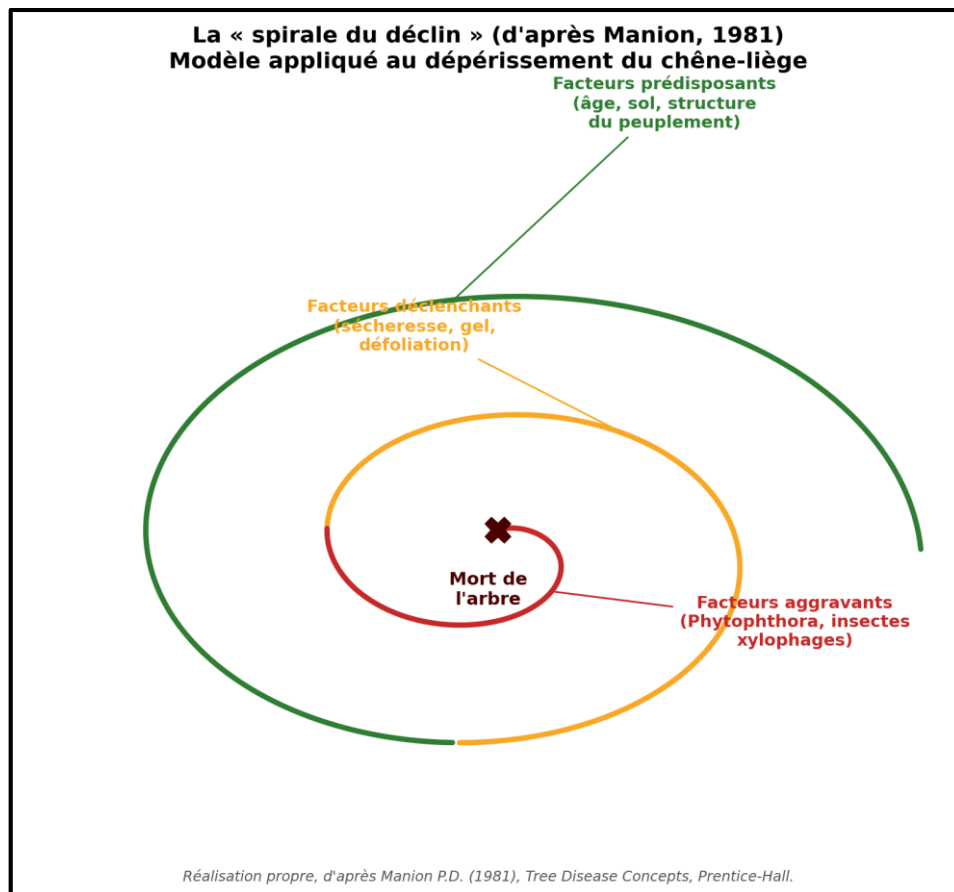


Figure 19 : La « spirale du déclin » de Manion (1981) appliquée au dépérissement du chêne-liège.
 Réalisation propre, d'après Manion P.D. (1981), Tree Disease Concepts, Prentice-Hall.

1-les facteurs prédisposants, de nature statique et permanente (âge, sol, structure du peuplement, gestion passée), qui installent l'arbre dans un état de stress chronique sans le tuer directement ;

2-les facteurs déclenchants, d'action brève et intense (une à trois saisons), typiquement représentés en contexte méditerranéen par la sécheresse édaphique, mais aussi par le gel tardif, la défoliation massive par les insectes ou les incendies ;

3-les facteurs aggravants ou terminaux, essentiellement biotiques (agents fongiques racinaires, insectes xylophages), qui portent le coup de grâce à un arbre déjà physiologiquement compromis.

Ce modèle séquentiel demeure la grille de lecture de référence pour interpréter le dépérissement des subéraies méditerranéennes, y compris dans le contexte spécifique de l'ouest algérien, où la conjonction de sols gréseux superficiels, de peuplements vieillissants, de sécheresses récurrentes, de vagues de chaleurs persistantes et d'une pression entomologique secondaire croissante reproduit fidèlement l'enchaînement prédisposition-déclenchement-aggravation.

2.Spécificités du dépérissement du chêne-liège en contexte méditerranéen

La crise sanitaire affectant les subéraies n'est pas un phénomène récent : ses prémices sont documentées dès l'aube du XXe siècle, avec des manifestations non discriminantes touchant aussi bien les jeunes recrues que les individus sénescents. Vers le milieu du siècle, cette dégradation s'est généralisée, provoquant un affaiblissement physiologique sévère de nombreux peuplements. Cette

dynamique délétère a entraîné une mutation paysagère majeure, marquée par le passage de la forêt climacique à des stades de substitution de type maquis (Camilo-Alves et al., 2013).

À partir des années 1980, le phénomène a connu une accélération alarmante, exacerbant la vulnérabilité de peuplements déjà fragilisés. Une tendance trouve un écho direct dans la réduction drastique des surfaces de subéraies productives observée dans plusieurs pays du bassin méditerranéen (Camilo-Alves et al., 2013).

3. Mécanismes physiologiques de dégradation : de la contrainte hydrique à la rupture fonctionnelle

3.1-Le continuum sol-plante-atmosphère

Le transport de l'eau au sein de l'arbre repose sur un système hydraulique passif reliant le sol à l'atmosphère par l'intermédiaire du xylème, tissu conducteur constitué de cellules mortes et vides (vaisseaux et trachéïdes). Ce mouvement est régi par l'interaction de plusieurs forces :

- 1) La transpiration foliaire, moteur principal, génère une tension qui aspire la sève brute vers le houppier ;
- 2) La poussée racinaire facilite l'entrée de l'eau dans le système racinaire depuis le sol ;
- 3) La gravité et les frottements internes s'opposent à l'ascension du flux liquide (**Cochard & Granier, 1999**).

L'efficacité de l'arbre à maintenir son équilibre hydrique dépend directement de l'extension et de la densité de son système racinaire : un enracinement profond, ramifié et dense constitue l'un des traits les plus efficaces pour tolérer la sécheresse, en donnant accès à des réserves d'eau plus stables (**Bréda et al., 2006**).

Le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux au niveau des stomates génère un gradient de tension hydrique qui maintient une colonne d'eau continue de la racine jusqu'aux feuilles, transformant l'arbre en une véritable pompe hydraulique passive. L'ouverture stomatique, en régulant simultanément les pertes d'eau et l'absorption du dioxyde de carbone nécessaire à la photosynthèse, place l'arbre au cœur d'un arbitrage physiologique permanent entre préservation de l'intégrité hydraulique et maintien de l'activité carbonée (Tyree, 1997).

3.2-Seuils critiques du statut hydrique

L'évaluation de l'intensité du déficit hydrique chez le chêne-liège repose sur deux indicateurs quantitatifs complémentaires.

3.2.1- Le potentiel hydrique foliaire

Il est mesuré à l'aide d'une chambre à pression de Scholander ; il exprime l'état de tension hydraulique interne de l'arbre. Pour le chêne liège, un stress sévère est atteint lorsque le potentiel descend entre $-2,0$ et $-2,5$ MPa, entraînant une fermeture stomatique maximale (**Bréda et al., 2006**). Au-delà d'un seuil critique situé entre $-3,0$ et $-3,5$ MPa, les dommages infligés au système conducteur deviennent le plus souvent irréversibles, ce qui accroît drastiquement le risque de mortalité hydraulique (**Tyree & Sperry, 1989**).

3.2.2- L'eau extractible relative du sol (REW)

Le REW (Relative Extractable Water) quantifie la disponibilité en eau pour la plante ; il varie de 1 (capacité au champ) à 0 (point de flétrissement permanent). Selon **Bréda et al. (2006)**, le seuil de 0,4 constitue une valeur charnière : au-dessus, l'alimentation hydrique n'est pas limitante et la conductance du couvert dépend essentiellement de la demande évaporative ; en dessous, le stress hydrique induit une fermeture stomatique progressive ; en dessous de 0,1, les stomates sont quasi totalement fermés et seule subsiste une transpiration résiduelle cuticulaire. Ce seuil, validé par des mesures de flux en milieu méditerranéen, constitue un paramètre central des modèles de bilan hydrique tels que BILJOU (Granier et al., 1999).

3.3-Cavitation et embolie xylémique : la rupture de la colonne d'eau

Sous l'effet d'un stress hydrique sévère, le gradient de tension au sein des vaisseaux du xylème augmente de manière critique. Lorsque cette tension excède le seuil de résistance des membranes situées au niveau des ponctuations inter-vasculaires, la colonne d'eau se rompt. Ce processus, appelé cavitation ; il se manifeste par l'intrusion de bulles d'air dans des conduits normalement remplis de sève (**Tyree & Sperry, 1989**) (**Fig.20**). L'expansion de ces bulles conduit à une embolie gazeuse, qui obstrue la circulation de la sève brute et réduit drastiquement la capacité de l'arbre à alimenter son houppier en eau. C'est l'une des causes majeures du déclin physiologique observé lors des épisodes de dépérissement

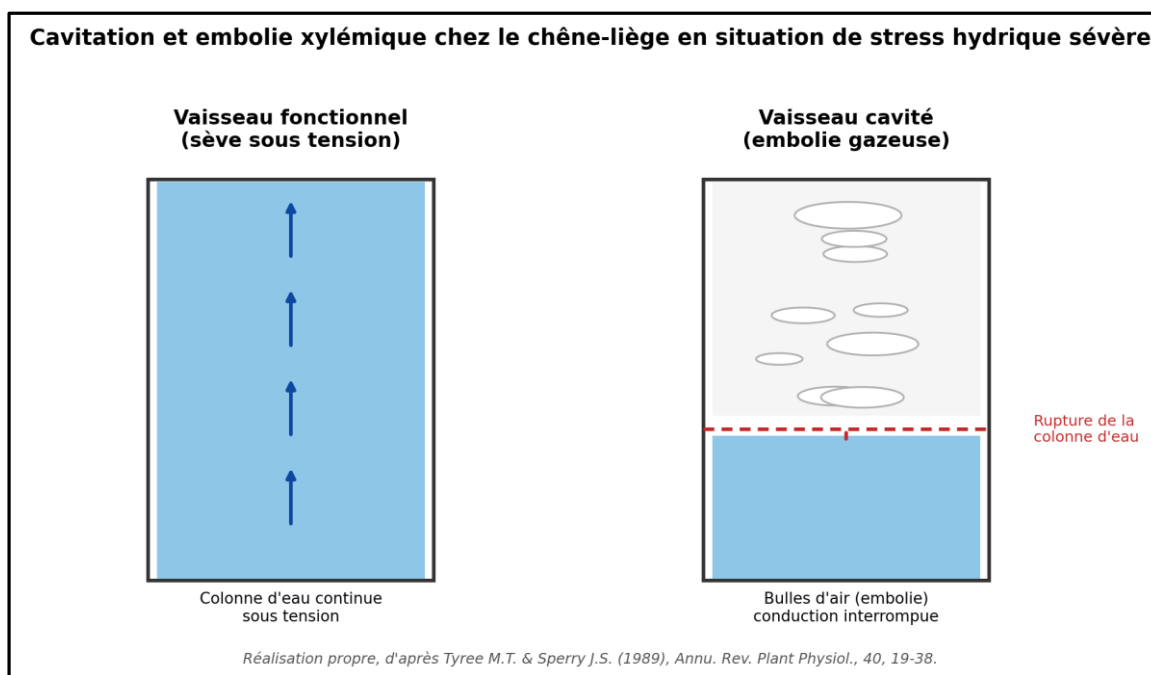


Figure 20 : Cavitation et embolie xylémique chez le chêne-liège en situation de stress hydrique sévère (Tyree & Sperry, 1989).

La vulnérabilité à la cavitation présente une cinétique de type sigmoïde : au-delà du seuil critique, une intensification même mineure du stress hydrique suffit à provoquer, en quelques jours seulement, la rupture de la colonne d'eau dans jusqu'à 80 % des vaisseaux conducteurs (**Tyree & Sperry, 1989**). Ce comportement est caractérisé par le paramètre Ψ_{50} , potentiel hydrique induisant 50 % de perte de conductance hydraulique. Les essences méditerranéennes telles que *Quercus suber* présentent des

valeurs de Ψ_{50} nettement plus négatives que celles des espèces tempérées, ce qui témoigne d'une adaptation évolutive aux contraintes de sécheresse récurrentes de leur environnement.

3.4- La crise énergétique : inanition carbonée

Parallèlement à la défaillance hydraulique, l'arbre subit une crise métabolique profonde, théorisée par **McDowell et al. (2008)** sous le concept d'inanition carbonée (carbon starvation). Pour limiter les pertes d'eau par transpiration, le chêne-liège ferme ses stomates ; si cette réponse protège temporairement les vaisseaux de l'embolie, elle bloque simultanément l'assimilation du CO_2 et donc l'activité photosynthétique. L'arbre est alors contraint de mobiliser ses glucides non structuraux (NSC, Non-Structural Carbohydrates), constitués principalement d'amidon et de sucres solubles stockés dans le parenchyme libéro-ligneux du tronc et des racines.

Chez un chêne-liège vigoureux, la concentration en NSC représente environ 5 à 10 % de la matière sèche du parenchyme du tronc (**McDowell et al., 2008**). Le processus de dépérissement devient irréversible lorsque ce taux s'effondre en deçà du seuil critique de 2 % de la matière sèche. Sous cette valeur, la synthèse des métabolites secondaires de défense (tanins, phénols) chute de 60 à 80 %, ce qui abolit pratiquement la capacité de l'hôte à contrecarrer les attaques d'insectes xylophages. **Bréda et al. (2006)** ont par ailleurs montré que de faibles teneurs en amidon résiduel dans le tronc à la fin de l'été sont corrélées à une mortalité sévère des rameaux au printemps suivant, ce qui illustre le caractère différé du déficit carboné : le dépérissement de la cime constitue souvent une réponse retardée à un stress physiologique subi l'année précédente.

3.5-Effondrement des défenses et invasion entomo-fongique

C'est dans cet état de vulnérabilité physiologique extrême qu'interviennent les facteurs aggravants, principalement d'origine biotique. Dans le contexte spécifique des subéraies algériennes, deux catégories d'agents pathogènes sont particulièrement documentées.

Le complexe racinaire, dominé par le champignon tellurique *Phytophthora cinnamomi*, détruit le système racinaire fin et paralyse les capacités d'absorption hydrique et minérale de l'arbre (**Espanol, 1964 ; Elena, 1992**). Les insectes xylophages, tels que le bupreste du chêne (*Coroebus florentinus*) absent en Algérie et le platype cylindrique (*Platypus cylindrus*), creusent des galeries sous-corticales qui interrompent mécaniquement la circulation de la sève élaborée, entraînant un dépérissement rapide (**Bouhraoua et al., 2002 ; Bouhraoua, 2003 ; Belhoucine et al. , 2011**).

Ces deux catégories d'agents sont dites « terminales ». Le champignon *Phytophthora* attaque la base racinaire tandis que les insectes xylophages bloquent le système de transport central, produisant un effet d'étranglement physiologique.

Bouhraoua (2003) a démontré que les arbres stressés émettent des signaux chimiques (terpènes, éthanol) qui attirent des bio-agresseurs opportunistes, révélant une dynamique densité-dépendante : le taux d'infestation par le Platype est directement corrélé à l'indice de défoliation de la cime. Dans les stations forestières dégradées, la pression de colonisation se traduit par des densités larvaires élevées, atteignant 15 à 20 galeries par mètre linéaire de tronc. Lorsque les galeries larvaires interceptent plus de 75 % de la circonférence cambiale, le flux de sève élaborée est totalement interrompu, ce qui prive le système racinaire de photoassimilats et entraîne sa mort par inanition en moins d'une saison de

végétation. Ce mécanisme explique la cinétique foudroyante du phénomène de « mort subite » observé sur le terrain.

3.6-Réponses morphologiques compensatoires : les pousses épicorniques

Avant l'issue fatale, l'architecture du chêne-liège subit des modifications structurelles notables, qui constituent des indicateurs précieux pour le gestionnaire forestier. Face à la mort de sa cime, l'arbre tente une réorganisation spatiale de sa photosynthèse : la levée de dominance apicale, causée par la mort des bourgeons terminaux, déclenche l'activation de bourgeons dormants situés sur le tronc et les grosses branches charpentières (**Rolland et al., 1999**). L'apparition de ces « gourmands » ou rameaux épicorniques constitue une tentative de reconstruire une surface foliaire à proximité immédiate des réserves carbonées, minimisant ainsi le coût énergétique du transport de l'eau. Cette réaction signale toutefois, le plus souvent, que l'arbre est entré dans la phase terminale du dépérissement, ces jeunes pousses étant elles-mêmes très sensibles aux attaques parasitaires ultérieures. Un mécanisme de rétroaction positive conforme à la logique de la spirale du déclin de **Manion (1981)**.

4- Dynamique de mortalité du chêne-liège :

Cet aspect vise à articuler les mécanismes physiologiques exposés précédemment avec les données empiriques disponibles sur la mortalité du chêne-liège, à l'échelle individuelle comme à l'échelle des peuplements, dans l'ensemble du bassin méditerranéen occidental.

4.1- Modèles mécanistes de la mortalité induite par la sécheresse

Selon le cadre théorique proposé par **McDowell et al. (2008)**, la mortalité des arbres associée à la sécheresse résulte de deux mécanismes principaux, qui peuvent agir de façon séquentielle ou synergique :

4.1.1-la défaillance hydraulique (hydraulic failure)

Elle survient lorsque la cavitation et l'embolie xylémiques atteignent un niveau critique empêchant totalement le transport de l'eau vers les organes aériens, lesquels cessent alors de fonctionner puis meurent progressivement. L'inanition carbonée (carbon starvation), qui résulte de la fermeture stomatique prolongée est imposée pour limiter le risque d'embolie. Cette stratégie de prudence hydraulique, en bloquant l'assimilation du carbone sur une durée excessive, épuise les réserves énergétiques nécessaires au maintien des fonctions vitales, à la défense contre les bio-agresseurs et à la reprise de croissance.

Ces deux mécanismes ne sont pas mutuellement exclusifs : chez le chêne-liège, la combinaison d'un stress hydraulique sévère et d'un déficit carboné prolongé crée une synergie mortelle, dans la mesure où l'arbre affaibli perd simultanément sa capacité à transporter l'eau et sa capacité à produire les composés de défense (résines, tanins, phénols) nécessaires pour contrecarrer l'invasion des agents opportunistes. C'est précisément à ce stade que les facteurs aggravants comme les maladies et insectes xylophages interviennent pour porter le coup fatal à un arbre déjà structurellement condamné (**McDowell et al., 2008**)

4.1.2- Seuils physiologiques critiques associés à la mortalité

La synthèse des seuils physiologiques identifiés dans la littérature permet de proposer une hiérarchie des points de non-retour dans la trajectoire de mortalité du chêne-liège (**Fig.21**):

-Le potentiel hydrique foliaire : stress sévère entre $-2,0$ et $-2,5$ MPa ; risque de mortalité hydraulique au-delà de $-3,0$ à $-3,5$ MPa, seuil au-delà duquel les dommages au système conducteur deviennent le plus souvent irréversibles (Tyree & Sperry, 1989 ; Bréda et al., 2006) ;

-L'Eau extractible relative du sol (REW) : fermeture stomatique progressive sous $0,4$; quasi-arrêt des échanges gazeux sous $0,1$ (Bréda et al., 2006) ;

-Perte de conductance hydraulique (PLC) : au voisinage du potentiel Ψ_{50} , propre à chaque espèce, une aggravation même mineure du déficit hydrique peut entraîner la rupture de la colonne d'eau dans jusqu'à 80 % des vaisseaux conducteurs en quelques jours seulement (Tyree & Sperry, 1989) ;

-Réserves en glucides non structuraux (NSC) : le niveau physiologique normal de 5 à 10 % de la matière sèche du parenchyme du tronc ; seuil d'irréversibilité du dépérissement fixé à environ 2 %, en deçà duquel la synthèse des métabolites de défense chute de 60 à 80 % (McDowell et al., 2008) ;

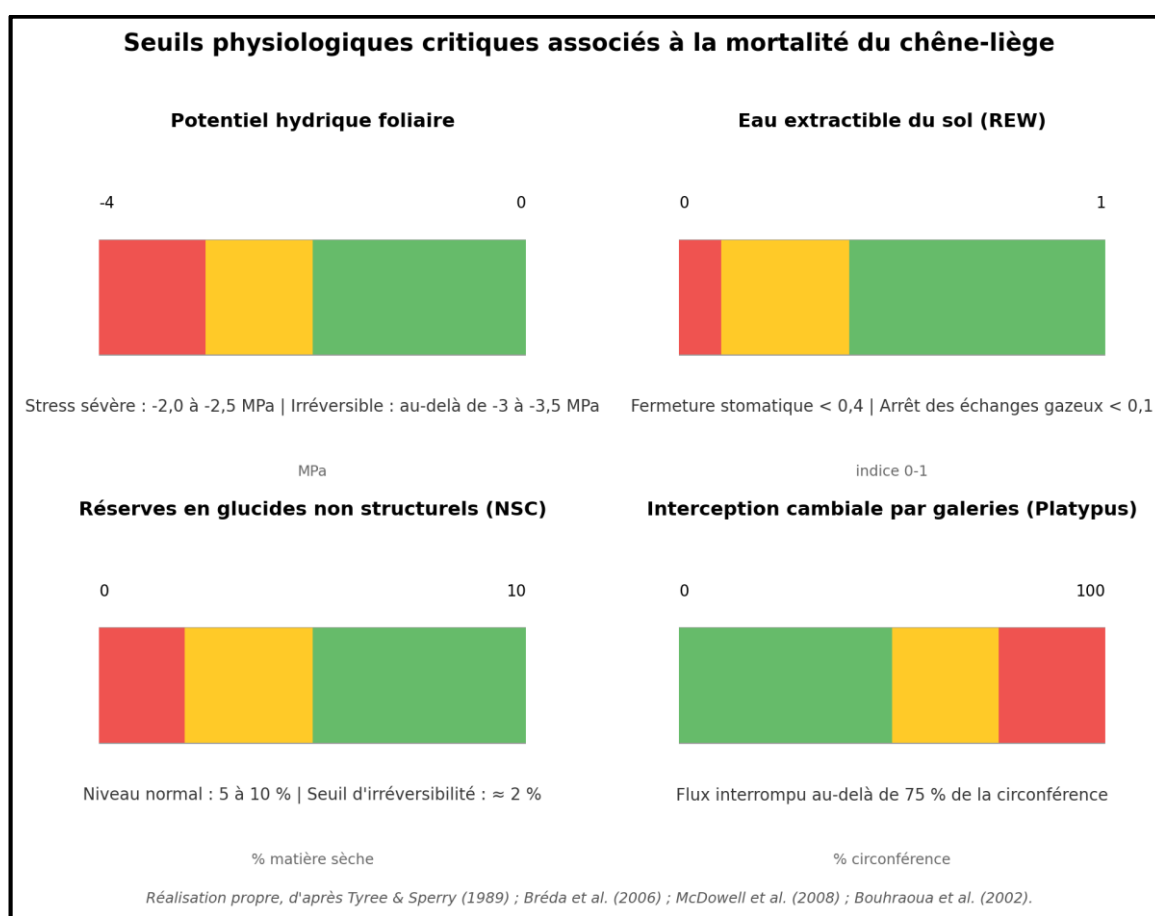


Figure 21 : Seuils physiologiques critiques associés à la mortalité du chêne-liège. Réalisation propre, d'après Tyree & Sperry (1989) ; Bréda et al. (2006) ; McDowell et al. (2008) ; Bouhraoua et al. (2002).

-Interception cambiale par les galeries xylophages : au-delà de 75 % de la circonférence du cambium interceptée par les galeries de *Platypus cylindrus*, le flux de sève élaborée est totalement interrompu, entraînant la mort du système racinaire par inanition en moins d'une saison de végétation (Bouhraoua et al., 2002).

La combinaison de ces seuils, hydraulique, énergétique et entomologique, dessine une trajectoire de mortalité qui n'est que rarement instantanée. Elle résulte le plus souvent de l'accumulation progressive de plusieurs années de stress sub-létal, ponctuée par un ou plusieurs épisodes aigus qui font basculer l'arbre au-delà de son point de non-retour physiologique (**Manion, 1981, 1991**)

4.1.3- Rôle amplificateur des agents entomologiques et fongiques

Dans les subéraies de l'Ouest algérien, l'impact des insectes phytophages suit une dynamique densité-dépendante clairement établie. **Bouhraoua (2003)** démontre dans ses travaux de thèse que le taux d'infestation par le *Platypus cylindrus* est directement corrélé à l'indice de défoliation de la cime (ce paragraphe est déjà cité avant ; répétition). Les arbres les plus stressés appartenant aux classes 2 et 3 de Déficit foliaire présentent les charges larvaires les plus élevées, en cohérence avec l'attractivité accrue des tissus stressés (émission de terpènes et d'éthanol). Ce xylophage agit donc selon un mécanisme particulier : ses galeries provoquent un « annelage interne » qui, au-delà du seuil de 75 % de la circonférence cambiale interceptée, interrompt totalement les flux photoassimilés vers les racines, produisant le phénomène de « mort subite » fréquemment rapporté sur le terrain (**Fig 22**).

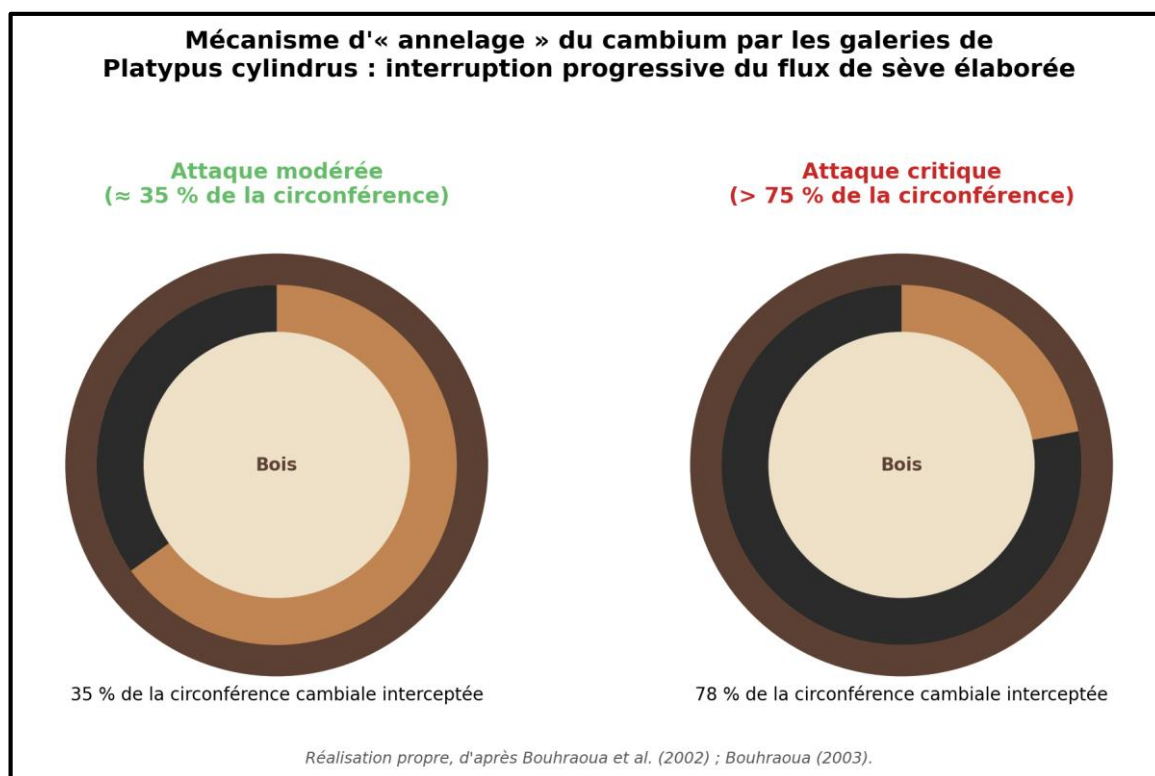


Figure 22 : Mécanisme d'« annelage » du cambium par les galeries de *Platypus cylindrus*.

Le complexe fongique racinaire, dominé par le mildiou des chênes, agit sur un registre différent mais tout aussi déterminant : en détruisant le système racinaire, il compromet directement la capacité d'absorption de l'eau et des éléments minéraux de l'arbre. Ceci aggrave la contrainte hydrique déjà demandée par la partie aérienne. Ce phytopathogène a été identifié comme le principal responsable de la « seca » observée en Espagne (**Espanol, 1964 ; Elena, 1992**), et figure parmi les agents pathogènes documentés au Portugal, associé à d'autres organismes tels que *Biscogniauxia mediterraneum*, *Diplodia mutila* et *Armillaria*

mellea (Carvalho, 1992 ; Cabral et al., 1993 ; Santos et al., 1999) et *Cryphonectria naterciae* en Algérie (Smahi et al., 2018).

5- Répercussions de la dégradation physiologique sur le phellogène et la formation du liège

5.1-Rappel du fonctionnement du phellogène et de la subérification

La périderme, structure protectrice caractéristique de la croissance secondaire des tiges et racines, résulte de l'activité du phellogène ou cambium subéro-phellodermique. C'est un méristème bifacial qui produit du phellème (liège) vers l'extérieur et du phelloderme vers l'intérieur (Fernández-Piñán et al., 2021). Chez la plupart des essences ligneuses, dont le chêne vert, le phellogène a une activité limitée dans le temps : lorsqu'un nouveau périderme se forme en position plus interne, les tissus externes, y compris l'ancien périderme, finissent par mourir, produisant un rhytidome hétérogène constitué de couches successives de phellème fin entremêlées de tissus corticaux et de phloème collabé (Armendariz et al., 2024).

Chez le chêne-liège, en revanche, le phellogène demeure actif tout au long de la vie de l'arbre, produisant un périderme persistant et homogène de cellules subérifiées épaisses : le liège. Les cellules nouvellement produites par le phellogène subissent une différenciation marquée par l'accumulation, dans leurs parois, d'un polyester lipidique (la subérine) et d'un polymère de type lignine, qui confèrent au liège ses propriétés d'imperméabilité, d'isolation thermique et de résistance mécanique. Cette spécialisation pariétale isole progressivement la cellule de l'eau et des nutriments, provoquant sa mort à maturité (Fernández-Piñán et al., 2021) (Fig.23).

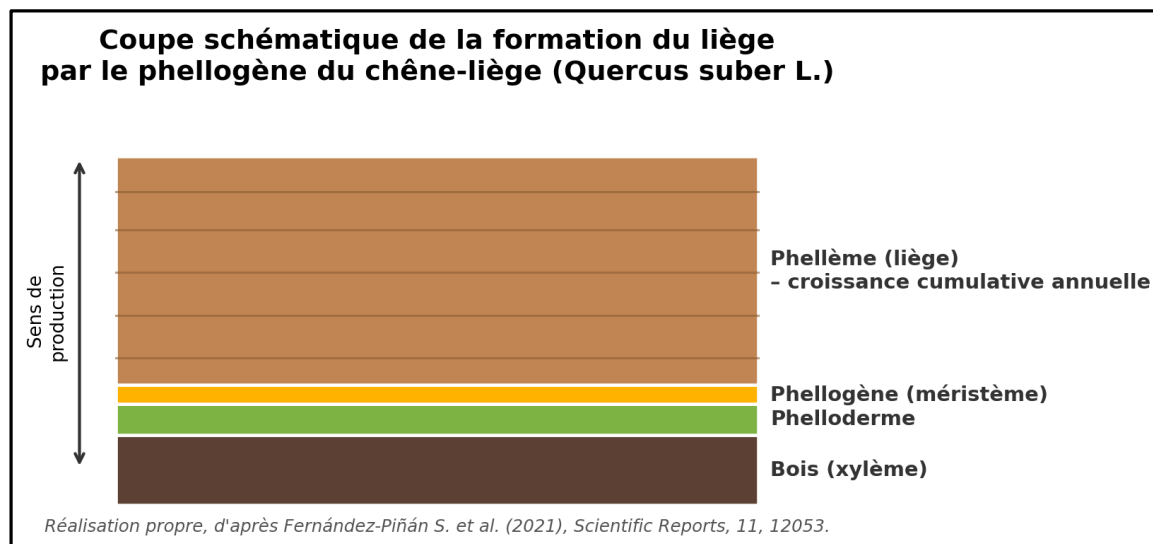


Figure 23 : Coupe schématique de la formation du liège par le phellogène du chêne-liège. Réalisation propre, d'après Fernández-Piñán et al. (2021).

5.2-. Saisonnalité de l'activité cambiale suberogène et sensibilité au climat

L'activité du phellogène du chêne-liège est strictement saisonnière. Chez le chêne liège, la croissance du liège débute généralement en avril et culmine en juin, produisant un liège initial (earlycork) composé de cellules nombreuses, longues et à parois minces ; elle ralentit ensuite progressivement jusqu'en juillet-août, avec la formation d'un liège tardif (latecork) composé de cellules moins

nombreuses et à parois plus épaisses (**Fernández-Piñán et al., 2021**). Cette alternance saisonnière matérialise les cernes annuels de croissance du liège, dont la largeur constitue un indicateur direct de l'intensité de l'activité cambiale au cours de l'année considérée.

L'étude dendroclimatologique de **Caritat et al. (1996)**, menée sur une chronologie de quatorze années dans une dehesa de Cáceres (Espagne), a mis en évidence des corrélations robustes entre la largeur des cernes de liège et les précipitations : le coefficient de corrélation le plus élevé est obtenu pour le cumul pluviométrique s'étendant de novembre de l'année précédente à septembre de l'année de croissance ($r = 0,852$), suivi du cumul de novembre à juin ($r = 0,825$) et de janvier à juin ($r = 0,796$). Lorsque les précipitations sont analysées mois par mois, seuls janvier et juin présentent des corrélations significatives, désignant ces deux mois comme des périodes clés pour l'activation et le maintien de l'activité phellogénique.

À l'inverse, la température entretient globalement une corrélation négative avec la croissance du liège, à l'exception notable d'avril et de septembre, où elle exerce une influence positive sur l'activation du phellogène ; un résultat qui suggère un rôle protecteur des températures modérées d'avril contre le gel tardif, et un rôle déclencheur en fin de saison de croissance (**Caritat et al., 1996**). Les corrélations les plus fortement négatives concernent les températures de mars, juin et octobre, ce qui indique que des températures élevées durant ces mois inhibent respectivement le réveil du phellogène, la croissance active et l'entrée en dormance.

Ces résultats convergent avec les observations issues du profilage transcriptomique saisonnier réalisé par **Fernández-Piñán et al. (2021)** et même par **Ghalem et al. (2018)** sur le liège de prélevé en avril, juin et juillet. Au début de la saison de croissance (avril), les gènes surexprimés relèvent principalement de la régulation du cycle cellulaire, du maintien de l'identité méristématique du phellogène (homologues de WUSCHEL, SHOOT MERISTEMLESS, AINTEGUMENTA) et de la mise en place de la différenciation cellulaire des dérivés phellogéniques. Au maximum de croissance (juin) et en phase avancée (juillet), en revanche, ce sont les processus métaboliques associés à la composition chimique du phellème, biosynthèse de la subérine, de la lignine, des triterpènes et des composés aromatiques solubles qui dominent le transcriptome, avec un pic d'expression des gènes de subérification observé en juin. En juillet, les processus liés à la paroi secondaire, notamment ceux impliquant polysaccharides et lignine, atteignent une expression maximale, traduisant un renforcement pariétal qui accompagne vraisemblablement la transition du liège initial vers le liège tardif.

5.3- Le signal du stress abiotique dans le transcriptome du liège

L'élément le plus significatif pour la présente analyse réside dans la constance du signal de stress abiotique tout au long du cycle de production du liège. **Fernández-Piñán et al. (2021)** montrent que la réponse au stress abiotique est retrouvée dans l'ensemble des groupes de gènes co-régulés identifiés (clusters), quelle que soit la phase de la saison considérée. Les gènes surexprimés en juin et en juillet présentent en particulier un enrichissement spécifique en réponses au stress lumineux, thermique et oxydatif, cohérent avec les conditions de température élevée typiques des étés méditerranéens. Le stress oxydatif dans les tissus en cours de lignification et de subérification est d'ailleurs documenté comme associé à un couplage oxydatif des composés polyphénoliques par l'intermédiaire de peroxydases productrices de radicaux libres. un mécanisme qui participe directement à la polymérisation de la subérine et de la lignine, mais qui traduit également l'état de tension physiologique du tissu producteur.

Cette observation revêt une portée importante : elle indique que le stress abiotique n'est pas un facteur exogène ponctuel affectant occasionnellement le phellogène, mais une composante intrinsèque et

permanente du fonctionnement normal de ce tissu au cours de la saison de croissance. Il en résulte que toute intensification de la contrainte hydrique ne fait qu'amplifier un état de tension déjà constitutif de l'activité cambiale subérogène, rapprochant d'autant plus rapidement le phellogène de ses seuils de dysfonctionnement.

5.4-Arbitrage métabolique entre croissance, défense et différenciation

La production de liège est énergétiquement coûteuse : elle mobilise à la fois des assimilats carbonés issus de la photosynthèse pour soutenir les divisions cellulaires du phellogène, et des précurseurs lipidiques et phénylpropanoïdes pour la biosynthèse de la subérine et de la lignine. Toute diminution de l'activité photosynthétique consécutive à la fermeture stomatique se traduit donc mécaniquement par une réduction de l'activité du phellogène et, par conséquent, par une diminution des accroissements annuels du liège (**David et al., 2007**). Ce lien direct entre statut hydrique, statut carboné et croissance du liège explique pourquoi les années de sécheresse marquée se traduisent systématiquement par la formation de cernes subéreux étroits, tandis que les années pluvieuses favorisent des cernes larges (**Bréda et al., 2004 ; Costa et al., 2001**).

Ce constat rejoint directement la logique de l'inanition carbonée exposée précédemment (§3.4) : lorsque les réserves en glucides non structuraux chutent en deçà du seuil de 2 % de la matière sèche, l'arbre n'est plus en mesure d'allouer simultanément des ressources à la croissance cambiale, à la synthèse des composés de défense et au maintien des fonctions vitales de base. Le phellogène, tissu à forte demande métabolique mais non directement vital à court terme, figure alors parmi les premiers postes de dépense sacrifiés, ce qui explique la réduction précoce et marquée de la croissance du liège observée dès les premiers stades du dépérissement, souvent avant même l'apparition de symptômes visibles au niveau de la cime.

5.5-Rhytidome versus liège : quand le stress chronique fait basculer le type d'écorce

L'étude comparative d'**Armendariz et al. (2024)**, portant sur le transcriptome, la chimie et l'anatomie des écorces externes de deux chênes à savoir *Quercus suber*, *Quercus ilex* et de leurs hybrides naturels, apporte un éclairage particulièrement instructif sur la relation entre stress physiologique et type de périoderme produit. Les analyses transcriptomiques comparant les écorces de type liège et les écorces de type rhytidome révèlent des orientations fonctionnelles nettement contrastées. Les groupes de gènes surexprimés dans les écorces de type rhytidome sont enrichis en processus liés au stress abiotique, au métabolisme des phénylpropanoïdes, à la mort cellulaire programmée et à des voies de développement associées à l'inhibition de l'activité méristématique, à l'inhibition de l'expansion cellulaire et à la différenciation cellulaire précoce. À l'inverse, les groupes de gènes surexprimés dans les écorces de type liège sont enrichis en processus de métabolisme lipidique, de cycle cellulaire, de division cellulaire, de maintien méristématique et d'expansion cellulaire.

Autrement dit, la formation d'un liège homogène et persistant repose sur un programme de développement qui privilégie la prolifération et l'expansion cellulaires soutenues du phellogène, tandis que la formation d'un rhytidome hétérogène est associée à un programme dominé par l'inhibition de l'activité méristématique, la différenciation précoce et la mort cellulaire. Ce profil transcriptomique est très proche, sur le plan fonctionnel, de celui observé chez les tissus végétaux soumis à un stress abiotique chronique. Ce parallèle est renforcé par l'analyse d'un individu hybride rare, issu d'un rétrocroisement avec le chêne-liège, qui présente une écorce de type liège malgré son origine hybride : cet individu montre une similarité transcriptomique marquée avec le chêne-liège, notamment au niveau des gènes associés à la lignine, à la subérine, à la formation de la paroi cellulaire et au cycle cellulaire, alors que les hybrides à écorce de type rhytidome partagent avec le chêne vert un

enrichissement en processus de stress biotique et abiotique, de signalisation, de mort cellulaire et de sénescence (**Armendariz et al., 2024**).

Ces résultats permettent de formuler une hypothèse physiologiquement cohérente et directement pertinente pour l'étude de la mortalité du chêne-liège : un stress chronique suffisamment intense et prolongé tel que celui induit par une sécheresse édaphique répétée, une sénescence avancée du peuplement ou un démasclage traumatique répété pourrait déplacer l'équilibre transcriptomique et développemental du phellogène vers un profil de type « rhytidome ». Il est caractérisé par une différenciation précoce, un ralentissement de la prolifération cellulaire et une activation des voies de mort cellulaire, au détriment du maintien d'un périderme persistant et homogène. Ce mécanisme, bien qu'il reste à confirmer par des approches transcriptomiques dédiées sur des arbres en dépérissement avéré, offre un cadre moléculaire cohérent pour expliquer l'irrégularité anatomique, la porosité accrue et la dégradation qualitative du liège fréquemment rapportées chez les arbres physiologiquement affaiblis.

5.6- Conséquences quantitatives et qualitatives sur la production de liège

L'ensemble de ces mécanismes converge vers des conséquences mesurables sur la production subéreuse. Sur le plan quantitatif, la réduction de l'activité du phellogène se traduit par une diminution de l'épaisseur annuelle du liège produit, les années de déficit hydrique marqué correspondant systématiquement aux années de plus faibles accroissements (**Costa et al., 2001**). Sur le plan qualitatif, les arbres affaiblis produisent un liège présentant une porosité plus élevée, une irrégularité tissulaire accrue et, par conséquent, une valeur commerciale réduite (**Pereira, 2015**). Cette dégradation qualitative n'est pas seulement un effet collatéral du ralentissement de la croissance : elle reflète, à l'échelle cellulaire, le déplacement du programme de différenciation du phellogène décrit ci-dessus, la formation de cellules subéreuses moins nombreuses, de dimensions réduites et pariétalement moins homogènes traduisant un état de stress cumulatif du tissu générateur.

6- Symptomatologie et classification de terrain de l'état sanitaire

Sur le terrain, l'évaluation de l'état sanitaire du chêne-liège repose sur un ensemble de symptômes hiérarchisés, dont l'apparition suit généralement l'ordre chronologique de la spirale du déclin. Le dépérissement débute fréquemment de façon discrète par une chlorose foliaire et une réduction de la longueur des pousses annuelles, traduisant l'incapacité de l'arbre à mobiliser efficacement ses réserves carbonées pour la croissance. Les symptômes majeurs observés au niveau de la cime comprennent : 1) des anomalies de la structure du houppier et un développement limité du ramage ; 2) la micro phyllie : feuilles de petite taille traduisant une limitation des ressources carbonées ; 3) des pertes de branches et une mortalité sectorielle de la couronne, donnant à la cime un aspect irrégulier ; 4) la « descente de cime », déclin graduel des branches supérieures débutant aux extrémités les plus distales du système racinaire ; 5) la défoliation anticipée, mécanisme adaptatif par lequel l'arbre sacrifie une partie de son feuillage pour protéger ses tissus essentiels ; et 6) des jaunissements précoces liés à des carences minérales d'origine racinaire.

Ces symptômes sont classiquement quantifiés au moyen d'une échelle de classement du houppier allant de la classe 0 (arbre en bonne santé, absence de défoliation apparente) à la classe 4 (arbre mort), fondée sur l'estimation visuelle du taux de défoliation et de la transparence du houppier (**Fig.24**).

La méthode standardisée qui permet des relevés comparables entre stations et entre années de suivi. Au niveau racinaire et du tronc, les indicateurs précoces incluent la dégénérescence des racines fines et des mycorhizes, la baisse des réserves d'amidon dans les tissus racinaires, une diminution de la croissance radiale pouvant précéder de plusieurs années l'apparition de symptômes visibles en cime, ainsi que des flux de sève sombre, des fentes d'écorce et des perforations d'origine entomologique sur le tronc.

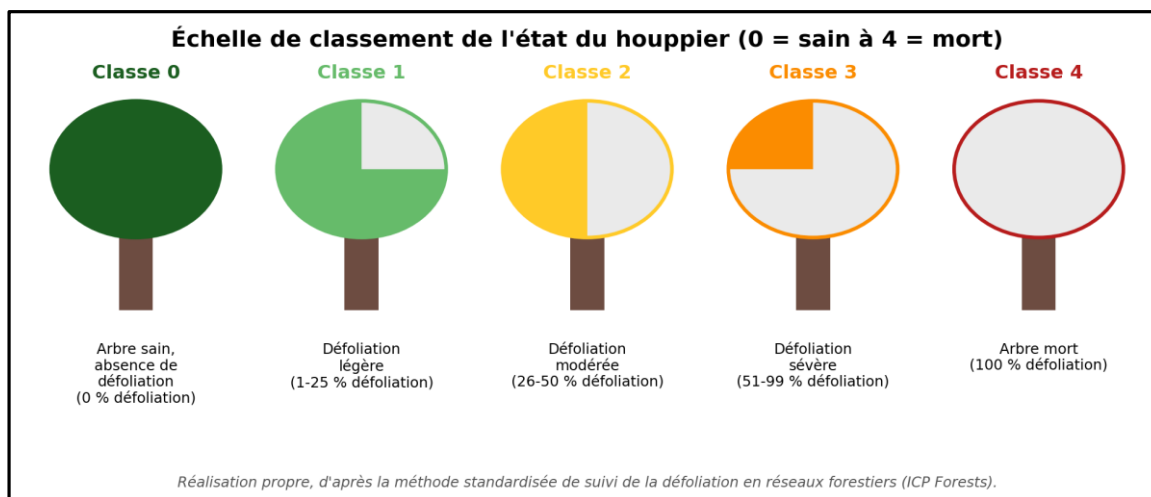


Figure 24 : Échelle de classement de l'état du houppier (0 = sain à 4 = mort). Réalisation propre, d'après la méthode standardisée de suivi de la défoliation.

Enfin, l'apparition de rameaux épicromiques (« gourmands ») constitue, comme exposé au §2.6, un signal d'alarme terminal fortement prédictif d'une entrée dans la phase ultime du dépérissement (Rolland et al., 1999).

7-Panorama comparé de la mortalité des subéraies méditerranéennes

Bien que les mécanismes physiologiques exposés soient génériques, l'ampleur de la mortalité et les cortèges d'agents biotiques impliqués varient sensiblement d'un pays à l'autre du bassin méditerranéen. **Le tableau 2** ci-dessous illustré par la **figure 25** synthétisent les principales données disponibles sur la santé du chêne liège dans son aire naturelle.

Pays	Superficie subéricole / évolution	Données de mortalité et symptômes	Principaux agents biotiques associés
		fin d'été, notamment en zones humides (Garolera, 1988 ; Tuset, 2002)	
Maroc (forêt de la Mamora)	≈ 350 000 ha au niveau national (15 % de la superficie mondiale)	10 à 40 % d'arbres en déclin selon les secteurs en 1990 (Messat, 1992) ; 80 % des arbres atteints et 10 % de mortalité annuelle quelques années plus tard (Yousfi, 1995) ; surface de la Mamora réduite de plus de moitié depuis 133 000 ha	Cortège fongique et entomologique multiple (non détaillé par source)
France	3 à 5 % de la superficie mondiale (Corse, Pyrénées-Orientales, Var)	Affaiblissement généralisé à partir de 1989 ; pertes de feuillage, dessèchement des branches, mortalités d'arbres (Nageleisen et al., 1990 ; 1992)	Non spécifié en détail
Tunisie	Réduction de ≈ 140 000 ha à ≈ 45 000 ha (Ben Jamâa et al., 2002)	Défoliation cyclique récurrente depuis le début des années 1920	<i>Lymantria dispar</i>
Italie (Sardaigne)	90 % de la subéraie nationale	Mortalité massive d'arbres adultes et jeunes depuis les années 1990 (Franceschini et al., 1999a, 2002 ; Sechi et al., 2002)	<i>Biscogniauxia mediterraneum</i> , <i>Diplodia mutila</i> , <i>Armillaria mellea</i>
Algérie	450 000 ha (Boudy, 1955) → ≈ 230 000 ha (D.G.F., 2009), soit une perte de ≈ 220 000 ha en 54 ans	≥ 61 % des subéraies classées comme peuplements âgés ; > 70 % des chênaies exploitées plus de neuf fois pour le liège, souvent dans des conditions défavorables	<i>Coroebus florentinus</i> , <i>Platypus cylindrus</i> , <i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>Zeuzera pyrina</i> , <i>Lymantria dispar</i> , <i>Biscogniauxia mediterraneum</i> (« charbon de la mère »)

La figure 26 montre la régression des surfaces de subéraies dans trois pays du Maghreb sous l'effet du dépérissement. Le taux la régression est plus élevé en Tunisie de 68% comparativement à l'Algérie et la Tunisie qui marquent des taux avoisinant les 50%.

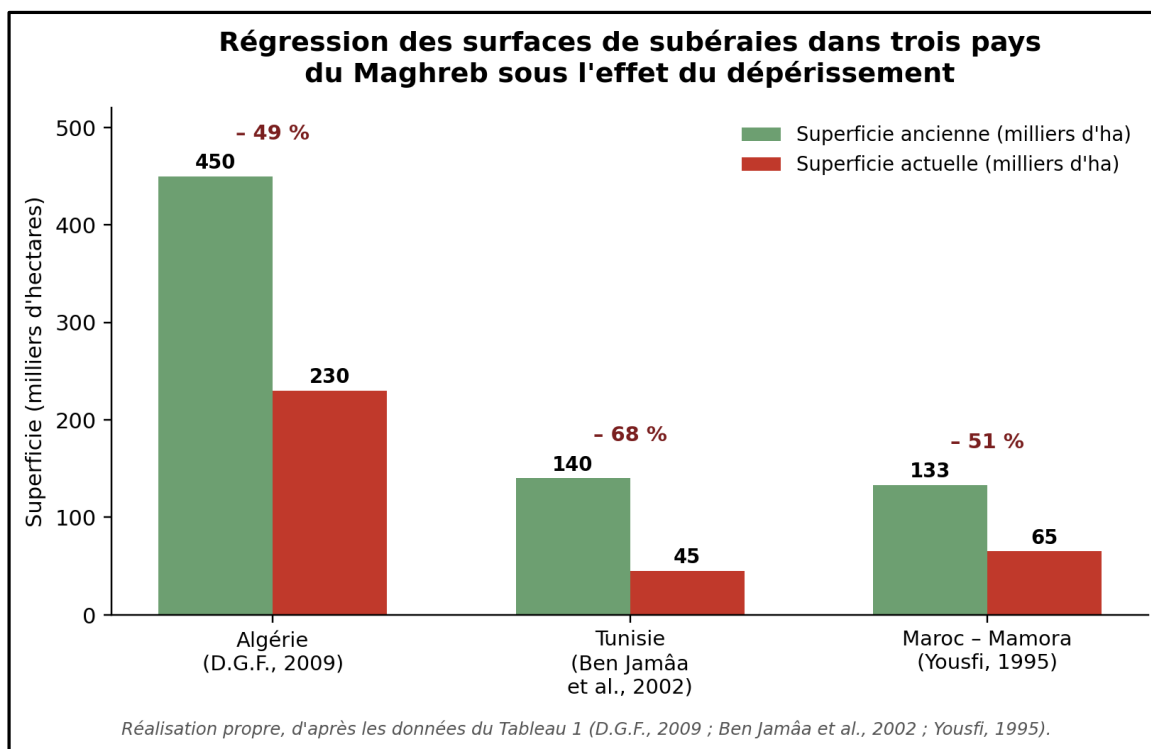


Figure 26 : Régression des surfaces de subéraies en Algérie, en Tunisie et au Maroc (Mamora) sous l'effet du dépérissement. Réalisation propre, d'après les données du Tableau 2

La chronologie des premiers signalements de dépérissements dans ces trois pays est présentée dans la figure 27.

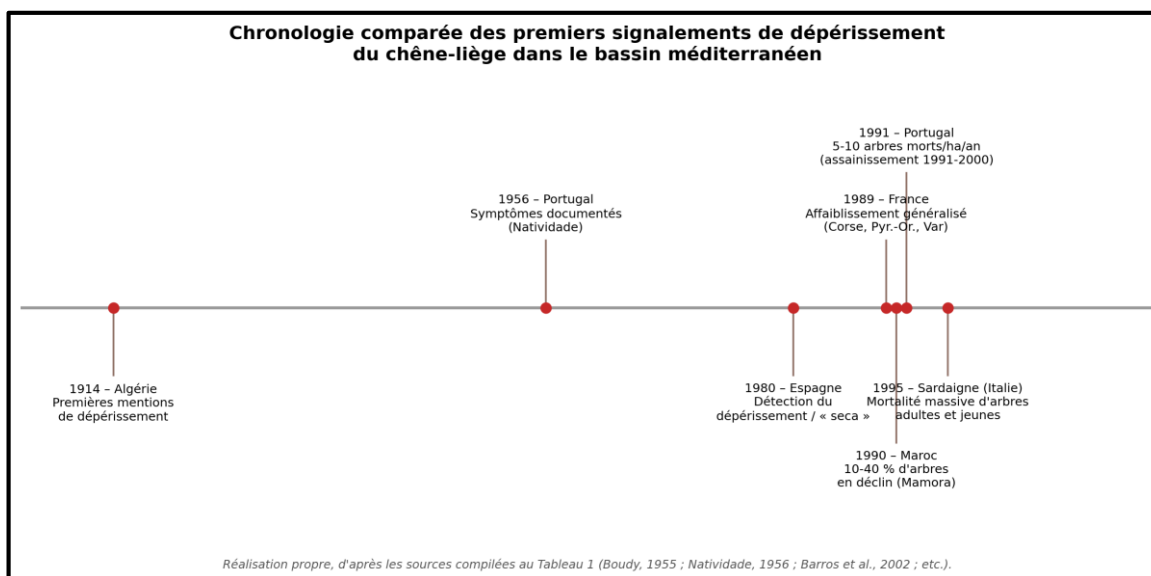


Figure 27 : Chronologie comparée des premiers signalements de dépérissement du chêne-liège dans le bassin méditerranéen. Réalisation propre, d'après le Tableau 11.

Le panorama comparatif révèle une convergence remarquable : dans l'ensemble des pays producteurs. La mortalité massive n'est signalée qu'à partir de la fin des années 1980, malgré des prémices documentées bien plus anciennement (dès 1914 en Algérie). Cette synchronisation à l'échelle du bassin méditerranéen suggère fortement l'action d'un facteur climatique commun, probablement

l'intensification des sécheresses estivales agissant comme déclencheur généralisé sur des peuplements déjà prédisposés par des décennies de surexploitation et de vieillissement structurel.

8-. Conséquences écologiques, économiques et sociales du dépérissement du chêne liège

La dégradation sanitaire des subéraies et la mortalité qui en résulte ont des répercussions qui dépassent largement le seul cadre physiologique de l'arbre individuel.

Sur le plan écologique, la réduction des surfaces de subéraies met en péril la biodiversité associée et favorise l'érosion des sols, rendant de plus en plus difficile la régénération naturelle des peuplements dans les zones les plus affectées . En Algérie, la réduction des forêts productives de 450 000 à 230 000 hectares s'est accompagnée d'une transformation massive vers des faciès de maquis dégradé (**D.G.F., 2009**).

Sur le plan économique, la filière du liège a subi des effets délétères directs, avec l'élimination de nombreuses unités de transformation confrontées à la pénurie de matière première, en particulier au Maghreb (**Alexandrian, 1988 ; Zine, 1992**). La proportion moyenne de liège bouchonnable qui reflète directement l'impact de la dégradation sanitaire sur la valeur commerciale de la production varie sensiblement selon les pays : environ 15 % en France (**Douheret, 1992**), 30 % en Espagne (**Elena, 1992**), moins de 20 % en Algérie (**Zine, 1992**) et environ 25 % au Portugal (**Alexandrian, 1988**). Ces écarts, bien qu'également influencés par des différences de pratiques sylvicoles et de rythmes de récolte, illustrent l'impact tangible de l'état sanitaire des peuplements sur la qualité technologique finale du liège produit bouclant ainsi la boucle entre dégradation physiologique de l'arbre, altération de l'activité du phellogène et perte de valeur économique du produit forestier.

Chapitre III : Etude du milieu : La forêt domaniale de Hafir

La caractérisation du milieu d'étude constitue une étape fondamentale dans toute approche écologique et forestière car elle permet d'identifier les principaux facteurs environnementaux influençant la dynamique des écosystèmes forestiers. En effet, la compréhension des conditions physiques et climatiques est indispensable pour interpréter les phénomènes observés, notamment le lien entre le dépérissement et la croissance des arbres et du liège.

1. Milieu physique

1.1 Situation géographique :

La forêt domaniale de Hafir est située dans la partie occidentale des monts de Tlemcen, au nord-ouest de l'Algérie. Elle se localise à environ 15 km au sud-ouest de la ville de Tlemcen et relève administrativement de la commune d'Aïn Ghoraba. Elle est limitée au nord par la commune de Mansourah, au sud par les crêtes de Béni Bahdel, à l'est par la commune de Terny et à l'ouest par les communes de Zelboun et Béni Mester (**Fig.28**).

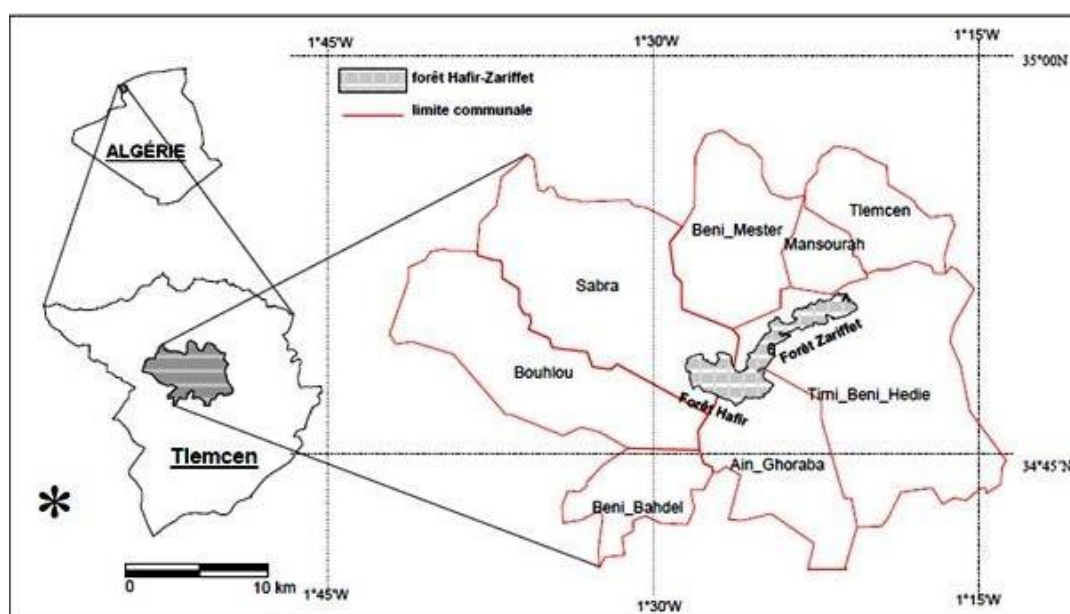


Figure 28 : Situation géographique de la forêt de Hafir (Tlemcen) (**Assia Ietreuch-Belarouci 2002**)

La forêt de Hafir constitue l'un des principaux massifs forestiers de la région de Tlemcen. Elle couvre une superficie totale d'environ 9 872 hectares, dont près de 3 500 hectares occupés par le chêne-liège (**Lamey, 1893**). Le massif est subdivisé en huit cantons forestiers relevant de la circonscription forestière de Tlemcen (**Boudy, 1955**).

Par son altitude, son relief montagneux et ses conditions climatiques relativement favorables, la forêt de Hafir représente l'une des principales subéraies de l'ouest algérien. Elle constitue également un réservoir important de biodiversité et joue un rôle écologique majeur dans la protection des sols, la régulation hydrique et la conservation des ressources forestières de la région.

1.2 Orographie et topographie (Relief)

Le relief de la forêt de Hafir est de type tabulaire avec une altitude variant entre 800 m et 1418 m. L'altitude culmine au niveau du Djebel Koudia. Ce relief est fortement entaillé par des vallées creusées par des oueds et leurs affluents, ce qui confère au paysage un aspect accidenté. Les pentes dominantes sont comprises entre 12,5 % et 25 %, tandis que les pentes faibles (<3 %) et très fortes (>50 %) restent peu fréquentes. Cette diversité topographique influence fortement la distribution de la végétation et des sols (B.N.E.D.E.R., 1979).

1.3 Géologie et pédologie

Le substrat géologique de la forêt de Hafir est constitué principalement de formations gréseuses, notamment les grès séquaniens et les poudingues (Fig. 29). Ces formations sont caractérisées par leur nature siliceuse et leur absence de calcaire (PNT, 2014 ; Boudy, 1950).

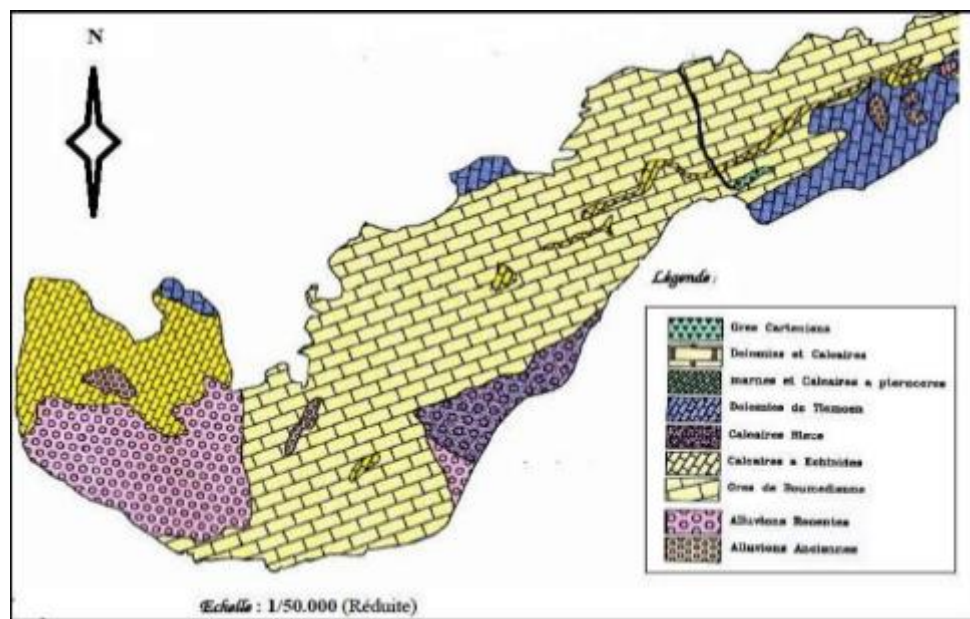


Figure 29: Carte géologique du massif Hafir-Zariffet (PNT, 2014).

Sur le plan pédologique, les sols de la subéraie de Hafir sont dominés par des sols bruns ferralitiques, généralement acides, profonds et bien drainés. Leur texture varie entre sableuse et sablo-limoneuse, ce qui favorise le développement du chêne-liège. Selon Bouhroua (2003), ces sols présentent une grande diversité de conditions édaphiques : ils peuvent être humides, meubles et relativement profonds dans certaines zones, alors qu'ils deviennent superficiels, très secs et fortement caillouteux, voire rocheux, au niveau des crêtes et des secteurs les plus exposés. Ces sols limitent souvent la croissance des peuplements. La profondeur du sol et sa

capacité de rétention en eau jouent un rôle déterminant dans la vitalité des arbres (PNT, 2014 ; Yassad, 2000). Les caractéristiques pédologiques de la zone d'étude sont illustrées dans la **figure 30** suivante.

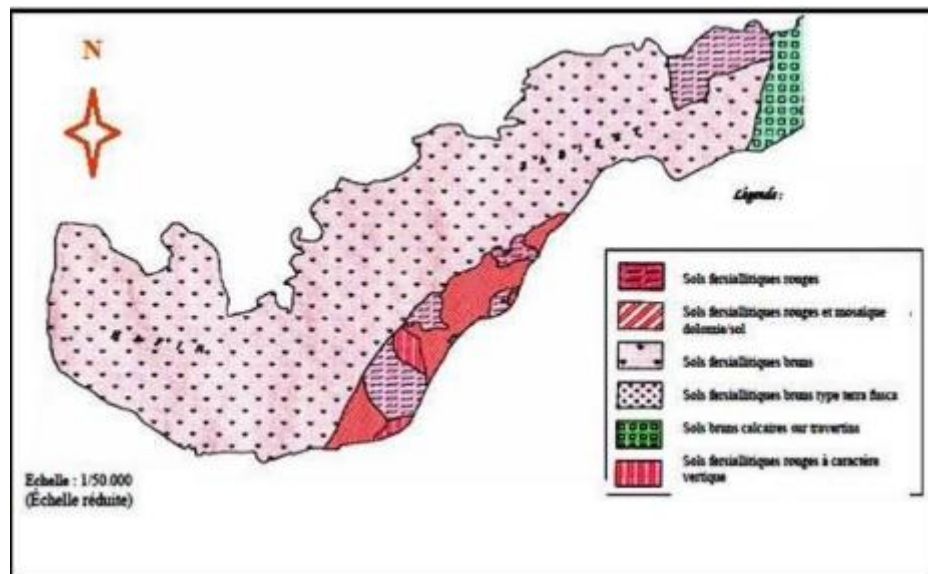


Figure 30: Carte pédologique du massif Hafir-Zariffet (PNT, 2014)

Les études pédologiques réalisées dans la forêt de Hafir ont permis de distinguer plusieurs catégories de sols présentant des caractéristiques physiques et chimiques variées. Selon **Gaouar (1980)**, plusieurs types de sols y sont rencontrés dont les principaux sont :

- Les sols bruns fersiallitiques lessivés se développent généralement sur des substrats calcaires.
- Les sols fersiallitiques rouges se caractérisent par une texture lourde, une faible capacité de rétention en eau, mais une richesse importante en éléments basiques tels que le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}) et le potassium (K^{+}).

Par ailleurs, les sols de la forêt de Hafir sont soumis à des processus d'érosion plus ou moins marqués, particulièrement sur les versants fortement inclinés et exposés aux précipitations.

1.4-Hydrolographie

Le réseau hydrographique de la forêt de Hafir est composé de plusieurs cours d'eau temporaires qui assurent le drainage des eaux pluviales vers les vallées environnantes. Dans la partie méridionale de la forêt, l'Oued Boumeroune traverse le territoire selon une direction Est-Ouest avant de rejoindre le bassin versant de la Tafna. Généralement saisonniers, ces oueds dépendent étroitement du régime des précipitations et jouent un rôle essentiel dans l'alimentation hydrique des sols, contribuant ainsi au maintien de l'équilibre écologique et au développement des peuplements forestiers (**Elmi, 1970 ; B.N.E.D.E.R., 1979**).

1.5 Climat

Le climat constitue l'un des principaux facteurs écologiques influençant la répartition et le développement des formations végétales. La dynamique climatique exerce aussi une influence significative sur la croissance, le développement et l'état sanitaire des peuplements de chêne-liège (**Letreuch-Belarouci, 2002**) ainsi que la croissance du liège (**Dehane et Bouhraoua,**

2010). Dans ses travaux consacrés aux écosystèmes méditerranéens, **Emberger (1971)** a mis en évidence l'importance des conditions climatiques dans la distribution de la végétation et a proposé une méthode de classification permettant de caractériser les différents bioclimats, comme le rapporte **Dahane (2012)**. La forêt de Hafir, localisée au nord des monts de Tlemcen, est soumise à un climat de type méditerranéen caractérisé par une alternance entre une période humide durant l'hiver et une période sèche en été.

L'étude climatique a été réalisée à partir de données météorologiques de longue durée, couvrant des périodes supérieures à vingt ans. Dans cette optique, deux intervalles temporels ont été considérés : une période ancienne s'étendant de 1914 à 1938, documentée par les travaux de **Seltzer (1946)** et les archives du Bulletin de la Station de Recherches Forestières du Nord de l'Afrique (**BSRF, 1937**), et une période récente allant de 1961 à 2017, pour laquelle les données proviennent des stations météorologiques les plus proches de la subéraie étudiée (**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

1.5.1-Précipitations :

1.5.1.1-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 moyens 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	-----

L'analyse comparative des deux périodes met en évidence une évolution de la pluviométrie dans la forêt de Hafir. Au cours de la période 1915-1934, les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à 750 mm, avec des valeurs comprises entre 732,5 et 763,8 mm. La faible amplitude des variations observées (CV = 23 %) traduit une certaine régularité des apports pluviométriques, tandis que le nombre annuel de jours de pluie varie de 56 à 75 jours. Pour la

période récente (1961-2017), une baisse des précipitations moyennes annuelles est observée, celles-ci n'atteignant plus que 643,79 mm. Cette diminution, estimée à près de 15 %, s'accompagne d'une augmentation de la variabilité interannuelle des pluies ($CV = 30 \%$), témoignant d'une plus grande irrégularité du régime pluviométrique. Au début des années 2000, **Pervillé (2003** apporté par **Dahane 2012)**, marque une pluviométrie variant entre 600 et 800mm dans la région de Tlemcen (**Fig.31**).

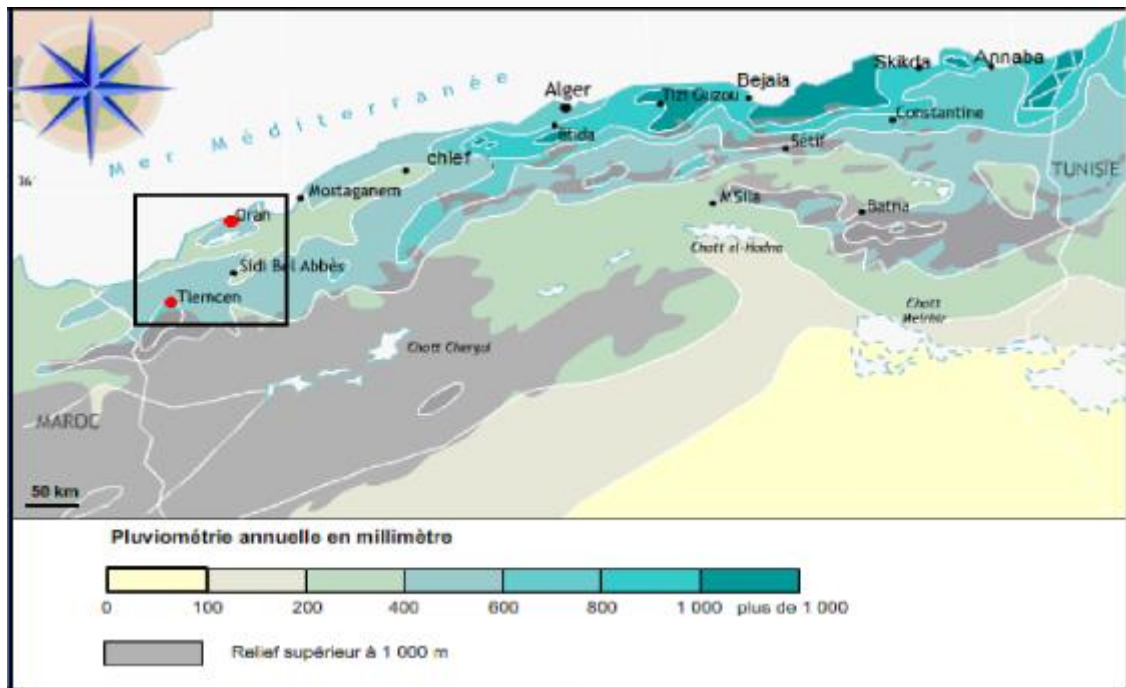


Figure 31 : Carte pluviométrique de l'Algérie, la région d'étude est encadrée (Dahane, 2012)

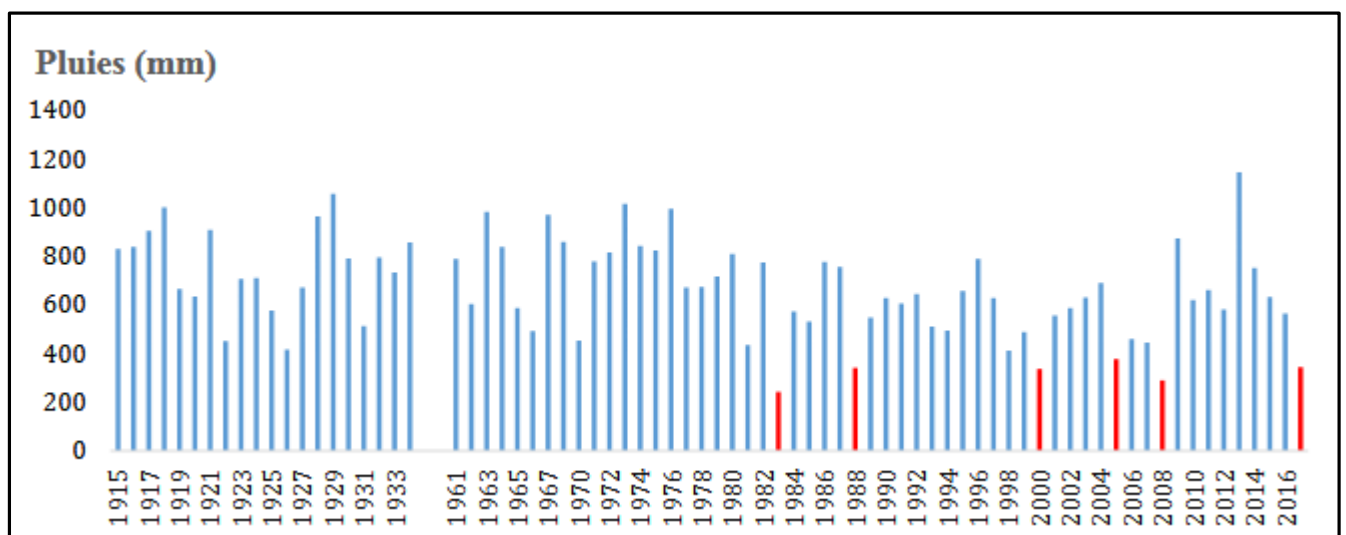


Figure 32 : Répartition annuelle des pluies dans la forêt de Hafir durant 2 périodes de référence (Histogrammes en rouge indiquent les tranches pluviométriques déficitaires pour le chêne liège)

L'examen de la figure met en évidence que, durant la période ancienne, les précipitations annuelles sont demeurées constamment supérieures à 400 mm. Les valeurs enregistrées variaient entre un minimum de 415 mm observé en 1926 et un maximum de 1 050 mm atteint en 1929.

Pour la période récente, les précipitations annuelles présentent une variabilité plus importante, avec des valeurs comprises entre 241 mm en 1983 et 1 141 mm en 2013. Malgré cette fluctuation, les cumuls pluviométriques annuels demeurent généralement supérieurs à 400 mm. Toutefois, plusieurs épisodes de déficit pluviométrique de courte durée ont été enregistrés au cours de cette période. Six années ont ainsi présenté des précipitations inférieures à ce seuil, à savoir 1983 (242 mm), 1988 (341 mm), 2000 (336 mm), 2005 (377 mm), 2008 (289 mm) et 2017 (343 mm). Ces épisodes secs restent relativement espacés dans le temps, avec des intervalles variant de 3 à 12 ans.

Cette évolution traduit une tendance à l'augmentation de l'irrégularité des précipitations au cours de la période récente, marquée par l'alternance d'années fortement arrosées et d'années déficitaires.

1.5.1.2-Répartition mensuelle moyenne des précipitations :

Le tableau 5 montre la répartition moyenne mensuelle des pluies enregistrées dans la zone d'étude durant les deux périodes de référence.

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

Périodes	Jan	Fev	Mar	Apr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Tot
1913-1938	101	106	105	66	63	22	4	4	29	52	96	100	748
1961-2017	79	82	109	80	66	17	3	5	26	48	69	78	660

L'analyse du tableau met en évidence une répartition saisonnière contrastée des précipitations entre les deux périodes étudiées. En effet, au cours de la période ancienne, les pluies les plus importantes sont enregistrées entre les mois de décembre et mars. Le mois de décembre représente le pic pluviométrique avec une moyenne avoisinant 100 mm.

En revanche, durant la période récente, le maximum des précipitations est observé entre février et avril, traduisant un léger décalage de la période la plus arrosée. Malgré cette évolution, la saison sèche demeure globalement inchangée ; les plus faibles hauteurs de pluie sont enregistrées entre juin et août dans les deux périodes considérées.

Ces résultats suggèrent une modification de la distribution intra-annuelle des précipitations, tout en conservant le caractère estival sec typique du climat méditerranéen.

1.5.1.3-Régimes saisonniers des précipitations :

Afin d'analyser la distribution des précipitations au cours de l'année, les cumuls pluviométriques ont été regroupés par saison pour chacune des deux périodes de référence. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 6, qui illustre les différences de répartition saisonnière observées au fil du temps.

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 - 2017	26	140	238	254	PHAE

*les trois mois consécutifs secs.

L'examen du tableau met en évidence une répartition saisonnière contrastée des précipitations entre les deux périodes étudiées. Au cours de la période ancienne, près de 50 % des précipitations annuelles sont enregistrées en hiver, tandis que le printemps contribue avec 31 % du total annuel. Cette distribution correspond à un régime pluviométrique de type HPAE (Hiver–Automne–Printemps–Été).

Pour la période récente, une modification du régime saisonnier est observée. En effet, les précipitations deviennent plus abondantes au printemps qu'en hiver, ce qui traduit un régime de type PHAE (Printemps–Hiver–Automne–Été). Malgré cette évolution, l'été demeure la saison la plus sèche, ne recevant qu'environ 3 % des précipitations annuelles.

Globalement, l'analyse des données couvrant près de huit décennies montre que la subéraie de Hafir bénéficie d'un niveau de précipitations relativement élevé, avec une moyenne annuelle supérieure à 600 mm. Les apports pluviométriques les plus importants sont concentrés au printemps et en hiver, périodes particulièrement favorables à la croissance des peuplements forestiers. Ces conditions climatiques contribuent ainsi au bon développement des arbres et à une production forestière satisfaisante, notamment en ce qui concerne le chêne-liège et la production de liège.

1.5.2-Températures :

La température constitue un facteur climatique majeur influençant le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Selon **Emberger (1930)**, elle intervient dans l'ensemble des processus physiologiques des végétaux, notamment la germination, la croissance, la floraison et la fructification. Elle joue également un rôle déterminant dans la répartition des espèces végétales ainsi que dans l'évolution des sols en agissant sur les mécanismes d'altération des roches et de décomposition de la matière organique.

Des températures excessivement élevées ou trop basses peuvent ainsi limiter le développement de certaines espèces et conditionner leur aire de répartition. Afin de caractériser les conditions thermiques de la subéraie de Hafir, plusieurs paramètres thermiques ont été pris en compte, notamment les températures minimales du mois le plus froid (m°C), les températures maximales du mois le plus chaud (M°C), ainsi que les températures moyennes mensuelles et annuelles (T°C).

Il convient toutefois de signaler que les données thermiques disponibles présentent une certaine discontinuité temporelle, car elles proviennent de différentes sources et couvrent des périodes d'observation variables, allant de courtes à moyennes durées.

1.5.2.1-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 mensuelles minimales des 2 périodes à Hafir

Années	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Moy.
1915-24	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
1925-34	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
1914-38	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
1975-91	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
1990-00	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

L'analyse des données thermiques met en évidence une évolution des températures minimales entre les deux périodes étudiées. Au cours de la période ancienne, les températures minimales mensuelles varient de 1,4 à 1,8 °C durant le mois de janvier, considéré comme le plus froid de l'année, jusqu'à 17,3 °C au mois d'août. La moyenne annuelle des températures minimales est estimée à environ 8,2 °C. Des épisodes de froid intense ont toutefois été enregistrés, avec des minimas extrêmes atteignant -7,6 °C en mars (période 1915-1924) et -6,0 °C en février-mars, voire -8,0 °C le 27 décembre 1926 (**BSRF, 1937**). Les moyennes minimales annuelles se situent globalement entre 7,9 et 8,2 °C.

Durant la période récente, une hausse des températures minimales est observée. Les valeurs enregistrées pour les mois les plus froids varient entre 2,8 °C en février et 3,5 °C en janvier, tandis que la moyenne annuelle se situe entre 8,2 et 9,7 °C. Ces résultats traduisent un réchauffement progressif des conditions hivernales par rapport à la période ancienne.

Ainsi, les hivers qui étaient généralement caractérisés par des températures fraîches ($m > 0$ °C), ils deviennent progressivement plus tempérés à partir des années 1990, avec des minima moyens dépassant fréquemment 3 °C.

1.5.2.2-Températures mensuelles maximales « M » :

Le **tableau 8** présente les valeurs des températures maximales moyennes mensuelles enregistrées dans la forêt de Hafir. Ces données permettent d'apprécier la dynamique des températures maximales.

Tableau 8 : Températures mensuelles maximales des 2 périodes de référence à Hafir

Années	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D	Moy
1925-34	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
1914-38	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
1975-91	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
1990-00	10	13,1	15,1	16,9	21,0	25,6	30,0	30,7	25,6	20,2	15,7	11,8	19,7

L'examen du tableau met en évidence une augmentation des températures maximales moyennes annuelles entre les deux périodes étudiées. En effet, celles-ci se situent entre 18 et 19 °C au cours de la période ancienne, alors qu'elles atteignent environ 21 °C durant la période récente. Les températures maximales moyennes les plus élevées sont observées en

août, mois le plus chaud de l'année, avec des valeurs avoisinant 31 °C. Par ailleurs, des épisodes de fortes chaleurs ont été enregistrés au cours de la période ancienne, les températures maximales extrêmes ayant atteint 39,2 °C le 18 juillet 1926, 38,0 °C le 11 août 1927 et 38,8 °C le 1er septembre 1928. Ces résultats traduisent l'existence de conditions estivales particulièrement chaudes dans la région étudiée.

1.5.2.3-Températures moyennes mensuelles et annuelles « T » :

Les valeurs des températures moyennes mensuelles et de la température moyenne annuelle mesurées dans la forêt de Hafir au cours des deux périodes de référence sont reportées dans le **tableau 9** ci-dessous.

Tableau 9 : Températures moyennes mensuelles et annuelles à Hafir

Années	J	F	M	A	MAI	J	JUI	AU	S	O	N	D	Moy.
1925-34	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
1913-38	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
1970-97	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
1990-14	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

Les données présentées révèlent une augmentation des températures moyennes annuelles entre les deux périodes étudiées. Alors que la première période affiche une moyenne de 13°C, la seconde enregistre des valeurs comprises entre 14 et 15°C. Cette évolution traduit un réchauffement thermique modéré de la région.

Par ailleurs, les conditions thermiques observées dans la forêt de Hafir demeurent compatibles avec les exigences écologiques du chêne-liège. Les moyennes des températures minimales du mois le plus froid restent supérieures à 0°C, tandis que les moyennes des températures maximales du mois le plus chaud se situent entre 18 et 22°C. Ces caractéristiques thermiques favorisent le développement de cette essence forestière et contribuent à son maintien dans la zone d'étude.

Ainsi, la prise en compte de l'ensemble des facteurs climatiques, qu'ils soient principaux ou secondaires, permet de mieux comprendre les conditions écologiques du milieu d'étude. Cette analyse globale est essentielle pour interpréter correctement l'état sanitaire des peuplements et introduire, par la suite, l'étude des interactions entre le climat et les autres composantes du milieu, notamment les facteurs édaphiques et hydriques.

Le schéma suivant résume l'influence des facteurs climatiques secondaires sur le chêne-liège (**Fig.33**).

1.5.3-Autres facteurs climatiques

Outre la température et les précipitations, plusieurs paramètres climatiques secondaires interviennent dans la croissance et le fonctionnement du chêne-liège. Parmi ceux-ci figurent notamment l'humidité relative de l'air, l'enneigement ainsi que le vent, qui peuvent influencer de manière significative les processus physiologiques et l'état sanitaire des peuplements forestiers.

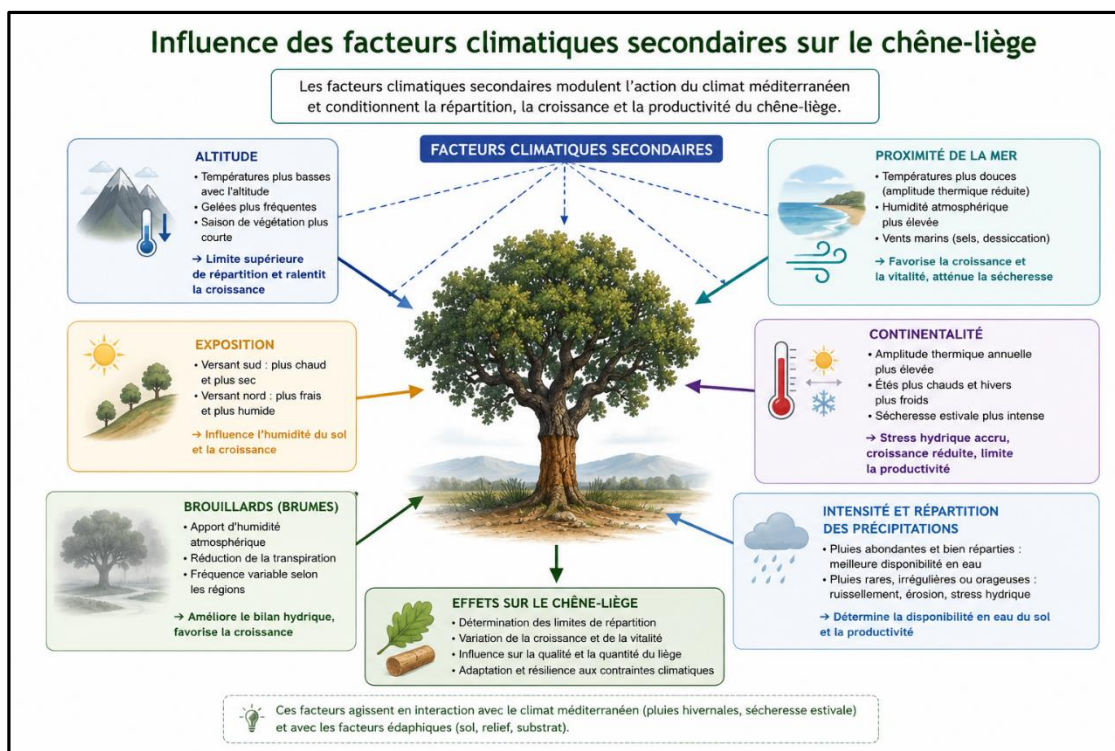


Figure 33- Influence des facteurs climatiques secondaires sur le chêne- liège (élaboration personnelle à partir de la littérature scientifique).

1.5.3-1-Humidité relative de l'air

L'humidité atmosphérique relative constitue un facteur écologique important pour le chêne-liège. En effet, elle contribue à atténuer les effets du déficit hydrique, notamment dans les régions où la pluviométrie annuelle est limitée ou lorsque les précipitations estivales sont insuffisantes. Selon **Yassad (2000)**, une humidité atmosphérique relativement élevée peut compenser, dans une certaine mesure, des précipitations annuelles faibles pouvant atteindre un seuil minimal d'environ 400 mm.

Les données présentées dans le tableau 10 concernent l'humidité relative de l'air durant l'ancienne période d'observation (**BSRF, 1937**). En revanche, les informations relatives à la période récente demeurent peu nombreuses et souvent incomplètes, ce qui limite les possibilités de comparaison temporelle.

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

Année	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Moy.
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

Éloignée d'environ 60 km de la mer, la forêt de Hafir est relativement moins soumise aux effets directs de l'influence maritime. Le relief montagneux constitue un obstacle naturel à leur propagation. Les résultats consignés dans le tableau révèlent une humidité relative moyenne annuelle relativement homogène. Celle-ci demeure élevée pendant la majeure partie de l'année, avec des valeurs variant de 65 à 80 %. Néanmoins, une baisse sensible est observée durant la saison estivale, période au cours de laquelle les taux moyens d'humidité se situent entre 50 et 60%.

1.5.3.2. Enneigement

Dans la région de Tlemcen, la neige apparaît généralement à partir d'une altitude d'environ 800 m. Historiquement, la forêt de Hafir connaissait des épisodes neigeux relativement importants, dont l'intensité et la fréquence variaient selon les années. Les premières chutes de neige étaient observées dès le mois de décembre, tandis que les épisodes les plus fréquents se produisaient durant les mois de janvier et février. Les chutes de neige devenaient ensuite plus occasionnelles en mars. Selon les données du **BSRF (1937)**, la période 1925-1934 a enregistré en moyenne 10 jours de neige par an. Durant cette même période, on dénombrait également 26 jours de gelée et 25 jours de gelée blanche, alors qu'aucun épisode de grêle n'a été signalé.

En l'absence de données récentes concernant l'enneigement, il est néanmoins possible de constater une nette diminution de ce phénomène au cours des dernières décennies. Les épisodes neigeux sont devenus de plus en plus rares dans la région de Hafir ; il se manifeste désormais que durant quelques jours par an, ce qui pourrait être associé aux changements climatiques observés à l'échelle régionale.

2-Milieu forestier

Les formations à chêne-liège occupaient historiquement une superficie estimée entre 3 500 et 4 000 hectares selon les auteurs (Lamey, 1893 ; Boudy, 1955 ; Thintoin, 1956 ; Sauvagnac, 1956 et Natividade, 1956). Elles sont réparties entre plusieurs cantons forestiers, parmi lesquels figurent notamment S'Rutou, Moutas, Tatsa, Tijdit, Oued Tlet, Oued Fernane et Koudiet Hafir.

L'évolution de ces peuplements a été influencée par endroit par la concurrence exercée par d'autres essences forestières. Dans les secteurs humides, le chêne zéen (*Quercus faginea subsp. tlemcensis*) tend à remplacer progressivement le chêne-liège grâce à sa capacité à former des peuplements denses. Cette substitution a néanmoins permis le maintien d'un couvert forestier limitant l'expansion du maquis. À l'inverse, dans les stations plus sèches, le chêne vert (*Quercus rotundifolia*), reconnu pour sa résistance aux contraintes écologiques et sa grande capacité d'adaptation, colonise fréquemment les anciennes subéraies (**Bouhraoua, 2003**).

Le sous-bois de la forêt de Hafir présente une richesse floristique remarquable. Certaines espèces témoignent de conditions écologiques relativement humides, tandis que d'autres sont

caractéristiques des formations de maquis souvent associées aux processus de dégradation des écosystèmes forestiers. Ce maquis demeure généralement peu dense dans les peuplements bien conservés, mais devient particulièrement abondant dans les zones affectées par les incendies (**Fig.34**).



Figure 34 : Vue générale d'un peuplement de chêne liège conservé (à gauche : Photo Bouhraoua, 2013) et peuplements embroussaillés post-feu (Photos Bouabdellah, 2019) à Hafir

Parmi les espèces végétales les plus fréquemment rencontrées figurent le lierre (*Hedera helix*), le chèvrefeuille (*Lonicera implexa*), la salsepareille (*Smilax aspera*), la ronce à feuilles d'orme (*Rubus ulmifolius*), le garou (*Daphne gnidium*), l'arbousier (*Arbutus unedo*), le petit houx (*Ruscus aculeatus*), la bruyère arborescente (*Erica arborea*), le romarin (*Rosmarinus officinalis*) ainsi que la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) (**Bouabdellah, 2019**).

Dans les secteurs les plus dégradés et soumis à des conditions plus chaudes et plus sèches, la végétation est dominée par des espèces secondaires mieux adaptées aux perturbations écologiques. On y rencontre notamment le chêne kermès (*Quercus coccifera*), le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*), différentes espèces de cistes (*Cistus ladanifer*, *Cistus salviifolius* et *Cistus monspeliensis*), le diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) ainsi que le palmier nain ou doum (*Chamaerops humilis*) (**Bouabdellah, 2019**).

3-Production subéricole

L'évolution de la production du liège dans la région oranaise peut être subdivisée en deux périodes distinctes. La première correspond à l'époque coloniale, durant laquelle l'ensemble de la production était destiné à l'exportation vers la France afin d'alimenter les industries de transformation du liège (**Chenel, 1951**). Au cours de cette période, les opérations de levée du liège étaient réalisées selon des rotations régulières, généralement de dix ans ou moins, tout en respectant des techniques d'exploitation rigoureuses (**Lamey, 1893 ; Saccardy, 1935**).

Les statistiques disponibles indiquent une production annuelle moyenne d'environ 1 500 quintaux entre 1898 et 1915, soit près de 1,7 % de la production nationale. Cette production a ensuite atteint près de 3 000 quintaux par an entre 1939 et 1951, représentant environ 1,3 % du total national. La majeure partie de cette production, estimée à près de 80 %, était constituée de liège marchand, chaque arbre produisant en moyenne 7 kg de liège sec (**Marc, 1916**).

Les niveaux de production enregistrés durant cette période étaient étroitement liés aux pratiques sylvicoles appliquées aux subéraies, notamment les travaux d'entretien et d'assainissement, le débroussaillage, la prévention des incendies ainsi que les opérations de reboisement visant à étendre les peuplements.

La seconde période, qui débute après l'indépendance, se caractérise au contraire par une régression importante de la production subéreuse. Les données statistiques couvrant la période 1962-2000 révèlent une production annuelle moyenne d'environ 500 quintaux seulement. Cette diminution significative traduit l'état de dégradation progressive des subéraies et les difficultés rencontrées dans leur gestion. Il convient également de souligner que les premières opérations de récolte du liège dans cette région n'ont repris qu'au début des années 1970, après plusieurs années d'interruption.

La production subéreuse de la wilaya de Tlemcen repose essentiellement sur les subéraies de la forêt de Hafir, qui constituent les peuplements de chêne-liège les plus étendus de la région. Historiquement, le liège de reproduction, réputé pour sa qualité supérieure, représentait une part importante de la production locale. Selon **Boudy (1955)**, ce type de liège correspondait à près de deux cinquièmes de la production totale, laquelle a atteint environ 20 000 quintaux durant la période comprise entre 1939 et 1951. À la même époque, le liège mâle contribuait à hauteur d'environ un tiers de la production globale, soit près de 6 300 quintaux (**Fig.35**).



Figure 35 : Evolution périodique de la production du liège à Hafir (Dehane ,2012)

Le liège marchand constituait néanmoins la principale catégorie exploitée, représentant près de 70 % du volume total récolté. Son extraction était effectuée de manière régulière et permettait d'obtenir un rendement moyen d'environ 792 quintaux par campagne, soit une production cumulée de 11 880 quintaux répartie sur quinze campagnes d'exploitation. Le

reste de la production était constitué de liège brûlé, récolté à la suite de plusieurs incendies survenus notamment en 1940, 1941, 1943, 1952 et 1956, ainsi que de liège de rebut. Ce dernier présentait une importance variable selon les campagnes, représentant entre 4 et 35 % de la récolte annuelle, avec une moyenne estimée à 207 quintaux (Bouhraoua, 2003).

Après l'indépendance, l'exploitation du liège a connu une longue interruption avant de reprendre en 1970. Les opérations de récolte se sont poursuivies jusqu'en 1996, date de la dernière campagne d'exploitation enregistrée, mais de manière irrégulière. Deux périodes d'activité plus soutenue peuvent être distinguées : de 1970 à 1974 et de 1982 à 1986. Par la suite, la production a progressivement diminué sous l'effet de plusieurs contraintes, notamment les aléas climatiques, les attaques d'insectes et d'autres facteurs de dégradation.

À partir de 1995, quelques opérations de récolte ont été relancées, mais elles sont restées limitées à de faibles superficies.

Pour l'ensemble de cette période post-indépendance, la production totale est estimée à environ 13 000 quintaux, correspondant à une moyenne annuelle de l'ordre de 1 180 quintaux (CfWT, 1996 et 2011).

Chapitre IV :

Matériel et Méthode

1-Problématique et principaux objectifs de l'étude :

Les écosystèmes forestiers méditerranéens figurent parmi les milieux les plus vulnérables aux changements climatiques. L'augmentation des températures moyennes et la diminution des précipitations observées au cours des dernières décennies ont contribué à l'intensification des épisodes de sécheresse et à la dégradation des conditions de croissance de nombreuses essences forestières (IPCC, 2023).

Pour le chêne-liège, plusieurs études ont montré que cette essence est particulièrement sensible aux stress hydriques prolongés, lesquels peuvent entraîner une diminution de la croissance radiale du bois et du liège. Un affaiblissement physiologique des arbres déclenche des phénomènes de dépérissement et de mortalité (Pereira, 2007 ; Camilo-Alves et al., 2013).

En Algérie, les subéraies ont connu au cours de ces dernières années une régression importante des facteurs climatiques caractérisée par l'installation d'un épisode de sécheresse persistante, expliquée par une élévation des températures extrêmes et une diminution des pluies. Cette situation a affecté la vitalité des peuplements de chêne-liège qui a influencé le processus de formation et de croissance normale du liège.

Face à cette situation, il devient nécessaire de mieux comprendre les relations entre les variations climatiques, la mortalité des arbres et la croissance du liège afin d'évaluer la vulnérabilité de la subéraie de Hafir aux changements climatiques et de contribuer à l'élaboration de stratégies de gestion durable.

La problématique de cette étude peut être formulée comme suit : *Dans quelle mesure cette période de sécheresse influence-elle la mortalité des arbres et la croissance du liège dans la forêt de Hafir ?*

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer donc l'impact des aléas climatiques récentes sur la mortalité des arbres et sur la croissance du liège dans la subéraie de Hafir. Il consiste à :

- Analyser l'évolution des paramètres climatiques de la zone d'étude ;
- Évaluer l'impact de la sécheresse récente sur l'état sanitaire des peuplements et l'importance de la mortalité observée ;
- Étudier le rythme des accroissements annuels du liège avant la mortalité des arbres ;
- Evaluer l'impact du l'aléas climatique récent sur la croissance du liège ;
- Mettre en évidence les relations entre les conditions climatiques actuelles, la mortalité des arbres, la formation et la production du liège.

1-Choix des sites d'étude :

1.1-Installation des sites d'étude

Notre travail d'étude a été mené dans quatre sites préalablement sélectionnés depuis 2024 dans la forêt de Hafir. Il s'agit d'un dispositif de 5 sites conçu pour assurer la surveillance et le suivi de l'état sanitaire des peuplements du chêne liège mais aussi l'évolution du phénomène de dépérissement et de mortalité suite à la récente sécheresse (Bouhraoua com. pers.).

Ce suivi à court et moyen termes permettra de décrire et caractériser l'impact du climat sur la santé des arbres et la formation du liège, les réponses adaptatives développées par les individus face au déficit hydrique et la dynamique et du phénomène de mortalité.

Ces sites ont été installés dans des secteurs où les symptômes de dépérissement et de mortalité du chêne-liège étaient particulièrement visibles. Les peuplements présentaient alors un paysage sinistré caractérisé par le dessèchement des branches, absences de feuillage, mortalité des arbres, ect. (**Fig.36**).

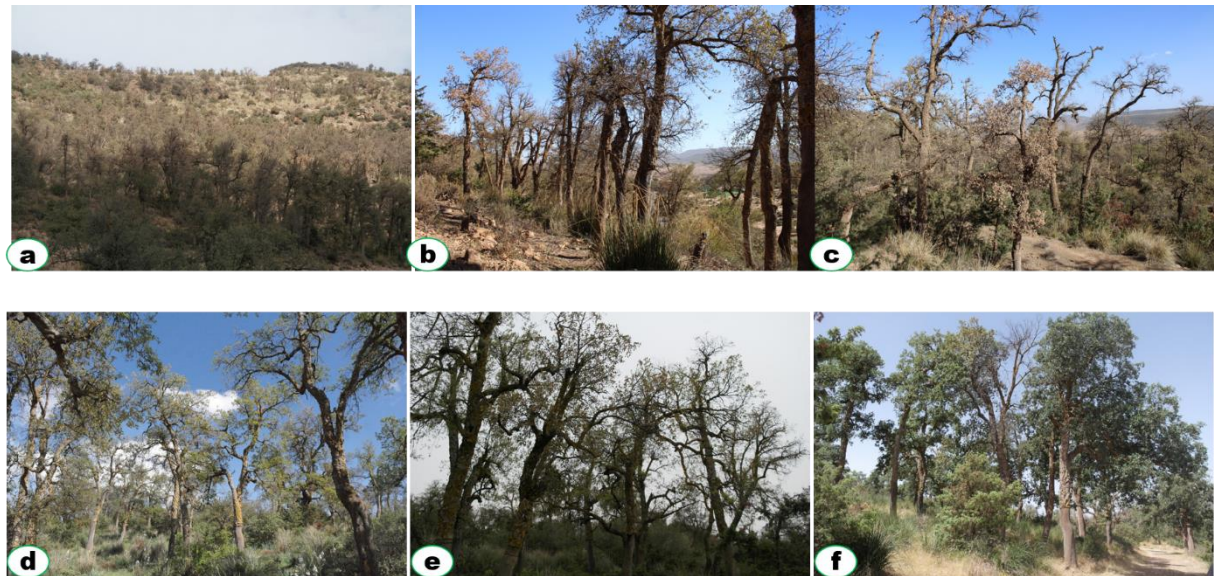


Figure 36- Etat sanitaire général du peuplement du chêne liège à Hafir en automne 2024 (a, b et c : Photos Allam, 2025), en automne 2025 (d et e : Photos Stambouli , 2026) et en Printemps 2026 (f : Photos Stambouli, 2026).

Pour notre étude, nous avons visité ces sites lors de la première sortie sur terrain effectuée le 18 février 2026.

1.2-Caractérisation des sites d'étude

La caractérisation des quatre sites d'étude constitue une étape essentielle pour la compréhension des facteurs susceptibles d'influencer la vitalité des peuplements de chêne-liège à Hafir et leur sensibilité aux contraintes environnementales. La description des caractéristiques physiques et forestières de ces sites permet d'interpréter l'importance des phénomènes de dépérissement et de mortalité observés et de mieux appréhender les relations entre les conditions du milieu et l'état sanitaire des arbres.

Dans ce cadre, plusieurs observations et relevés de terrain ont été réalisés lors de nos sorties sur terrain afin de caractériser ces sites sélectionnés. Ces relevés ont porté sur les principales caractéristiques du milieu, notamment la topographie, l'exposition, l'altitude, la structure du peuplement ainsi que l'état sanitaire général des arbres présents dans chaque site.

L'analyse de ces paramètres est particulièrement importante dans le contexte des changements climatiques, où les conditions stationnelles peuvent accentuer ou atténuer les effets du stress hydrique dus aux déficits pluviométriques aggravés par les températures élevées sur les peuplements forestiers. Les données recueillies constituent alors une base indispensable pour l'interprétation des résultats relatifs aux conditions écologiques et forestières défavorables dans lesquelles évoluaient les peuplements étudiés et à la dynamique de la mortalité des arbres et par conséquent la l'arrêt de croissance du liège. Enfin, ils permettent d'identifier les éventuels facteurs ayant favorisé l'affaiblissement puis le dépérissement et enfin la mortalité des arbres.

1.2.1- Relevés géographiques :

La localisation des sites d'étude a été déterminée à l'aide d'un GPS « marque Garmin 61 » lors des sorties de terrain réalisées dans la forêt de Hafir. Les coordonnées géographiques ont été relevées au centre de chaque site ; ils nous ont permis d'identifier précisément chaque site et de faciliter leur repérage au cours des différentes phases d'observation et de collecte des données. Le lieu-dit correspondant à chaque site a également été noté afin de compléter les informations relatives à leur localisation.

1.2.2-Relevés topographiques :

Les caractéristiques topographiques des sites ont été prises en considération en raison de leur influence sur les conditions écologiques du milieu et sur la croissance des peuplements forestiers. Les principaux paramètres relevés sont : l'altitude, la pente et l'exposition des sites.

L'altitude a été relevée à l'aide du GPS, tandis que la pente et l'exposition ont été déterminées directement sur le terrain à l'aide d'un clinomètre boussole. Ces paramètres permettent surtout de mieux comprendre les conditions d'ensoleillement, d'humidité du sol et de son disponibilité aux arbres.

1.2.3- Relevés forestiers

Les relevés forestiers ont pour objectif de décrire les principaux traits historiques du peuplement des sites étudiés. Ils reposent sur l'analyse de plusieurs paramètres relatifs à la structure du peuplement, à sa densité, à son état sanitaire ainsi qu'à l'importance du sous-bois et de la végétation associée. Ces informations sont indispensables pour comprendre le fonctionnement des stations et interpréter les résultats obtenus concernant la mortalité des arbres et l'impact des conditions climatiques sur les peuplements de chêne-liège.

1.2.3.1 – Densité du peuplement (Dp)

La densité constitue un paramètre fondamental dans la caractérisation de l'état structural d'un peuplement forestier. Elle permet d'apprécier, de manière indirecte, le niveau de compétition entre les individus pour les ressources essentielles du milieu, notamment l'eau, les éléments minéraux ainsi que la lumière (**Rondeux, 1999**). Ainsi, elle représente un indicateur pertinent de la dynamique interne du peuplement et de son degré de fermeture ou d'ouverture.

La densité est déterminée en rapportant le nombre total d'arbres recensés dans le site à la superficie correspondante, exprimée en hectares.

Sur la base des valeurs obtenues, les peuplements sont ensuite répartis en différentes classes de densité permettant de qualifier leur degré de fermeture :

- **Classe 5 : peuplement très dense** : $D_p > 400$ arbres/ha
- **Classe 4 : peuplement dense** : $300 \leq D_p < 400$ arbres/ha
- **Classe 3 : peuplement moyennement dense** : $200 \leq D_p < 300$ arbres/ha
- **Classe 2 : peuplement clair** : $100 \leq D_p < 200$ arbres/ha
- **Classe 1 : peuplement très clair** : $D_p \leq 100$ arbres/ha

1.2.3.2-Structure du peuplement

La structure du peuplement est un indicateur essentiel permettant de décrire la composition dimensionnelle des arbres au sein d'une station forestière. Elle est établie à partir de la répartition à l'hectare des individus selon différentes classes de diamètre mesuré sous écorce, ce qui permet d'apprécier le profil structural du peuplement ainsi que son stade de développement (IML, 2016).

Cette classification repose sur cinq catégories de bois définies selon le diamètre à hauteur de référence :

- **P : Perchis** : $7,5 < \varnothing < 17,5$ cm
- **PB : Petit bois** : $17,5 < \varnothing < 27,5$ cm
- **BM : Bois moyen** : $27,5 < \varnothing < 42,5$ cm
- **GB : Gros bois** : $42,5 < \varnothing < 62,5$ cm
- **TGB : Très gros bois** : $\varnothing > 62,5$ cm

Ainsi, l'analyse de cette répartition permet de mettre en évidence la structure dia métrique du peuplement et de mieux comprendre sa dynamique, notamment en termes de croissance, de maturation et de renouvellement des individus.

2- Choix des arbres :

2.1-Selection des arbres pour l'évaluation sanitaire

Au niveau de chaque site d'étude, les arbres ont été déjà sélectionnés en automne 2024 (lallam, 2025). À partir d'un premier arbre choisi dans chaque site, les autres sujets ont été sélectionnés selon la méthode du « proche en proche ou du « plus proche voisin » ». Cette technique est largement utilisée dans ces types d'étude (Bouhraoua, 2003 ; Nagggar, 2021 ; Tekkouk, 2022).

Cette méthode a permis de limiter les biais liés au choix des arbres et d'assurer une répartition homogène des observations au sein des sites. Les arbres retenus sont numérotés sur le terrain, ce qui a grandement facilité leur localisation lors des différents inventaires sanitaires, d'observations et de prélèvements.

2.1.1-Inventaire sanitaire des arbres : Saison végétative 2025

L'appréciation sanitaire repose sur une combinaison d'approches méthodologiques largement utilisées dans les études forestières, notamment les méthodes ARCHI et DEPEFEU ainsi que

les principes d'évaluation adoptés par le réseau européen de suivi de l'état des forêts (**DSF, 1991 ; CRPFC, 2014**).

La méthode ARCHI est fondée sur l'analyse architecturale du houppier et permet d'apprécier l'état physiologique de l'arbre à travers l'observation de sa structure, de sa ramification et de son développement. Cette approche fournit des informations sur la vitalité des individus sans pour autant identifier directement les causes du dépérissement, qu'elles soient d'origine biotique ou abiotique.

La méthode DEPEFEU repose quant à elle sur l'évaluation du déficit foliaire, considéré comme l'un des principaux indicateurs du dépérissement des arbres forestiers. Cette méthode consiste à estimer visuellement la réduction de la surface foliaire par rapport à un arbre de référence considéré comme sain et ne présentant aucun déficit foliaire.

2.1.1.1- Méthode d'examen sanitaire des arbres :

L'évaluation sanitaire a été réalisée à partir des observations visuelles effectuées depuis le sol sur chaque arbre-échantillon. Elle repose sur l'état du houppier surtout mais aussi du tronc.

Cette approche repose sur l'estimation du **déficit foliaire**.

En effet, cet indice sanitaire constitue l'un des indicateurs les plus utilisés pour l'évaluation du niveau de vitalité des arbres forestiers (**Landmann, 1988**). Il traduit une réduction de la quantité de feuillage présente dans le houppier par rapport à un arbre considéré comme sain et présentant un développement normal du feuillage.

2.1.1.2-Conduite et chronologie des observations

Le chêne-liège est une essence sempervirente dont le feuillage persiste tout au long de l'année ; cette caractéristique nous permet de réaliser les observations sanitaires durant la majeure partie de l'année à savoir du début-été jusqu'à la fin-hiver. En revanche, la période de printemps est défavorable à ces observations car elle coïncide avec le renouvellement foliaire où l'interprétation de certains symptômes peut être plus délicate.

Dans notre cas, les prélèvements sanitaires des cinq peuplements ont été effectués à partir du mois de février 2026. Cette campagne avait pour objectif d'établir un diagnostic sanitaire des arbres et des peuplements pour la saison végétative 2025.

Nous avons veillé au respect minutieux de la méthode d'estimation du déficit foliaire déjà effectué par **Lallam (2025)** pour la saison 2024. Ceci nous permet de suivre l'évolution de l'état de santé des arbres et la dynamique de mortalité.

Donc, le principal intérêt de cette méthode réside dans la possibilité de réaliser des observations répétées sur les mêmes individus sans provoquer de dommages, permettant ainsi d'assurer un suivi de leur évolution au cours du temps.

2.1.1.3-Estimation du déficit foliaire et classes sanitaire des arbres

La sénescence foliaire se caractérise par un dessèchement des feuilles encore attachées aux rameaux ou une absence totale des feuilles sur les rameaux (rameaux nus). Pour estimer ce déficit, nous avons divisé la couronne de chaque arbre en quatre secteurs homogènes ;

chacun étant évalué séparément avant le calcul du déficit foliaire global exprimé en pourcentage (**Fig.37**). Cette approche permet d'obtenir une appréciation relativement plus fiable sur l'état sanitaire du houppier et le niveau de dépérissement des arbres.

Les valeurs du déficit foliaire obtenues pour chaque arbre ont été regroupées en quatre classes sanitaires distinctes, établies sur la base des travaux de référence de la **D.S.F (1991)**, de **Nageleisen (2002)** et de **Bouhraoua (2003)**.

Cette classification permet d'identifier le statut sanitaire des arbres en fonction du niveau de perte foliaire et de distinguer différents degrés de dégradation physiologique (**Tab.11**).

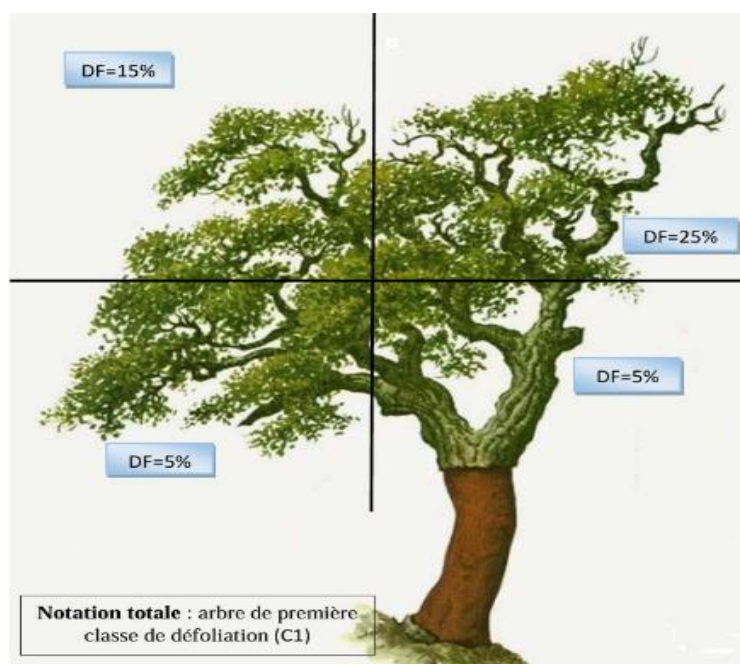


Figure 37: Protocole de notation de déficit foliaire d'un chêne liège (**Naggar, 2021**)

Tableau 11 : Classification du déficit foliaire (DF) et statut sanitaire.

Classe	Proportion de perte foliaire	Signification	Catégories sanitaires	Etat sanitaire
1	< 25 %	Faible perte foliaire	Arbre sain	Arbre vivant
2	30 – 60 %	Perte foliaire modérée	Arbre affaibli	
3	65 – 95 %	Forte perte foliaire	Arbre dépérissant	
4	Mort	Absence totale de feuillage/dessèchement complet	Arbre mort	Arbre Mort

Dans notre étude, nous sommes intéressés à la dynamique des arbres morts seulement dans la forêt de Hafir. Pour cela, nous avons regroupé les arbres en 2 lots ou états sanitaires :

1-Arbres vivants : ils comptent les arbres encore vivants sur pied, ils appartiennent aux trois premières classes (sain, affaibli et dépéris).

2-Arbres morts : ils comptent les arbres compétemment desséchés ou nus sur pied.

La dynamique de la mortalité des arbres a été analysée au cours de 2 saisons végétatives (2024 et 2025). En effet, les données sanitaires de la saison 2024 sont fournies par **Allam (2025)** pour 3 sites et complétées par **Bouhraoua (com. Pers.)** pour des 2 autres sites restants.

2.1.1.4-Autres paramètres sanitaires

D'autres paramètres complémentaires ont été pris en considération pour décrire l'aspect et l'architecture du houppier des arbres moment de leur mortalité lorsque celle-ci est récente. Ces indicateurs permettent de retracer encore mieux l'historique sanitaire des arbres et d'apporter des informations supplémentaires pour une meilleure appréciation de leur vigueur avant la mortalité.

Ces facteurs ont été notés en classes allant de 0 à 4 et exprimées en pourcentage, conformément à l'approche proposée par **Stafford et Bodson (2006)**. Ils sont inspirés de différentes méthodes d'évaluation sanitaire des peuplements forestiers, notamment celles développées pour le chêne-liège par le **DSF (1991) et le CRPF (2014)**.

Tableau 12: 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 (2 5%), 2 : moyenne(<50%) ,3 : forte (<75%) , 4 : très forte(>75%)
Transparence	TP	0 : nulle (0%), 1 : faible (<25%) , 2 :moyenne(25-50%) ,3 :forte (50-75%), 4 : très forte(>75%)
Rameau aux bourgeons/ Rameau nu	RB	0 : nul (0%) , 1 : faible (<25%) , 2 : moyen(25-50%), 3 : fort (50-75%) 4 : très fort(>75%)
Hors concurrence	HC	0 : nulle (0%) , 1 : faible (25%), 2 : moyenne (50%) , 3 : forte (75%) , 4 : très forte (>75%)
tronc	Tr	Sain (0%) ou altéré (crevasses ; <10% , <25% ou >25%
Rameaux feuillés	RF	0 : nul (0%) , 1 : faible (<25%) , 2 : moyen(25-50%), 3 : fort (50-75%) 4 : très fort(>75%)

2.2.-Selection et caractérisation des arbres morts

L'identification des arbres morts de chaque site vise à caractériser ces arbres au moment de la mortalité pour étudier l'impact de la sécheresse sur la santé des arbres et le peuplement par apparition du phénomène de mortalité et étudier le mécanisme et la vitesse de mortalité. Une partie de ces arbres ont été sélectionnés pour étudier l'impact de la dégradation sanitaire sur les accroissements annuels du liège.

Elle repose sur plusieurs critères visuels observés directement sur le terrain. Ces critères comprennent l'absence totale du feuillage des rameaux, le dessèchement complet du feuillage

de l'arbre, la densité du feuillage produit au dessèchement, la mortalité des branches et rameaux, la disparition des pousses et des rejets, ainsi que l'absence de tout signe d'activité végétative, ect. (**Fig. 38**).

Certains arbres présentaient également une altération avancée de leur structure selon l'ancienneté de la mortalité. Ils sont souvent caractérisés par une cime aux branches cassantes, un décollement partiel du liège du tronc, une frondaison totalement ou partiellement disparue. L'ensemble de ces symptômes nous ont permis d'identifier les arbres correspondants aux « **arbres morts –échantillons** » retenus pour l'étude de l'impact de la sécheresse sur la formation du liège.



Figure 38- Quelques exemples d'arbres morts à Hafir (**Photos originales, février 2026**)

L'échantillonnage a concerné un nombre total de 30 arbres déjà numérotés. Ils sont répartis entre 9 arbres dans le site 1, 1 arbre dans le site 2, 2 arbres dans le site 3, 4 arbres dans le site 4 et 14 arbres dans le site 5. Ces arbres ont été retenus pour étudier au niveau des cernes (largeurs des accroissements annuels du liège) leur réponse à la sécheresse avant leur mortalité.

2.2.1-Données arbres-échantillons

Chaque arbre a fait l'objet d'un examen détaillé portant sur l'état architectural de son houppier lors de la mortalité permettant de déterminer la date approximative de la mortalité, ses caractéristiques dendrométriques et d'exploitation ainsi que les symptômes visibles de dépérissement et de mortalité. Cette démarche a permis d'obtenir une description précise de ces arbres et de constituer une base de données fiable pour l'analyse des relations entre les conditions climatiques surtout et la mortalité observée dans la subéraie de Hafir.

2.2.1.1-Localisation géographique

La majorité des arbres-échantillons retenus pour étudier le rythme de croissance du liège avant leur mortalité ont été géo référenciés à l'aide du GPS GARMIN 64 à l'intérieur de leur site. Ces relevés nous permettront d'établir une carte de distribution des arbres dans la forêt.

2.2.1.2-Relevés dendrométriques :

Les arbres morts sélectionnés ont fait l'objet de mesures dendrométriques permettant de décrire leur développement et leur potentiel de croissance avant la mortalité. Ces paramètres sont couramment utilisés pour l'évaluation de la productivité des stations forestières et peuvent contribuer à l'estimation de leur fertilité (**Paulo et al., 2014**). Les principales variables mesurées sont la circonférence à 1,30 m du sol ainsi que la hauteur totale de l'arbre.

1- Circonférence sur écorce (C) :

La circonférence sur écorce ou externe correspond à la mesure du périmètre extérieur du tronc réalisé à la hauteur standardisée de 1,30 m au-dessus du sol (**Fig. 39a**).

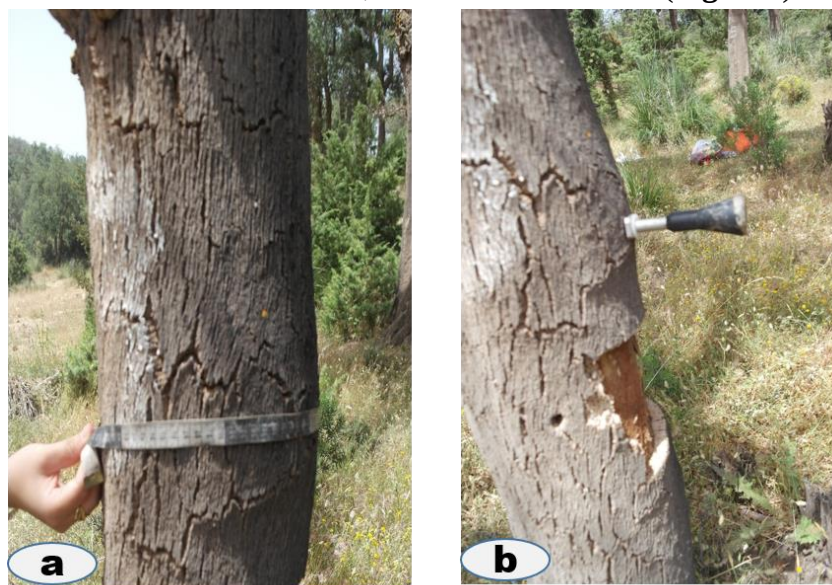


Figure 39- Méthode de relevé de la circonférence de l'arbre à 1.30m du sol (a) et l'épaisseur du liège (b) (Photos originales, Février, 2026)

Cette mesure est effectuée à l'aide d'un ruban mètre et constitue une donnée de base pour l'évaluation des caractéristiques dimensionnelles des arbres.

Or, chez le chêne-liège, la présence d'une couche de liège d'épaisseur variable nécessite une correction de la mesure externe afin d'obtenir les dimensions réelles du bois. La relation entre la circonférence mesurée sur liège et la circonférence sous liège peut être exprimée comme suit (**Saccardy, 1937**) : Circonférence sur liège = $C_{int} + (2\pi * E)$

où : **E** : épaisseur du liège (cm) ; C_{int} : Circonférence interne ou sous le liège ou du bois

À partir de cette relation, le diamètre du bois (**D**) est calculé selon la formule suivante :

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

Où **D** : diamètre du bois (cm) ; **Cext** : circonférence externe mesurée sur écorce à 1,30 m du sol (cm) et **E** : épaisseur du liège (cm).

La relation entre ces différentes variables est illustrée dans la **figure 40** suivante :

Les valeurs de diamètre obtenues ont été classées selon les catégories suivantes de bois ce qui facilite de déterminer approximativement le stade de développement ou l'âge de l'arbre au moment de la mortalité (**IML, 2016**) : Cette classification repose sur cinq catégories de bois définies selon le diamètre à hauteur de référence : Perchis : $7,5 < \varnothing < 17,5$ cm, Petit bois : $17,5 < \varnothing < 27,5$ cm, Bois moyen : $27,5 < \varnothing < 42,5$ cm, Gros bois : $42,5 < \varnothing < 62,5$ cm, Très gros bois : $\varnothing > 62,5$ cm

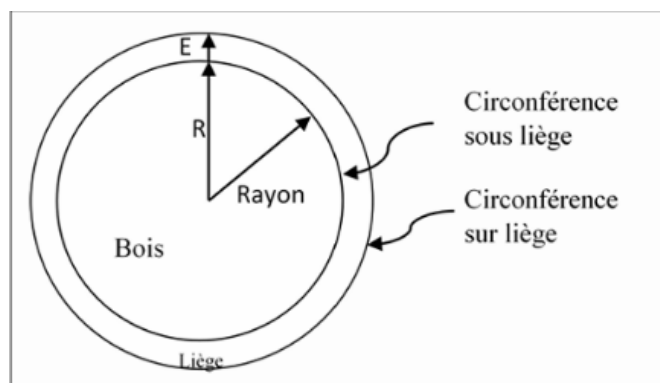


Figure 40: Circonférence sur liège et sous liège dans une section transversale d'une Tige.

2-Hauteur totale (Ht)

La hauteur totale représente la distance verticale comprise entre la base de l'arbre et son bourgeon terminal. Ce paramètre constitue un indicateur important de la croissance en hauteur et du développement des arbres au sein du peuplement (**Marchal et Rondeux, 1995**).

Au cours de notre étude, la hauteur totale a été mesurée sur chaque arbre-échantillon à l'aide du dendromètre Blume-Leiss. Les valeurs obtenues permettent d'apprécier les différences de croissance des arbres. et de caractériser la structure verticale des peuplements étudiés.

Afin de faciliter l'analyse, les hauteurs mesurées ont été regroupées en quatre classes :

Cl1 : $Ht < 5$ m ; Cl2 : $5 \text{ m} \leq Ht < 7$ m ; Cl3 : $7 \text{ m} \leq Ht < 10$ m ; Cl4 : $Ht \geq 10$ m.

La distribution des arbres selon ces classes de hauteur permet de décrire l'organisation verticale de ces arbres au sein du peuplement forestier.

Par ailleurs, la hauteur des arbres constitue un critère essentiel pour déterminer leur position sociale au sein du peuplement. En effet, les individus les plus développés bénéficient généralement d'un meilleur accès à la lumière et disposent d'un avantage compétitif par rapport aux arbres de dimensions plus réduites. Cette position influence directement leur croissance, leur vigueur et leur capacité à exploiter les ressources disponibles du milieu (**Boudru, 1989 ; Gaudin, 1997**).

3- Classes sociales (Dm)

La position sociale des arbres morts au sein du peuplement a été évaluée à partir de leur niveau de dominance dans le couvert forestier. Cette classification permet de distinguer les

individus selon leur accès à la lumière, leur développement et leur vigueur, fournissant ainsi des informations sur les relations de compétition existant entre les arbres.

Conformément à la classification adoptée par **Nagggar (2021)**, trois classes sociales ont été distinguées :

- **CL1 : Arbre dominant** : Il s'agit d'un arbre dont la cime atteint ou dépasse la partie supérieure du couvert forestier. Cet arbre bénéficie généralement d'un accès privilégié à la lumière et présentent une croissance vigoureuse ainsi qu'un houppier bien développé et relativement symétrique.
- **CL2 : Arbre Co dominant** : Cette catégorie regroupe les arbres dont la cime participe également à la formation de la canopée supérieure. Toutefois, leur houppier présente souvent un développement moins équilibré ou asymétrique, traduisant une situation de compétition plus marquée que celle observée chez les arbres dominants.
- **CL3 : Arbre dominé** : Les arbres dominés se caractérisent par une cime située en dessous du niveau principal du couvert forestier. Leur développement en hauteur est limité par la concurrence exercée par les arbres voisins, dont les branches ou les houppiers interceptent une grande partie de la lumière disponible.

L'étude de ces classes sociales permet de comprendre encore mieux la cause de la mortalité de l'arbre dans le peuplement car la position verticale de l'arbre permet d'évaluer l'intensité de la compétition entre les individus. Elle constitue donc un indicateur pertinent de l'arrêt de la croissance de l'arbre et de son évolution dans le peuplement forestier.

2.2.1.3- Relevés d'exploitation :

Les relevés d'exploitation concernent les paramètres directement liés à la dernière opération de récolte du liège réalisée sur les arbres étudiés. Ces mesures permettent d'évaluer les caractéristiques de l'exploitation précédente ainsi que d'apprécier certains aspects de la production subéreuse du chêne-liège.

Deux principaux paramètres ont été retenus :

- **L'épaisseur du liège (E, mm)**, qui constitue un indicateur important de la croissance subéreuse et de la productivité de l'arbre ;
- **La hauteur de démasclage ou hauteur d'écorçage (Hd, cm)**, correspondant à la hauteur maximale atteinte lors de la dernière opération de levée du liège.

L'analyse de ces paramètres, en plus de l'état du tronc, permet de mieux comprendre les variations des conditions d'exploitation dans lesquelles les arbres étudiés sont soumis. Ces données constituent également des facteurs susceptibles de prédisposer les arbres mal exploités surtout au dépérissement suite au déficit hydrique.

1. Épaisseur du liège :

L'épaisseur du liège correspond à la moyenne des mesures effectuées sur quatre directions du tronc à l'aide d'une jauge à écorce. Les mesures sont réalisées à une hauteur de 1,30 m du sol afin d'obtenir une valeur représentative de l'épaisseur du liège (**Massenet, 2010**) (**Fig. 38b**).

Les différentes épaisseurs du liège sont ensuite classées en cinq catégories permettant ainsi d'apprécier le niveau de croissance du liège selon son âge (**Lamey, 1893**) :

- **Liège flotte** : épaisseur inférieure à 22 mm ;
- **Liège mince** : épaisseur comprise entre 22 et 27 mm ;
- **Liège juste** : épaisseur comprise entre 27 et 32 mm ;
- **Liège régulier** : épaisseur comprise entre 32 et 40 mm ;
- **Liège épais** : épaisseur supérieure à 40 mm

2. Hauteur d'écorçage (He) et coefficient d'écorçage (Ce):

La hauteur d'écorçage correspond à la distance séparant le collet de l'arbre de la limite supérieure visible de la dernière levée de liège. Cette mesure est réalisée à l'aide d'un ruban métrique et permet d'évaluer l'intensité de l'exploitation appliquée à chaque arbre.

À partir de cette mesure, il est possible de calculer le coefficient d'écorçage (**Ce**), paramètre couramment utilisé pour apprécier le niveau d'exploitation du chêne-liège. Selon **Boudy (1950)** et **Natividade (1956)**, ce coefficient est déterminé par la relation suivante :

$$Ce = \frac{He}{C1.30}$$

Le coefficient d'écorçage varie en fonction de la vigueur des arbres et des conditions de végétation. D'après **Saccardy (1937)** et **Natividade (1956)**, les valeurs recommandées sont les suivantes :

- **Ce = 1,5** pour les arbres à végétation médiocre ;
- **Ce = 2,0** pour les arbres à végétation moyenne ou normale ;
- **Ce = 2,5** pour les arbres vigoureux et bien développés.

Par ailleurs, les dates de la dernière exploitation du liège pour les sites d'étude ont été obtenues à partir des archives forestières et des documents cartographiques disponibles auprès des services forestiers de la wilaya de Tlemcen. Ces informations ont permis de déterminer l'âge du liège au moment des mesures et de calculer la vitesse moyenne des accroissements annuels, paramètre essentiel pour l'évaluation de la croissance subéreuse et l'analyse de l'influence des facteurs environnementaux sur la production du liège.

2.2.1.4-Etat des troncs

L'état sanitaire du tronc nous renseigne souvent sur la cause finale de dépérissement et de mortalité des arbres. Ceci a été réalisé par un examen visuel systématique de chaque arbre mort-échantillon le long de la partie exploitée. Cette analyse s'est appuyée sur certains descripteurs sanitaires importants déjà utilisés dans des études sanitaires du chêne-liège

(Bouhraoua, 2003 ; Tekkouk et Bouhraoua, 2022 ; Iallam, 2025). La majorité de ces paramètres ont été enregistrées sous forme de données qualitatives seulement.

Les observations ont été portées principalement sur : 1) l'état de surface du tronc, 2) les altérations de l'écorce avec présence de la croûte charbonneuse de la mère, 3) les crevasses du bois, 4) les tous de xylophages et 5) les attaques de *Platypus cylindrus* (Fig.41).

Une attention particulière a été accordée à la détection de ce dernier xylophage au niveau du collet. Il est considéré comme le responsable majeur de la mortalité du chêne liège (Marques et al., 2025)

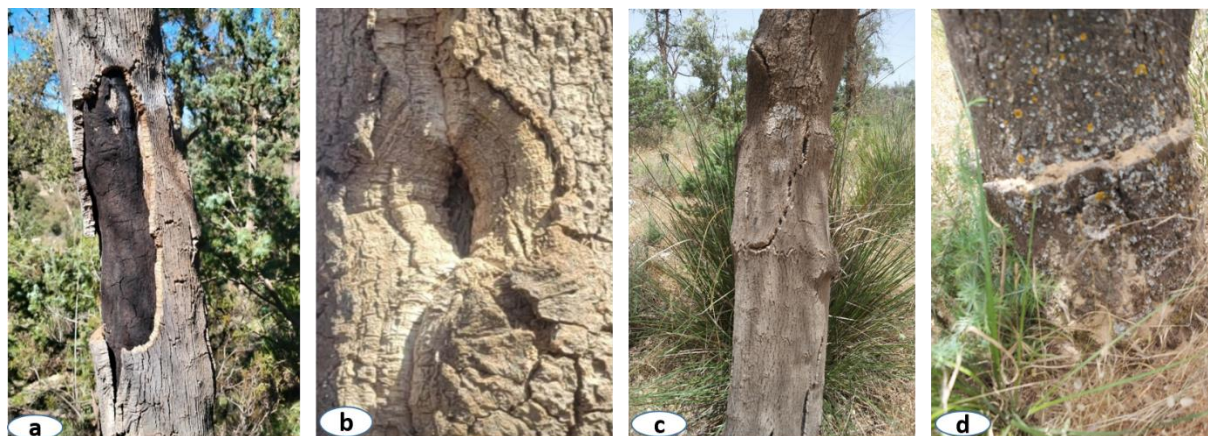


Figure 41: Etat des troncs des arbres morts (a : croûte charbonneuse), (b : crevasse du tronc), (c : éclatement de l'écorce) et (d : attaque de platype) (Photos originales, février 2026).

2.2.3-Détermination des dates de mortalité

La détermination de la date exacte de la mortalité des arbres est primordiale dans cette étude. Elle permet de corréliser la date de la mortalité des arbres et l'arrêt de la croissance de ces arbres. La collecte de ces données repose sur le recours aux méthodes suivantes :

-La mortalité de 2025 : elle est signalée dans notre inventaire sanitaire effectué en hiver 2026 (saison végétative 2025) et identifiée par rapport à l'inventaire de l'hiver 2025 (saison végétative 2024). Dans ce relevé, l'arbre en question était noté vivant en 2024 et appartenant à l'une des 3 premières classes de santé (Tab. 11). Il se caractérise extérieurement par un dessèchement complet du feuillage formé au cours de l'année. Ce feuillage présente une coloration marron claire au contraste jaunâtre conservant un peu d'humidité au toucher.

Mais selon la densité du feuillage, nous avons noté facilement l'état de santé de l'arbre au moment du déclin (Fig.42c).

Nous considérons ici la mortalité comme un « *dépérissement aigu* » lorsqu'elle survient d'une façon anormale en affectant les arbres sains (DF₁) ou affaiblis (DF₂). Par contre, elle est naturelle lorsqu'elle touche les arbres en classe 3 (DF₃). On parle dans ces conditions de « *dépérissement chronique* » (Tab.11).

-La mortalité de 2024- elle est fournie à partir des relevés sanitaires effectués en automne 2024 par **Bouhraoua (com. Pers.)**. Les arbres en question présentent les mêmes caractéristiques du feuillage desséché.

-La mortalité 2022-2023 : Ces arbres ont perdu au cours du temps beaucoup de leur feuillage desséché. Le feuillage encore conservé prend souvent une coloration marronne plus foncée à aspect plus sec (**Fig.42b**).

-La mortalité avant 2022-2023 : La majorité de ces arbres sont complètement nus sans aucun feuillage desséché observé sur le houppier. Il s'agit d'une mortalité ancienne (**Fig.42a**).

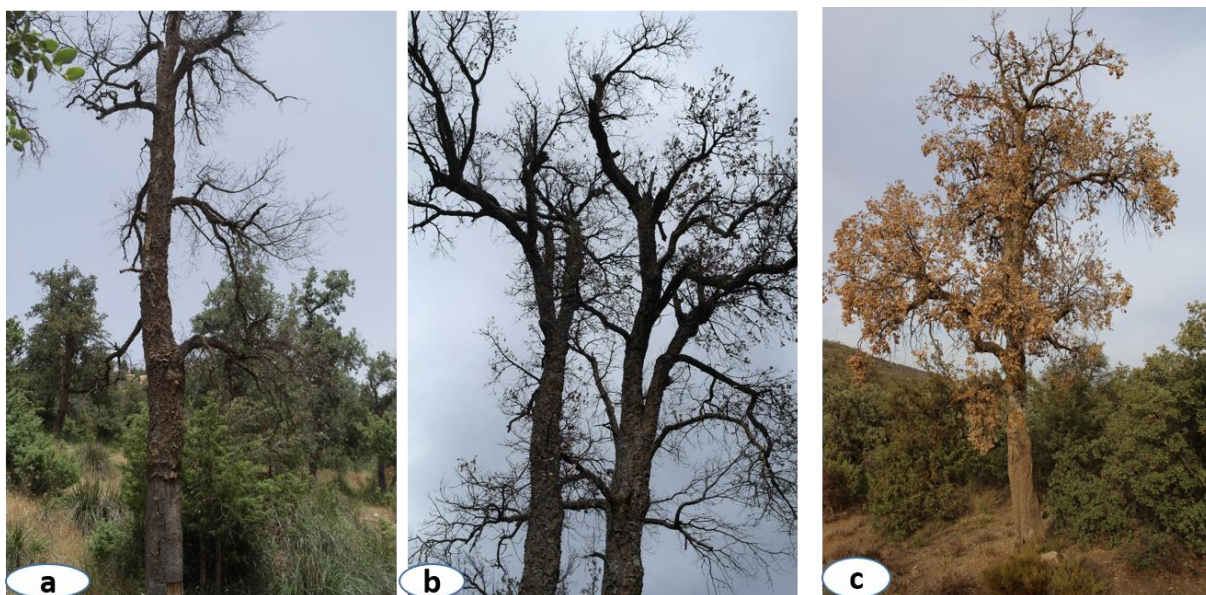


Figure 42- Exemples de l'ancienneté de la mortalité des arbre (a : mortalité ancienne survenue avant 2022), (b : mortalité survenue entre 2022 et 2023) et (c : mortalité récente de classe sanitaire 1) (Photos Bouhraoua).

2.3- Étude de l'impact de la sécheresse sur la formation du liège

Dans le cadre de la présente étude, l'analyse des arbres morts est principalement orientée vers la connaissance du rythme des accroissements annuels du liège depuis sa dernière récolte mais surtout durant la période de sécheresse (2020-2025). Cependant, le rythme de la croissance du liège juste avant la mortalité de l'arbre. Cette étude vise à mettre en évidence les relations entre l'état sanitaire des arbres, les conditions climatiques régionales dans la forêt de Hafir et la croissance du liège.

2.3.1-Prélèvement des plaques de liège

Il consiste à extraire de chaque arbre mort– échantillon une plaque de liège à hauteur de 1,30 m avec des dimensions variables de 10-20 x10-20 cm (**Ferreira et al., 2000 ; Dehane, 2012, Naggar et al. 2019**). Les calas ont été prélevés en hiver (février 2026) dans la même orientation nord lors de la récolte du liège (**Caritat et al., 2000**).

Pour extraire les plaques du liège, deux incisions horizontales parallèles ont été effectuées profondément dans le tronc (soit jusqu'au bois) à l'aide d'une scie à dent. Une autre incision verticale a été effectuée au moyen d'un ciseau à bois. A l'aide de ce dernier instrument pénétré profondément en utilisant un marteau, la plaque du liège commence à se détacher difficilement de la surface du bois avec souvent le phellogène ou la mère (**Fig.43**). Ceci est tout à fait normal car l'arbre est mort, la montée de la sève est arrêtée et les vaisseaux du bois sont complètement desséchés ; contrairement à la récolte réglementée du liège d'arbres vigoureux coïncidant avec la remontée de sève.



Figure 43- Méthode d'extraction du liège d'un arbre mort (Photos originales, 26 février 2026)

2.3.2- Préparation des échantillons aux observations des cernes annuels du liège

2.3.2.1-Protocol expérimental

Au total, 30 échantillons de liège ont été prélevés de 30 arbres morts. Sur chaque plaque nous avons noté sur terrain le numéro du site et le numéro de l'arbre. Ces échantillons ont été transportés au laboratoire afin de subir différentes opérations de préparation et de mesure (**Fig. 44 a**).

Dans un premier temps, les échantillons ont été triés et nettoyés afin d'éliminer les impuretés présentes au niveau du ventre de la plaque. Il s'agit souvent du phellogène qui s'est détaché avec le liège parfois sur d'ensemble de la surface de la plaque. Il est éliminé au maximum à l'aide d'un ciseau à bois



Figure 44- Echantillons du liège avant préparation (a) et bandes de liège coupées pour observation et mesures des cernes (Photos originales, avril 2026)

Par la suite, les échantillons ont été immergés dans une grande marmite à soupe contenant de l'eau bouillante pendant 60mn à une température d'environ 100°C suivant la pratique industrielle de préparation du liège (**Ferreira et al., 2000**). Cette opération de bouillage permet le nettoyage et la désinfection du liège tout en favorisant son expansion linéaire et volumétrique de 10 à 30% (**Dehane, 2012**).

Les échantillons ont été par la suite séchés à l'air libre et exposés au soleil pendant une période de stabilisation d'environ 10 jours.

Une fois séchés, le ventre des échantillons a été nettoyé une seconde fois du phellogène encore présent à l'aide d'un ciseau à bois.

De chaque échantillon du liège, une bande de 4 cm de largeur a été découpée à l'aide d'une découpeuse électrique). L'ensemble des échantillons découpés ont des dimensions variables (15 x 4 cm à 20 x 4 cm) (**Fig.44b**). Ils ont subi par la suite une opération soigneuse de ponçage à l'aide d'une ponceuse équipée de papier abrasif. Le ponçage a été réalisé sur une face afin d'éliminer les irrégularités de surface et d'obtenir une surface lisse Cette opération a permis d'obtenir des sections transversales plus nettes et rendre les cernes plus visibles aux observations et aux mesures (**Ferreira et al., 2000, Pereira, 2011**). Pour améliorer cette netteté, nous avons nettoyé la surface poncée des résidus de poussière générés lors de l'abrasion par l'huile de lin ou le cirage chaussure blanc.

Cette étape est indispensable pour mettre en évidence les limites des cernes annuels et améliorer la visibilité des différentes couches de croissance du liège sous la loupe binoculaire.

2.3.2.2-Autres mesures sur plaques du liège

Avant de passer à l'étape de mesure des cernes, l'ensemble des échantillons ont fait l'objet de deux mesures :

1-Epaisseur du liège :

L'épaisseur totale du liège de chaque bande découpée a été mesurée à l'aide d'un pied à coulisse électronique (**Fig.45 a, b et c**). Cette mesure d'épaisseur permet de caractériser avec plus de précision la croissance subéreuse des arbres étudiés. Les valeurs obtenues (la moyenne de trois mesures) ont permis de comparer les variations de mesures avec celles prises sur pied à l'aide de la jauge à écorce. Les données recueillies ont ensuite été exploitées au mieux pour analyser les relations entre la croissance du liège, l'état sanitaire des arbres et les conditions climatiques ayant affecté la forêt de Hafir.

2-Humidité du liège

L'humidité des plaques de liège séchées à l'air a été mesurée sur deux faces à l'aide d'un détecteur d'humidité de bois et autres matériaux (**Fig.45d**). Elle doit être de l'ordre de 7 % selon **Ferreira et al. (2000)**.

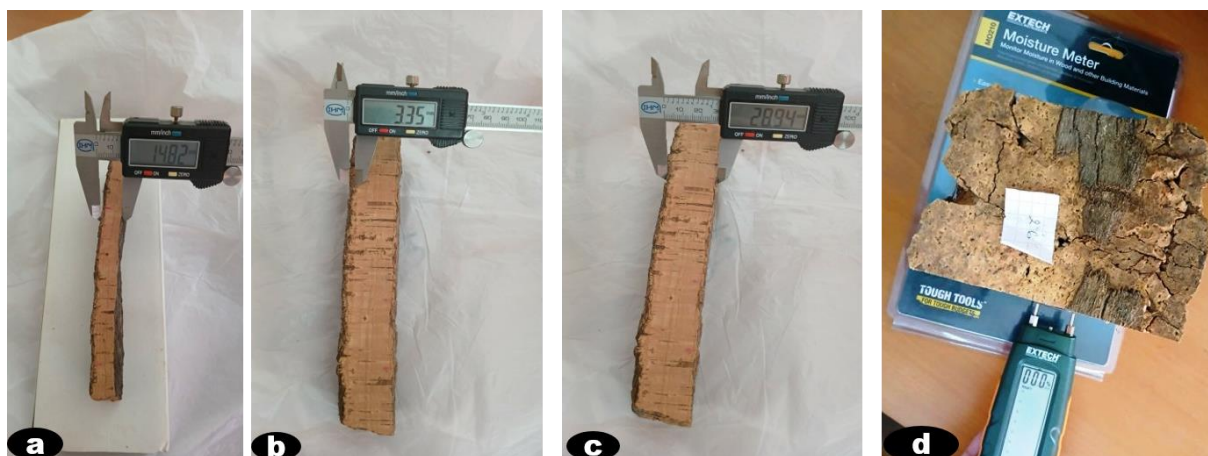


Figure 45- Mesures de l'épaisseur du liège d'une bande découpée à l'aide d'un pied à coulisse (a, b, c) et mesure d'humidité du liège à l'aide d'un mesureur d'humidité (d) (Photos originales)

2.3.3- Mesure des accroissements annuels du liège

Les mesures des accroissements annuels ont été réalisées sur les sections transversales des échantillons. Pour chaque échantillon, trois points de mesure espacés régulièrement ont été matérialisés à l'aide d'un stylo ou d'une épingle entomologique fine afin de couvrir toute la surface de la section (**Fig. 46**).



Figure 46- Exemples de bandes de liège montrant les endroits de mesures marqués au stylo rouge (Photos originales)

La largeur des cernes annuels a été mesurée à l'aide du système LINTAB 6 couplé au logiciel TSAP-Win. L'échantillon est placé sur un chariot mobile qui défile sous la loupe binoculaire, permettant ainsi d'identifier les limites de chaque cerne et mesurer sa largeur avec une précision de 1/1000 mm (**Fig. 47a, b**). Les données sont enregistrées automatiquement par le logiciel TSAP-Win. Pour chaque cerne, trois mesures ont été effectuées au niveau des 3 points distinctes préalablement situés et la valeur retenue correspond à la moyenne des 2 à 3 mesures les plus proches.

Enfin, les cernes annuels ainsi mesurés de chaque échantillon ont été photographiées à l'aide d'un stéréoscope binoculaire relié à un appareil photo et un écran (**Fig.47 c**). La représentation graphique de ces photos illustre le détail des largeurs mesurées.



Figure 47- Instruments de mesures des cernes Lintab 6 (a et b) et stéréo microscope binoculaire pour prise de photos des cernes (Photos originales)

3- Caractérisation de la période de sécheresse : 2019-2025

Pour décrire l'aléa climatique qui a touché la zone d'étude ces dernières années et son influence sur l'état sanitaire de la subéraie de Hafir et par conséquent sur la croissance et production du liège, nous avons pris la période allant entre 2019 et 2025. Pour cela, nous avons analysé deux paramètres climatiques essentiels à savoir les précipitations mensuelles et les températures mensuelles minimales, moyennes et maximales.

En absence de station forestière de référence pouvant fournir des valeurs plus fiables, nous nous sommes orientés vers les données climatiques provenant de la station météorologique automatique de Mansourah (Lieu : INRF). Elles sont complétées par d'autres données pluviométriques fournies par un pluviomètre installé dans ce site. Les caractéristiques géographiques de cette station se résument comme suit :

Latitude : 34°54'00'' N , Longitude : 1°18'00'' W , Altitude : 872m.

Il convient de signaler que le recours aux données fournies par différentes plateformes internet méritent d'être validées par des données fournies par des stations terrestres. Selon Bouhraoua (Com. Pers.), les données pluviométriques fournies par les sites internet sont à prendre avec précautions.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

1-Caractérisation des sites d'étude

1.1-Caractérisation physique

1.1.1-Paramètres géographiques et topographiques

Les principales caractéristiques géographiques et topographiques de quatre sites d'étude sont résumées dans le **tableau 13**. La **figure 48** illustre l'emplacement de ces sites dans Google Mapp.

Tableau 13 : Principale caractéristiques géographiques et topographique des 4 sites d'étude

Site	Cordonnées GPS	Pente (%)	Altitude (m)	Expo	Canton
S1	N 34°46'30,1"- W 01°25'59,4"	3	1292	Nord	Oued Fernene
S3	N 34°46'42,1"-W 01°25'50,4"	10	1263	Sud-Ouest	Oued Fernene
S4	N34°46'46,6'' – W 001°25'38,8''	8	1236	Sud-Est	Oued Fernene
S5	N34°46'45,7'' – W 001°25'41,1''	15	1259	Sud-Est	Oued Fernene

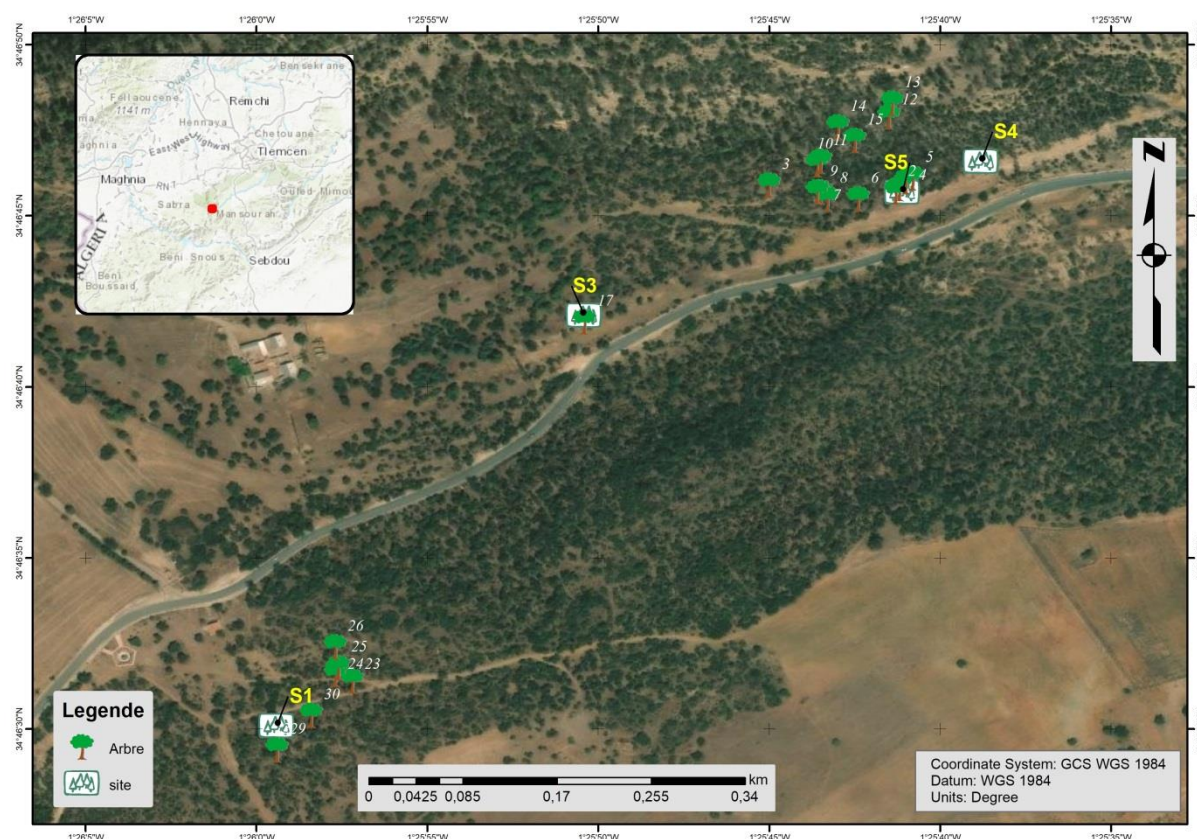


Figure 48- Localisation géographique des quatre sites d'étude dans la forêt domaniale de Hafir sur Google Mapp

Les résultats des relevés géographiques et topographiques montrent que tous les sites sont localisés dans le canton Oued Fernane (canton à chêne liège par excellence) à une altitude peu variable comprise entre 1236 m (S4) et 1292m (S1). Le terrain est de faible pente (S1) à pente moyenne (S3-S4) à forte (S5). Celles-ci favorisent l'accumulation de matière organique, créant un substrat profond et riche. Le premier site est localisé à mi- versant

exposée au nord plus frais tandis que le reste des sites se trouve au bas versant exposés au sud-ouest à sud-est généralement plus chauds (Masson, 2005).

1.1.2-Caractérisation climatique : Période de sécheresse de 2019-2025

1.1.2.1-Précipitations

Les valeurs pluviométriques enregistrées par la station de Mansourah pendant la période 2019-2025 nous ont permis d'apprécier l'intensité du déficit pluviométrique qui a touché notre zone d'étude en particulier récemment (Fig.49).

La lecture de la figure met en évidence une irrégularité interannuelle assez contrastée des pluies. En effet, la moyenne des 7 années s'établit à 334 mm. Cette hauteur est beaucoup inférieure à la moyenne de la station proche de Mefrouche (période récente : 644 mm, tab.4). Ceci représente une réduction de près de la moitié (soit 48%). Ce déficit est plus accentué par rapport à la période ancienne de l'ordre de 56% (750mm, tab.4). L'année 2022 est relativement plus arrosée enregistrant une pluviométrie de l'ordre de 467 mm. Par contre, les années 2021 et 2023 et surtout 2024 marquent des seuils critiques inférieurs à 300mm. Mais l'année 2024 avec une hauteur de 199 mm reste la plus catastrophique. Cette analyse illustre une récurrence marquée des déficits pluviométriques continues durant les 7 dernières années. Ils sont d'intensités variables mais défavorables pour le chêne liège (Natividade, 1956 ; Boudy, 1956 ; Yassad, 2000). Cette situation contribue par conséquent aux bilans hydriques négatifs des sols dans la région.

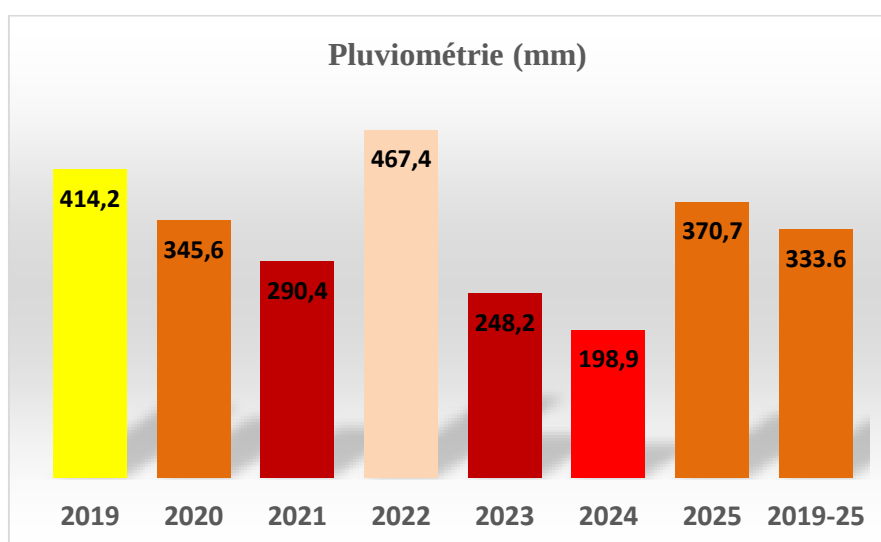


Figure 49: Évolution de la pluviométrie annuelle et moyenne interannuelle (2019-2025) à la station de Mansourah

Les valeurs des pluies enregistrent un coefficient de variabilité relativement élevé de 28%. D'un point de vue éco-physiologique, la récurrence des déficits pluviométriques supérieurs à

50%, bien visible à travers la succession d'années déficitaires dans la figure, entraîne un épuisement progressif des réserves en eau du sol. Ce stress hydrique pluriannuel, exacerbé par le choc climatique de l'année 2024, affaiblit profondément la santé de l'arbre.

Le tableau 14 consigne les précipitations moyennes mensuelles par rapport à la station de Mefrouche pour comparaison.

Tableau14 : Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) durant la période : 2019-2025

Année	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
2019-25	47,33	30,27	62,61	56,43	24,07	9,41	1,66	3,09	14,06	10,91	31,96	41,83
1982-00	76,70	61,10	57,00	42,40	40,70	13,90	3,10	4,60	26,50	39,70	77,00	66,60
déficit	-29,37	-30,83	5,61	14,03	-16,63	-4,49	-1,44	-1,51	-12,44	-28,79	-45,04	-24,77
%	-38,29	-50,46	9,85	33,09	-40,86	-32,27	-46,54	-32,92	-46,95	-72,51	-58,50	-37,19

D'après ce tableau, nous constatons que tous les mois de l'année ont enregistré un déficit pluviométrique. Ce déficit oscille entre 40 et 72% sauf les 2 mois de mars et avril qui ont enregistré respectivement une stabilité voire une amélioration. Cette analyse des précipitations mensuelles révèle donc un glissement précoce des pluies printanières et une sécheresse automno-hivernale sévère. Ceci influe négativement sur l'apport hivernal des sols en eau.

L'année 2025 présente une amélioration relative des conditions pluviométriques par rapport aux deux années précédentes avec un cumul annuel de 371 mm. Toutefois, malgré cette augmentation, plusieurs mois demeurent marqués par une faible pluviométrie, traduisant le maintien de conditions susceptibles de provoquer un stress hydrique chez les arbres.

Le régime saisonnier des pluies durant cette période de sécheresse est de type P.H.A.É. ; il est caractérisé par une concentration des pluies en printemps (**Tab.15**). Cette saison conserve son hauteur de pluies par rapport à d'autres saisons qui ont connu un déficit pluviométrique important variant entre 60% en automne et 42% en Hiver. Nous assistons à un changement de régime qui était à l'origine de type HP AE.

Tableau 15 : Répartition saisonnière moyenne des précipitations et détermination du régime pluviométrique (2019-2025)

	A	H	P	E
2019-2025	56,93	119,43	143,11	14,16
1982-20	143,20	204,40	140,10	21,60
Déficit %	60,25	41,57	-2,15	34,46

1.1.2.2- Températures

Les fluctuations mensuelles des températures minimales (m°C), maximales (M°C) et moyennes (T°C) enregistrées pour la période 2019-2025 sont présentées dans la figure 50.

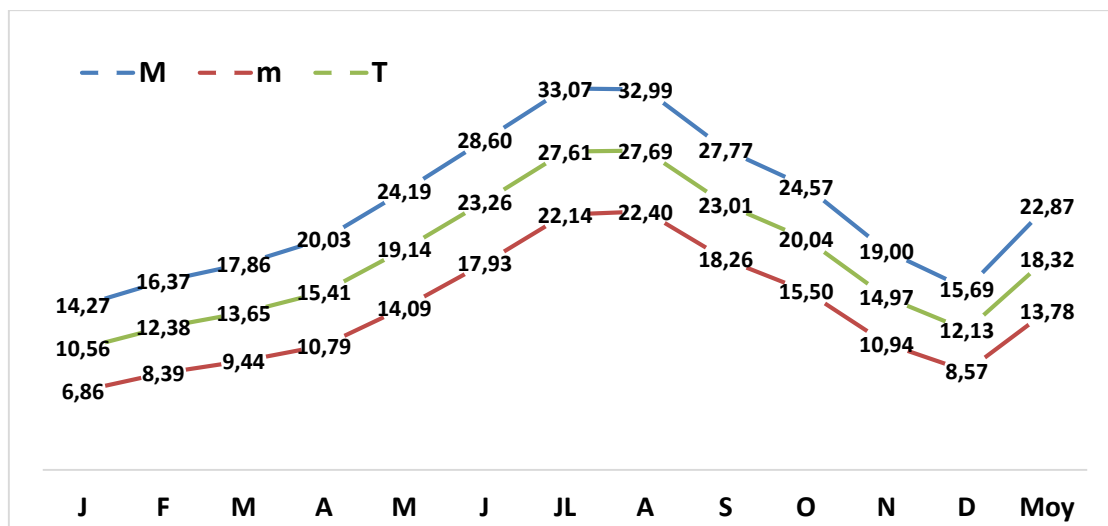


Figure 50 : Courbes des températures mensuelles moyenne minimale (m°C), maximale (M°C) et moyenne (T°C) enregistrées à Mansourah entre 2019et 2025

La lecture de cette figure met en évidence l'existence d'une période estivale tempérée à chaud et prolongée. Elle est matérialisée par le croisement des courbes où les précipitations s'effondrent sous le double des températures. Le déficit hydrique culmine en juillet et août, mois durant lesquels les pluies atteignent leur minimum absolu (2-3mm) tandis que les températures maximales moyennes atteignent leur paroxysme à **33°C**. En plus, durant chacun de ces deux mois, nous avons noté près de 17 jours chauds à très chauds ($32^{\circ}\text{C} < M < 36^{\circ}\text{C}$).

À l'inverse, la période hivernale affiche les valeurs les plus basses. Le minimum thermique est enregistré en janvier avec une valeur moyenne de 6.9°C . La valeur minimale moyenne saisonnière de 7°C (décembre-février) affiche un hiver tempéré.

En comparaison avec la période récente, l'analyse met en évidence une nette augmentation des températures. En effet, le mois le plus froid qui reste toujours enregistré en janvier, voit sa valeur augmentée en passant de 3.5°C (tab.7) à 6.9°C soit une différence de 3.4°C . Une partie de cette valeur peut être expliquée par la différence altitudinale (300m) entre la station de Mefrouche (1100m) et celle de Mansourah (872m). Dans ce cadre, **Seltzer (1948)** a noté que la température minimale diminue de $0,4^{\circ}\text{C}$ pour 100m de dénivèlement dans l'Atlas Tellien oranais. Après la correction thermique, la température minimale de l'hiver a connu une élévation de 2.2°C ce qui est important. A l'échelle annuelle, les températures minimales moyennes enregistrent durant cette période une augmentation de 2.8°C après les corrections thermiques en passant de 8.9°C (1975-2000 : tab.7) à 11.7°C .

Pour la température maximale du mois le plus chaud, la valeur reste relativement stable de l'ordre de 0.3° après les corrections thermiques où la température maximale diminue de 0.7°C tous les 100m selon **Seltzer (1948)**. Cette température a passé de 33.07°C à 30.7°C . Annuellement, la valeur enregistrée dans la période récente (1975-2000 : 20.5°C) est presque la même durant cette période de 20.8° (22.9°C).

Pour la température moyenne annuelle, les valeurs oscillent entre 15.5°C (1970-2014 : Tab.9) et 20.5°C durant ces dernières années. Ceci marque une augmentation des températures mais qui restent toujours favorables au chêne liège (Yassad, 2000).

La lecture de cette analyse climatique met en évidence un régime thermique saisonnier typiquement méditerranéen, caractérisé par une forte amplitude thermique et une saison chaude bien marquée. Une augmentation des températures et une diminution des pluies restent les traits marquants négatifs pour le chêne liège en particulier.

1.2-Caractérisation forestière

L'ensemble des résultats de mesures des deux paramètres forestier sont résumés dans le **tableau 16**. La **figure 51** donne un aperçu général sur la structure des peuplements et l'état sanitaire en automne 2024.

Tableau 16- Caractéristiques forestières des quatre peuplements de chêne liège

Variables	1	3	4	5
Effectif arbres	64	30	34	65
Densité du peuplement (tiges .ha ⁻¹)	200	310	220	350
Type de peuplement	Clair	Moyennement clair	Clair	Moyennement clair
Structure du peuplement	Subéraie mature au bois moyen	Subéraie jeune au Petit Bois	Subéraie mature au bois moyen	Subéraie mature au bois moyen

Les résultats de calcul de la densité du peuplement, montrent que les sites 1 et 4 présentent un peuplement clair avec une structure à dominance en bois moyen. Par contre, les sites 3 et 5 montrent un peuplement moyennement dense à structure dominante en petit bois (site 3) et bois moyen (site 5). Tous ces sites reflètent une futaie mûre en pleine phase de croissance et de production.



Figure 51- Aperçu général sur la structure des peuplements et l'état sanitaire en automne 2024 des 4 sites d'étude (Photos Bouhraoua, octobre 2024)

2- Caractérisation des arbres

2.1- Caractéristiques sanitaires

Les résultats d'inventaire sanitaire de la saison végétative 2025 des arbres des 4 sites, réalisé en hiver 2026 sont présentés dans la **figure 52**.

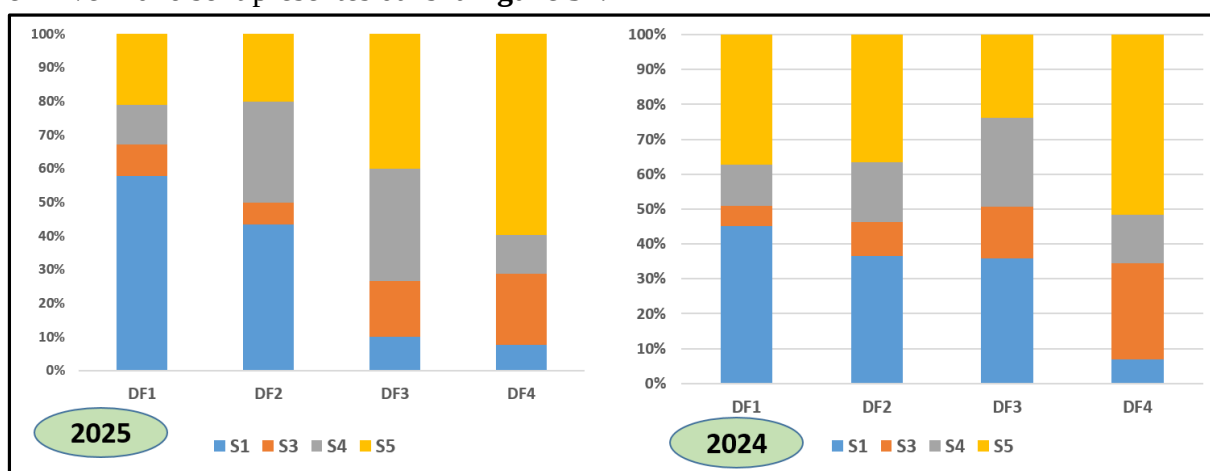


Figure 52- Répartition des arbres selon les classes de déficit foliaire (DF) dans les 4 sites (inventaires 2024 et 2025)

D'après cette figure, nous remarquons qu'au cours de cet inventaire, 52 arbres ont été enregistrés morts dans les quatre sites sur un total observé de 188 arbres. Ces arbres appartenant à la quatrième classe de déficit foliaire (DF4) représentent un taux de mortalité de 27.66%. Ce taux est variable entre les sites. Il est faible en site 1 (6.25%), fort en site 4 (17.65%) et très fort dans les 2 autres sites de l'ordre de 44 % et 47.69% respectivement en site 3 et site 5.

Les arbres dépéris de la classe 3 de déficit foliaire (DF3) sont dominants dans les sites 3, 4 et 5 avec un taux oscillant entre 18.46 et 23.33%. En revanche, dans le site 1, ce sont les arbres sains qui dominent avec un taux de 68.75%. Globalement, les arbres vivants appartenant aux 3 premières classes sont toujours dominantes dans les inventaires (plus de 70%).

Comparativement à l'inventaire de la saison végétative de 2024, **Allem (2025)**, a enregistré un taux de mortalité de 15.43%, soit un effectif de 29 arbres (**Fig.52**). Ceci explique une augmentation du taux de mortalité en 2025 de 12.23% soit 23 nouveaux cas de mortalité. Près de 70 % de cette augmentation (16 nouveaux arbres morts) est observée dans le site 5 en passant de 23.08% en 2024 à 47.69 % en 2025. Dans les autres sites, l'augmentation du taux de mortalité des arbres est faible ; il est d'environ de 10.50% (2 à 3 nouveaux cas par site).

2.2-Caractérisation des arbres morts

2.2.1-Caractéristiques géographiques

Les résultats des relevés GPS des arbres-morts échantillons des sites d'étude sont présentés dans la carte Google Map (**Fig.48**).la majorité des arbres sont concentrés dans les sites 1 et 5 et avec un degré moindres dans les sites 3 et 4 .

2.2.2- Caractéristiques dendrométriques

Les résultats de calcul de diamètre des arbres à partir des relevés de circonférence sur liège sont présentés par tranches de 10cm dans la figure 50a suivante.

La lecture de cette figure montre la dominance des arbres morts dont le diamètre varie entre 20 et 30cm (46%) ce qui correspond aux arbres jeunes (**Fig.53a**). Cette classe est suivie par la classe 30-40 cm de diamètre avec un taux de 27%. Ceci correspond aux arbres adultes mûres. Nous remarquons à travers ces résultats que la mortalité a affecté peu d'arbres très jeunes (classe : 10-20cm) et vieux arbres. Cette dernière catégorie est peu présente sur terrain.

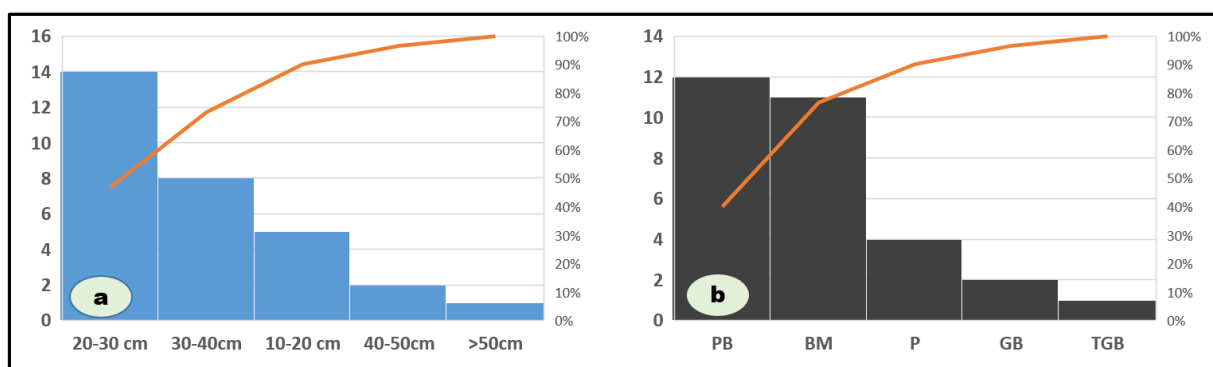


Figure 53- Répartition des 30 arbres morts par classe de diamètres (a) et type de bois (b).

Le calcul du diamètre nous a permis de répartir les arbres par type de bois. Les résultats montrent la dominance de 2 types de bois à savoir le petit bois et le bois moyen (**Fig.53b**).

En ce qui concerne la hauteur totale des arbres, les résultats montrent la dominance des arbres variant entre 7 et 10m (57%) Très peu d'arbres dont la hauteur est inférieure à 5m ou supérieure à 10m, soit de l'ordre de 10% pour chaque catégorie.

2.2.3- Caractéristiques d'exploitation

Les caractéristiques de la dernière exploitation des arbres morts sont consignées dans la **figure 54** suivante.

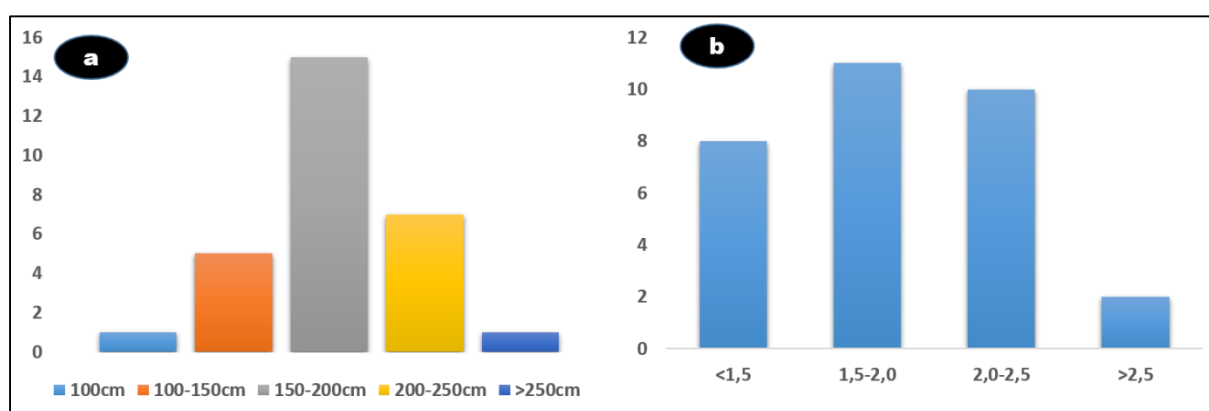


Figure 54- Répartition des arbres morts par classe de hauteur d'écorçage (cm) (a) et le coefficient d'écorçage (b)

Les résultats de mesures montrent que la majorité des arbres morts ont été exploités sur une hauteur variant entre 1.0 et 4.5 m (moyenne de 1.42m) (Fig.51a). Le coefficient d'écorçage ainsi calculé varie entre 0.9 et 2.5 (moyenne de 1.83). Cependant, près du tiers des arbres ont été surexploités (Ce supérieur à 2.5) et 27% sous-exploités (<1.5).

Il convient de signaler que les arbres des sites 3, 4 et 5 ont été exploités en 2015, par contre ceux du site 1 en 2016 selon les archives de gestion forestière de la conservation des forêts de Tlemcen (CFT,

Les résultats de mesures des épaisseurs du liège des arbres morts sur terrain montrent que cette épaisseur varie entre 8 et 31mm (soit une moyenne de 22.67mm). La répartition des données par catégorie de liège montre la présence du liège sur flotte (37%), mince (30%) et juste (33%). Les autres catégories (régulier et épais) sont complètement absentes (**Fig.55**).

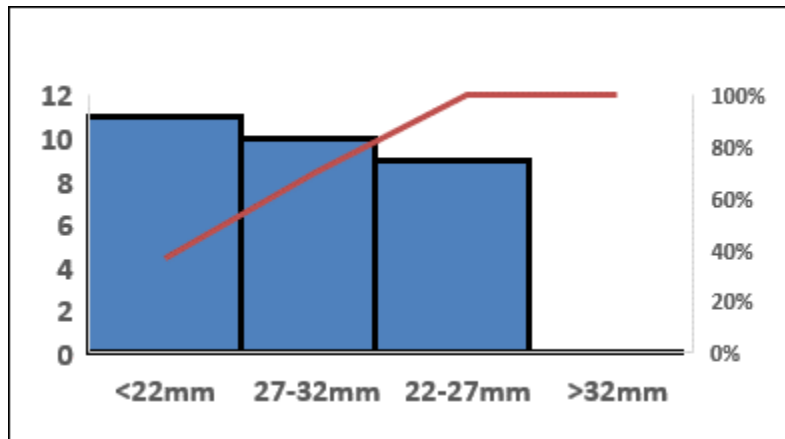


Figure 55- Répartition des épaisseurs du liège par catégorie de liège des arbres morts

2.2.4-Caractéristiques sanitaires

Les résultats de l'estimation de l'état de santé des arbres au moment de la mortalité sont présentés dans la **figure 56**.

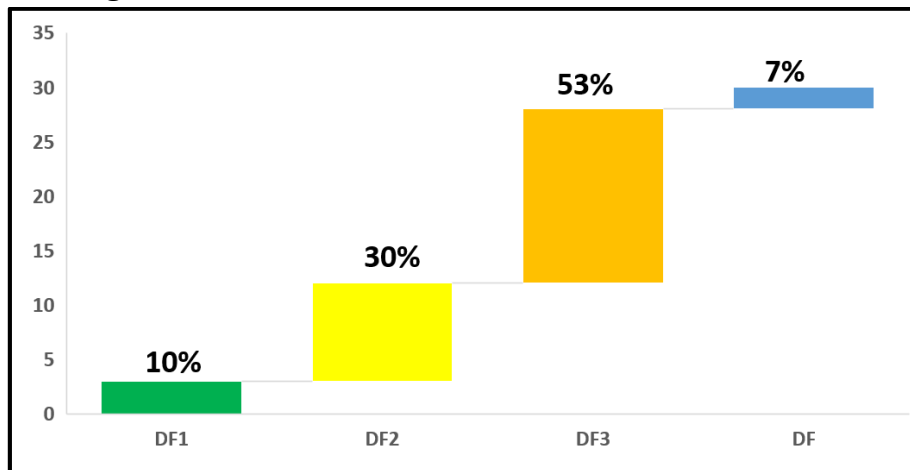


Figure 56- Répartition des arbres morts selon leur statut sanitaire au moment de la mortalité

La densité du feuillage desséché encore fixé sur l'arbre noté en 2025 et le dépouillement de l'inventaire sanitaire de 2024 nous a permis d'identifier le statut sanitaire des arbres au moment de la mortalité. La lecture des résultats montre que la majorité de la mortalité a affecté les arbres dépéris de la classe 3 sanitaire (53%). Il s'agit ici d'un dépérissement chronique où la vitesse de la mortalité était lente. Les arbres considérés comme sains (DF1) ayant subi une mortalité subite sont présents avec un taux de 10%. Par contre, près du tiers des arbres affaiblis ont succombé aux conditions de la sécheresse (30%). Dans ces deux cas, on parle plutôt d'un dépérissement aigu car la mortalité est anormale. Dans le reste des cas, la mortalité des arbres est ancienne caractérisée par la chute totale des feuilles.

2.2.5-Etat des troncs et Attaques du xylophage *Platypus cylindrus*

Les résultats d'observation minutieuse des troncs d'arbres morts nous ont permis de révéler quelques anomalies présentées dans la **figure 57**.

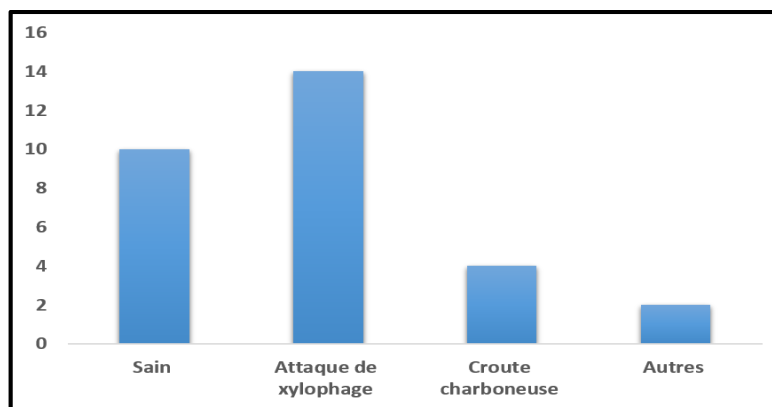


Figure 57- Anomalies relevés des troncs d'arbres morts

D'après cette figure, nous remarquons que près de la moitié des troncs sont infestés par le xylophage *Platypus cylindrus*. Les troncs sains ne révélant aucune anomalie sont présents avec un taux de 33% ; les croutes charbonneuses sont enregistrées sur 4 arbres seulement (13%).

3. Impact de la sécheresse sur la croissance radiale du liège des arbres morts

L'analyse des accroissements annuels du liège chez les arbres morts échantillonnés dans la forêt domaniale de Hafir met en évidence une évolution temporelle marquée, caractérisée par une diminution progressive de l'activité du phellogène au cours de la période de sa formation après le dernier écorçage.

3.1-Dates de mortalité des arbres

A partir de la date de récolte du liège, nous avons pu déterminer la date de mortalité des arbres basée sur le nombre de cernes. Par exemple, un liège récolté en 2015, sa couche doit être composée en 2025 par 11 cernes dont 10 cernes complets. Cependant, le premier cerne est un demi-accroissement formé en été-automne de l'année de récolte.

Sur cette base, les résultats obtenus à partir des échantillons récoltés en été 2015 et 2016 et présentés dans la **figure 58** nous renseignent sur le rythme de mortalité des arbres durant les 7 dernières années (période de sécheresse).

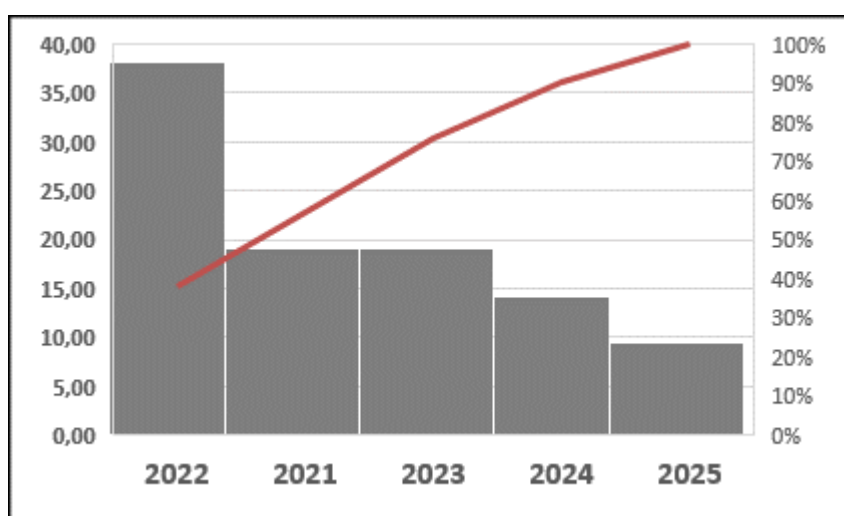


Figure 58- Répartition des échantillons de liège selon la date de mortalité des arbres

La lecture de cette figure montre que la mortalité des arbres a commencé à se manifester dans la forêt rassemblement en 2021 (soit en deuxième année de sécheresse). Cette mortalité s'est accentuée en 2022 (année suivante) où le taux de mortalité était le plus élevée durant toute l'épisode de sécheresse. Au-delà de cette date, le taux de mortalité a connu une certaine stabilité pour régresser en 2025. Il convient de citer qu'aucun cas de mortalité n'a été noté durant les deux premières années de sécheresse 2020- 2019.

3.2-Rythme de croissance du liège

Les valeurs obtenues montrent que la croissance du liège n'a pas suivi l'évolution normal au cours de son cycle de production ; les cernes sont larges durant les premières années suivant la levée puis ils se rétrécissent progressivement pour se stabiliser au minimum et ce jusqu'à la prochaine récolte (**Natividade, 1956 ; Dehane, 2012, Naggar, 2019**).

Or, dans notre cas, les observations dendrochronologiques révèlent que la croissance du liège a subi une rupture progressive voire subite aboutissant finalement à un arrêt quasi total de la production du liège chez la majorité des échantillons.

Les résultats de mesures des couches annuelles du liège permettent de distinguer deux grandes phases physiologiques :

- une première phase correspondant à une période de fonctionnement relativement normal du phellogène (de 2015-2016 à 2019. Nous nous intéressons peu à cette période de croissance.
- une seconde phase caractérisée par une perturbation du rythme des accroissements annuels du liège, dégradation rapide et un effondrement de la croissance sous l'effet du stress hydrique chronique (2020–2025). Cette phase nous permettra de constater dans quelle mesure, la production du liège est perturbée chez un arbre stressé.

3.2.1- Phase pré-sécheresse (2015/2016–2020)

Les résultats montrent qu'entre 2015 et 2021, les arbres présentent globalement une activité importante du phellogène, traduite par des épaisseurs relativement élevées des cernes de liège. Durant cette période, la majorité des individus enregistrent des accroissements importants, témoignant d'un fonctionnement physiologique encore satisfaisant (**Fig.59**). La moyenne annuelle est l'ordre de 2.51mm (2.63mm pour le liège récolté en 2015 et 2.41 mm pour le liège récolté en 2016). Cette valeur est déjà reportée par **Chorana et al., (2019)** pour la même forêt.

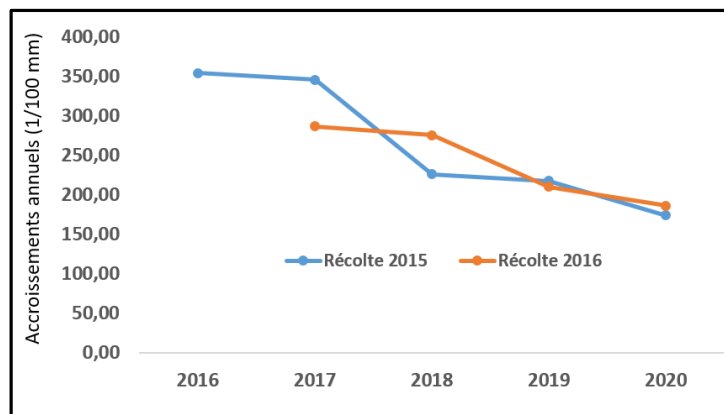


Figure 59- Variation annuelles des accroissements complets moyens du liège sur des échantillons récoltés en 2015 et 2016 avant la période de sécheresse (2016-2020).

Les demi cernes ne sont pas inclus dans la représentation

En effet, durant les trois premières saisons végétatives suivant la récolte correspondent à la période de croissance maximale du liège où les accroissements annuels atteignent des valeurs plus élevées de l'ordre de 3 à 5 mm.

Ces résultats traduisent une forte activité du phellogène, capable d'assurer une division cellulaire intense et une production régulière de nouvelles cellules subéreuses. Les réserves hydriques disponibles dans le sol semblent avoir été suffisantes pour maintenir un potentiel hydrique favorable durant la période de croissance printanière. Dans ces conditions, la photosynthèse fonctionne normalement, permettant la production des assimilats carbonés nécessaires à la synthèse de la subérine et des autres constituants de la paroi cellulaire.

Cette interprétation est en accord avec les travaux de **Fernández-Piñán et al. 2021**, qui montrent que les gènes responsables de l'activité du phellogène (WOX4, KNAT1, AIL6, STM) présentent une forte expression durant le début de la saison de croissance, favorisant la prolifération des cellules méristématiques. Les gènes impliqués dans la biosynthèse de la subérine (GPAT5, FAR4, KCS2, ABCG2) sont également fortement exprimés durant cette période, assurant la formation d'un liège épais et homogène.

3.2.2-Phase de sécheresse : 2021-2025

Durant la période 2021-2025, la majorité des cas de mortalité des arbres ont été enregistrés (Fig.58). Mais c'est à partir de 2022 que les accroissements du liège ont été perturbés. La **figure 60** suivante présente cinq situations de croissance du liège avant et au moment de la mortalité.

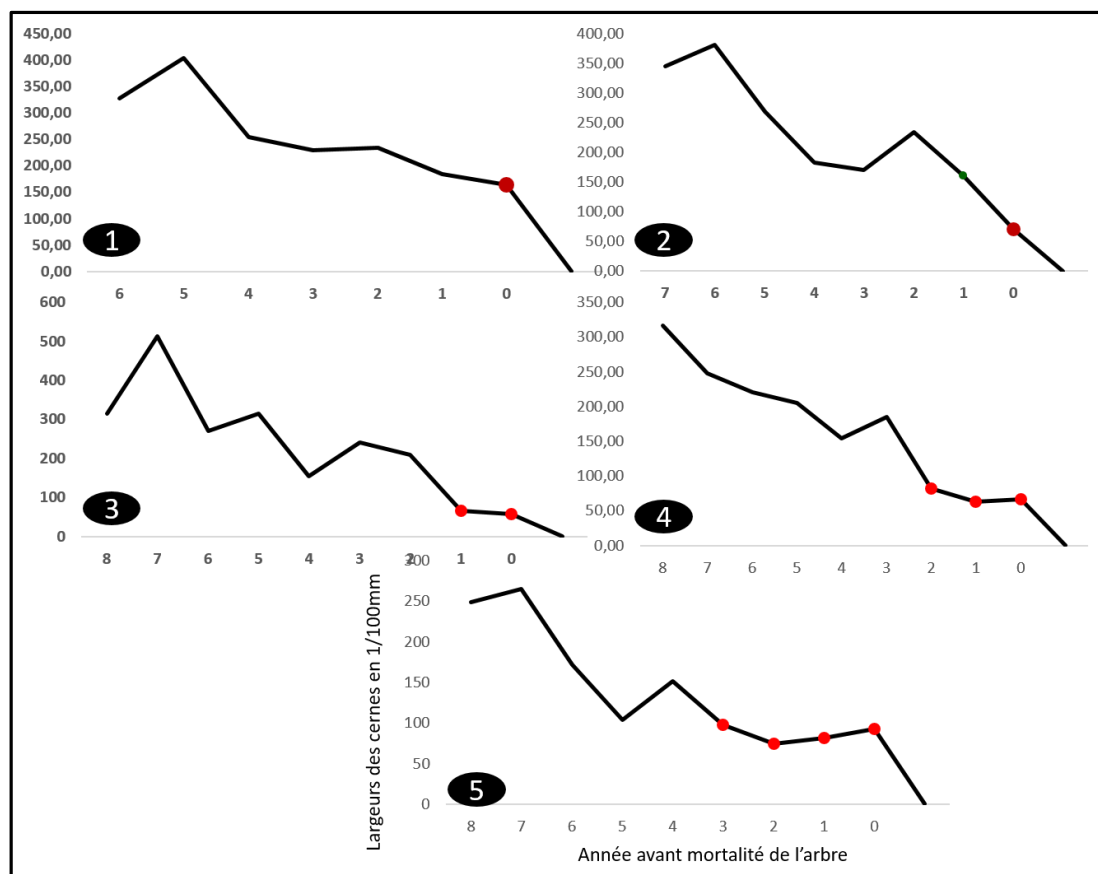


Figure 60- Rythme de croissance annuelle du liège au moment et avant la mortalité des arbres

3.2.2.1-Rythme de croissance du liège au moment de la mortalité

Les résultats de mesures des largeurs des cernes mesurés au moment de la mortalité des arbres montrent deux situations différentes. Dans la première situation, les arbres succombent après avoir formée à la fin de l'été une couche de liège d'une largeur moyenne sensiblement stable (1.63mm par rapport à l'année précédente de 1.84mm) (**Fig.60₁**). Ce sont des arbres morts sans subir de perturbations particulières dans le cycle de production. Cette catégorie d'arbres est présente dans 26% des échantillons. Il s'agit des arbres morts en 2021 et 2025. Sur le plan sanitaire ce sont des arbres considérés sains non préalablement stressés et ayant formée une couche de liège large en printemps avant de succomber subitement en été-automne.

Par contre, près du tiers des arbres (32%) ont subi une perturbation marquante à la fin de la croissance de l'année de mortalité. En effet, la couche du liège a perdu près de 56% de sa valeur moyenne par rapport à l'année précédente en passant de 1.6 mm à 0.7mm (**Fig.60₂**). La majorité de ces cas ont été identifiés au niveau des cernes de 2024.

3.2.2.1-Rythme de croissance du liège avant la mortalité

Dans le reste des échantillons, les arbres ont subi des perturbations variables au cours des années du cycle de production du liège précédant la mortalité des arbres. On cite :

- Les arbres morts ayant perdu de la croissance annuelle du liège lors des deux dernières saisons végétatives précédant leur mortalité. Ils sont présents avec un taux de 28% (**Fig.60₃**). Les accroissements annuels moyens se sont réduits de 70% de leur largeur en passant de

2.09mm à 0.65mm. Après cette chute de croissance, le cerne suivant a été maintenu à ce niveau bas et ce jusqu'à la mortalité de l'arbre. Cette situation a été enregistrée chez les cernes de 2023 -2024.

Pour les deux autres catégories, on enregistre des cycles de productions perturbés de même intensité que les arbres précédents mais sur une période plus longue de deux années (2022-2024) à trois années (2023-2025) avant la mortalité (**Fig.604**). Durant ces années, les arbres sont dépéris sur le plant symptomatologique et les largeurs des cernes varient alors faiblement entre 1mm et 0.36mm.

Globalement, les arbres morts suite à la sécheresse répond d'une manière variable au rythme de croissance du liège. Mais la chute brutale de largeur des cernes de plus de 50% constitue un signal d'alarme de mortalité immédiat ou à court terme de l'arbre.

3.2.2.2-Rythme global de croissance du liège

-Période 2017-2021

Les résultats des observations et mesures montrent qu'à partir de 2020, les données révèlent une diminution progressive des accroissements chez plusieurs arbres. Chez certains arbres, l'épaisseur passe de 5,12 mm en 2017 à 2.38 mm en 2018. Des diminutions similaires sont observées chez plusieurs autres individus, bien que certains conservent encore une croissance relativement élevée.

Cette diminution ne se traduit pas par un dysfonctionnement irréversible mais plutôt les premiers signes d'un déséquilibre hydrique progressif. Les réserves en eau deviennent progressivement insuffisantes pour maintenir le rythme maximal de division cellulaire. Le phellogène demeure actif, mais son activité ralentit progressivement.

L'année 2021 apparaît comme une véritable année de transition. Certains arbres, conservent encore une croissance relativement importante (4,97 mm), alors que d'autres présentent déjà une forte réduction. Cette variabilité traduit probablement une différence de résistance individuelle liée à la profondeur des systèmes racinaires, aux réserves carbonées ou encore aux caractéristiques stationnelles locales. Ainsi, durant cette première phase, le peuplement conserve encore une capacité d'adaptation importante malgré les premiers signes du changement climatique.

- Période de 2022–2025

Les résultats obtenus entre 2022 et 2025 mettent en évidence une rupture brutale dans la dynamique de croissance du liège. Dès 2022, plusieurs arbres cessent complètement leur production de liège. Les arbres présentent une épaisseur annuelle égale à 0 mm, traduisant un arrêt total et précoce de l'activité du phellogène chez ces individus.

Cette situation devient beaucoup plus préoccupante en 2023. La majorité des arbres étudiés enregistrent simultanément une croissance nulle (0 mm). Les quelques individus qui poursuivent encore leur activité présentent uniquement des valeurs résiduelles extrêmement faibles, comme (0.75-0.98 mm).

L'année 2024 confirme cette tendance puisque les valeurs restent nulles chez la majorité des individus. Seuls quelques arbres présentent encore une activité très réduite (0.42 mm-0.81 mm), insuffisante pour traduire une véritable reprise physiologique.

En 2025, la situation devient critique. Presque tous les arbres enregistrent une croissance totalement nulle, indiquant une interruption durable et généralisée de l'activité méristématique du phellogène à l'échelle du peuplement.

La figure 61 illustre globalement le rythme de croissance du liège chez les arbres ayant été stressés avant leur mortalité en 2022.

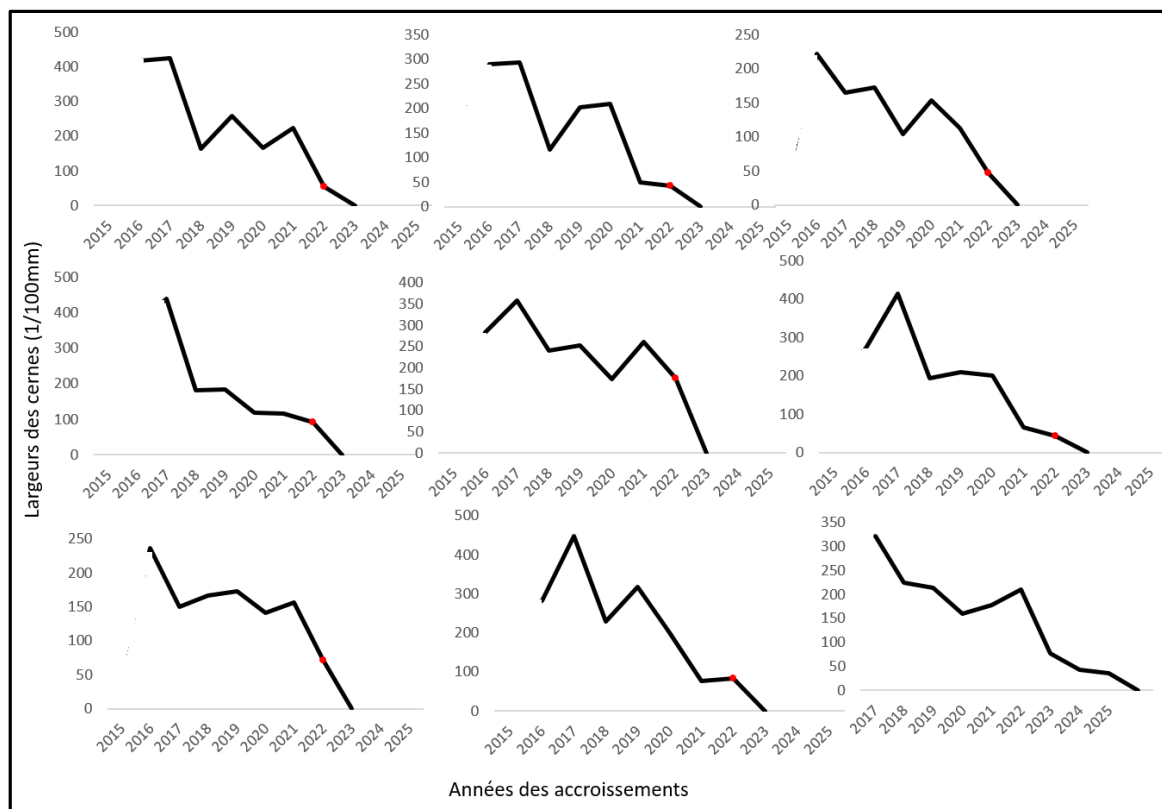


Figure 61-Rythme de croissance du liège des arbres morts récoltés en 2015 (demi-accroissement de 2015 n'est pas inclus)

3.3-. Interprétation écophysiologie et moléculaire globale

L'analyse détaillée révèle que, malgré une variabilité logique des valeurs d'accroissement entre les individus, tous partagent la même tendance générale au déclin au cours de la décennie d'étude. Cette évolution traduit une réponse commune et globale du peuplement face aux modifications drastiques des conditions environnementales locales.

Sur le plan éco- physiologique, cette évolution traduit l'installation d'un stress hydrique chronique aggravé par l'augmentation des températures estivales. La diminution des précipitations réduit fortement la réserve utile du sol. Face à cette contrainte, les arbres ferment progressivement leurs stomates afin de limiter les pertes d'eau par transpiration. Cette fermeture stricte réduit drastiquement l'entrée du CO₂ et diminue par conséquent l'activité de la photosynthèse. Les glucides produits deviennent alors insuffisants pour assurer la croissance secondaire. L'arbre entre dans une stratégie de survie où les faibles quantités de

carbone disponibles sont exclusivement mobilisées pour maintenir les fonctions vitales (respiration de maintenance, entretien cellulaire, régulation osmotique et réparation des tissus conducteurs), au détriment de la production du liège.

Parallèlement, le déficit hydrique prolongé favorise la cavitation et l'embolie des vaisseaux du xylème, réduisant fortement la conductivité hydraulique et le transport de la sève brute vers la couronne. Les racines fines, particulièrement sensibles à la dessiccation, perdent progressivement leur capacité d'absorption. Le fonctionnement hydraulique global de l'arbre est alors profondément perturbé.

Cette situation est d'ailleurs fortement aggravée dans la forêt de Hafir par la compétition intense pour les ressources en eau exercée par le maquis méditerranéen sous-jacent, dominé notamment par *Pistacia lentiscus*, *Calicotome villosa*, *Arbutus unedo* et les espèces du genre *Cistus* (**Bouabdellah, 2019**). Ces espèces compagnes exploitent rapidement les faibles réserves hydriques superficielles du sol et accentuent dramatiquement le déficit hydrique subi par le chêne-liège.

Enfin, le maintien prolongé de valeurs nulles jusqu'en 2025 met en évidence un phénomène puissant de Legacy Effect (effet d'héritage). Les sécheresses successives ont provoqué des dommages structuraux irréversibles au système hydraulique ainsi qu'une altération durable du phellogène. Le phellogène ne retrouve plus son activité normale malgré le retour éventuel de quelques précipitations temporaires, ce qui démontre qu'en conditions de stress sévère, les processus liés au développement du phellème deviennent totalement inhibés. (**Bose et al., 2024**)

4- Description des accroissements du liège des arbres échantillonnés

Quelques sont pris comme exemple pour décrire l'allure général des cernes annuels du liège des arbres avant leur mortalité.

Arbre 1

L'évolution de la croissance du liège chez cet 'arbre met en évidence trois comportements physiologiques successifs. Entre 2015 (324 μm) et 2017 (424 μm), une augmentation importante de l'épaisseur des cernes est observée. Cette progression traduit une activité optimale du phellogène, favorisée par des conditions hydriques relativement favorables. Durant cette période, les divisions cellulaires sont intenses et la biosynthèse de la subérine est efficace, permettant la formation d'un liège épais. À partir de 2018 (1.64 mm), la croissance chute brutalement, puis reste faible entre 2019 (2.59 mm) et 2021 (2.24 mm). Cette diminution traduit les premiers effets du déficit hydrique. Le phellogène demeure actif mais son rythme de division ralentit progressivement sous l'effet de la réduction de la disponibilité en eau. En 2022, la croissance devient très faible (0.55 mm) avant de s'annuler totalement entre 2023 et 2025. Cette absence complète de production indique un arrêt physiologique total du phellogène.



Arbre 2

Contrairement à plusieurs individus du peuplement, cet arbre présente une dynamique plus irrégulière. Après une légère diminution entre 2015 (2.05 mm) et 2017 (1.63 mm), une augmentation remarquable est observée en 2018 (4.09 mm). Cette reprise peut traduire une meilleure disponibilité locale en eau ou une meilleure capacité individuelle de résistance. Cependant, à partir de 2021 (1.06 mm), l'activité du phellogène devient très instable. Une légère reprise apparaît en 2022 (2.18 mm) puis en 2023 (2.76 mm) avant un effondrement presque complet en 2024 (0.57 mm) et un arrêt total en 2025. Cette évolution suggère que cet arbre possédait une capacité de résilience supérieure à celle de la majorité des individus, mais les épisodes successifs de sécheresse ont fini par épuiser ses réserves physiologiques jusqu'à provoquer la cessation de sa croissance.



Arbre 3

Cet arbre présente l'une des croissances les plus importantes du peuplement au début de l'étude. L'épaisseur atteint 5.12 mm en 2017, représentant son maximum annuel. Cette forte production traduit une activité intense du phellogène ainsi qu'une excellente alimentation hydrique. Cependant, dès 2018, la croissance diminue de moitié (2.38 mm) puis atteint seulement 0.76 mm en 2020. Une légère reprise est observée en 2021 (2.30 mm) puis 2022 (2.26 mm), probablement liée à une amélioration temporaire des conditions hydriques locales. Malgré cette résistance relative, l'arbre ne retrouve jamais son niveau initial. Les valeurs chutent ensuite à 0.67 mm en 2023, 0.56 mm en 2024 puis 0 mm en 2025. Cette évolution montre que même les arbres les plus vigoureux finissent par subir les effets cumulatifs des sécheresses successives.



Arbre 4

Cet arbre suit une trajectoire de déclin linéaire et précoce. Affichant une croissance moyenne en 2015 (2.50 mm), il subit une diminution constante d'année en année sans jamais montrer de signe de reprise. Dès 2021, sa croissance passe sous la barre des 0.80 mm pour s'effondrer définitivement à partir de 2022. Cet individu se caractérise par une faible plasticité cambiale et une forte vulnérabilité aux déficits hydriques du sol.



Arbre 5

Chez ce sujet, la croissance augmente progressivement entre 2015 (1.89 mm) et 2017 (2.94 mm) avant de diminuer progressivement jusqu'en 2022 (0.43 mm). À partir de 2023, aucune production de liège n'est enregistrée et la situation reste inchangée jusqu'en 2025. Cette évolution traduit un épuisement progressif des capacités physiologiques de l'arbre. Le ralentissement du phellogène précède son arrêt complet, illustrant le passage d'un stress modéré à un stress irréversible.



Arbre 6

L'arbre montre une amélioration importante entre 2015 (0.47 mm) et 2016 (2.22 mm), indiquant une excellente reprise de croissance initiale. Par la suite, les accroissements deviennent irréguliers mais restent relativement faibles jusqu'en 2022 (0.47 mm). En 2023, la croissance devient totalement nulle et le reste jusqu'en 2025. Ce comportement traduit probablement une forte sensibilité aux épisodes de sécheresse intense, où les faibles réserves carbonées disponibles n'ont plus permis de maintenir les divisions cellulaires nécessaires.



Arbre 7

L'arbre 7 fait partie des individus les plus productifs au début de la période d'étude, atteignant une croissance remarquable de 5.11 mm en 2017. Cependant, l'apparition de la crise se traduit par un effondrement extrêmement brutal : dès 2022, l'activité méristématique tombe à 0 et la production reste totalement nulle jusqu'en 2025. L'obtention d'une valeur égale à 0 μm signifie que le phellogène n'a produit aucune nouvelle cellule durant toute la saison végétative. Ce blocage physiologique complet montre qu'un fort développement initial peut parfois s'accompagner d'une grande vulnérabilité lorsque la ressource hydrique s'épuise.



Arbre 8

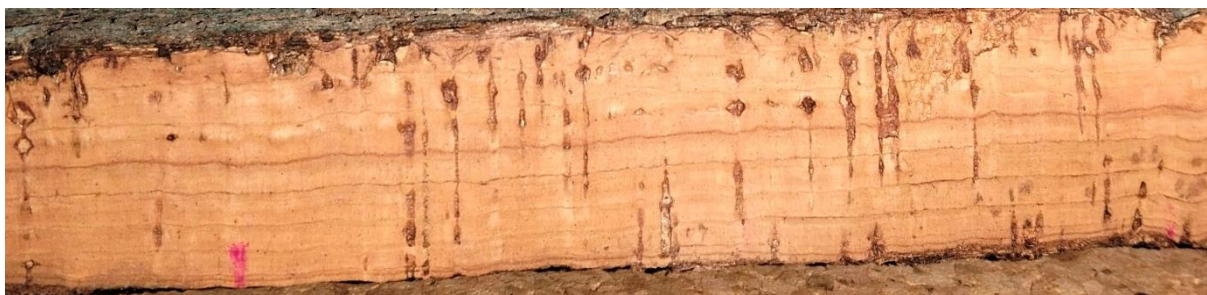
Ce sujet montre un profil de résistance modérée. Sa croissance fluctue autour de 2.80 mm entre 2015 et 2019. L'impact des sécheresses successives se fait sentir tardivement à partir de 2020 avec une baisse continue. Il bascule dans une inhibition totale en 2023, rejoignant la réponse synchrone du peuplement face au stress chronique.



Arbre 9

Cet arbre montre une dynamique de croissance initialement faible à moyenne, ne dépassant jamais 2.10 mm entre 2015 et 2018. Cette faible vigueur de départ s'est traduite par une incapacité à accumuler des réserves carbonées suffisantes. En conséquence, l'arbre subit un

déclin rapide dès 2020, aboutissant à un arrêt complet de l'activité méristématique à partir de 2023.



Arbre 10

Cet individu se distingue par une résilience hydraulique et méristématique remarquable. Bien que sa croissance décline après 2018, il réussit à maintenir une activité phellogénique résiduelle tout au long de la période de crise la plus sévère, affichant 0.98 mm en 2023 et 0.95 mm en 2024. Même si ces valeurs restent faibles, elles prouvent que son phellogène reste partiellement fonctionnel, probablement grâce à un système racinaire profond lui assurant un approvisionnement en eau minimal.



Arbre 11

Cet arbre présente une croissance stable mais modérée au cours de la première phase (2015-2020), oscillant entre 1.90 et 2.30 mm. Le phellogène subit ensuite un fléchissement marqué en 2021, prélude à un effondrement total en 2022, persistant jusqu'en 2025. Cet individu illustre une rupture nette de l'homéostasie interne face au seuil critique de sécheresse.



Arbre 12

L'arbre manifeste une vulnérabilité très précoce au stress hydrique. Après une phase de croissance initiale satisfaisante, son activité s'interrompt totalement dès 2022. Le phellogène reste complètement inactif pendant quatre années consécutives (2022-2025), ce qui suggère

un blocage physiologique complet provoqué par un déficit hydrique sévère et une potentielle embolie de ses vaisseaux conducteurs.



Arbre 13

L'arbre affiche des performances exceptionnelles en début de période, atteignant un maximum de 5.26 mm. Disposant probablement d'une excellente position sociologique ou micro-stationnelle, il résiste mieux aux premières années de déficit (2018-2021). Bien qu'il subisse une baisse drastique, son phellogène reste partiellement fonctionnel en maintenant une production minimale en 2023 (0.96 mm) avant de s'effondrer définitivement en 2024 et 2025 face à la sévérité cumulée du stress.



Conclusion générale

Ce présent travail de recherche nous a permis de caractériser au mieux la réponse des arbres de chêne liège de la forêt domaniale de Hafir à la péjoration climatique sévère qui affecte tout le nord-ouest algérien au cours de la période 2019-2025. À travers l'analyse des résultats du suivi sanitaire durant deux saisons végétatives consécutives (2024 réalisé par **Allem (2025)** et par nous-même, montrent une évolution assez nette de la mortalité s'ajoutant à celle survenue avant cette date. Le taux global de la mortalité des arbres de près de 28% est très élevé, jamais enregistré dans la forêt depuis les dernières décennies. **Bouhraoua (2003)**, rapport un taux de mortalité de 3% durant la période 2000-2002 dans la même forêt. Au niveau de la forêt mitoyenne (Zarrieffet), **Dehane (2012)** n'a enregistré aucun arbre mort dans ses parcelles d'échantillonnage (2006-2008) ce qui suppose que la suberaie de Hafir-zarrieffet était généralement saine et très peu affectée par le phénomène de mortalité. Ceci est expliqué par les bonnes conditions climatiques enregistrées durant cette période ce qui a favorisé la bonne santé et la croissance des arbres.

Mais, la succession d'années déficitaires de pluies aggravées par l'augmentation des températures en été, notamment entre 2021 et 2024 témoigne de l'installation progressive d'un contexte climatique plus défavorable aux arbres forestiers. Ceci a contribué à l'affaiblissement physiologique des arbres ayant favorisé les phénomènes de dépérissement et de mortalité. La présence cumulée d'arbres morts sur le terrain en absence de gestion de la crise depuis leur apparition a donné à la subéraie un paysage sinistré.

Ces conditions ont affecté directement le fonctionnement physiologique du chêne-liège par dégradation sanitaire des arbres, la perturbation de la structure forestière du peuplement et la diminution de la formation annuelle de son liège.

Elles sont la conséquence de la réduction des réserves hydriques du sol ayant entraîné une diminution de l'absorption racinaire, une baisse du potentiel hydrique foliaire et une augmentation du risque de cavitation et d'embolie du xylème. Ces arbres deviennent exposés aux attaques de xylophages secondaires de faiblesse en l'occurrence le *Platypus cylindricus* (Sousa, 1996, Bouhraoua et Villemannt, 2020 ; Belhoucine et al., 2011).

Par ailleurs, les analyses dendrochronologiques des arbres échantillonnés morts dans quatre sites permanents de suivi de l'impact de la sécheresse sur le chêne liège, les résultats obtenus dessinent une trajectoire cohérente de dégradation progressive puis d'effondrement généralisé dans le cycle de production annuelle du liège.

La phase de référence pré-sécheresse (2015-2018) a révélé un peuplement physiologiquement vigoureux, avec des accroissements annuels de liège atteignant 5.40 mm chez beaucoup d'arbres ; c'est une valeur témoin d'un phellogène en pleine activité méristématique et d'une disponibilité hydrique encore satisfaisante. La phase de transition (2018-2020) a été marquée par un ralentissement progressif et hétérogène, préfigurant la rupture à venir. La phase de sécheresse sévère (2021-2025) a enfin consacré l'effondrement généralisé : la proportion d'arbres ayant perdu plus de 56% de croissance a atteint 88 % en 2025, et la mortalité globale du peuplement a progressé d'environ 14,7 % en 2024 à 27,8 % en 2025.

Plusieurs enseignements majeurs se dégagent de cette étude. En premier lieu, la chute de la croissance du liège s'avère être un indicateur biologique précoce et sensible du dépérissement forestier, précédant d'un à deux saisons la hausse mesurable de la mortalité sur le terrain ce qui lui confère une valeur diagnostique et prédictive importante pour la gestion conservatoire de la subéraie. En second lieu, l'interprétation écophysologique met en évidence une cascade physiologique caractéristique traduite par la fermeture stomatique, la réduction de l'assimilation carbonée, la cavitation xylémique, la réallocation des ressources. Ce sont des traits de cohérence avec les mécanismes documentés dans la littérature internationale sur le déclin des ligneux méditerranéens.

En troisième lieu, la persistance de valeurs très faible chez la grande majorité des arbres jusqu'en 2025, y compris après des épisodes pluvieux ponctuels, confirme l'existence d'un puissant effet d'héritage post-sécheresse (Legacy Effect), dont l'amplitude dépasse la fenêtre d'un à quatre années généralement rapportée dans la littérature. Enfin, l'analyse individuelle révèle une diversité remarquable des réponses : si la majorité des arbres s'est effondrée entre 2022 et 2023, d'autres ont maintenu une activité phellogénique résiduelle jusqu'en 2025, suggérant l'existence de différences microstationnelles ou architecturales susceptibles de conférer une résilience supérieure.

En définitive, la dynamique de croissance du liège dans la forêt domaniale de Hafir s'affirme comme un miroir fidèle et un indicateur précoce de la vulnérabilité des subéraies méditerranéennes face à l'intensification du changement climatique. La conjugaison d'une sécheresse structurelle persistante, d'une compétition hydrique aggravée par un sous-bois et d'un effet d'héritage durable fait de la subéraie algérienne de l'Ouest un écosystème en état d'alerte.

Recommandations de gestion

À la lumière de ces résultats, les recommandations suivantes sont formulées pour la bonne gestion sylvicole et la conservation de la subéraie de Hafir :

- Mettre en place un réseau permanent de suivi dendrochronologique et phénologique à l'échelle de la subéraie , permettant de détecter précocement les signes de déclin (réduction de l'incrément de liège) avant l'apparition de symptômes visuels de dépérissement sur le houppier.
- Initier une gestion raisonnée du maquis sous-jacent par débroussaillage sélectif et réduction de la densité des espèces les plus compétitrices, afin d'atténuer la compétition hydrique en période de déficit pluviométrique aigu.
- Prioriser, dans les programmes de conservation et de régénération, les individus ayant démontré une résilience remarquable , qui sont susceptibles de porter des caractères génétiques ou physiologiques d'intérêt adaptatif. Une caractérisation génomique comparative de ces individus pourrait guider les programmes de sélection et de préservation des ressources génétiques.
- Installer des capteurs dendrométriques et hydriques sur un sous-échantillon d'arbres représentatifs des différents profils de réponse, et réaliser une cartographie pédologique des micro-stations afin d'identifier les zones à meilleure capacité de rétention hydrique, supports potentiels de la régénération future.
- Poursuivre le suivi dendrochronologique au-delà de 2025 afin de déterminer si le Legacy Effect observé est réversible à moyen terme en cas de retour à des conditions pluviométriques plus favorables, ou s'il traduit un basculement fonctionnel durable vers

un régime de type rhytidome, comme le suggèrent les analogies moléculaires disponibles.

- Intégrer les données de croissance du liège dans les modèles de vulnérabilité forestière régionale et les plans de gestion adaptative des forêts algériennes, en cohérence avec les stratégies nationales d'adaptation au changement climatique.
- La recherche scientifique, la gestion adaptative et la volonté politique de conservation constituent les trois piliers indispensables pour préserver ce patrimoine naturel exceptionnel pour les générations futures.

Liste des Références Bibliographiques

1. Alexandrian, D. (1988). Le rôle du chêne-liège dans la protection contre les incendies de forêt. *Revue Forestière Française*, 40 (spécial), 112–120.
2. Alexandrian, D., Esnault, F., & Le Houérou, H. N. (2002). Fire in the Mediterranean region. In *Forest Fires: Their Country, Environmental and Socioeconomic Impact* (pp. 43–67). Springer.
3. Allam, A. (2025). *Modélisation du dépérissement et de la dynamique de croissance du chêne-liège en milieu méditerranéen*. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie.
4. APCOR (Associação Portuguesa da Cortiça). (2019). *Yearbook of Cork: Statistics and Global Trends*. APCOR Publications, Santa Maria de Lamas.
5. Armendariz, A., López de Heredia, U., Soler, M., Puigdemont, A., Ruiz, M. M., Jové, P., Soto, Á., Serra, O., & Figueras, M. (2024). Rhytidome- and cork-type barks of holm oak, cork oak and their hybrids highlight processes leading to cork formation. *BMC Plant Biology*, 24*, 488.
6. Armendariz, A., Santos, M., & Garcia, F. (2024). Impacts of extreme climatic events on Mediterranean cork oak decline. *Forest Ecology and Management*, 552*, 121580.
7. Avila, A., & Bernal, S. (1998). Litterfall dynamics and nutrient fluxes in a Mediterranean holm oak forest. *Biogeochemistry*, 42 (3), 255–277.
8. Bakhti, K., & Bouhraoua, R. T. (2014). *Étude du dépérissement de la subéraie de Hafir (Tlemcen)*.
9. Becker, M., & Levy, G. (1983). Le dépérissement du chêne : Synthèse des connaissances actuelles. *Revue Forestière Française*, 35 (5), 341–356.
10. Belhoucine, L., Bouhraoua, R. T., & Chakali, G. (2011). Inventaire de l'entomofaune associée au chêne-liège dans la forêt de Hafir (Tlemcen, Algérie). *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 48, 385–392.
11. Ben Jamâa, M. L., M'nara, S., & Hasnaoui, B. (2005). Analyse de l'état sanitaire des suberaies en Tunisie. *Annales de l'INRGREF*, 8, 120–135.
12. Benabid, A. (2000). *Flore et écosystèmes du Maroc : Évaluation et conservation de la biodiversité*. Éditions Ibis Press, Paris.
13. B.N.E.D.E.R. (Bureau National d'Études pour le Développement Rural). (1979). *Étude d'aménagement de la forêt de Hafir (Tlemcen)*. Ministère de l'Agriculture, Alger.
14. Boudru, M. (1989). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses Agronomiques de Gembloux.

15. Boudy, P. (1950). *Économie forestière de l'Afrique du Nord : Tome II. Monographies des essences forestières*. Éditions Larose, Paris.
16. Bouabdellah, M. (2019). *Impact des variations microclimatiques sur la vulnérabilité de Quercus suber L. dans le Nord-Ouest algérien*. Thèse de Magister, Université de Tlemcen.
17. Bouhraoua, R. T. (2003). *Contribution à l'étude des insectes xylophages associés au dépérissement du chêne-liège en Algérie*.
18. Bouhraoua, R. T. (2003). *Les insectes ravageurs du chêne-liège (Quercus suber L.) dans le Nord-Ouest de l'Algérie*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Tlemcen.
19. Bouhraoua, R. T., Villemant, C., & Khelil, M. A. (2002). Rôle des insectes xylophages dans le dépérissement du chêne-liège en Algérie occidentale.
20. Boulahia, K. (2012). *Contribution à l'étude de la gestion sylvicole du démasclage et de son impact sur la vigueur du chêne-liège*.
21. Bréda, N., Granier, A., & Barataud, F. (2004). Climat, sécheresse et réserve en eau du sol : Impact sur la croissance et la santé des forêts. *Rendez-Vous Techniques ONF*, 4, 15–24.
22. Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees facing drought: Physiological responses, vulnerability to cavitation and recovery capacities. *Annals of Forest Science*, 63 (6), 625–647.
23. Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63, 625–644.
24. BSRF (Station de Recherches et d'Expérimentation Forestières). (1937). *Bulletin de la Station de Recherches Forestières du Nord de l'Afrique*. Imprimerie Officielle, Alger.
25. Camarero, J. J., Gazol, A., & Sangüesa-Barreda, G. (2024). Drought memory and legacy effects on cork oak radial growth. *Global Change Biology*, 30 (1), e17100.
26. Camilo-Alves, C. S., Vázquez-Piqué, J., & Tapias, R. (2013). Drought-induced mortality in Mediterranean oak open woodlands (dehesas/montados). *Agroforestry Systems*, 87 (5), 1011–1020.
27. Caritat, A., Gutiérrez, E., & Molinas, M. (1996). Cork ring width and climatic series in a *Quercus suber L.* forest. *Tree Rings, Environment and Humanity*, 231–238.
28. Caritat, A., Molinas, M., & Gutiérrez, E. (1996). Annual cork-ring width variability of *Quercus suber L.* in relation to temperature and precipitation (Extremadura, southwestern Spain). *Forest Ecology and Management*, 86, 113–120.
29. Chakali, G., Dejean, A., & Boughdad, M. (2002). Impact des insectes xylophages sur le dépérissement des suberaies algériennes. *Sécheresse*, 13 (2), 115–122.

30. Charlemagne, P. (1894). *Notice sur l'exploitation du chêne-liège en Algérie*. Imprimerie Giralt, Alger.
31. Chenel, C. (1951). Le liège et le chêne-liège en Algérie. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*, 42, 85–96.
32. CIB (Conseil Interprofessionnel du Liège). (2010). *Rapport annuel sur la filière liège et les forêts de suberaies*. CIB Publications, Paris.
33. Cochard, H., & Granier, A. (1999). Vulnerability of xylem to cavitation in temperate forest trees. *Annales des Sciences Forestières*, 56 (4), 289–297.
34. Cochet, P. (1971). Étude sur la croissance du liège de reproduction en Afrique du Nord. *Revue Forestière Française*, 23 (3), 189–202.
35. Conceição Barros, M., Faria, C., & Pereira, H. (2002). Modelling cork thickness formation in *Quercus suber*. *Forest Ecology and Management*, 167 (1–3), 171–181.
36. Costa, A., Oliveira, A., & Pereira, H. (2002). An approach to simulate cork production in *Quercus suber* stands in Portugal. *Ecological Modelling*, 154 (3), 287–295.
37. Costa, A., Pereira, H., & Oliveira, A. (2001). Influence of climate on cork growth in *Quercus suber*. *Canadian Journal of Forest Research*, 31 (8), 1325–1333.
38. CRPFC (Centre Régional de la Propriété Forestière du Centre). (2014). *Guide des bonnes pratiques de sylviculture du chêne-liège*. CRPFC, Orléans.
39. C.W.F.T. (Conservation Wilaya des Forêts de Tlemcen). (1996). *Plan de gestion et de protection de la forêt domaniale de Hafir*. Conservation des Forêts, Tlemcen.
40. C.W.F.T. (Conservation Wilaya des Forêts de Tlemcen). (2011). *Rapport de bilan du dépérissement des suberaies dans la wilaya de Tlemcen*. Direction Générale des Forêts, Tlemcen.
41. Dehane, B. (2006). Incidence des facteurs écologiques sur les accroissements du liège : cas de la forêt de M'Sila (Oran) et la forêt de Zarieffet (Tlemcen). Thèse de Magister, Université de Tlemcen.
42. Dehane, B. (2012). Incidence de l'état sanitaire des arbres du chêne-liège sur les accroissements annuels et la qualité du liège de quelques suberaies oranaises Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen.
43. De Candolle, A. (1852). *Prodromus Systematis Naturalis Regni Vegetabilis* (Vol. 16). Victoris Masson, Paris.
44. Dehane, B., & Bouhraoua, R. T. (2010). Évaluation de l'état sanitaire du chêne-liège dans le massif de Hafir (Algérie). *Revue Écologie-Environnement*, 6, 45–53.
45. DGF (Direction Générale des Forêts). (2003). *Atlas des forêts d'Algérie*. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Alger.

46. DGF (Direction Générale des Forêts). (2009). *Inventaire Forestier National : Synthèse des résultats des forêts de suberaies*. DGF, Alger.
47. Douheret, J. (1992). *Guide des démasclages du chêne-liège en zone méditerranéenne*. Éditions du Centre National de la Propriété Forestière, Paris.
48. DSF (Département de la Santé des Forêts). (1991). *Bilan de la santé des forêts en France et dans le bassin méditerranéen*. Ministère de l'Agriculture, Paris.
49. Elena, R. (1992). La régénération naturelle de *Quercus suber* L. en région méditerranéenne. *Ecologia Mediterranea*, 18(1), 55–68.
50. Espanol, F. (1964). Los Coleópteros xilófagos de los bosques de *Quercus* en el Mediterráneo occidental. *Publicaciones del Instituto de Biología Aplicada*, 37, 73–95.
51. FAO (Food and Agriculture Organization). (2013). *State of Mediterranean Forests 2013*. FAO, Rome.
52. Fernández-Piñán, S., Boher, P., Soler, M., Figueras, M., & Serra, O. (2021). Transcriptomic analysis of cork during seasonal growth highlights regulatory and developmental processes from phellogen to phellem formation. *Scientific Reports*, 11, 12053.
53. Fernández-Piñán, S., Vázquez-Piqué, J., & Alejandra, M. (2021). Effects of water deficit and debarking stress on cork oak physiological performance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308, 108570.
54. Ferreira, A., Oliveira, A., & Pereira, H. (2000). Post-harvest growth of cork in *Quercus suber* L. trees. *Forest Ecology and Management*, 126 (2), 193–204.
55. FOSA (Forestry Outlook Study for Africa). (2007). *African Forests and Forestry: Trends and Prospects*. FAO Forestry Paper, Rome.
56. Fos, F., Sanjaume, E., & Dongu, G. (1994). Morphology and anatomy of phellogen in *Quercus suber* L. *Botanica Helvetica*, 10, 115–126.
57. Fortes, M. A., & Rosa, M. E. (1988). Growth and structure of cork in *Quercus suber* L. *Wood Science and Technology*, 22 (4), 289–298.
58. Fortes, M. A., Pereira, H., & Ferreira, M. L. (2004). Cork: Properties, capabilities and applications. *Progress in Materials Science*, 49 (6), 1135–1173.
59. Freixe, A. (1915). *Traité de la culture du chêne-liège et de l'exploitation du liège en France et en Algérie*. Imprimerie J. B. Baillière et Fils, Paris.
60. Garolera, J. (1988). *El alcornoque y el corcho : Fisiología, aprovechamiento y silvicultura*. Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Madrid.
61. Gaudin, S. (1997). *Ecologie et gestion des peuplements de chêne-liège*. Institut Développement Forestier (IDF), Paris.

62. GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat). (2022). *Changement climatique 2022 : Impacts, adaptation et vulnérabilité*. Contribution du groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation. GIEC, Genève.
63. Houston, D. R. (1967). The dieback and decline of oaks: A review. *Phytopathology*, 57(8), 816.
64. Houston, D. R. (1967, 1973, 1981, 1984, 1992). Travaux successifs sur le concept de « maladie du dépérissement » (dieback disease).
65. Houston, D. R. (1973). Diebacks and declines: Diseases initiated by stress, completed by organisms. *Tree Center Journal*, 1 (2), 20–23.
66. Houston, D. R. (1981). *Stress Triggered Tree Diseases: The Diebacks and Declines*. USDA Forest Service, NE-INF-41-81.
67. Houston, D. R. (1984). Stress-related diseases of forest trees. *Journal of Arboriculture*, 10 (5), 137–149.
68. Houston, D. R. (1992). A host-stress-saprogen model for forest diebacks and declines. In *Forest Decline Concepts* (pp. 56–81). APS Press.
69. IML (Institut Méditerranéen du Liège). (2013). *Rapport d'activité sur la régénération des suberaies en Méditerranée*. IML, Perpignan.
70. IML (Institut Méditerranéen du Liège). (2016). *Guide technique du démasclage et de la qualité du liège*. IML, Vivès.
71. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Repor*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report. IPCC, Geneva.
72. Jalas, J., & Suominen, J. (1996). *Atlas Florae Europaeae: Distribution of Vascular Plants in Europe* (Vol. 11: Fagaceae to Betulaceae). Committee for Mapping the Flora of Europe, Helsinki.
73. Landmann, G. (1988). Évaluation de la santé des forêts et concepts de dépérissement. *Revue Forestière Française*, 40 (6), 433–446.
74. Landmann, G. (1994). Dépérissement des forêts : Le point sur les recherches en France et en Europe. *Rendez-Vous Techniques ONF*, 2, 5–18.
75. Landmann, G. (1994). Ecological perspectives for the interpretation of decline and dieback phenomena.
76. Lamey, A. (1893). *Le chêne-liège : Sa culture et son exploitation*. Berger-Levrault et Cie, Éditeurs, Paris.

77. Letreuch-Belarouci, A. (2002). *Les forêts de suberaies en Algérie : Bilan, problématique et perspectives d'aménagement*. Thèse de Magister, Université de Tlemcen.
78. Lombardini, A. (2008). The cork oak forests in the Mediterranean basin: History and silviculture. *Gayana Botánica*, 65(1), 102–115.
79. Manion, P. D. (1981). *Tree Disease Concepts*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
80. Manion, P. D. (1981, 1991). *Tree Disease Concepts*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
81. Manion, P. D. (1991). Evolution of the concept of forest decline. *Phytopathology*, 81(9), 948–951.
84. Marchal, O., & Rondeux, J. (1995). Méthodes de mesure et d'estimation du volume et de la biomasse des arbres. *BASE*, 1(1), 18–30.
85. Massenet, S. (2010). *Gestion durable des forêts de chêne-liège en région méditerranéenne*. ÉcoFor, Paris.
86. Masson, G. (2005). *Précis de sylviculture d'Afrique du Nord*. Éditions Techni-Stems, Casablanca.
87. Matias, L., Castro, J., & Zamora, R. (2019). Regeneration patterns of Mediterranean oaks under climate change scenarios. *Forestry*, 92(4), 411–421.
88. McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yepez, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178(4), 719–739.
89. Médail, F., & Quézel, P. (1999). The biodiversity hotspots of the Mediterranean basin revisited. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 86 (1), 186–204.
90. Messali, A. (2003). *Analyse de la dynamique spatio-temporelle du dépérissement de la forêt de Hafir (Tlemcen)*. Mémoire de Magister, Université de Tlemcen.
91. Messaoudene, M., Derridj, A., & Krouchi, F. (2019). Réponse dendrochronologique du chêne-liège (*Quercus suber* L.) aux fluctuations climatiques en Algérie. *Revue Écologie et Environnement*, 15 (1), 34–46.
92. Naggar, M. (2021). Impact of global change on cork oak (*Quercus suber* L.) decline in North Africa. *Journal of Mediterranean Ecology*, 21 (2), 89–102.
93. **Naggar O., Bouhraoua R.T., TorresE., et Zedek M., 2019**-Etude de l'influence des facteurs du milieu sur la croissance et la production du liège de la subéraie du Parc National de Theniet-El-Had (Tissemsil, Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques*, 342, 2019, 41-54
94. Oliveira, G., & Costa, A. (2012). Estimation of cork production in *Quercus suber* L. stands using climate and tree variables. *Forest Systems*, 21(3), 480–489.

95. Oliveira, G., Martins, A., & Chaves, M. M. (1994). Water relations and gas exchange of *Quercus suber* L. under Mediterranean climate. *Physiologia Plantarum*, 92 (2), 286–292.
96. Paulo, J. A., Palma, J. H., & Tomé, M. (2014). SUBER tool: A decision support system for cork oak management in Portugal. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, 110–118.
97. Pereira, H. (2007). *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier Publications, Amsterdam.
98. Pereira, H. (2011). Biology and harvesting of cork oak. *Industrial Crops and Products*, 34(3), 1255–1262.
99. Pereira, H. (2015). The rational exploitation of cork oak forests. *European Journal of Forest Research*, 134(1), 17–29.
100. Pereira, H., Graça, J., & Baptista, C. (1987). The chemical composition of cork from *Quercus suber* L. *Wood Science and Technology*, 21(4), 299–307.
101. Perreira, H. (2007). The cork oak system: Structure, function and management. *Forest Pathology*, 37(2), 85–99.
102. Pervillé, R. (2003). L'histoire de la suberaie algérienne de la colonisation à nos jours. *Outre-Mers. Revue d'Histoire*, 90(338), 145–162.
103. PNT (Parc National de Tlemcen). (2014). *Plan de gestion du Parc National de Tlemcen (2014–2019)*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Tlemcen.
104. Quézel, P., & Médail, F. (2003). *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Éditions Elsevier, Paris.
105. Rolland, C., Petit-Cailleux, C., Lebourgeois, F., et al. (1999). Réponses morphologiques des arbres en dépérissement : Formation des pousses épicormiques.
106. Rolland, C., Petitolas, F., & Michalet, R. (1999). Changes in radial growth of *Pinus uncinata* and *Quercus suber* during the 20th century. *Trees*, 13(5), 268–279.
107. Saccardy, L. (1935). Note sur le chêne-liège en Algérie. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*, 26, 112–128.
108. Saccardy, L. (1938). *Le chêne-liège et le liège en Algérie*. Service des Forêts d'Algérie, Imprimerie Officielle, Alger.
109. Sauvage, C. (1961). *Recherches phytogéographiques sur le Maroc occidental*. Travaux de l'Institut Scientifique Chérifien, Série Botanique, N° 22, Rabat.
110. Sinclair, W. A. (1964). Comparison of recent declines of white ash, oak, and sugar maple in northeastern Woodlands. *Cornell Plantations*, 20, 62–67.

111. Sinclair, W. A. (1964, 1965). Comparisons of recent declines of white ash, oaks and sugar maple in the northeastern United States.
112. Smahi, H., Belhoucine, L., & Bouhraoua, R. T. (2017). Évaluation des attaques de *Platypus cylindrus* Fab. sur *Quercus suber* L. dans le massif de Hafir. *Journal of Forest Science*, 63 (4), 180–189.
113. Smahi, H., Belhoucine, L., & Bouhraoua, R. T. (2018). Spatio-temporal distribution of wood-boring beetles in a weakened cork oak forest of Tlemcen (Algeria). *Entomological Research*, 48 (5), 390–401.
114. Sousa, E. M. R. (1996). *Contribution à l'étude de la biologie de population de Platypus cylindrus (Coleoptera, Platypodidae) dans les peuplements de chêne-liège au Portugal*. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon, 163 p.
115. Tekkouk, F. (2022). *Cartographie par télédétection de la défoliation et du dépérissement des forêts de suberaies de Hafir*. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen.
116. Touhami, I., Chirino, E., & Bellot, J. (2019). Assessing the impact of climate change on water balance and cork oak growth in North African forests. *Regional Environmental Change*, 19 (5), 1431–1443.
117. Touhami, I., Chirino, E., Aouinti, H., El Khorchani, A., Elaieb, M. T., Khaldi, A., & Nasr, Z. (2019). Decline and dieback of cork oak (*Quercus suber* L.) forests in the Mediterranean basin: A case study of Kroumirie, Northwest Tunisia. *Journal of Forestry Research*. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00974-1>
118. Tuset, J. J. (2002). Enfermedades del alcornoque (*Quercus suber* L.) en España. *Boletín de Sanidad Vegetal Plagas*, 28, 115–130.
119. Tyree, M. T. (1997). The Cohesion-Tension theory of sap ascent: Current status. *Journal of Experimental Botany*, 48 (10), 1753–1765.
120. Tyree, M. T., & Sperry, J. S. (1989). Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40 (1), 19–38.
121. WWF (2008). *Cork Oak Tea: Living Landscapes of the Mediterranean*. WWF Mediterranean Programme Office, Rome.
122. Yassad, S. (2000). *Étude de la dynamique de la croissance du liège dans le massif de Hafir (Tlemcen)*. Mémoire de Magister, Université de Tlemcen.
123. Yessad, S. (2000). *Contribution à l'étude dendrochronologique du chêne-liège dans l'Ouest algérien*. Thèse de Magister, Université de Tlemcen.
124. Zine, E. (1992). *Impact des facteurs climatiques sur le dépérissement de la suberaie de la Mamora*. Thèse de Troisième Cycle, Université Mohammed V, Rabat.

