

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

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

Département des Ressources Forestières

Mémoire de Master

Filière : Sciences Agronomiques

Foresterie : Protection des Forêts

Thème :

**Suivi de l'état sanitaire du chêne liège de
Hafir face à la sécheresse récente**

Présenté par :

BOUDGHENE STAMBOULI Anfal Zayneb

Soutenu le :

28/06/2026

Devant le jury composé de :

Président :

LABIOD Mohammed

MCA. Université de Tlemcen

Encadreur :

BOUHRAOUA Rachid Tarik

Pr. Université de Tlemcen

Examineur :

CHOUIKHI-SMAHI Hadjer

MCA. 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 chaque obstacle sur ce chemin exigeant.

À mes chers parents

*À ma tendre **maman**, pour son amour inconditionnel, ses prières quotidiennes et son soutien infaillible. Que ce travail soit le reflet de ta fierté.*

*À la mémoire de mon cher **père**, qui nous a quittés trop tôt. Bien que tu ne sois plus là pour partager ce moment, ton esprit, tes valeurs et tes sacrifices m'ont guidé à chaque étape. J'espère que, de là où tu es, tu es fier de moi. Ce succès est aussi le tien.*

*À mes frères, **Younes et El Hadi**, ainsi qu'à ma sœur **Asma**, pour leur présence, leur complicité et leur soutien indéfectible. Votre confiance mutuelle, votre amour et votre énergie positive ont été une source de force immense, me portant vers l'avant à chaque étape de ce projet.*

*À ma chère copine, **Zhor**, pour sa patience, ses encouragements précieux et sa présence constante à mes côtés dans les moments de doute comme de réussite.*

*À l'ensemble de ma **famille** et à mes précieux **amis**, qui ont su m'entourer, m'encourager et partager les joies comme les défis de ce parcours universitaire.*

Merci à vous tous d'avoir fait partie de ce voyage.

Remerciements

*Avant tout, je remercie **Dieu**, le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la santé nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.*

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

*Mes sincères remerciements s'adressent également à **Madame Chouikhi** et **Monsieur LABIOD Mohammed** pour avoir honoré mon travail en acceptant de faire partie des membres du jury et d'évaluer ce mémoire.*

*Je tiens à saluer chaleureusement **Monsieur Ledouzi Mohamed**, pour son soutien indispensable, sa force et son aide précieuse sur le terrain lors des campagnes d'échantillonnage. Ce travail de terrain n'aurait pas été le même sans lui.*

*Toute ma reconnaissance va à **Monsieur Benabdallah** pour son aide précieuse, ses compétences et son orientation dans la réalisation des analyses statistiques de cette étude.*

*À mes chers **parents**, les piliers de mon existence : un grand et infini remerciement pour votre présence essentielle dans ma vie, vos sacrifices et votre amour inconditionnel. À ma **famille**, pour son soutien constant.*

*À ma chère copine, **ZHOR**, pour sa présence, ses encouragements et son soutien de chaque instant.*

*À mes **collègues** d'études, pour les moments de partage, d'entraide et les discussions enrichissantes.*

Enfin, je n'oublie pas d'adresser un grand merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenue, encouragée et ont cru en moi. Votre présence, vos mots et vos gestes ont compté plus que vous ne l'imaginez. À vous tous, un remerciement total.

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

Face à la régression de plus de 66 % des subéraies algériennes sous l'effet du changement climatique, ce mémoire évalue l'impact de la sécheresse sur l'état sanitaire de la forêt domaniale de Hafir (Tlemcen) via un suivi pluriannuel (2024-2026) de 90 arbres répartis sur deux stations, combinant les protocoles ARCHI et DEPEFEU, des mesures dendrométriques et des analyses de sol. L'analyse climatique (2019-2025) confirme un stress hydrique sévère avec une pluviométrie interannuelle moyenne de seulement 333,63 mm (minimum de 198,90 mm en 2024) et des pics thermiques estivaux à 33,34 °C. Les résultats révèlent une forte hétérogénéité spatiale : la station 1 (versant nord, peuplement jeune) subit une dégradation alarmante, son déficit foliaire sévère grimpant de 36 % à 69 % entre 2024 et 2025, tandis que la station 2 (versant sud-ouest, futaie adulte) fait preuve de résilience en réduisant sa défoliation critique de 60 % à 36 % grâce aux pluies hiverno-printanières, malgré des attaques du ravageur opportuniste *Platypus cylindrus* sur 16 % des arbres. Ces données valident le modèle de dépérissement en spirale de Manion (1981), où la sécheresse agit comme le facteur déclenchant (induisant embolie xylémique et inanition carbonée), ouvrant la voie aux bioagresseurs secondaires selon la vulnérabilité stationnelle propre (sol, topographie, exposition), ce qui souligne l'urgence de mettre en œuvre des stratégies sylvicoles adaptatives.

Mots-clés : *Quercus suber* L., dépérissement, sécheresse, stress hydrique, forêt de Hafir, Tlemcen, déficit foliaire, embolie xylémique, état sanitaire, changement climatique, *Platypus cylindrus*.

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

In response to the 66% decline of Algerian cork oak forests driven by climate aridification, this thesis assesses the impact of drought on the health status of the Hafir state forest (Tlemcen) through a comparative multi-year monitoring program (2024–2026) of 90 trees across two distinct stations, combining ARCHI and DEPEFEU protocols, dendrometric measurements, and soil analyses. Climate data (2019–2025) highlights a critical water stress with an average rainfall of only 333.63 mm (dropping to 198.90 mm in 2024) and summer temperatures peaking at 33.34 °C. Health outcomes reveal strong spatial heterogeneity: Station 1 (north slope, young stand) shows alarming degradation, with severe foliage deficit rising from 36% to 69% between 2024 and 2025, whereas Station 2 (southwest slope, mature forest) exhibits resilience, reducing critical defoliation from 60% to 36% thanks to winter-spring rainfall, despite opportunistic infestations by *Platypus cylindrus* on 16% of the trees. These findings validate Manion's (1981) spiral dieback model, where drought acts as the triggering factor (inducing xylem embolism and carbon starvation), predisposing weakened trees to secondary pests according to site-specific vulnerability (soil, topography, aspect), which underscores the urgent need for adaptive silvicultural strategies.

Keywords : *Quercus suber* L., dieback, drought, hydric stress, Hafir forest, Tlemcen, foliage deficit, xylem embolism, health status, climate change, *Platypus cylindrus*.

ملخص: تأثير الجفاف على الحالة الصحية للبلوط الفليني: حالة غابة حفير (تلمسان)

في ظل تراجع مساحة غابات الفلين في الجزائر بأكثر من 66% نتيجة لجفاف المناخ، تقيم هذه المذكرة تأثير الجفاف على الحالة الصحية لغابة حفير الدولة (تلمسان) من خلال متابعة مقارنة متعددة السنوات (2024-2026) شملت 90 شجرة موزعة ، وقياسات دندروجرامية، وتحليلات للتربة. أكد التحليل DEPEFEU و ARCHI على محطتين، بالاعتماد على طريقتي المناخ (2019-2025) وجود إجهاد مائي حاد، حيث بلغ معدل الأمطار 333.63 ملم فقط (مع حد أدنى 198.90 ملم عام 2024) وارتفاع الحرارة الصيفية إلى 33.34 درجة مئوية. وأظهرت النتائج الصحية تبايناً مكانياً كبيراً: سجلت المحطة 1 (المنحدر الشمالي، تجمع فتي) تدهوراً مقلّفاً، حيث قفز العجز الورقي الشديد من 36% إلى 69% بين عامي 2024 و2025، في حين أظهرت المحطة 2 (المنحدر الجنوبي الغربي، أشجار بالغة) قدرة على الصمود، حيث انخفض التدهور الحرج من الانتهازية. *Platypus cylindrus* 60% إلى 36% بفضل أمطار الشتاء والربيع، رغم إصابة 16% من الأشجار بحشرة تؤكد هذه المعطيات صحة نموذج مانيون (1981) للتدهور الحلزوني، حيث يمثل الجفاف العامل المحفز (مسبباً انسداد الأوعية الناقلة ونفاذ المخزون الكربوني)، مما يفتح المجال أمام الآفات الثانوية بناءً على هشاشة كل موقع (التربة، التضاريس، والتوجيه)، وهو ما يبرز الحاجة الملحة لتطبيق استراتيجيات حرجية تكيفية.

بلوط الفلين، التدهور، الجفاف، الإجهاد المائي، غابة حفير، تلمسان، العجز الورقي، انسداد الأوعية :الكلمات المفتاحية
Platypus cylindrus الناقلة، الحالة الصحية، التغير المناخي،

Abréviations

APCOR : Association Portugaise du Liège

B.N.E.D.E.R: Buerau National des Etudes de Développement Rural

BSRF : Bulletin de la Station de Recherches Forestières

CEREMA : centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

CFT : Conservation des Forêts de Tlemcen

CNIS : Centre National d'Information et de Statistiques

C.O.I.T. : Conservation d'Oran, Inspection de Tlemcen

CRPFC : centre Régional de la propriété Forestière de Corse

DGF : Direction générale des Forêts

D.S.F Direction de santé des Forêts

ERGR : Entreprise Régionale de Génie Rural

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

IOBC : Organisation Internationale de Controle 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

Liste des figures	
CHAPITRE 1	
Figure1	Aire de répartition du chêne liège dans le monde
Figure2	Aire de répartition du chêne liège en Algérie
Figure3	Evolution de la superficie productive de chêne-liège en Algérie
Figure4	Vue générale d'un chêne liège en peuplement et isolé (gauche: Espagne ; milieu : Hafir-Algérie et droite : Mamora-Maroc)
Figure5	a (bourgeon terminal) ; b (bourgeon axillaire) du chêne liège (Allam, 2025), c (bourgeon épïcormique (flèche) commençant à être enveloppé par le phellème) et d (d (bourgeon épïcormique coupé en coupe oblique montrant que le méristème apical du bourgeon est protégé d'écailles bourgeonnantes se chevauchant)
Figure6	Ramification et état des pousses de chêne liège
Figure7	Feuilles du chêne liège
Figure8	Stomate d'une feuille de chêne liège (x600) à gauche et d'une feuille d'un chêne Suisse à droite
Figure9	Racine pivotante du chêne liège (a : Photo Roula SE, Jijel) , Racines latérales robustes
Figure10	Système architectural des racines du chêne liège
Figure11	a -coupe transversale d'un tronc de chêne liège, webAAA , b -Éléments conducteurs de la sève brute dans les vaisseaux d'angiospermes (Cruiziat et al., 2003 [49], c -vue microscopique d'une coupe transversale du bois de chêne effectuée à la limite de deux cernes , d- Modèle structural des vaisseaux du xylème: La circulation de l'eau d'un élément de vaisseau à l'autre se passe à travers une plaques de perforation 46. 49 e- Photo de microscopie électronique à balayage montrant une structures de ponctuation observées chez les angiospermes f- Représentation schématique du réseau de vaisseau montrant la circulation de l'eau d'un vaisseau (v1) à l'autre (v2) par les ponctuations à travers une paroi primaire (en noir) et une paroi secondaire (en brun)
Figure12	Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction des précipitations
Figure13	Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction de la température
Figure14	Comportement du chêne liège par rapport aux caractères édaphiques
Figure15	Liège de reproduction sur arbre (gauche), planches de liège de reproduction en pile (milieu) et bouchons naturels (droite)
Figure16	Proportion des recettes des exportations mondiales du liège en 2018
Figure17	Evolution annuelle de la production du liège en Algérie durant la période 1965-2020
CHAPITRE II :	
Figure18	Représentation schématique de la spirale du déclin appliquée aux subéraies de l'Ouest algérien
Figure19	Le dépérissement du chêne-liège résulte de multiples interactions

Figure20	Vue générale des processus de transport dans une plante vasculaire. Le xylème permet le transfert de l'eau du sol vers l'atmosphère. Le phloème transporte les molécules organiques des feuilles vers les tissus. Les images en micrographie optique, montrent la section perpendiculaire d'une feuille, du tronc et d'une racine, l'emplacement approximatif du xylème étant marqué en bleu et celui du phloème en orange.
Figure21	Les différentes voies de transport de l'eau dans le mésophylle
Figure22	structure d'une aquaporine végétale
Figure23	le continuum sol/plante/atmosphère
Figure24	Les échanges gazeux à l'interface stomate/atmosphère
Figure25	Représentation des structures cellulaires du xylème et mécanisme de rupture capillaire
Figure26	Schéma du mécanisme de cavitation et d'embolie dans les vaisseaux du xylème de <i>Quercus suber</i>
Figure27	Courbe de vulnérabilité à la cavitation chez <i>Quercus suber</i> . La forme sigmoïde illustre le point de rupture hydraulique.
Figure28	Modèle conceptuel des interactions temporelles et physiologiques entre la défaillance hydraulique (embolie xylémique) et la crise énergétique cellulaire (inanition carbonée) chez les ligneux soumis à une sécheresse létale.
Figure29	Visualisation microscopique de l'embolie de la cavitation au niveau des vaisseaux conducteurs de sève
Figure30	Séquence chronologique des cinq phases du dépérissement de <i>Quercus suber</i>
Chapitre III :	
Figure31	- Situation géographique de la forêt domaniale de Hafir et de ses cantons
Figure32	Précipitation annuelle enregistrée dans la zone d'étude durant les périodes 1915-1934 et 1961-2019
Figure33	Vue générale de la subéraie saine de Hafir
Figure34	forêt domaniale de Hafir wilaya de Tlemcen
Figure35	Suberaie de Hafir dégradée en maquis clair
Figure36	Liège de Hafir en pile (a: tronc récolté en été 2013, b : pile de liège récolté en 2013)
Figure37	Production du liège (quintaux) fournie par la subéraie de Hafir après l'indépendance (trait plein : tendance de la courbe)
Chapitre IV :	
Figure38	vue générale du peuplement du chêne liège à Hafir Tlemcen
Figure39	Vue générale de l'arbre de référence
Figure40	Circonférence sur liège et sous liège dans une section transversale d'une tige $\text{Circonférence sur liège} = \text{Circonférence sous liège} + (2\pi * E)$
Figure41	Différents types du protocole ARCH
Figure42	Protocole de notation de déficit foliaire d'un chêne liège
Figure43	Typologie des classes de transparence du houppier chez le chêne-liège a1(nulle), 2(faible), 3(moyenne), 4 (forte) et 6 (très forte)

Figure44	Différents états de tronc du chêne liège : a (sain), b (sciure xylophage au collet), c (légèrement crevas), d (présence de charbon de la mère), e (tronc sévèrement crevassé), f et g (suintements noirâtres pathologiques)
Figure45	Observation des attaques du <i>Platypus cylindrus</i> au niveau du collet (sciure indiquée par une flèche noire)
Figure46	Méthode de prélèvement des échantillons de rameaux des arbre
Figure47	Différents échantillons de rameaux et de feuilles prélevés sur les arbres
Chapitre V	
Figure48	Localisation géographique des deux stations d'étude S1 et S2 dans la forêt domaniale de Hafir sur Google Mapp
Figure49	Évolution de la pluviométrie annuelle et moyenne interannuelle (2019-2025) à la station de Mansourah
Figure50	Courbes des températures mensuelles moyenne minimale (m°C), maximale (M°C) et moyenne (T°C) enregistrées à Mansourah entre 2019et 2025
Figure51	Conditions climatiques mensuelles (m°C, M°C et Pmm) enregistrées dans la forêt de Hafir
Figure52	Histogramme de distribution des arbres par classes de diamètre dans les deux station d'étude
Figure53	Distribution des arbres par classes de hauteurs totales
Figure54	Distribution des épaisseurs selon le type de liège des 2 sites à Hafir
Figure55	Histogramme de distribution (%) des arbres par classe de déficit foliaire des arbres des deux sites au cours des années 2024 -2025
Figure56	Etat sanitaire général du peuplement du site 1 en 2024
Figure57	Etat sanitaire général du peuplement du site 2 en 2024
Figure58	Distribution des arbres par classe de transparence du houppier en 2024 et 2025 Des deux sites de Hafir
Figure59	Répartition des arbres-échantillons selon les classes de rameaux à bourgeons (RB) et feuillés (RF) des deux sites (Site1 : n= 58 ; site2 : n=17) au cours des années d'inventaire 2024 et 2025 est
Figure60	Anomalies relevées en 2025 sur troncs d'arbres (Photos originales)
Figure61	Projection des paramètres morphologiques, sanitaires et des individus du site 1 sur le plan factoriel (A1xA2)
Figure62	Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique (CAH) des individus basés sur les descripteurs sanitaires et morphologiques de la placette 1
Figure63	Projection des paramètres morphologiques, sanitaires et des individus de la placette P2 sur le plan factoriel Dim1\Dim2.
Figure64	Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique (CAH) des individus de la seconde placette.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Superficie estimée des forêts de chêne-liège dans le monde
Tableau 2 : Panorama de l'état sanitaire des subéraies méditerranéennes
Tableau 3 : Localisation géographique de la forêt domaniale de Hafir (Tlemcen)
Tableau 4 : Coordonnées des stations météorologiques de référence
Tableau 6 : Régime saisonnier des précipitations au niveau de la forêt de Hafir
Tableau 7 : Températures minimales mensuelles durant deux périodes de référence à Hafir
Tableau 8 : Maximums moyens mensuels (M°C) dans 2 périodes de référence à Hafir
Tableau 9 : Températures moyennes mensuelle et annuelle « T°C » durant les deux périodes de références dans la forêt de Hafir
Tableau 10 : Différentes classes de l'épaisseur du liège
Tableau 11 : Classes de notation de déficits foliaires des arbres
Tableau 12 : Autres paramètres sanitaires et architecturaux pris en compte
Tableau 13 : Différents descripteurs utilisés dans l'examen du tronc
Tableau 14 : Différentes catégories de taille des feuille
Tableau 15 : Variables sanitaires et morphométriques soumises à l'ACP
Tableau 16 : Principale caractéristiques géographiques et topographique des site d'étude
Tableau 17 - Résultats de mesures de certains paramètres du sol au niveau de 2 sites
Tableau18 : Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) pendant les 6 années
Tableau 19 : Répartition saisonnière moyenne des précipitations et détermination du régime pluviométrique (2019-2025)
Tableau 20 : Caractéristiques climatiques entre septembre 2025 et avril 2026
Tableau21 : Caractéristiques dendrométriques, forestières et d'exploitation des deux peuplements de chêne liège
Tableau 22 : Données statistiques des mesures des rameaux et feuilles du chêne liège dans les deux sites durant les saisons végétatives 2024
Tableau 23 : Données statistiques des mesures des rameaux et feuilles du chêne liège dans la placette 1 durant les saisons végétatives 2024

INTRODUCTION GÉNÉRALE

À l'échelle planétaire, les changements climatiques contemporains s'affirment comme l'un des défis environnementaux majeurs du XXI^e siècle, altérant en profondeur la structure et le fonctionnement des écosystèmes terrestres (**IPCC, 2021 ; Seidl et al., 2017**). Cette dynamique globale se traduit par une modification drastique des régimes climatiques mondiaux, caractérisée par une élévation continue des températures et une réduction marquée de la disponibilité en eau (**Giorgi et Lionello, 2008 ; Larcher, 2000**).

Ce déficit hydrique croissant, exacerbé par des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes et sévères, pousse de nombreuses essences végétales aux limites de leur tolérance physiologique, déclenchant à l'échelle mondiale des phénomènes préoccupants de dépérissement forestier (**Allen et al., 2010 ; Morin et al., 2018**).

Au sein des écosystèmes du bassin méditerranéen occidental, particulièrement vulnérables à ce manque d'eau chronique, les subéraies à chêne-liège (*Quercus suber* L.) occupent une place prépondérante (**Aronson et al., 2009**). Bien qu'étant une essence sclérophylle biologiquement adaptée aux contraintes thermiques et à l'aridité estivale, la récurrence des sécheresses intenses fragilise aujourd'hui l'état sanitaire global de ces massifs, induisant un dépérissement marqué qui accélère leur dégradation structurelle (**Barbero et al., 1990 ; Thomas et al., 2002**).

En Algérie, ce patrimoine forestier unique traverse depuis nombreuses années une crise écologique profonde (**Messaoudène et al., 2013**). La subéraie nationale subit une régression continue de ses surfaces, où les effets cumulés de la sécheresse s'associent à des facteurs écologiques et pathologiques complexes pour installer un dépérissement progressif et multifactoriel des peuplements (**Bouhraoua et al., 2002 ; Messaoudène et al., 2013 ; Smahi et al., 2017**).

À l'échelle locale, la forêt domaniale de Hafir, située dans la wilaya de Tlemcen (Nord-Ouest de l'Algérie), constitue un véritable écosystème sentinelle face à cette crise environnementale (**Eriksson et al., 2017**). Ce massif subit de plein fouet une baisse critique de sa pluviométrie interannuelle moyenne, passée historiquement de 750 mm à moins de 334 mm, installant un état de sécheresse aiguë et permanent chez les arbres (**Bouhraoua, 2003 ; données stations de Mansourah et Mefrouche, 2024**).

C'est dans ce contexte hautement sensible qu'il devient indispensable de mener des évaluations scientifiques rigoureuses pour apprécier la dynamique évolutive et le niveau de dépérissement de ces peuplements face au changement climatique (**Bréda et al., 2006 ; Eriksson et al., 2017**).

Le présent travail de recherche s'inscrit précisément dans cette démarche académique et professionnelle, en se positionnant comme le prolongement direct et la continuité d'une

première étude de référence. En effet, notre recherche consiste à réaliser un suivi rigoureux de l'état sanitaire et morphométrique des arbres, faisant suite au premier cycle d'évaluation mené lors de l'année 2024. Cette seconde phase d'investigation, basée sur une nouvelle campagne de terrain réalisée entre la fin de l'année 2025 et le début de l'année 2026, permet d'assurer un suivi temporel indispensable pour interroger l'existence d'un changement, valider les tendances à moyen terme, et évaluer la capacité de résilience ou, à l'inverse, l'aggravation du dépérissement du chêne-liège à Hafir face à la persistance de la sécheresse.

La problématique centrale de ce mémoire repose sur la réalisation de ce suivi afin de déterminer s'il existe des changements significatifs dans la trajectoire sanitaire et les réponses morphologiques de Chêne-liège sous l'effet de la sécheresse prolongée et du dépérissement au niveau de la forêt de Hafir. Dès lors, l'objectif principal de notre travail est d'assurer ce suivi de la vitalité des arbres en confrontant directement les dynamiques observées entre les deux cycles d'étude successifs (**Bréda et al., 2006 ; Dehane et al., 2014**).

Plus spécifiquement, nos objectifs consistent à :

Caractériser l'évolution des conditions bioclimatiques récentes de la zone d'étude à partir des données des stations locales,

Évaluer l'état sanitaire et le degré de dépérissement des peuplements échantillonnés en appliquant des protocoles standardisés (méthodes ARCHI et DEPEFEU),

Analyser les descripteurs de vigueur morphologique au niveau de l'appareil végétatif et des rameaux des arbres,

Comparer rigoureusement les données initiales de l'année 2024 avec les nouvelles mesures de terrain et collectées au laboratoire en 2025-2026 afin de dégager des orientations pour une gestion sylvicole adaptative

Pour répondre à ces objectifs, le corps de ce mémoire est structuré de manière progressive en cinq chapitres principaux :

Chapitre I : Généralités sur le chêne-liège (*Quercus suber* L.) – Ce chapitre présente les caractéristiques botaniques et les exigences écologiques fondamentales de l'essence.

Chapitre II : Mécanismes de dépérissement du chêne liège – Dédié à la synthèse bibliographique des concepts de déclin forestier et des mécanismes physiologiques induits par la sécheresse

Chapitre III : Etude du milieu : la forêt domaniale de Hafir – Ce chapitre décrit le cadre physique, géographique et le contexte bioclimatique propre à la forêt de Hafir

Chapitre IV : Matériel et méthodes – Il expose le dispositif expérimental, le protocole de suivi et d'échantillonnage des arbres ainsi que la démarche statistique retenue pour le traitement des données de terrain

Chapitre V : Résultats et discussion – Cette section présente l'analyse croisée et comparative des données, mettant en parallèle le cycle initial de 2024 et notre suivi de 2025-2026 afin d'interpréter l'évolution et les changements de la vitalité des peuplements

Enfin, le travail se termine par une conclusion générale et perspectives de recherche

Chapitre I :

Généralités sur le Chêne-liège

1- Systématique et origine

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.) est une espèce typiquement méditerranéenne, endémique de la Méditerranée occidentale (Zeraia, 1981). Elle est décrite pour la première fois par Linné en 1753 (Natividade, 1956). C'est une espèce appartient à la famille des Fagacées, la sous familles des Quercoidées, et au genre *Quercus*. Ce dernier comprend 200 à 500 espèces dont 6 espèces existantes en Afrique du Nord.

2- Distribution géographique

2.1- Dans le monde

Le Chêne-liège est considéré comme l'une des essences emblématiques de la région méditerranéenne. Il se caractérise par une aire de répartition naturelle relativement restreinte et fragmentée, strictement localisée dans la partie occidentale de la région. En effet, sa répartition déborde sur les côtes atlantiques et finit sur les côtes méditerranéennes (Cantat et al., 2005). Il se rencontre dans 4 pays de d'Europe du sud (Portugal, Espagne, Italie et France) et de l'Afrique du Nord (Algérie, Maroc et Tunisie), (Boudy, 1950 ; Maire, 1961; Quezel et Santa, 1962 ; Shackleton et al., 2015) (Figure 1). Il couvre une superficie totale estimée à 2, 7 millions d'hectares (APCOR, 2019).

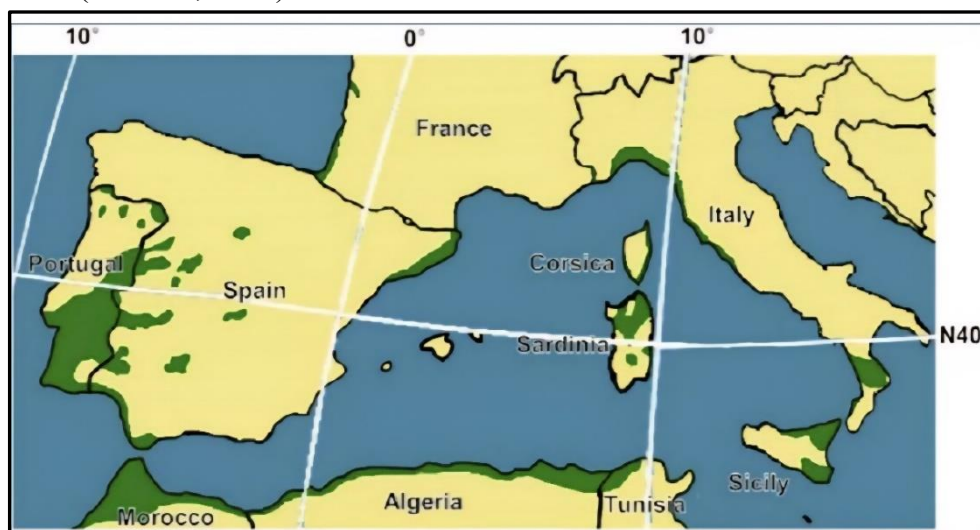


Figure 1 : Aire de répartition du chêne liège dans le monde (Shackleton et al., 2015).

Le tableau 1 suivant illustre les superficies du chêne liège par pays selon l'Association Portugaise du Liège (APCOR, 2019).

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

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

2.2- En Algérie

Le chêne-liège s'étend le long de la bande côtière. Il fait partie intégrale du littoral oriental (dite région à chêne-liège). Les plus vastes massifs sont localisés à l'est du pays, région qui détient à elle seule plus de 4/5 de la subéraie algérienne (Boudy, 1952). Dans cette région, le chêne liège forme un massif en un seul tenant de plus de 130 000 ha allant du Bejaia jusqu'aux frontières tunisiennes (Figure 2). Dans cette bande littorale, il est bien planté dans les wilayas de Bejaia, Jijel, Skikda, Annaba et El Taref.



Figure 2 : Aire de répartition du chêne liège en Algérie (Source : DGF, 2003)

D'autres peuplements moins compacts sont localisés dans le centre (Chlef, Tipaza, Boumerdes) et quelques ilots bien isolés dans le littoral occidental (Dehane, 2012). L'essence fait des incursions dans le Tell sur une distance ne dépassant pas 100 km de largeur. Dans son facies oriental, il se localise à Souk-Ahras, Guelma, El Milia et Constantine. Dans l'Algérois, il se rencontre à Blida, Bouira, Tizi Ouzou, Tipaza, Médèa et Tissemsilt (Teniet El Had).

Dans l'Oranie, la présence du chêne-liège est enregistrée dans 7 wilayas dont Oran. Il couvre une superficie globale de 8 347 ha (Lamey, 1893). Selon cet auteur, la wilaya de Tlemcen se distingue avec la plus vaste étendue, soit 4 881 ha. Dans le facies montagnard, il se cantonne surtout à Tlemcen mais aussi à Mascara, Tiaret et Relizane (Boudy, 1952; Yessad, 2000).

À l'échelle nationale, les subéraies productives algériennes ont subi une régression préoccupante au fil des décennies. La superficie originelle était estimée entre 440 000 et 460 000 ha selon les relevés de Lamey (1893) et le premier inventaire de 1933-35 (Saccardy, 1937 ; Natividade, 1956). Après l'indépendance, les chiffres du premier Inventaire Forestier National (IFN) (1983-84) indiquent une chute drastique atteignant environ 230 000 ha (Zine, 1993) ce qui représente une perte de patrimoine forestier de l'ordre de 48 % (Fig.3).

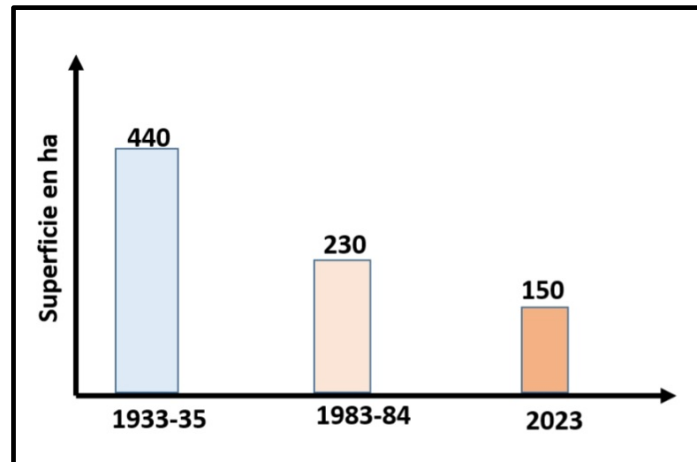


Figure 3 : Evolution de la superficie productive de chêne-liège en Algérie

Les dernières données de la Direction Générale des Forêts (2023) confirment la poursuite de ce déclin, avec une superficie productive désormais estimée à 150 000 ha. Ce chiffre ne représente plus que le tiers (33 %) de l'étendue originelle (Bouhraoua, com. pers.). Le reste du territoire autrefois boisé en chêne liège a subi une dégradation structurelle, se transformant progressivement en formations de maquis dégradés

3-Caractères botaniques et forestiers

Le chêne-liège se distingue au sein du genre *Quercus* par une morphologie singulière, fruit d'une adaptation millénaire aux contraintes du biome méditerranéen. Cet arbre à feuillage persistant et sclérophylle se caractérise principalement par une croissance lente et une architecture plastique, capable de s'adapter à des sites variés (Natividade, 1956).

Sa structure biologique est dominée par le développement d'une assise subéro-phellodermique hyperactive, produisant une enveloppe protectrice de liège qui constitue son trait phénotypique le plus remarquable (Aronson et al., 2009).

3.1-Caractères forestiers

3.1.1-Dimensions et longévité

Le chêne-liège est un arbre de stature moyenne dont le développement métrique est fortement influencé par les conditions stationnelle (climat et sol) et historique de sa gestion sylvicole. Dans des conditions écologiques optimales, il atteint généralement une hauteur comprise entre 10 et 15 mètres, bien que certains individus protégés en forêt dense ou sur des sols profonds puissent culminer à 20 mètres (Boudy, 1952). Son tronc souvent court et tortueux, peut atteindre des diamètres considérables avec l'âge, dépassant parfois un mètre chez les vieux sujets non déliégés (Fig.4).



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

Sur le plan chronologique, *Quercus suber* est doté d'une longévité remarquable pour une essence sclérophylle méditerranéenne. Sa durée de vie moyenne oscille couramment entre 150 et 250 ans (Natividade, 1956). Cette longévité est toutefois intrinsèquement liée à l'exploitation du liège : si un déliégeage raisonné et espacé (tous les 9 à 12 ans) n'affecte pas significativement la survie de l'arbre, une surexploitation ou des blessures répétées du "mère-bois" (le phellogène) lors de la levée peuvent considérablement abrégé son existence en favorisant l'intrusion de pathogènes (Lamey, 1893 ; Aronson et al., 2009). La croissance de l'arbre est globalement lente, mais sa capacité de résilience, notamment face au feu, lui permet de traverser les siècles.

3.1.2- Houppier

Le chêne-liège se caractérise par un tronc court et robuste qui soutient un houppier. Sa tige principale, tortueuse, se ramifie précocement dès sa base en un réseau de grosses branches dont le port est plus horizontal que vertical (Yassad, 2000).

La morphologie de sa cime, souvent irrégulière, s'adapte toutefois à son environnement : elle adopte une forme arrondie et large en milieu ouvert, mais devient fusiforme au sein de peuplements denses ou chez les jeunes individus (Saccardy, 1938 ; Natividade, 1956). Cette structure aérée confère à l'arbre un feuillage relativement clairsemé, dont la perméabilité à la lumière explique la grande richesse et l'abondance du sous-bois associé (Saccardy, 1937 ; Natividade, 1956).

3.2-Caractères botaniques

3.2.1-Bourgeons

Les bourgeons du chêne liège se caractérisent par leur petite taille et leur forme généralement ovoïde ou conique. Ils sont protégés par de nombreuses écailles (cataphylles) imbriquées, de couleur brune ou rougeâtre, souvent recouvertes d'un fin duvet grisâtre (pubescence) qui les protège du dessèchement et des variations thermiques (Boudy, 1950). On distingue principalement les bourgeons terminaux, responsables de l'élongation des rameaux, et les bourgeons axillaires situés à l'aisselle des feuilles (Natividade, 1956) (Fig.5a, b). Une particularité fondamentale de cette espèce réside dans l'existence de nombreux bourgeons épïcormiques (ou dormants), dissimulés sous l'épaisse couche de liège du tronc et des branches maîtresses (Fig.5, c, d) (Burrows et Chisnall, 2016). Ces bourgeons, maintenus en état de dormance sont capables de se réveiller et de produire de nouveaux rameaux après un traumatisme majeur (incendie de forêt ou une défoliation par des ravageurs (Pausas, 1997 ; Moreira et al., 2009). Cette capacité de régénération à partir du tronc fait du chêne-liège un exemple unique de résilience au sein des écosystèmes forestiers méditerranéens.



Figure 5 : a (bourgeon terminal) ; b (bourgeon axillaire) du chêne liège (Allam, 2025), c (bourgeon épïcormique (flèche) commençant à être enveloppé par le phellème) et d (bourgeon épïcormique coupé en coupe oblique montrant que le méristème apical du bourgeon est protégé d'écailles bourgeonnantes se chevauchant) (Burrows et Chisnall, 2016).

3.2.2-Ramification

La ramification du chêne-liège suit un modèle architectural complexe qui contribue à la formation de son houppier caractéristique, large et souvent irrégulier. Le mode de croissance est initialement monopodial chez le jeune sujet, avant de devenir sympodial avec l'âge : l'axe principal finit par perdre sa dominance au profit de branches latérales vigoureuses (Boudy, 1952). Les rameaux de l'année se distinguent par un indumentum dense et grisâtre, une protection pileuse qui s'estompe à mesure que l'assise génératrice (le phellogène) commence à produire les premières couches de liège dès la deuxième année (Natividade, 1956) (Fig.6)



Figure 6 : Ramification et état des pousses de chêne liège (Photo originale février 2026)

Une caractéristique forestière majeure de la ramification chez le chêne liège est sa capacité de réitération. Sous l'effet de la lumière ou suite à des stress (élagage, déliégage, ou passage du feu), l'arbre active des bourgeons dormants situés sur les branches charpentières. Ce processus permet de densifier la structure du houppier et de régénérer des unités architecturales complètes, assurant ainsi une surface foliaire optimale pour la photosynthèse (Aronson et al., 2009). En milieu ouvert, la ramification est souvent dirigée par l'homme via des tailles de formation pour favoriser l'étalement horizontal et faciliter l'extraction future du liège sur les branches principales (Zapata-Lomba, 2010).

3.2.3-Feuilles et feuillage

Le feuillage du chêne liège est de type persistant. Chaque feuille a une durée de vie moyenne comprise entre un et deux ans avant d'être renouvelée. Les feuilles sont alternes, coriaces (sclérophylles) et présentent un limbe de forme variable, généralement ovale-oblongue ou lancéolée, mesurant de 3 à 7 cm de longueur. La face supérieure est d'un vert foncé luisant, recouverte d'une cuticule épaisse et cireuse qui limite la perte d'eau par évaporation cuticulaire (Boudy, 1952). À l'inverse, la face inférieure est d'un gris blanchâtre mat, dû à la présence d'un indumentum dense composé de poils stellaires (trichomes). Ces poils créent une couche d'air immobile qui piège l'humidité et protège les stomates contre un dessèchement excessif lors des vents chauds (Natividade, 1956 ; Joffre et al., 1999).

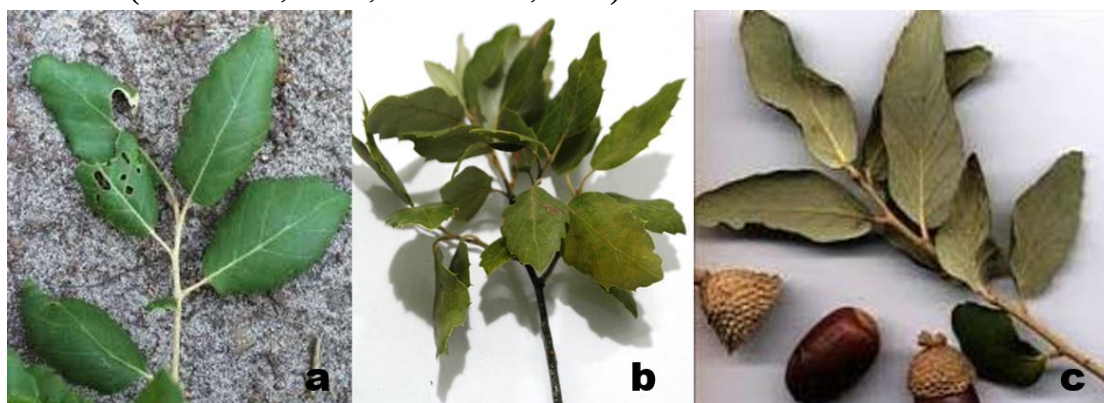


Figure 7 : Feuilles du chêne liège (Allam, 2025)

Sur le plan adaptatif, le feuillage présente un certain polymorphisme : le bord des feuilles peut être entier ou muni de petites dents épineuses, particulièrement chez les jeunes arbres ou sur les rameaux bas pour se protéger du pâturage (Barbéro et al., 1992). La chute des feuilles les plus anciennes a généralement lieu au printemps, coïncidant avec l'apparition des nouvelles pousses. Cette stratégie de persistance permet à l'arbre de maintenir une activité photosynthétique minimale même en hiver, tout en optimisant l'utilisation de l'eau durant l'été grâce à une régulation stomatique très fine (Aronson et al., 2009).

Les stomates de la partie inférieure des feuilles des arbres jouent un rôle déterminant dans la résistance et l'adaptation à un stress hydrique. Elles se ferment lors d'une forte sécheresse pour réduire ainsi le déficit hydrique par évaporation. Chez le chêne liège, le nombre de stomates est élevé de près de 490 par mm^2 (Natividade, 1956) (Fig.8).

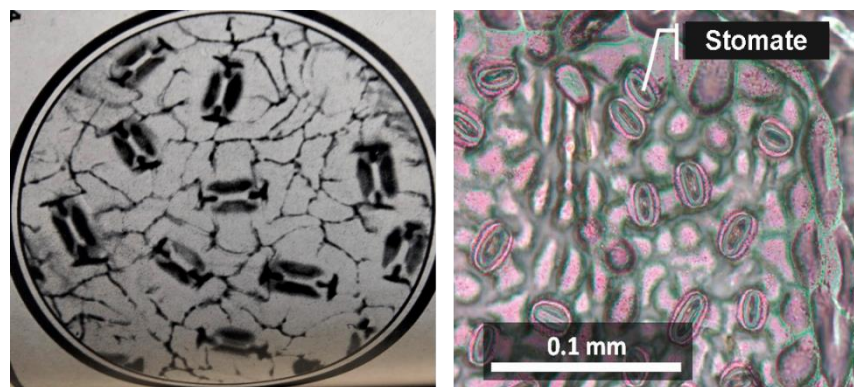


Figure 8 : Stomate d'une feuille de chêne liège (x600) à gauche (Natividade, 1956) et d'une feuille d'un chêne Suisse à droite (Photo : Terence Menard, WSL, WebA).

Ce nombre élevé de stomates et leur enfoncement, la concavité du limbe recroquevillé ou enroulé vers la face inférieure (Fig.7a), la sclérophyllie constituent autant de structures adaptatives visant à empêcher la déshydratation intense durant les fortes chaleurs (**Natividade, 1956**) et requiert à l'arbre alors le caractère de résistance.

3.2.4-Racines et système racinaire

Le chêne liège possède un fort enracinement qui leur permettent de bien résister aux vents mais aussi d'utiliser les réserves alimentaires du sol. Cette utilisation dépend de la profondeur racinaire, ainsi que de sa densité. En effet, le système racinaire comprend :

- 1- une racine principale pivotante robuste (Fig.9 a) : elle se développe généralement sous le tronc et pénètre profondément dans le sol selon sa nature ; elle peut atteindre 1.5 à 2 mètres de profondeur (Natividade, 1955) voire plusieurs mètres sur sol suffisamment perméable (Saccardy, 1937 ; Boudy, 1950).
- 2- nombreuses racines latérales (Fig.9 b,c): *ce sont des racines secondaires superficielles* fortes et longues qui fixent l'arbre solidement même dans les sols les plus rocheux (Saccardy, 1937 ; Natividade, 1956).



Figure 9 : Racine pivotante du chêne liège (a : Photo Roula SE, Jijel) , Racines latérales robustes (b.c : Dinis, 2014)

La représentation en 3D de la distribution du système racinaire du chêne liège montre que la majorité des racines se développent principalement et prioritairement dans les couches supérieures de sol avant d'aller en profondeur. Ainsi, la majorité de la densité racinaire (près de 80%) se concentre sous la projection de la canopée de l'arbre sur une profondeur de 0.40m pouvant atteindre 1.40m. Par contre horizontalement, les racines (latérales) s'étendent de l'arbre sur une distance 4 fois plus large que la projection au sol du houppier (Fig.10) (Dinis, 2014).

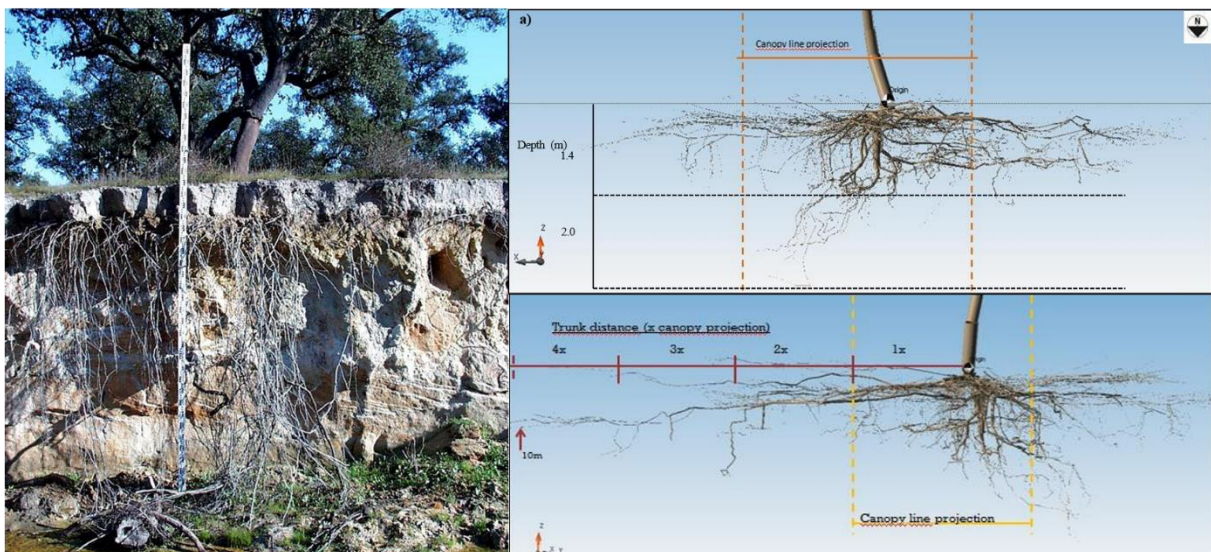


Figure 10- Sy Système architectural des racines du chêne liège : Gauche (Example of a cork oak root system accidentally exposed after bank collapsing during a flood. Numerous very long surface roots are well visible in the soil layer of 0.5-0.8 m. There are also several sinkers visible extending to soil depths deeper than 5 m (Nadezhdina & al., 2008), Droite : Extension latérale et profonde des racines en 3D de chêne liège (Dinis, 2014).

De manière générale, le réseau racinaire des arbres dont le chêne liège décroît en profondeur ce qui conduit à un déplacement des horizons exploités au cours du temps [Desmet, 2024]. En effet, les racines au cours de leur croissance, se propagent dans l'ensemble du profil du sol principalement à un niveau superficiel ou horizontale et progressivement à un niveau plus profond. Ceci démontre la capacité de l'arbre d'explorer simultanément les différents niveaux du sol afin d'optimiser l'intégralité de l'eau de la réserve et les éléments nutritifs (Dinis, 2014).

L'appareil souterrain représente donc un investissement biologique majeur. La biomasse des racines est souvent équivalente à celle des parties aériennes de l'arbre (Dinis, 2014). Au-delà de l'ancrage mécanique, les racines charpentières forment un réseau de vaisseaux essentiel à la conduction de l'eau, des nutriments et des métabolites (Danjon et Reubens, 2008 ; Dinis, 2014). Elles agissent également comme un système de stockage d'énergie vital pendant les périodes de dormance (Pagès, 2002 ; Dinis, 2014). L'interface intime entre l'arbre et le sol, facilitée par les racines fines et les poils absorbants, est ce qui garantit l'approvisionnement nécessaire à la santé, à la croissance et à la survie de l'espèce dans des environnements contraints dont le déficit hydrique induit par la sécheresse (Dinis, 2014).

3.2.5-Bois et système de circulation de l'eau

Le bois ou xylème est un ensemble de tissus cellulaires, de consistance plus ou moins dure, formant la masse principale du tronc des arbres. Il est généralement brun clair à brun rougeâtre, lourd, compact et peu homogène (Fig.11a). La structure du bois du chêne liège est similaire à celle des autres angiospermes dont les chênes à feuilles persistantes (Natividade, 1956). Il est très complexe et constitué de différents types de cellules : 1) vaisseaux et trachéides (rôle de conduction), 2) fibres ligneuses : typiques, libriformes, trachéiformes : rôle de soutien) et 3) parenchyme ligneux (Natividade, 1956 ; Awad, 2011).

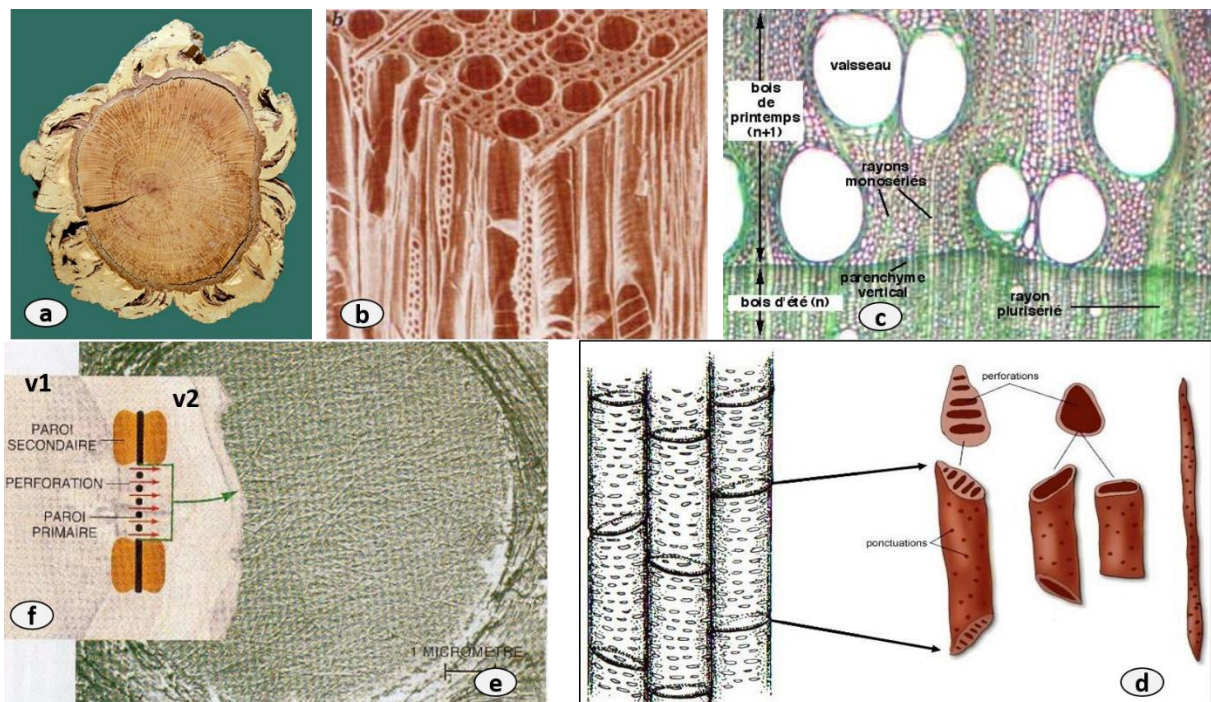


Figure11 - **a**-coupe transversale d'un tronc de chêne liège, webAAA , **b**-Éléments conducteurs de la sève brute dans les vaisseaux d'angiospermes (Cruiziat et al., 2003 [49], **c**-vue microscopique d'une coupe transversale du bois de chêne effectuée à la limite de deux cernes , **d**- Modèle structural des vaisseaux du xylème: La circulation de l'eau d'un élément de vaisseau à l'autre se passe à travers une plaques de perforation 46. 49 (Tyree et al., 2002 ; Awad, 2011) **e**- Photo de microscopie électronique à balayage montrant une structures de ponctuation observées chez les angiospermes (Awad, 2011) **f**- Représentation schématique du réseau de vaisseau montrant la circulation de l'eau d'un vaisseau (v1) à l'autre (v2) par les ponctuations à travers une paroi primaire (en noir) et une paroi secondaire (en brun) (Cruiziat et al., 2002).

Les vaisseaux ligneux se présentent sous forme d'un réseau uniforme de fibres (Fig.11b) (Cruiziat et al., 2003). Ils sont constitués des cellules mortes organisées en éléments de vaisseaux, allongées verticalement et de longueur variable. Ils sont formés surtout au printemps mais aussi en été en prenant une disposition générale annulaire et le bois est dit annelé ou à anneaux poreux. (Fig.11c) (46).

L'eau circule d'un élément de vaisseau à l'autre en passant par une plaque perforée aux extrémités et accolées les unes aux autres en longues files longitudinales (Fig.11d) (Awad, 2011). Les perforations sont simples à section transversale circulaire ou elliptique (Natividade, 1956). Le diamètre des vaisseaux varie entre 0.15mm (bois de printemps : très fort diamètre qui assure la conduction) et 0.012mm (bois d'été-automne : très faible diamètre) (Fig.11c) . (Natividade, 1956) .

Les parois de vaisseaux sont épaisses et lignifiées et comportent de nombreuses ponctuations facilitant le passage de la sève brute entre les vaisseaux du xylème (Zimmermann and Brown, 1971) (Fig.11d) mais aussi protégeant le système vasculaire contre la propagation de bulles d'air responsables d'embolie et d'agents pathogènes dans (Choat et al., 2008 : 46).

4-Ecologie

Le chêne-liège occupe une place prépondérante au sein des écosystèmes forestiers méditerranéens. Essence d'une grande valeur patrimoniale et économique, le chêne-liège présente des exigences écologiques relativement strictes qui conditionnent sa présence : il se cantonne principalement aux zones sous influence maritime, fuyant les froids continentaux et les sols calcaires. Sa biologie unique, marquée par la production d'une écorce protectrice suberneuse, en fait un modèle d'adaptation face aux contraintes de son milieu, notamment le feu.

4.1-Exigences climatiques

4.1.1-Précipitations

Le chêne-liège manifeste une remarquable plasticité phénotypique vis-à-vis des apports hydriques, tolérant une amplitude pluviométrique considérable allant de **440 à 2000 mm** par an (Loup, 1962 ; Yassad, 2000) (Fig.12). Cette large tolérance s'explique par l'adaptation de l'espèce aux nuances du climat méditerranéen : si le littoral reçoit l'essentiel de ses précipitations durant la période automno-hivernale, les zones montagneuses enregistrent un maximum entre l'hiver et le printemps (Yassad, 2000).

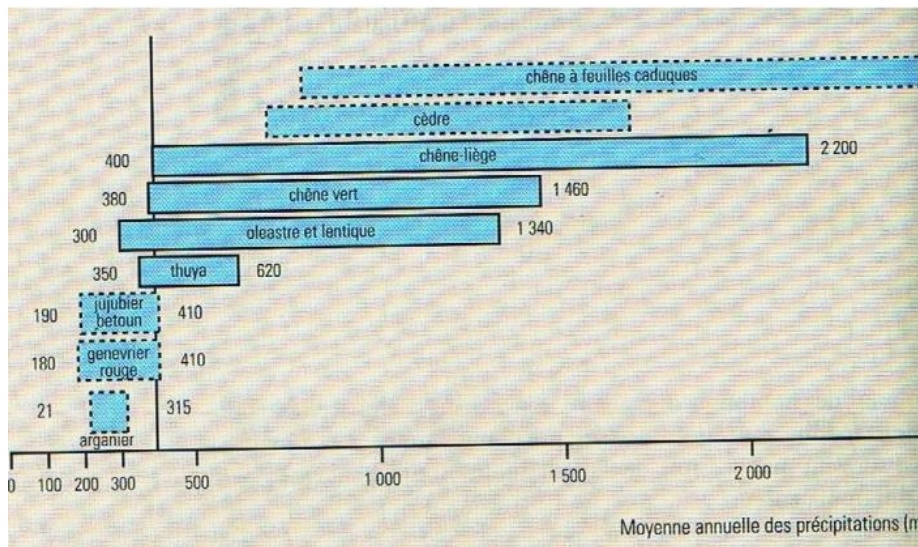


Figure 12 : Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction des précipitations (Yassad, 2000 in Sauvage, 1961)

Bien qu'une tranche comprise entre **600 et 1200 mm** soit optimale pour le développement de l'essence, un déficit pluviométrique assez marqué (**400-600 mm**) déclenche le ralentissement de la croissance de l'arbre et la réduction de la production subéreuse. Le seuil critique des pluies pouvant déclencher le phénomène de dépérissement est généralement atteint en deçà de **400 mm** (Boudy, 1950 ; Natividade, 1956 ; Vignes, 1990). Toutefois, l'arbre peut subsister sous ces faibles précipitations à condition de bénéficier d'une forte humidité atmosphérique compensatoire, comme c'est le cas sur les façades atlantiques et littorales (Loup, 1962).

4.1.2- Températures

Le chêne-liège se caractérise comme une essence mésotherme, s'épanouissant sous des climats aux températures moyennes annuelles tempérées. Son développement optimal est observé dans une fourchette comprise entre 13°C et 19°C (Yassad, 2000). Bien qu'il présente un tempérament relativement thermophile, les relevés indiquent que la moyenne annuelle des températures maximales durant le mois le plus chaud se situe généralement entre 22°C et 27°C (Fig.13).

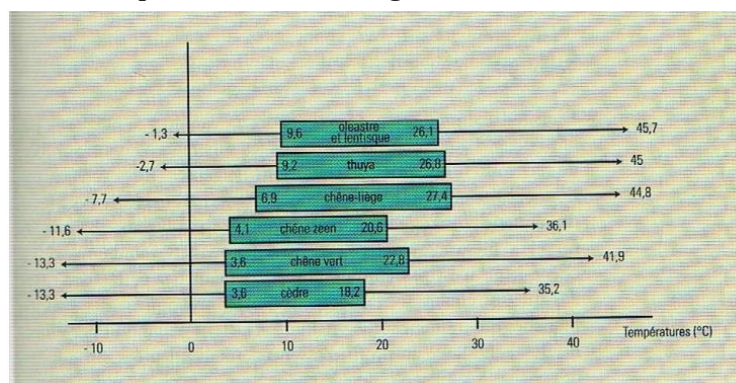


Figure 13 : Position du chêne liège par rapport à quelques autres espèces du bassin méditerranéen en fonction de la température (Yassad, 2000)

S'agissant de sa résistance aux pics de chaleur, le chêne liège est capable d'endurer des épisodes caniculaires ponctuels de quelques jours, avec des températures oscillant entre 35°C et 40°C (étés très chauds à caniculaires). Les valeurs maximales extrêmes de la période estivale sont principalement relevées dans les zones de basse altitude (Quezel, 2000 ; Yassad, 2000).

À l'inverse, le chêne-liège manifeste une sensibilité notable au froid. Pour une croissance saine, la moyenne annuelle des minima du mois le plus froid ne devrait idéalement pas chuter en dessous de 3°C (Boudy, 1950 ; Vignes, 1990). En règle générale, ces valeurs minimales fluctuent entre 6,9°C en zone montagneuse et 15°C sur le littoral (Fig.13) caractérisant des hivers tempérés à chauds. L'espèce tolère mal l'hiver froid avec des moyennes inférieures à 0°C et craint particulièrement les gelées persistantes. Enfin, l'exposition à des froids intenses, atteignant -7°C à -9°C pendant seulement un ou deux jours, s'avère préjudiciable pour sa survie (Boudy, 1952).

4.1.3-Humidité de l'air

Bien qu'il soit xérophile, le chêne-liège nécessite une forte humidité atmosphérique de l'ordre de 60% même en saison sèche (Cantat et al., 2005). Le long de la côte, l'humidité relative est forte en toutes saisons avec une moyenne de 75% (Yassad, 2000).

D'après ce même auteur, à l'intérieure, l'humidité est très variable selon le lieu, la saison et le moment de la journée. Elle est toujours comprise en été entre 35 et 50%.

4.2-Exigences pédologiques

Le chêne liège préfère se développer sur des substrats légers comme les sols siliceux dont les grès numidiens et les sables pliocènes. Le sol doit être dépourvue de calcaire, frais, aéré, bien drainé, profond et de fertilité moyenne. Le pH est légèrement acide ou voisin de la neutralité entre 6 et 6.5 (Fig.14).

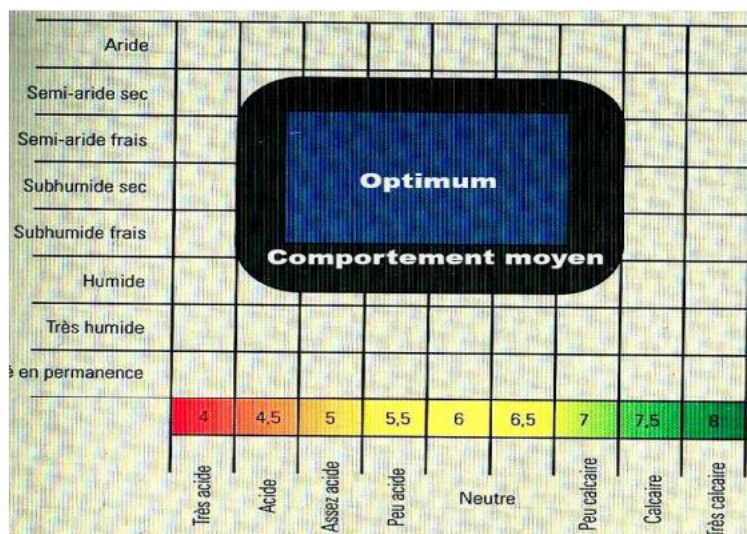


Figure 14- Comportement du chêne liège par rapport aux caractéristiques édaphiques (Yassad, 2000)

Les sols lui convenant le mieux sont les sols bruns forestiers acide à lessivés (début lessivage des argiles) et à texture sablo-argileuse.

Les sols les plus favorables sont ceux avec une teneur en sable supérieure à 50%. Par contre, les argiles et les substrats granitiques légèrement argileux lui sont défavorables (argile >15%). Les formations édaphiques adéquates sont plus ou moins imperméables ou comportant des niveaux d'accumulation des eaux souterraines. Le chêne liège pousse rarement sur un sol sans eau libre.

L'optimum écologique du chêne-liège se trouve satisfait dans les étages bioclimatiques méditerranéens subhumide et humide. Par contre, il est à sa limite écologique inférieure dans l'étage semi-aride sec (Boudy, 1952 ; Natividade, 1956 ; Quezel, 2000 et Yassad, 2000).

5- Importance des forêts de chêne-liège

5.1- Intérêt général des forêts de chêne-liège

Le chêne-liège constitue un patrimoine forestier d'une valeur inestimable pour l'équilibre écologique méditerranéen, agissant comme un véritable rempart contre la dégradation des sols et l'instabilité bioclimatique (Bouhraoua, 2003). L'importance de ces écosystèmes réside avant tout dans leur capacité à maintenir des services systémiques essentiels, notamment la protection des bassins versants et la régulation du cycle de l'eau, particulièrement dans les zones vulnérables au stress hydrique (Bouhraoua et al., 2014). Sur le plan biologique, les travaux de recherche ont montré que la santé de la subéraie est le garant de sa biodiversité. Cependant, cette stabilité est aujourd'hui menacée par un dépérissement complexe où les facteurs abiotiques dont la sécheresse exacerbent l'impact des ravageurs xylophages, réduisant ainsi la résilience globale du massif (Bouhraoua & Villemant, 2005).

Au-delà de l'aspect conservatoire, l'importance économique du chêne-liège est indissociable de la qualité du produit « liège ». C'est une ressource renouvelable dont la croissance et la structure cellulaire sont directement influencées par l'état physiologique de l'arbre et les techniques de levée (Bouhraoua, 2011).

Enfin, dans un contexte de changement climatique global, ces forêts jouent un rôle crucial de puits de carbone, bien que leur pérennité nécessite une gestion sylvicole adaptative et des stratégies de reboisement rigoureuses pour compenser les échecs fréquents de la régénération naturelle (Bouhraoua et al., 2014 ; 2019)

5.2- Importance économique du liège

L'importance économique du liège réside dans son statut de matière première stratégique et renouvelable pour l'industrie de transformation. Il constitue le pivot du développement durable dans les zones rurales méditerranéennes. Au-delà de ses propriétés physiques uniques qui le rendent indispensable à l'industrie bouchonnière et aux secteurs de pointe (isolation thermique, aérospatiale), le liège assure la viabilité financière des massifs forestiers en permettant une exploitation cyclique sans abattage. (Bouhraoua 2011). Cette importance est intrinsèquement liée à la qualité technologique de la ressource : un état sanitaire préservé garantit une production

à haute valeur ajoutée, soutenant ainsi une filière industrielle capable de générer des emplois stables et de freiner l'exode rural dans les régions montagneuses de l'Ouest algérien (Bouhraoua et al., 2014) (Fig. :15)



Figure 15 : Liège de reproduction sur arbre (gauche), planches de liège de reproduction en pile (milieu) et bouchons naturels (droite) (Photos, Bouhraoua)

5.2.1-Dans le monde

Le liège est le 6^{ème} PFNL exporté au monde. Les exportations génèrent près de 1.7 milliards d'euros de chiffre d'affaire annuel dont 70% provient du bouchon naturel et ce à partir d'une production de 200 mille tonnes (Fig.16) (APCOR, 2019).

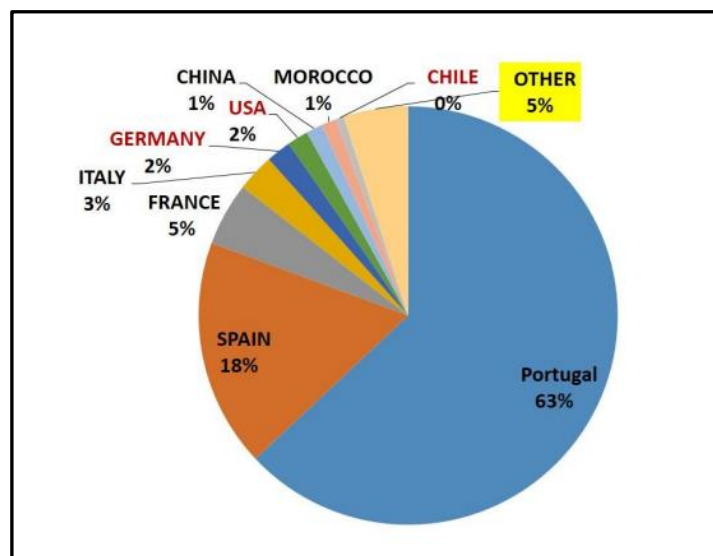


Figure 16 : Proportion des recettes des exportations mondiales du liège en 2018 (APCOR, 2019)

D'après les données présentées dans cette figure, le Portugal s'affirme comme le leader mondial incontesté de la filière avec 63 % des recettes totales suivie par l'Espagne avec une part de 18 %. Du marché mondial. À l'opposé, les pays du Maghreb affichent des résultats très modestes. En effet, le Maroc occupe la première place avec 1 % des revenus, tandis que l'Algérie et la Tunisie générant des taux insignifiants ou très faibles.

5.2.2-En Algérie

L'Algérie possède l'une des plus vastes subéraies au Maghreb. Elle se classe historiquement au troisième rang mondial en termes de superficie avec environ 440 000 hectares. Cependant, la filière fait face à des défis importants pour transformer ce potentiel naturel en une valeur économique stable.

En effet, la filière du liège en Algérie est actuellement marquée par une dynamique régressive de sa production. L'analyse historique révèle que sur une période de 57 ans (1964-2020), la forêt a fourni plus de 627 000 tonnes, soit une moyenne annuelle de 11 000 tonnes (DGF, 2021). (Fig. 17).

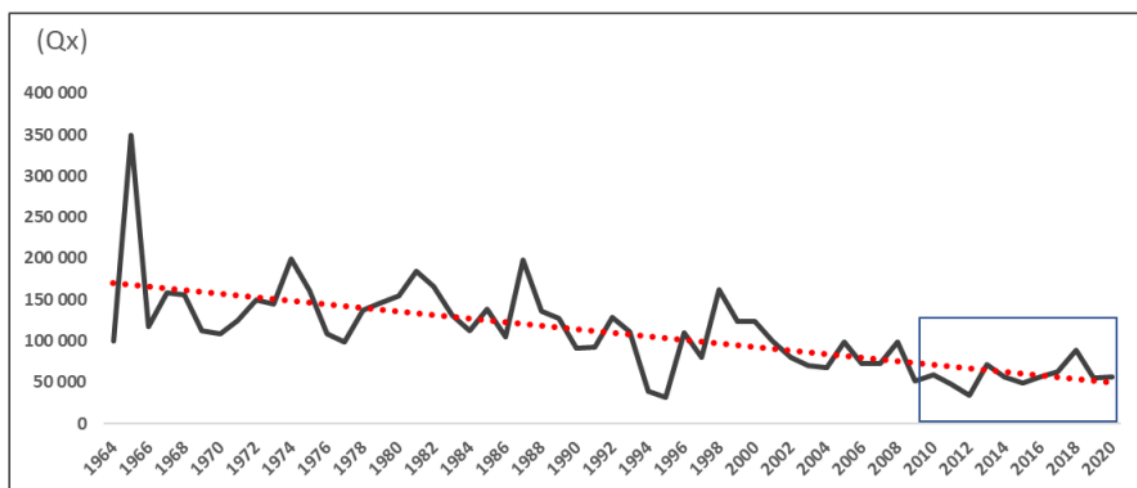


Figure 17 : Evolution annuelle de la production du liège en Algérie durant la période 1965-2020 (DGF, 2021)

Toutefois, cette performance s'est effondrée durant la décennie 2009-2020, avec une production plafonnant à 6 000 tonnes, ce qui représente à peine 52 % de la période de référence. Ce déclin est d'autant plus significatif si l'on considère qu'entre 1930 et 1959, la subéraie algérienne fournissait environ 30 000 tonnes par an (Marc, 1930 ; Chenel, 1951). Ainsi, la production contemporaine ne couvre que 37 % du potentiel théorique de la forêt, un taux qui a chuté à seulement 20 % au cours des dernières années.

Globalement, l'écosystème de la subéraie en Algérie, bien qu'il représente un patrimoine forestier et économique d'une valeur inestimable, traverse une phase de vulnérabilité critique marquée par plusieurs facteurs : feux de forêt récurrents, système de gestion et d'exploitation du liège aggravé par le phénomène de dépérissement multifactoriel.

Ce déclin ne peut être attribué à un événement isolé, mais résulte plutôt d'une synergie dévastatrice entre des pressions climatiques extrêmes, des agressions biologiques persistantes et une gestion anthropique souvent inadaptée. La compréhension de ces mécanismes est essentielle pour envisager toute stratégie de restauration durable de la production de liège.

6-Principaux facteurs de dégradation de la subéraie

Le stress hydrique et les changements climatiques : Le stress hydrique induit par le déficit hydrique suite aux changements climatiques est la cause fondamentale et déclenchante du phénomène de dégradation de la santé des arbres. Il résulte de l'exacerbation des périodes de sécheresse et l'augmentation des températures, qui induisent un stress physiologique sévère chez les arbres. La conséquence de telle situation est la réduction de leurs capacités de défense naturelle contre les autres agresseurs de nature biotique (pathogènes et xylophages) et abiotique (canicule, ect) (Martínez-Vilalta et al., 2002)

Les attaques d'insectes ravageurs : Le déficit hydrique affaiblit souvent l'arbre et facilite l'installation d'insectes xylophages, principalement le Platype (*Platypus cylindrus*). Les galeries produites par les adultes interrompent le flux de sève brute (Belhoucine et al., 2011). Parallèlement à ces foreurs de bois, d'autres ravageurs tels que la *Lymantria dispar* (Bombyx disparate) provoque des défoliations périodiques en phase de gradation qui épuisent les réserves énergétiques de l'arbre, limitant sa croissance et la formation du liège (Bouharaou et al., 2002).

La récurrence des incendies de forêt : Le passage répété des feux de forêt, bien que le liège soit un isolant, finit par détruire l'assise génératrice de l'arbre et modifie la structure du sol, favorisant l'érosion et la perte de nutriments essentiels (Meddour-Sahar, 2012). Le taux de mortalité des arbres est fonction de la sévérité du feu et l'épaisseur du liège (Lamey, 1894 ; Bouazzaoui et Bouhraoua, 2020 ; Roula et al., 2020).

La pression du pâturage : L'occupation anarchique des forêts par le bétail constitue un frein majeur car les animaux consomment les jeunes plants, les jeunes rejets de souches et les glands. Ceci inhibe toute tentative de régénération naturelle du chêne liège et conduit au vieillissement irréversible des peuplements (Boudy, 1950 ; Derridj, 1996 ; Roula et al., 2020).

Les blessures causées par la récolte du liège (démasclage) servent de portes d'entrée à des champignons pathogènes comme le *Hypoxylon mediterraneum* (charbon du chêne), qui accélère la nécrose des tissus corticaux (Belhouadjeb et al., 2018).

L'insuffisance des interventions sylvicoles : Le manque de travaux d'entretien, tels que le démaquisage sélectif et l'élagage, entraîne une fermeture excessive du milieu, augmentant la concurrence pour l'eau et créant un réservoir de combustible dangereux pour les incendies (Ghalem, 2015).

Le vieillissement et la sénescence des massifs : Une grande partie de la subéraie algérienne est composée d'arbres ayant dépassé leur âge de maturité productive, les rendant naturellement plus sensibles aux agressions extérieures et moins aptes à produire un liège de qualité (Zine, 1992 ; DGF, 2021).

L'impact des techniques de récolte inadaptées : Les opérations de levée du liège effectuées par une main-d'œuvre non qualifiée peuvent blesser la "mère" (le liber), provoquant la mortalité des arbres, l'installation des chancre qui condamnent la production future et affaiblissent l'arbre (I.M.L, 1997).

CHAPITRE II :
Mécanismes de dépérissement du chêne liège

1- Fondements conceptuels du dépérissement

1.1-Évolution historique du concept

Le concept de dépérissement forestier s'appuie sur un cadre théorique progressivement établi depuis le milieu du XXe siècle. En **1967 (Houston)** a formulé l'idée fondatrice d'une « maladie induite par le stress », stipulant qu'un arbre exposé à des stress récurrents s'affaiblit jusqu'à devenir vulnérable aux agents secondaires, ce qui peut mener à sa mort. Ce modèle, approfondi au fil des décennies (**Houston, 1973, 1981, 1984, 1992**), définit le dépérissement comme une pathologie banale qui s'articule autour du triangle classique de la phytopathologie : l'interaction entre l'hôte, le pathogène et le milieu environnemental.

1.2. Définition et caractéristiques générales

Le dépérissement forestier ne saurait être réduit à une simple pathologie végétale. Il s'agit d'un syndrome complexe et multifactoriel causé 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, ultimement, de la mortalité de l'individu (**Manion, 1991**). Ce phénomène se distingue d'une maladie végétale ordinaire par plusieurs caractéristiques fondamentales :

- Plusieurs catégories de facteurs (climatiques, édaphiques, biotiques, anthropiques) interagissent simultanément ou successivement pour produire le phénomène ;
- Ce n'est pas un agent adverse unique qui en est la cause, mais une combinaison de perturbations qui s'accumule au fil du temps ;
- Il se traduit par une dégradation progressive de la biomasse foliaire et une diminution des accroissements radiaux, finissant par entraîner la mort de l'individu ;
- Les facteurs climatiques et stationnels sont presque toujours présents comme éléments prédisposants, déclenchant ou aggravants selon l'état de santé de l'arbre affecté (**Landmann, 1994**) ;
- Les champignons et insectes opportunistes interviennent systématiquement comme facteurs exacerbants (**Landmann, 1994**) ;
- Les symptômes persistent et s'intensifient sur plusieurs années, ce qui les rend discernables d'une réaction temporaire à un stress ponctuel.

1.3. État sanitaire et dynamique de régression des subéraies en Algérie

La crise sanitaire affectant les écosystèmes à *Quercus suber* L. en Algérie n'est pas un phénomène récent. Ses prémices ont été documentées dès l'aube du XXe siècle. Les premières manifestations de **dépérissement** ont été observées de manière non discriminante, touchant aussi bien les jeunes recrues de moins de 15 ans que les individus sénescents (**Anonyme, 1914a, b**). Vers le milieu du siècle, cette dégradation s'est généralisée, se traduisant par un affaiblissement physiologique sévère au sein de nombreux peuplements (**Boudy, 1955 ; Natividade, 1956**).

Cette dynamique délétère, persistante jusqu'à la fin des années 1990, a provoqué une mutation paysagère majeure : le passage par dégradation de la forêt climacique vers des stades de substitution de type **maquis**, impactant près de 50 % des superficies initiales (**Zine, 1992**).

À partir de la décennie 1980, le phénomène a connu une accélération alarmante, exacerbant la vulnérabilité des peuplements préalablement fragilisés. Aujourd'hui, l'intégrité écologique de la majorité des subéraies algériennes est jugée critique (**Messaoudène, 2000**). Les indicateurs statistiques confirment cette tendance régressive : les surfaces de subéraies productives sont passées de 450 000 ha (**Boudy, 1955**) à environ 230 000 ha (**D.G.F., 2009**), actant une perte d'actif forestier de près de 50 % en seulement cinquante ans.

2. Les déterminants du dépérissement — Le modèle de Sinclair (1964).

Le modèle de Sinclair (souvent complété par **Manion en 1981**) structure le déclin des arbres en trois catégories de facteurs chronologiques (Fig.18). Pour le chêne-liège en Méditerranée, ce modèle sert de cadre de référence pour diagnostiquer la perte de vigueur des peuplements.

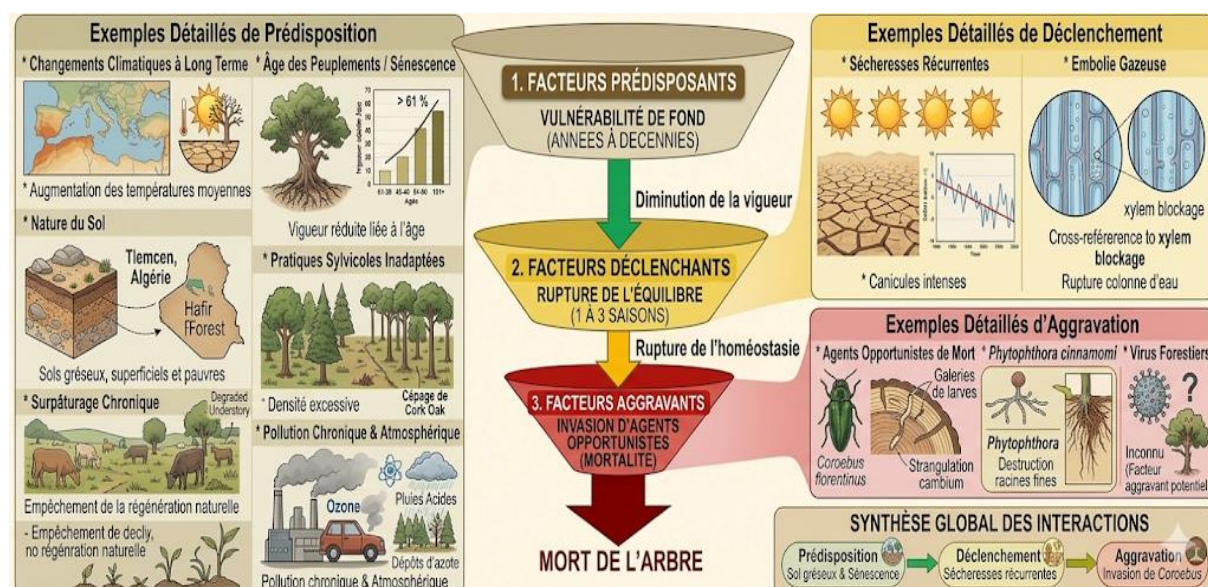


Figure 18 : Représentation schématique de la spirale du déclin de **Manion (1981)**, appliquée aux subéraies de l'Ouest algérien.

2.1- Les facteurs prédisposants : Une vulnérabilité de fond

Les facteurs prédisposants sont dits statiques ou permanents. Ils ne tuent pas l'arbre instantanément, mais ils le placent dans un état de stress chronique. Ils réduisent la capacité de l'arbre à résister aux chocs futurs (comme une sécheresse sévère ou une attaque d'insectes).

2.1.1-Facteurs environnementaux et stationnels

Changement climatique global : L'aridification progressive du bassin méditerranéen modifie l'équilibre hydrique sur le long terme.

Conditions édaphiques (Sols) : La qualité du support est cruciale. Dans des régions comme Tlemcen, les sols gréseux, superficiels et pauvres limitent les réserves en eau et en nutriments.

Sur les crêtes, la faible profondeur du sol accentue la sensibilité des arbres au manque d'eau.

2.1.2-État biologique des peuplements

Sénescence (Vieillessement) : Un arbre âgé a un métabolisme plus lent et une capacité de régénération tissulaire réduite. En Algérie, plus de 61 % des subéraies sont considérées comme âgées, ce qui constitue une fragilité structurelle majeure (**Zine, 1992, Bouhraoua et Villemant, 2005**).

2.1.3-Pressions anthropiques et gestion subéricole

L'homme joue un rôle prépondérant dans la prédisposition du chêne liège au dépérissement. On cite :

a-Surexploitation du liège : La levée du liège est un traumatisme physiologique. Lorsque le rythme est trop intense (plus de 9 récoltes pour 70 % des arbres), l'arbre s'épuise et par conséquent s'affaiblit (**Zine, 1992**),

b-Mauvaise exploitation du liège : La mauvaise qualité de récolte du liège (arrachage du phelloderme) et les blessures commises aux arbres sont à l'origine de dépérissement des arbres voire leur mortalité surtout après un incendie de forêt (**Ben Jemaa, 2014 ; Roula et al., 2020**),

Surpâturage : La pression constante du bétail empêche le renouvellement de la forêt en détruisant les jeunes semis, laissant une forêt vieillissante sans relève.

2.2-Les facteurs déclenchants

Les facteurs déclenchants se caractérisent par une action sévère s'étalant sur une durée brève, généralement comprise entre une et trois saisons. En zone méditerranéenne, ce phénomène est majoritairement illustré par la sécheresse édaphique (déficit d'eau dans le sol).

D'après les travaux de **Toumi et al. (2018)**, la répétition d'années en sous-frais pluviométrique entraîne une rupture de la continuité de la colonne d'eau au sein des vaisseaux du xylème. Ce phénomène, appelé **embolie gazeuse** (est un seuil critique pour l'arbre). Lorsque la tension dans le xylème devient trop forte, des bulles d'air se forment et bloquent la circulation hydraulique ; elle empêche l'ascension de la sève brute vers le houppier. Outre la sécheresse, d'autres événements peuvent jouer ce rôle de déclencheur, notamment : 1) Les épisodes de gel tardif ; 2) Les attaques massives d'insectes défoliateurs tel que *Lymantria dispar* et *Tortrix viridana* (**Villemant et Fraval, 1999 ; Chakali et al., 2002**), 3) Les incendies de forêt (**Bouhraoua et al., 2019**).

2.3. Les facteurs aggravants

Les facteurs aggravants, sont principalement d'origine biotique. Ils affectent les arbres dont la vigueur est déjà compromise par les facteurs prédisposant et déclenchants. Dans le contexte spécifique des forêts de chêne-liège, deux types d'agents pathogènes sont particulièrement identifiés :

Le complexe racinaire : Le champignon tellurique *Phytophthora sp.* Ce pathogène détruit le système racinaire fin, ce qui paralyse les capacités d'absorption hydrique et minérale de l'arbre (Smahi et al., 2017)

Les insectes xylophages : Plusieurs ravageurs xylophages s'installent sur les arbres souffreteux. On cite le **platype** (*Platypus cylindrus*) qui produit des galeries dans le bois, provoquant une interruption mécanique de la circulation de la sève élaborée. Ceci entraîne un dépérissement rapide de l'arbre (**Bouhraoua et al., 2002 ; Belhoucine et al., 2011**).

Ces agents sont dits "terminaux" car ils portent souvent le coup de grâce à l'hôte. Tandis que le *Phytophthora* attaque la base (racines), les insectes xylophages bloquent le système de transport central, créant un **effet d'étranglement** physiologique. L'interaction entre ces agents biotiques et le stress hydrique préalable crée une synergie mortelle : l'arbre affaibli ne peut plus produire de composés de défense chimiques pour stopper l'invasion des larves ou la progression du champignon.

La figure 19 illustre les multiples interactions intervenant dans le dépérissement du chêne-liège (**Amandier, 2006**).

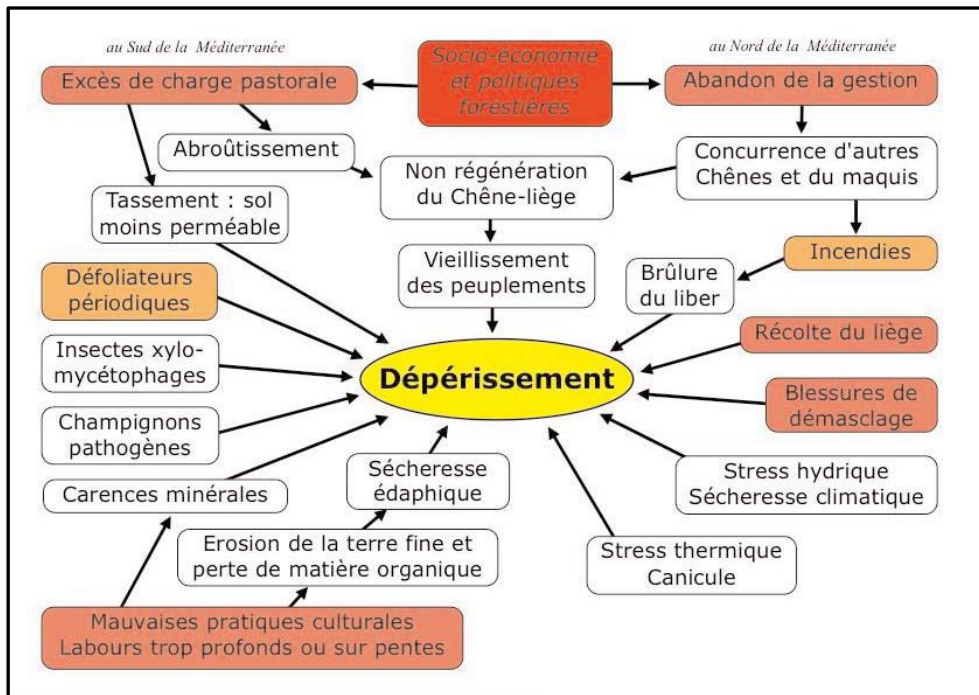


Figure 19. Le dépérissement du chêne-liège résulte de multiples interactions (Amandier, 2006)

3. Mécanismes physiologiques et hydrauliques

3.1-L'interface sol-racine et l'absorption de l'eau (l'entrée de l'eau)

L'efficacité d'un arbre à maintenir son état hydrique dépend de sa capacité à absorber l'eau à un rythme suffisant pour compenser la transpiration. Cette absorption repose sur l'extension spatiale et la densité du système racinaire (**Bréda et al., 2006**). Le développement d'un système racinaire profond, ramifié et dense constitue l'un des traits les plus efficaces pour tolérer la sécheresse, car il permet d'accéder à des réserves d'eau plus importantes (**Bréda et al., 2006**).

Il est établi que l'absorption de l'eau se déplace progressivement vers les couches plus profondes à mesure que le sol s'assèche. Même une faible proportion de racines fines situées en profondeur peut permettre la survie de l'arbre en fournissant la quantité minimale d'eau nécessaire, assurant ainsi l'équilibre hydrique durant la nuit (**Bréda et al., 2006**). Par ailleurs, les symbioses mycorhiziennes jouent un rôle crucial en augmentant la surface d'échange et en améliorant la conductivité hydraulique à l'interface sol-racine (**Bréda et al., 2006**).

L'eau se déplace de façon radiale à travers les racines, puis de manière axiale via le système vasculaire des racines vers les feuilles, et finalement radialement au sein des feuilles (Fig.20). Le transport radial de l'eau des vaisseaux du xylème vers les autres tissus.

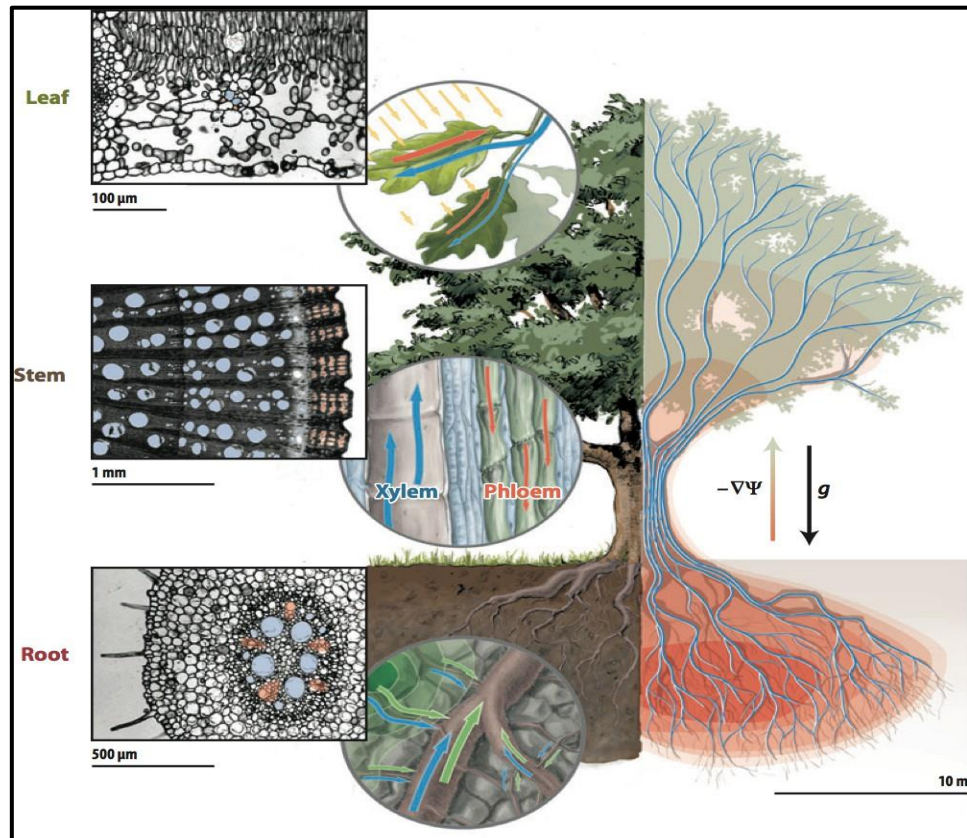


Figure 20 : Vue générale des processus de transport dans une plante vasculaire. Le xylème permet le transfert de l'eau du sol vers l'atmosphère. Le phloème transporte les molécules organiques des feuilles vers les tissus. Les images en micrographie optique, montrent la section perpendiculaire d'une feuille, du tronc et d'une racine, l'emplacement approximatif du xylème étant marqué en bleu et celui du phloème en orange. Figure extraite de Stroock et al., 2014 in Bienaimé, 2016)

Au niveau cellulaire de la feuille, il existe trois voies pour le passage de l'eau et les substances (**Benoit, 2014**) (Fig. 21) :

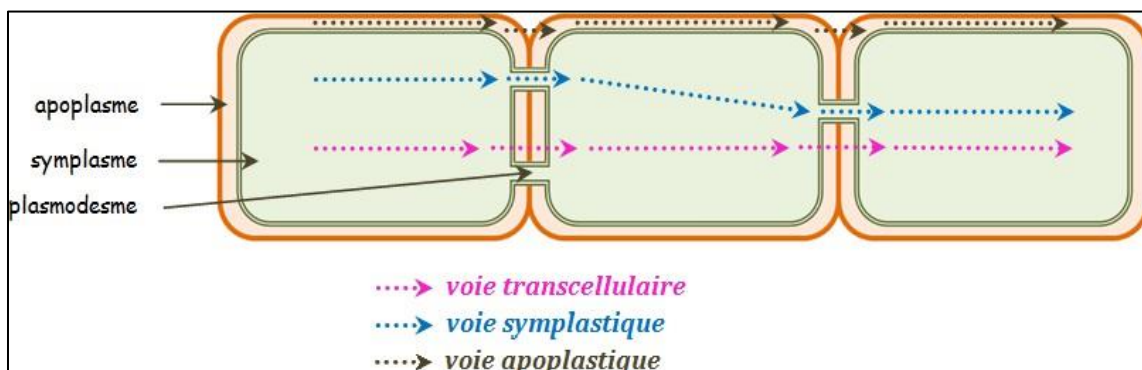


Figure 21 : Les différentes voies de transport de l'eau dans le mésophylle (source : <http://www.cours-pharmacie.com/biologie-végétale/>).

-L'eau peut circuler uniquement dans les espaces extracellulaires ou parois cellulaires (apoplasme), c'est la voie apoplastique. Première et principale voie empruntée pendant la journée

-l'eau transite de cellule à cellule par les plasmodesmes entre cellules est resté dans le continuum cellulaire (symplasme), c'est la voie symplastique.

- une molécule d'eau est capable de suivre ces deux voies et effectue donc un trajet transcellulaire, l'eau traverse les membranes plasmiques des cellules, ces 2 voies : l'eau circule à l'intérieure des cellules

3.2- Les aquaporines

3.2.1-Définition

Les aquaporines, qui font partie de la superfamille des protéines intrinsèques majeures (MIPs), sont des canaux protéiques traversant les membranes. Elles sont structurées en tétramères (23-31 kDa) et possèdent six domaines transmembranaires ainsi que cinq boucles régulatrices. À l'intérieur de leur canal, deux motifs fortement préservés, composés des acides aminés Asparagine-Proline-Alanine (motifs NPA), créent un étranglement (le port) qui rompt les liaisons hydrogène des molécules d'eau, autorisant ainsi leur traversée individuelle à travers la membrane cellulaire.

Le rôle principal des aquaporines est de favoriser et contrôler le passage sélectif à travers la membrane de l'eau, de quelques solutés et de certains gaz tels que le dioxyde de carbone **(Maurelet al., 2008)**.

D'un point de vue physiologique, ils jouent un rôle essentiel dans la régulation de l'équilibre hydrique cellulaire et de l'homéostasie végétale. Leur fonction et leur caractéristique de transport sont régulés par des changements biochimiques (comme la phosphorylation ou la méthylation), des interactions entre protéines, ou encore par l'hétéromérisation (par exemple, entre PIP1s et PIP2s, ce qui perfectionne le déplacement membranaire et le courant d'eau) **(Sack et Holbrook, 2006)**.

Essentiellement, en période de stress hydrique, les aquaporines ont un rôle clé et dynamique en accélérant le rétablissement de l'état hydrique normal de la plante suite à une phase de sécheresse **(Siefritz, 2002 ; Martre, 2002 ; Cohen et al., 2013)**.

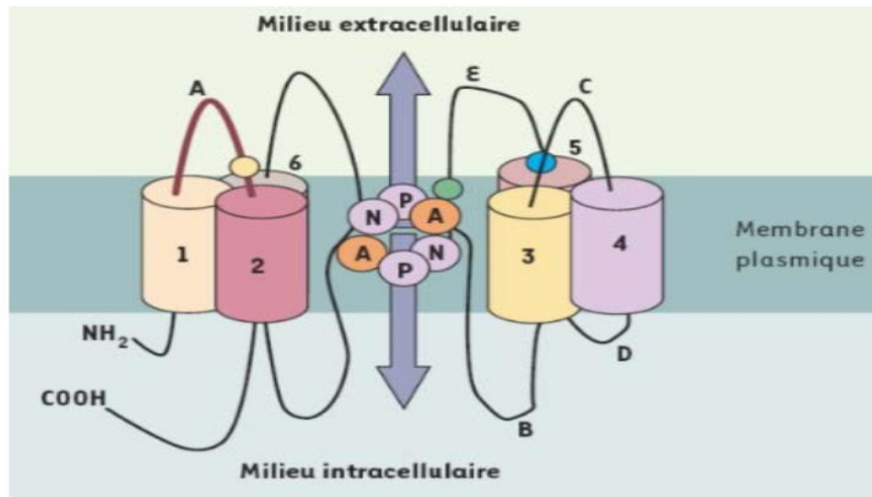


Figure 22 : structure d'une aquaporine végétale (source : <http://www.erudit.org/revue/MS/2005/>).

Elle se compose de six zones intra membranaires et de cinq boucles d'acides aminés (A-E). L'ouverture et la fermeture du canal central sont régulées par des motifs tels que le motif NPA, fortement préservé (N : Asparagine, P : proline et A : alanine).

3.3-Le continuum sol-plante-atmosphère et le transport de l'eau (la circulation)

Le transport de l'eau au sein de l'arbre repose sur un système hydraulique passif reliant le sol à l'atmosphère via le xylème, un tissu conducteur constitué de cellules mortes et vides (vaisseaux et trachéides). Selon **Cochard et Granier (1999)**, ce mouvement est régi par l'interaction de plusieurs forces :

-La transpiration foliaire agit comme le moteur principal, générant une tension qui aspire la sève brute (composée à plus de 93 % d'eau, de minéraux et d'acides aminés) vers le haut. La poussée racinaire facilite l'entrée de l'eau dans le système racinaire depuis le sol. Les forces antagonistes : La gravité et les frottements internes s'opposent à l'ascension du flux liquide. (Fig.23)

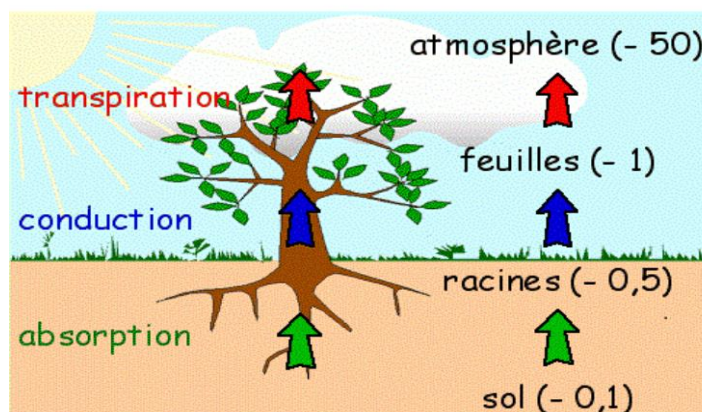


Figure 23: le continuum sol/plante/atmosphère (source : www.Futura-Sciences).

Le sol renferme une réserve d'eau qui est extraite, transportée et exploitée par l'arbre, des racines jusqu'aux feuilles, en fonction d'un gradient de potentiel décroissant (Méga Pascal, MPa). Le flux constant d'eau est produit par la transpiration des feuilles à l'interface entre la plante et l'atmosphère, la Chambre sous-stomatique (**Prat, 2016**).

3.4-La gestion de l'eau par la plante

La perte d'eau par évapotranspiration au niveau des stomates dépend du degré d'ouverture stomatique ainsi que de la pression de vapeur saturante de l'eau, qui correspond à la pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase liquide (**Benoit, 2014**).

Dans un système clos, lorsque l'équilibre entre les phases liquide et gazeuse n'est pas atteint, une partie du liquide passe à l'état gazeux afin de saturer le milieu et d'atteindre un nouvel équilibre. Ce processus se produit à l'interface entre le stomate et l'atmosphère, où l'air exerce aussi un pouvoir déshydratant. Ce mécanisme est lié à la conductance stomatique. Ainsi, l'eau se déplace selon un gradient de pression des cellules foliaires vers l'air, tandis que le CO₂ diffuse en sens inverse, de l'air vers les cellules chlorophylliennes (Fig .24). (**Benoit, 2014**).

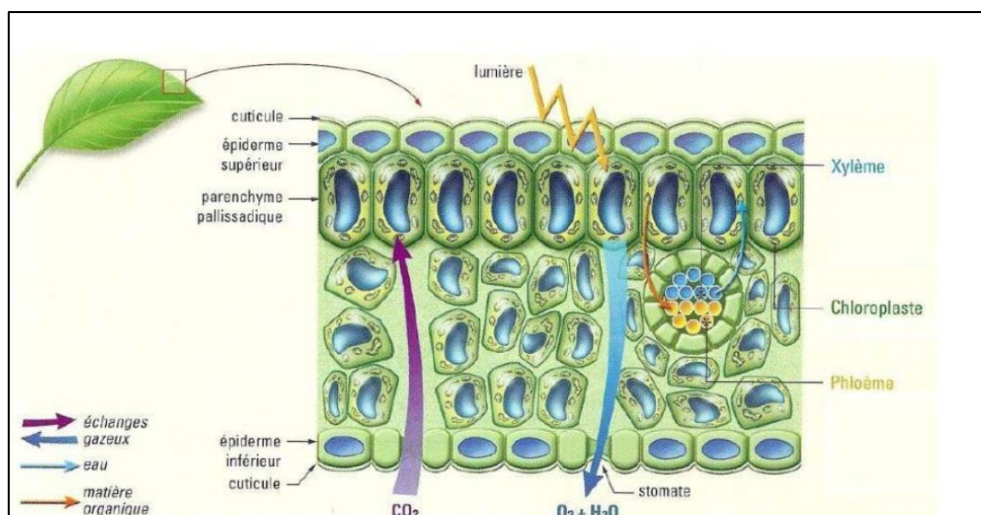


Figure 24 : Les échanges gazeux à l'interface stomate/atmosphère (source : <http://www1.svtaulycce.fr>).

Les molécules d'eau issues des conduits du xylème passent à travers la gaine péricellulaire avant de suivre diverses trajectoires (cellules photosynthétiques et/ou lacunes) en direction de

la chambre sous-stomatique. Lors de l'ouverture des stomates, le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère pénètre dans la chambre par le biais des stomates, tandis que l'oxygène (O_2) et la vapeur d'eau (H_2O gaz) en sortent. (Benoit, 2014).

3.4- Seuils de rupture : potentiel hydrique et REW (la limite critique)

L'évaluation de l'intensité du déficit hydrique ou l'état de stress chez l'arbre repose sur deux indicateurs quantitatifs clés : l'état de tension interne de la plante et la disponibilité de l'eau dans le sol.

3.4.1- Le potentiel hydrique foliaire

Le potentiel hydrique, exprime l'état de tension hydraulique au sein de l'arbre. Pour le chêne-liège, les seuils de tolérance se définissent comme suit :

a-Stress sévère : Il est atteint lorsque le potentiel descend entre **-2,0 et -2,5 MPa**, entraînant une régulation stomatique maximale (Bréda et al., 2006).

b-Risque de mortalité : Au-delà d'un seuil critique situé entre **-3,0 et -3,5 MPa**, les dommages au système conducteur deviennent souvent irréversibles, augmentant drastiquement le risque de mortalité hydraulique (Tyree et Sperry, 1989).

3.5-Interface cime-atmosphère et régulation stomatique : Tentative de protection

Le développement de la cime, mesuré par l'indice de surface foliaire (LAI), contrôle directement la transpiration et l'interception des pluies. La transpiration est régulée par la conductance de la canopée, qui dépend de l'éclairement et du déficit de pression de vapeur (VPD) (Bréda et al., 2006).

Lors d'un épisode de sécheresse, dès que l'eau extractible du sol descend en dessous d'un seuil critique (environ 0,4), la conductance de la canopée diminue progressivement (Bréda et al., 2006). Cette fermeture des stomates réduit les flux d'eau mais limite également l'assimilation du CO_2 . En cas de sécheresse extrême, l'assimilation nette de carbone peut devenir négative, signifiant que l'écosystème rejette plus de carbone qu'il n'en absorbe (Bréda et al., 2006).

L'interface stomates/atmosphère est l'endroit où se produit la transformation de l'eau liquide en vapeur, due à un changement abrupt et significatif de la tension hydrique (pression négative). Cela, combiné à la tension hydrostatique des molécules d'eau, génère une sorte de tirage d'eau de la chambre sub-stomatique vers les racines pour assurer un flux d'eau constant. C'est le continuum sol/plante/atmosphère. Ainsi, l'eau est acheminée par le biais de la disparité de potentiel qui existe entre l'interface racine-sol et l'interface stomate-atmosphère (Cochard et Granier, 1999) (Figure 24).

3.6-Mécanismes de la cavitation xylémique et de l'embolie : Rupture physique des vaisseaux

Sous l'effet d'un stress hydrique sévère et une sécheresse intense, le gradient de tension au sein des vaisseaux du xylème augmente d'une manière critique. Lorsque cette tension excède le seuil de tolérance des membranes situées au niveau des ponctuations inter-vasculaires, une rupture de la colonne d'eau se produit. Ce processus, appelé **cavitation** (Fig.25) qui se manifeste par l'intrusion de bulles d'air dans les conduits normalement remplis de sève (**Tyree et Sperry, 1989**).

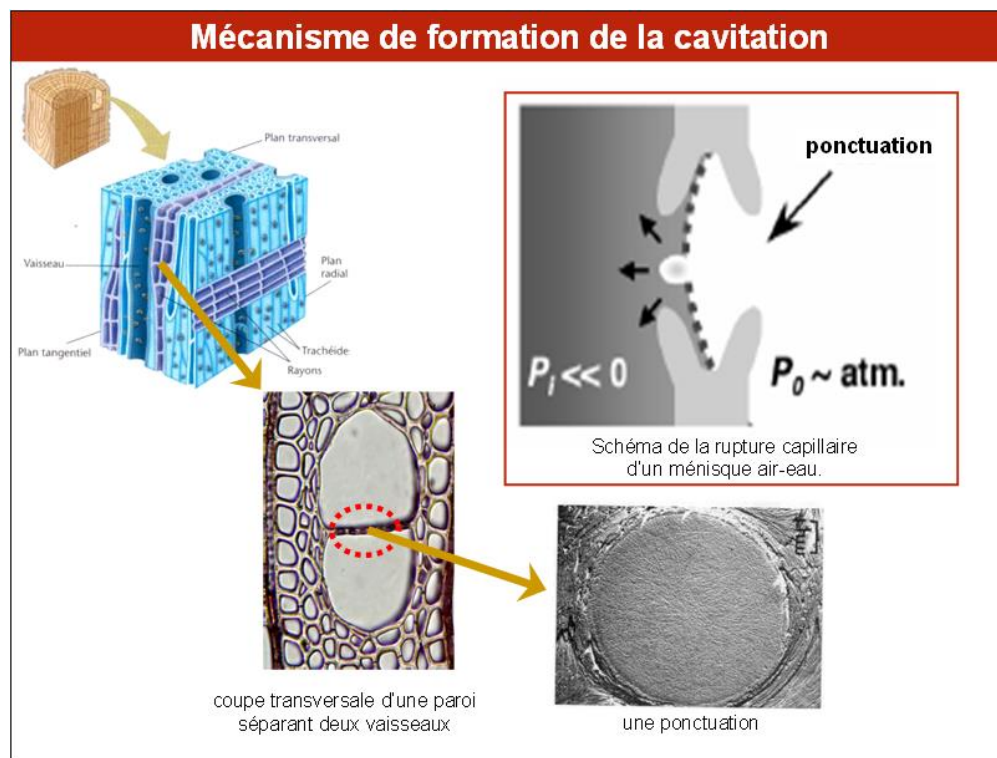


Figure 25 : Représentation des structures cellulaires du xylème et mécanisme de rupture capillaire (cavitation) au niveau d'une ponctuation. (Source : H. Cochard & A. Granier, Chapitre II.7, projet collaboratif @Plantes et Eau, INRA). https://www.plantes-et-eau.fr/images/documentation/architecture_hydraulique_fichiers/image005.pn

L'expansion de ces bulles entraîne une **embolie gazeuse**, laquelle obstrue la circulation de la sève brute. Cette rupture de continuité hydraulique réduit drastiquement la capacité de l'arbre à acheminer l'eau vers son houppier, constituant ainsi l'une des causes majeures du déclin physiologique observé lors des épisodes de dépérissement. (Fig.26)

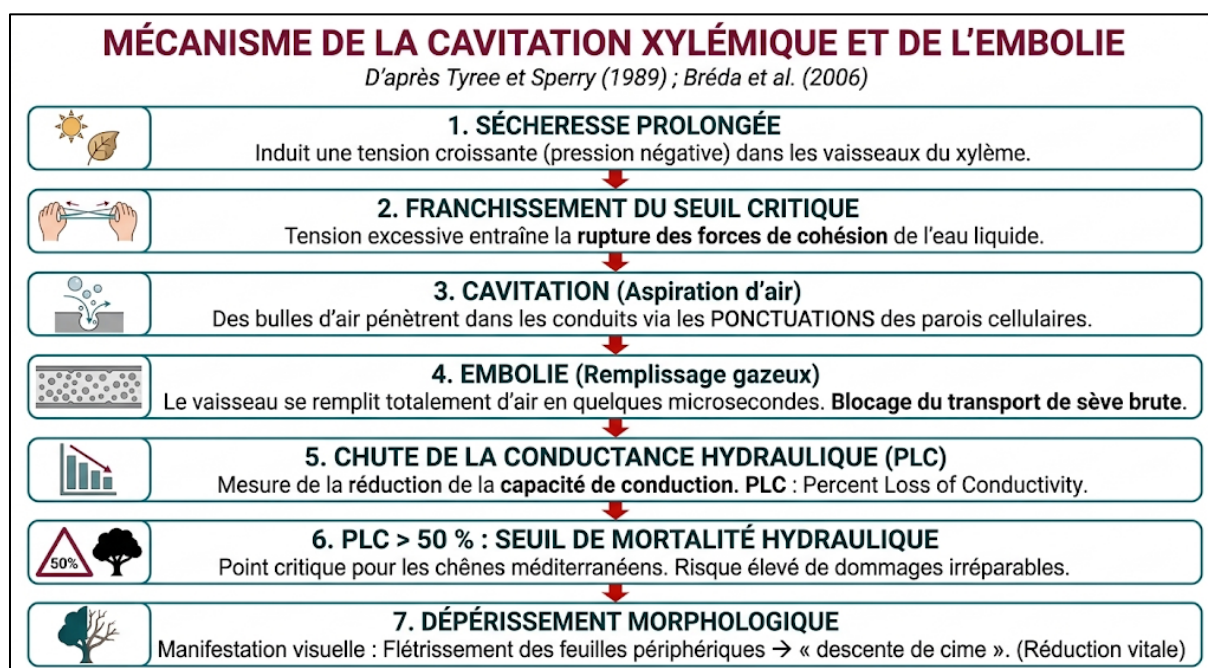


Figure 26 : Schéma du mécanisme de cavitation et d'embolie dans les vaisseaux du xylème de *Quercus suber*

https://engbasc.hub.inrae.fr/var/hub_internet_national_basc/storage/images/_aliases/inra_hub_image_modal/media/images/modeles/figure-conceptuelle-continuum/33683-1-fre-FR/Figure-conceptuelle-Continuum.png

Le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux au niveau des stomates crée un gradient de tension hydrique. Ce différentiel permet de maintenir une colonne d'eau continu de la racine jusqu'aux feuilles, transformant la plante en une véritable pompe hydraulique. Enfin, la performance de ce mécanisme face au stress hydrique est étroitement liée à l'architecture racinaire : un réseau dense, ramifié et capable de prospecter le sol en profondeur est essentiel pour garantir la survie lors des périodes de sécheresse (Bréda et al., 2006).

La vulnérabilité à la cavitation se caractérise par une cinétique sigmoïdale : dès lors que le seuil critique est franchi, une intensification mineure du stress hydrique et une augmentation de la sécheresse suffit à provoquer, en quelques jours seulement, une rupture de la colonne d'eau dans 80 % des vaisseaux conducteurs (Tyree et Sperry, 1989). Face à ce mécanisme, les essences méditerranéennes telles que *Quercus suber* présentent des valeurs (potentiel induisant 50 % de perte de conductance hydraulique) nettement plus négatives que celles des espèces tempérées. Cette propriété fonctionnelle témoigne d'une adaptation évolutive remarquable aux contraintes de sécheresse récurrentes de leur milieu

Pour comprendre de manière tangible l'effet du stress hydrique sur le fonctionnement des vaisseaux conducteurs, il est crucial de déterminer le point critique au-delà duquel la rupture de la colonne d'eau devient irréparable. Cette tendance de détérioration est précisément reflétée par une courbe de vulnérabilité à la cavitation, qui établit un lien entre la réduction de conductance hydraulique (PLC) de la plante et l'affaiblissement de son potentiel hydrique xylémique (Psi). Pour le chêne-liège, sa réaction biophysique présente une dynamique non linéaire spécifique, reflétant la stratégie de résistance ou de tolérance de l'espèce en réponse à une sécheresse grandissante. Le graphique ci-dessous souligne les seuils critiques et les zones de tolérance hydraulique qui déterminent la survie de cette espèce dans un environnement méditerranéen affecté par le déclin. (Fig.27)

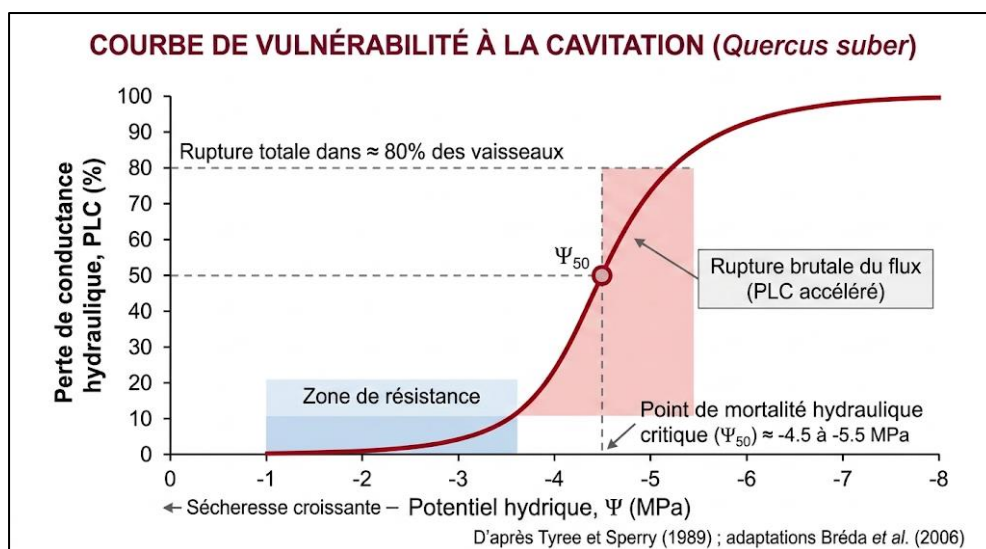


Figure 27 : Courbe de vulnérabilité à la cavitation chez *Quercus suber*. La forme sigmoïde illustre le point de rupture hydraulique. Source : Adapté de Tyree et Sperry (1989) pour le modèle théorique et de Bréda et al. (2006) pour les valeurs seuils du chêne-liège

L'examen de cette figure met en évidence une courbe de vulnérabilité à la cavitation qui présente une forme généralement sigmoïde (en S), indiquant une réaction hautement spécialisée et biphasique du chêne liège face au manque d'eau.

Le point d'inflexion significatif de la courbe se trouve à proximité du point critique de mortalité hydraulique qui est localisé entre -4.5 et -5.5 MPa. Ce paramètre crucial, normalisé dans les travaux écophysiologiques (Tyree et Sperry, 1989 ; Bréda et al., 2006), représente le point où le système de circulation a perdu 50% de sa capacité à transporter la sève brute. Au-delà de ce seuil critique (< -4.5 MPa), la courbe connaît une accélération abrupte et exponentielle, signalant une défaillance catastrophique du flux. Hydraulique. Dans cette région de tensions maximales,

l'infiltration d'air dans les vaisseaux (l'embolie) se propage progressivement par les ruptures de la membrane cellulaire.

Quand le potentiel hydrique s'approche des valeurs aux alentours de -5.5 à -6 MPa, la Conductance de Perte de Confiance (PLC) se situe ou dépasse souvent les 80%, seuil généralement reconnu comme étant le point de non-retour ou la rupture complète des vaisseaux.

À ce stade de défaillance massive, l'arbre subit un désamorçage hydraulique total, bloquant toute possibilité de réhydratation et provoquant inéluctablement le flétrissement des branches, la perte de feuilles et finalement, la mort de l'individu. Ces chiffres démontrent que, bien que *Quercus suber* présente une résistance notable à la sécheresse comparativement à d'autres feuillus, l'atteinte du seuil critique initie un processus de détérioration rapide et irréversible de son état hydrique.

3.7- La crise énergétique : l'inanition carbonée (NSC)

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*). Afin de limiter les pertes d'eau par transpiration, le chêne liège régule sa conductance en fermant ses stomates. Bien que cette réponse stomatique protège temporairement les vaisseaux de l'embolie, elle induit un arrêt de l'assimilation du CO₂ bloquant ainsi l'activité photosynthétique. (Fig.28).

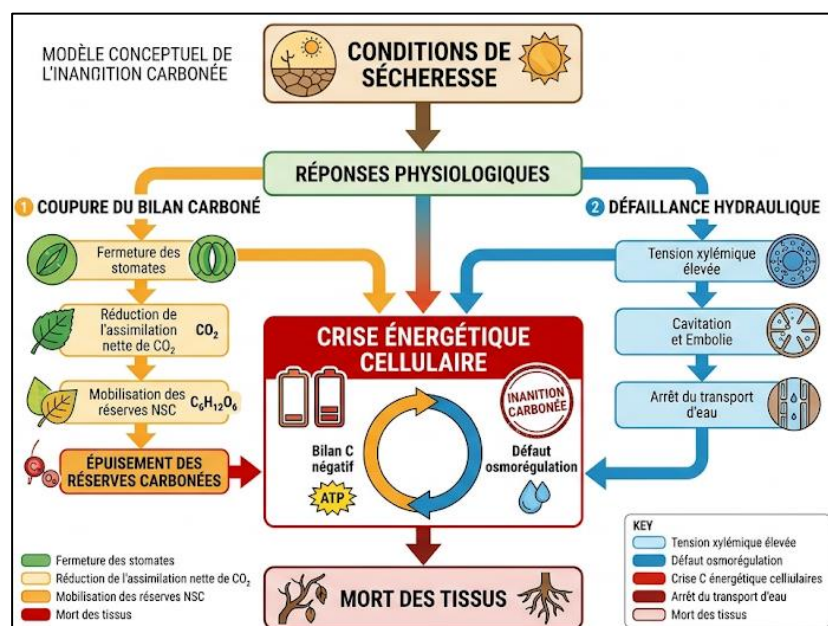


Figure 28 : Modèle conceptuel des interactions temporelles et physiologiques entre la défaillance hydraulique (embolie xylémique) et la crise énergétique cellulaire (inanition carbonée) chez les ligneux soumis à une sécheresse létale. (*Adapté de Bouyer, 2019*).

Dès lors, l'arbre est contraint de mobiliser ses glucides non structurels, constitués essentiellement d'amidon et de sucres solubles stockés dans le parenchyme libéro-ligneux du tronc et des racines. La dynamique de ces réserves au cours du dépérissement suit une cinétique précise :

État initial de référence : Chez un chêne-liège vigoureux, la concentration en ces glucides représente environ 5 % à 10 % de la matière sèche du parenchyme du tronc (McDowell *et al.*, 2008).

Seuil d'irréversibilité : Le processus de dépérissement devient irréversible lorsque ce taux s'effondre en deçà du seuil critique de 2 % de la matière sèche.

Effondrement des défenses chimiques : Sous cette valeur limite, la synthèse des métabolites secondaires de défense (tanins, phénols) chute de 60 % à 80 %, inhibant l'aptitude de l'hôte à contrecarrer les attaques d'insectes xylophages.

Effet de latence : À cet égard, Bréda *et al.* (2006) ont démontré que de faibles teneurs en amidon résiduel dans le tronc à la fin de l'été étaient corrélées à une mortalité sévère des rameaux au printemps suivant, illustrant le caractère différé du déficit carboné.

En somme, ce mécanisme d'autoconsommation énergétique affaiblit considérablement l'organisme et favorise l'action délétère des agents pathogènes opportunistes et des bioagresseurs.

3.8-Effondrement du système de défense et l'invasion entomologique

C'est dans cet état de vulnérabilité physiologique extrême que les facteurs aggravants, principalement les insectes xylophages, interviennent. Dans le contexte spécifique des forêts algériennes, **Bouhraoua (2003)** a démontré que les arbres stressés émettent des signaux chimiques qui attirent des bio-agresseurs opportunistes. Des insectes tels que les Platypodidae s'installent alors sur les sujets affaiblis. Selon **Bouhraoua et al. (2002)**, ces attaques détruisent physiquement le système de transport de la sève élaborée (le phloème).

3.9-Interaction entomologique et dynamique de mortalité

Bien que les mécanismes hydrologiques et énergétiques précédemment détaillés constituent les causes primaires du dépérissement, ils ne dictent pas seuls la trajectoire de survie de l'arbre. En réalité, cet affaiblissement physiologique profond agit comme une véritable porte d'entrée

biologique. La réduction des réserves carbonées limite drastiquement la capacité du chêne-liège à synthétiser ses métabolites secondaires de défense, tels que les tanins. Ainsi vulnérable et incapable de répondre aux agressions extérieures, l'arbre devient le siège d'une interaction entomologique décisive, où les agents biotiques viennent parachever la dynamique de mortalité de l'individu déjà stressé.

Sur le plan physiologique, le dépérissement s'accélère par un phénomène d'annelage interne causé par les insectes xylophages comme (*Platypus cylindrus*). Lorsque les galeries larvaires interceptent plus de 75 % de la circonférence cambiale, le flux de sève élaborée est totalement interrompu. Ce blocage phloémien prive le système racinaire de photoassimilats, entraînant sa mort par inanition en moins d'une saison de végétation. Ce processus mécanique et métabolique explique la cinétique foudroyante du phénomène de « mort subite » observé sur le terrain.

3.10-Dysfonctionnements hydrauliques et dépérissement

Le transfert de l'eau du sol vers les feuilles suit un gradient de potentiel hydrique. Si les tensions dans le xylème deviennent trop fortes, des bulles d'air peuvent pénétrer dans les vaisseaux, provoquant une cavitation et une embolie irréversible qui réduit la conductivité hydraulique (Bréda et al., 2006).

Le dépérissement et la mortalité des arbres suite à des sécheresses extrêmes peuvent résulter de deux mécanismes principaux discutés par Bréda et al. (2006) :

La rupture hydraulique : Une embolie massive des vaisseaux du xylème empêchant le transport de la sève. (Fig.29) L'épuisement des réserves : La fermeture prolongée des stomates entraîne un déficit de stockage du carbone.

Une étude menée après la sécheresse de 2003 a montré que de faibles taux d'amidon dans le tronc à la fin de l'été étaient corrélés à une mortalité importante des branches et des pousses au printemps suivant (Bréda et al., 2006). Ainsi, le dépérissement de la couronne est souvent une réponse différée aux stress physiologiques subis l'année précédente.

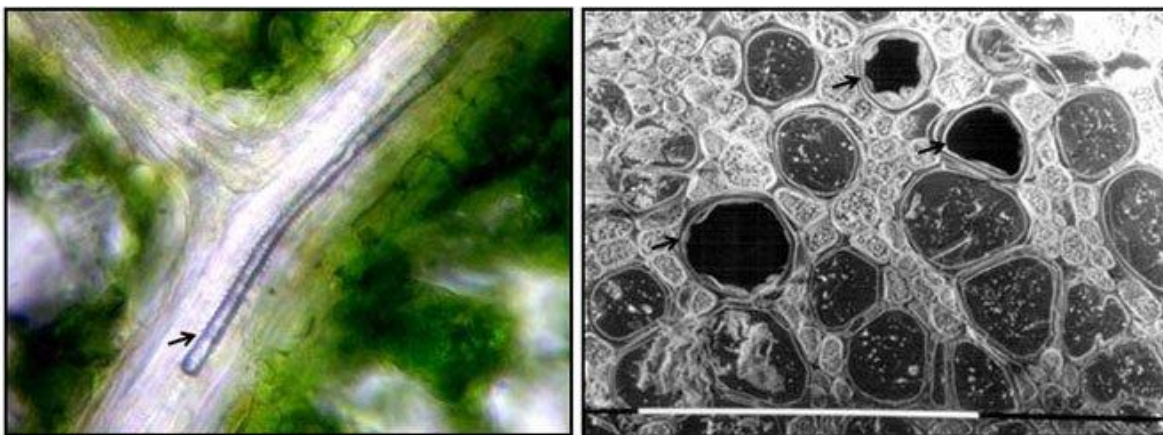


Figure 29 : Visualisation microscopique de l'embolie de la cavitation au niveau des vaisseaux conducteurs de sève (Gradt, 2021)

4. Processus de dépérissement — Séquence en cinq phases L'intégration des mécanismes physiologiques, morphologiques et entomologiques permet de reconstituer une séquence chronologique cohérente du dépérissement du chêne-liège sous l'effet de la sécheresse (Fig.30).

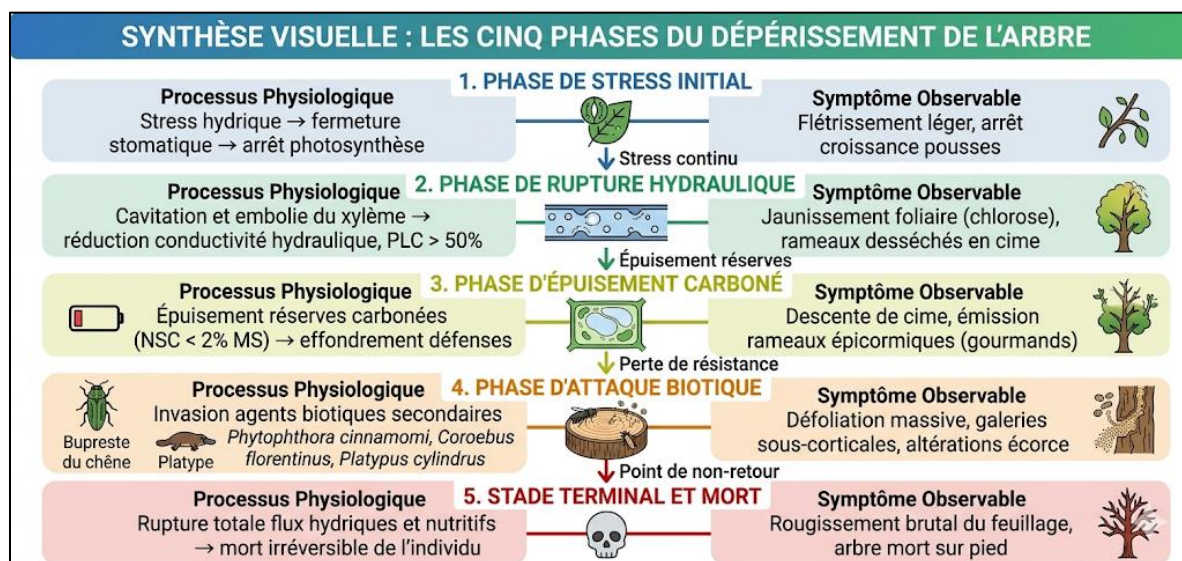


Figure30 : Séquence chronologique des cinq phases du dépérissement de *Quercus suber*

D'après Manion (1981), Tyree et Sperry (1989), Bréda et al. (2006), McDowell et al. (2008), Bouhraoua et al. (2002)

4.1- La phase de stress initial : Le déclenchement abiotique

Le processus de dépérissement commence généralement sous l'influence d'un facteur limitant d'intensité, généralement un déficit hydrique du sol sévère associé à une forte demande évaporative atmosphérique (Manion, 1981 ; McDowell et al., 2008). D'un point de vue physiologique, la première barrière de protection de l'arbre est une régulation rigoureuse des stomates. Le chêne-liège embrasse une stratégie d'évitement (isohydrique ou semi-isohydrique en fonction des écotypes). L'occlusion des stomates est régulée par des signaux hormonaux, en particulier la production d'acide abscissique (ABA) par les racines et les feuilles (Bréda et al., 2006). Même si cette réponse réduit significativement la déperdition d'eau par transpiration, elle entraîne immédiatement un effondrement de la conductance stomatique et, de ce fait, un arrêt pratiquement total de l'assimilation nette du carbone via la photosynthèse. D'un point de vue morphologique, les symptômes visibles à ce stade demeurent subtils et réversibles : ils se manifestent par un léger flétrissement des feuilles et un arrêt anticipé de la croissance des pousses annuelles (Mitrakos, 1980).

4.2-La phase de rupture hydraulique : Le basculement biophysique

Quand le stress hydrique se prolonge ou s'aggrave, les processus de contrôle stomatique ne parviennent plus à freiner la diminution du potentiel hydrique xylémique . Lorsque la pression interne excède les seuils de résistance mécanique des parois (le point critique), le phénomène de cavitation se produit.

L'infiltration d'air dans les vaisseaux conducteurs entraîne une embolie gazeuse qui diminue de manière significative la conductivité hydraulique propre du xylème (**Tyree et Sperry, 1989**). Quand la perte de conductance hydraulique dépasse le seuil critique de 50%, l'approvisionnement en eau pour la canopée est sévèrement affecté. Les premiers signes visibles de dégradation apparaissent au niveau du houppier : on constate une généralisation de la décoloration et du jaunissement des feuilles (chlorose), causée par la décomposition de la chlorophylle en raison du stress photo-oxydatif, ainsi qu'un dessèchement progressif des rameaux périphériques et des branches supérieures (**Nardini et al., 2013**).

4.3- La phase d'épuisement carboné : La crise énergétique

La persistance de la fermeture stomatique couplée à la désorganisation du réseau vasculaire plonge l'arbre dans un état d'inanition ou de famine carbonée. N'ayant plus de production de photosynthétats frais, l'individu est contraint de puiser massivement dans ses réserves de glucides non structuraux, principalement l'amidon et les sucres solubles) stockées dans le parenchyme du xylème et des racines (**McDowell, 2011**). Selon les études écophysiologiques, une diminution de ces réserves en dessous d'un seuil critique (généralement évalué à moins de 2% de la matière sèche) entraîne un effondrement des fonctions métaboliques essentielles et des voies de signalisation défensive de l'arbre (**Salmon et al., 2015**). Morphologiquement, cette défaillance énergétique se traduit par une « descente de cime » (mortalité des branches maîtresses supérieures) et par une ultime tentative de survie grâce à la production de rameaux épïcormiques (gourmands) le long du tronc, un signe architectural caractéristique des arbres en état de dépérissement chronique (**Roloff, 2001**).

4.5-Le stade terminal et la mort

Cette phase finale constitue le moment où les dégâts infligés à l'arbre atteignent un stade d'irréversibilité systémique. Selon Martinez-Vilalta et al. (2002), l'interaction du dessèchement xylémique, de la carence énergétique et de l'agression physique par les bioagresseurs conduit à une interruption totale et irréversible des courants hydriques montants (sève brute) et descendantes (sève élaborée). L'activité métabolique des cellules cesse. Dans le contexte pratique, cette phase finale se manifeste visuellement par un rougissement soudain et simultané de tout le feuillage restant, indiquant une déshydratation rapide de l'intégralité de la couronne.

De ce fait, l'arbre finit par dépérir sur place et devient du bois mort, ce qui indique la fin de la spirale de dépérissement (Manion's Spiral) au niveau individuel (Franklin et al., 1987).

5-État de santé des subéraies dans la région méditerranéenne

Les problèmes de dégradation de la santé des peuplements forestiers sont anciens et remontent à la fin du XIXe siècle dans de nombreux pays d'Europe et d'Amérique du Nord. Ce n'est qu'au début des années 1980 que l'aspect véritablement alarmant de ce déclin a été identifié (**Delatour, 1983 ; Bonneau et Landmann, 1988**). (Tab1). Les travaux de **Marques et al., (2025)** ont fait une synthèse sur les facteurs de dépérissement du genre *Quercus* dans la région méditerranéenne et à partir de 241 articles indexés parus entre 1981 et 2021. Les principaux facteurs de déclin des chênes dont le chêne liège sont d'origine pathogènes et climatiques mais aussi à d'autres interactions.

Tableau 2 : Panorama de l'état sanitaire des subéraies méditerranéennes Sources : Anonyme (1914) ; Boudy (1955) ; Natividade (1956) ; Zine (1992) ; Messaoudène (2000) ; D.G.F. (2009) ; Barros et al. (2002) ; Ben Jamâa et al. (2002) ; Franceschini et al. (2002) ; Marras et al. (1995) ; Nageleisen et al. (1990) ; Serra (1992) ; Yousfi (1995).

Pays	Superficie	État sanitaire / Intensité	Principaux agents biotiques impliqués
Portugal	> 1/3 mondiale	5–10 arbres morts/ha/an (1991–2000)	<i>Platypus cylindrus</i> , <i>Coroebus undatus</i> , <i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>Biscogniauxia mediterraneum</i> , <i>Armillaria mellea</i>
Algérie	~230 000 ha (D.G.F., 2009)	Dépérissement massif depuis les années 1980 ; 50 % des surfaces perdues	<i>Zeuzera pyrina</i> , <i>Lymantria dispar</i> , <i>Coroebus florentinus</i> , <i>Biscogniauxia mediterraneum</i> , <i>Phytophthora cinnamomi</i>
Espagne	~390 000 ha (23 % mondiale)	Mortalités subites depuis 1990, « seca »	<i>Phytophthora cinnamomi</i> , <i>Platypus cylindrus</i> , <i>Coroebus undatus</i> , <i>Biscogniauxia mediterraneum</i> , <i>Diplodia mutila</i>
Maroc	~350 000 ha (15 % mondiale)	80 % d'arbres malades ; 10 % de mortalité/an (forêt de la Mamora)	<i>Lymantria dispar</i> , <i>Cerambyx cerdo mirbecki</i> , <i>Platypus cylindrus</i> , <i>Biscogniauxia mediterraneum</i> , <i>Diplodia mutila</i>
France	3–5 % mondiale (Corse, Var, P.-O.)	Affaiblissement généralisé depuis 1989	<i>Lymantria dispar</i> , <i>Tortrix viridana</i> , <i>Cerambyx cerdo</i> , <i>Coroebus bifasciatus</i> , <i>Platypus cylindrus</i> , <i>Biscogniauxia mediterraneum</i>
Tunisie	~45 000 ha	Régression de 140 000 à 45 000 ha ; état relativement satisfaisant	<i>Lymantria dispar</i> (gradations depuis 1992–1998)
Italie	< 100 000 ha (90 % Sardaigne)	Irréversiblement inexploitable (Sicile) ; mortalités massives depuis 1990	<i>Lymantria dispar</i> , <i>Malacosoma neustria</i> , <i>Tortrix viridana</i> , <i>Biscogniauxia mediterraneum</i> , <i>Diplodia mutila</i> , <i>Armillaria mellea</i>

5.1-Le Portugal :

Le Portugal produit plus de la moitié du liège mondial, hébergeant plus d'un tiers des chêne-liège de la Terre (Alexandrian et al., 1986). La sylviculture ainsi appliquée est le mode « forêt-verger ». Les problématiques de santé ont toujours été présentes (Natividade, 1956), pourtant, c'est seulement à la fin des années 1980 que leur portée a véritablement été ressentie. Entre 1991 et 2000, diverses opérations d'assainissement ont été effectuées dans plusieurs régions exposées à l'ampleur du problème. Chaque année, de 5 à 10 arbres s'éteignent par hectare (Barros et al., 2002). Les entités identifiées englobent les défoliateurs (*Lymantria dispar*, *Tortrix viridana*), les insectes qui se nourrissent du bois (*Coroebus undatus*, *Platypus cylindrus*) ainsi que les champignons *Biscogniauxia mediterraneum*, *Phytophthora cinnamomi*, *Diplodia*

mutila et *Armillaria mellea*. (Carvalho, 1992 ; Cabral et al., 1993 ; Santos et al., 1999 ; Marques et al., 2025).

5.2. Algérie.

Les divers éléments qui participent à la détérioration de l'état de santé des arbres en Algérie comptent les facteurs écologiques tels que l'aridité et l'augmentation de la sécheresse, les aspects géographiques et topographiques comme les versants mal orientés, les facteurs forestiers tels que le vieillissement, l'embroussaillage, l'enrésinement et le manque d'interventions sylvicoles. Les éléments humains sont présents pas le surpâturage et les abattages illégaux. Les feux répétés sont à l'origine de la majorité de l'altération des subéraies en Algérie où chaque année ravage près de 7000 ha en moyenne. Les éléments biotiques comptent les attaques occasionnelles de *Lymantria dispar* mais surtout les attaques des xylophages tel que le Platype. Les affections pathologiques sont présentes provoquant le flétrissement de la cime, la mortalité des branches, tel que le charbon de la mère (**Bouhraoua et Villemant, 2005 ; Belhoucine et al., 2011 ; Belhoucine et al., 2012 ; Smahi et al., 2014 ; Smahi et al., 2017 ; Bouhraoua et al., 2019 ; Roula et al., 2020**).

5.3. Espagne.

Le phénomène de dépérissement en Espagne a été identifié pour la première fois au début des années 1980, généralement suite à des épisodes de défoliation qui ont entraîné des taux de mortalité. Dès 1990, ce phénomène a soulevé des préoccupations, touchant de vastes territoires et causant des décès massifs identifiables par le dépérissement généralisé du feuillage à l'automne, surtout dans les régions humides (Garolera, 1988 ; D.S.F., 1991c ; Tuset, 2002). Selon Espanol en 1964 et Elena en 1992, l'agent pathogène principal de la « seca » en Espagne est le champignon *Phytophthora cinnamomi*.

5.4-Maroc

Depuis 1986, le phénomène de dépérissement au Maroc a pris une dimension alarmante. D'après une étude de recensement réalisée en 1990 dans la forêt de la Mamora, on évaluait que le taux d'arbres en dégradation fluctuait entre 10 et 40 % en fonction des emplacements (Messat, 1992). Quelques années plus tard, l'état de cette forêt s'est dégradé avec 80 % des arbres touchés par la maladie, dont 10 % tombaient malades chaque année (Yousfi, 1995). Anciennement la plus vaste subéraie mondiale s'étendant sur 133 000 ha, la forêt de Mamora a connu une réduction considérable de sa superficie, dépassant la moitié de ses dimensions (Bakry et Abourouh, 1995 ; Bakry et al., 1999b).

5.5. France, Tunisie et Italie

À partir de 1989, un déclin généralisé a été observé en France, qui a été suivi par des phases d'amaigrissement caractérisées par la chute de feuillage, le flétrissement des branches et la

mortalité des arbres (Nageleisen et al., 1990 ; Nageleisen, 1992). Dans le contexte tunisien, l'aire des subéraies a connu une réduction passant de près de 140 000 hectares à seulement 45 000 hectares (Ben Jamâa et al., 2002), des occurrences de défoliation cyclique causées par *Lymantria dispar* ont été documentées depuis le début des années 1920. Depuis les années 1990 en Italie, les subéraies de Sardaigne, qui constituent 90% du total national, ont subi une mortalité massive d'arbres adultes et jeunes. Cette attribution est due à l'engagement des agents fongiques *Biscogniauxia mediterraneum*, *Diplodia mutila* et *Armillaria mellea*. (Franceschini et al., 1999a ; 2002 ; Sechi et al., 2002).

6. Conséquences Écologiques, Économiques et Sociales du phénomène de dépérissement des subéraies

6.1- Impacts environnementaux

La dégradation des arbres influence directement la qualité et la quantité de la production de liège, un élément essentiel des ressources forestières. La réduction des zones de subéraies menace la biodiversité locale et favorise l'érosion des sols, ce qui rend de plus en plus difficile la régénération naturelle des groupements dans les zones les plus touchées.

6.2. Conséquences économiques

L'industrie du liège a été affectée négativement par la dégradation constante des forêts de chênes-lièges et la réduction de leur étendue. Plusieurs unités de transformation ont été supprimées à cause d'un manque de matières premières, et celles qui sont encore en activité opèrent souvent à une capacité réduite, surtout dans les pays du Maghreb (Alexandrian, 1988 ; Zine, 1992). Le pourcentage moyen de liège utilisable en bouchons varie d'un pays à l'autre : il est de 15% en France (Douheret, 1992), 30% en Espagne (Elena, 1992), moins de 20% en Algérie (Zine, 1992) et autour de 25% au Portugal (Alexandrian, 1988). Ces données montrent l'effet de la détérioration de la santé sur la valeur marchande de la production.

Chapitre III :

Etude du milieu : la forêt domaniale de Hafir

1.2- Orographie et topographie

La forêt de Hafir présente une structure tabulaire. Son altitude s'échelonne de 800 à 1 418 mètres, atteignant son point culminant au niveau du Djebel Koudia. Ce relief est entrecoupé de vallées cultivées ou boisées, façonnées par le passage des oueds et de leurs affluents (B.N.E.D.E.R., 1979). Cette configuration donne à la forêt un aspect accidenté avec des expositions variées. Les pentes dominantes se situent entre 12,5 et 25 %, tandis que les zones de faible inclinaison (<3 %) ou les versants abrupts (>50 %) demeurent plus rares.

1.3- Géologie et pédologie

La forêt de Hafir est majoritairement située sur un substrat géologique constitué de grès du séquanien ou de poudingues, en particulier les grès de Boumediene et les grès Lutasicas (PNT, 2014). Les peuplements de chêne-liège en particulier s'établissent sur des structures gréseuses, et siliceuses à caractère plus ferrugineux et totalement exempt de calcaire (Gaouar, 1980 ; Yassad, 2000). Sur le plan pédologique, la subéraie repose sur des sols meubles, frais et profonds mais aussi des sols superficiels et secs. Mais l'essentiel du chêne-liège se développe sur des sols de type brun fersiallitique (PNT, 2014). Ce sont de sols fertiles et bons pour l'alimentation hydrique ; ils sont donc propices à la croissance des arbres. La brunification constitue le moteur principal de leur formation (Yassad, 2000).

1.4-Climat

L'analyse de l'impact des conditions climatiques actuelles sur l'état sanitaire des peuplements de chêne-liège nécessite un examen approfondi du climat de la zone d'étude. En effet, une compréhension précise du contexte climatique est indispensable pour situer les enjeux de notre recherche et interpréter correctement la réponse de la forêt face aux contraintes climatiques défavorables. L'étude climatique locale et de son évolution à long terme est fondamentale pour comprendre le fonctionnement de l'écosystème forestier, particulièrement en ce qui concerne les interactions des précipitations et la température avec la physiologie et la santé des arbres. Afin de caractériser le climat de notre zone d'étude avec précision que possible, nous nous sommes appuyés sur les séries de données météorologiques (anciennes et récentes) issues des stations météorologiques de référence situées les plus proches de la zone d'étude.

1.4.1-Origin des données

L'analyser des conditions s'appuie sur des séries de données continues s'étalant sur des périodes de plus de 20 ans. Deux séquences chronologiques de référence ont été distinguées : une période ancienne (1914-1938), documentée principalement par les travaux de Seltzer (1946) ainsi que par les bulletins de la Station de Recherches Forestières du Nord de l'Afrique pour les intervalles 1915-1924 et 1925-1934 (BSRF, 1937), et une période récente (1961-2017) dont les données proviennent des stations météorologiques les plus proches de la subéraie (Tab. 4). Cette approche comparative entre deux époques distinctes permet de mieux appréhender les changements climatiques subis par la forêt de Hafir.

Tableau 4 : Coordonnées des stations météorologiques de référence

Station de référence	Longitude	Latitude	Altitude	Emplacement	Mesure climatique	Période observation
Hafir	1°26' W	34° 47'N	1270 m	Maison Forestière	Pluviométrie	1915-1934
						1961-1996
					Températures	1913-1938
						1925-1934
						1975-1991
Mefrouche	1°16' W	34° 51'N	1100 m	Barrage	Pluviométrie*	1997-2019
					Températures (m et M)	1990-2014
					T°C*	1982-2019

*Pluies (2017-2019) et T°C (Boussaidi, 2024)

1.4.2-Précipitations

1.4.2.1-Répartition annuelle des précipitations

La figure 32 présente la pluviométrie enregistrée annuellement au cours des deux périodes de référence au sein de notre zone d'étude.

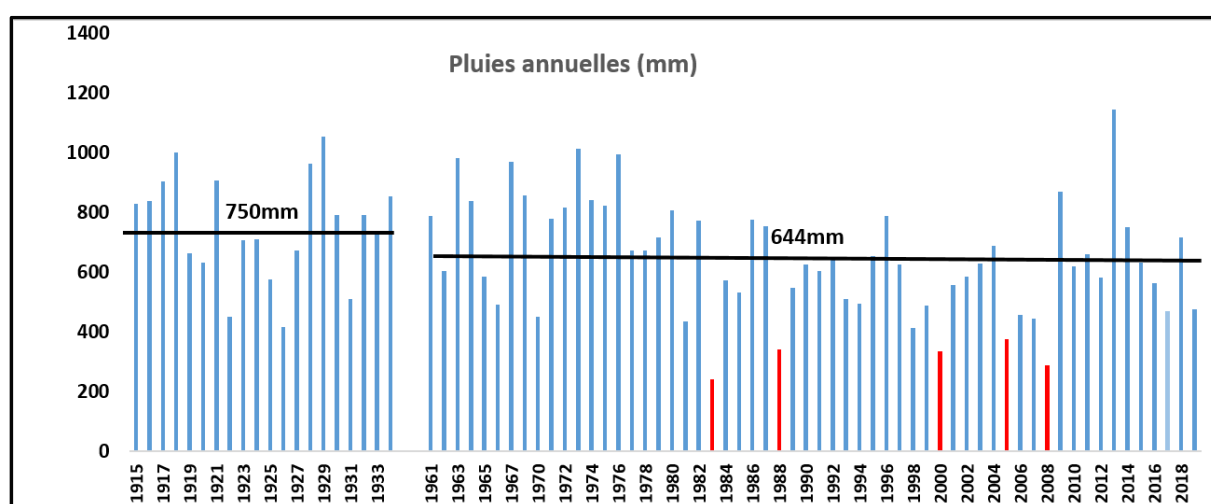


Figure 32- Précipitation annuelle enregistrée dans la zone d'étude durant les périodes 1915-1934 et 1961-2019 (barres en rouge : pluies<400mm).

La lecture de cette figure montre que la moyenne annuelle des précipitations durant la période ancienne (1915-1934) est de l'ordre de 750.2 mm, avec des chiffres variant entre 451,4 mm (1922) et 1054.6mm (1929) avec un CV de 23%. La majorité des hauteurs enregistrées restent systématiquement supérieures à 600mm par an.

En revanche, lors de la deuxième phase d'étude (58 ans : 1961-2019), on constate une diminution de près de 13 % de la moyenne annuelle par rapport à la première période de référence. Elle atteint 643,8 mm. Cette baisse s'accompagne d'une irrégularité interannuelle plus prononcée, comme le prouve l'accroissement de la variabilité (CV : 30 %).

Durant cette période, les valeurs extrêmes des pluies oscillent entre un minimum de 241 mm (1983) et un maximum de 1141 mm (2013). Elle se distingue par l'enregistrement de six

années déficitaires, où le cumul annuel est descendu sous la barre des 400 mm. Ces épisodes de sécheresse pluviométrique, répartis sur des intervalles de 3 à 12 ans, ont été notés précisément en 1983 (242 mm), 1988 (341 mm), 2000 (336 mm), 2005 (377 mm) et 2008 (289 mm).

1.4.2.2-Répartition mensuelle moyenne des précipitations :

Le tableau 5 présente 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	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Tot
1913-1938	101	106	105	66	63	22	4	4	29	52	96	100	748
1961-2019	77	80	107	78	64	11	3	5	24	48	61	81	645

L'analyse de ce tableau révèle que, durant la période ancienne, les précipitations étaient plus soutenues entre les mois de décembre et mars, le mois de février étant le plus arrosé avec une moyenne de 106 mm. En revanche, au cours de la seconde période, le maximum pluviométrique s'est déplacé pour se situer en mars. Quant à la saison sèche, elle demeure constante au fil du temps, avec des précipitations minimales enregistrées entre les mois de juin et août pour les deux périodes d'étude.

1.4.2.3-Régimes saisonniers des précipitations :

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

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

Périodes/Saisons	Eté* (J-Jl-A)	Automne (S-O-N)	Hiver (D-J-F)	Printemps (M-A-M)	Type de Régime
1914 - 1938	30	177	307	234	HPAE
1961 - 2019	19	139	238	249	PHAE

*les 3 mois consécutifs avec des minimums pluviométriques

L'analyse de ces données montre que durant la période initiale, près de 41 % des précipitations annuelles se concentraient en hiver, suivi par le printemps avec 31 %, définissant ainsi un régime saisonnier de type HPAE (Hiver-Automne-Printemps-Été). À l'inverse, la seconde période marque une transition où les pluies printanières deviennent relativement plus abondantes que les pluies hivernales, faisant basculer le système vers un régime de type PHAE (Printemps-Hiver-Automne-Été). Dans les deux cas, la saison estivale demeure uniformément sèche, ne représentant que 3 % du cumul annuel.

1.4.3. Températures

L'analyse de ce paramètre climatique s'est basée sur les températures moyennes mensuelle et annuelle (T) et les températures extrêmes du mois le plus chaud (M, indicateur du stress

thermique estival) et du mois le plus froid (m : indicateur de la caractéristique de l'hiver). La surveillance de la tendance de ce paramètre est essentielle pour la santé du chêne-liège. C'est une espèce thermophile dont la répartition et les processus physiologiques sont fortement affectés par les températures basses (dangers de gelées hivernales en altitude) et hautes (canicules). Il est important de noter que la série chronologique des températures présente une grande disparité dans le temps ; provenant de diverses sources. En effet, les données sont morcelées de durées courtes à moyennes. En dépit de ces interruptions, ces séries restent extrêmement représentatives des tendances thermiques sur place et sont essentielles pour établir les indices bioclimatiques ainsi que pour déterminer avec précision l'étage de la subéraie étudiée.

1.4.3.1-Températures mensuelles minimales « m »

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

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

Années	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
1914-1938	1,8	2,4	3,5	5,4	8,7	12,0	17,0	17,3	13,6	9,3	5,3	2,2
1975-1991	3,7	2,8	3,1	5,1	7,4	11,0	17,4	16,8	13,2	9,6	4,5	3,6
1990-2000	3,5	4,3	5,7	6,9	9,9	13,3	15,3	16,0	13,2	10,6	8,9	5,0

L'examen détaillé des données thermiques consignées dans ce tableau révèle un changement du régime des températures minimales (m) des mois les plus froids au cours du temps dans la subéraie de Hafir. En effet, les données historiques montrent des moyennes mensuelles minimales de l'ordre de 1,8°C obtenue en janvier contre 2.8°C voire 3.5°C durant la période récente (1975-2000). Ceci explique une augmentation sensible de la température. Quel que soit la valeur minimale, la zone jouit depuis longtemps d'un climat à hiver frais.

1.4.3.2-Températures mensuelles maximales « M »

Les températures moyennes maximales mensuelles (°C) enregistrées au niveau de la forêt de Hafir sont présentées dans le tableau 8.

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

Années	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
1914-1938	9,4	10,9	13,0	15,8	19,7	24,8	30,6	31,1	25,9	20,6	13,7	10,6

1975-													
1991	9,7	10,4	14,0	15,9	20,7	26,0	30,9	28,1	25,1	20,3	14,2	12,2	
1990/2000	10,8	13,1	15,1	16,9	21,0	25,6	30,0	30,7	25,6	20,2	15,7	11,8	

L'examen des données présentées dans ce tableau indique que les températures maximales mensuelles correspondant au mois le plus chaud atteignent 31.1°C en mois d'aout dans la première période de référence. Par contre dans la période récente, ces températures sont relativement basses variant entre 30.7°C et 30.9°C enregistrées en juillet-aout. Ces résultats montrent durant ces 2 périodes des étés tempérés à chaud.

1.4.3.3-Températures moyennes mensuelles et annuelles « T »

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

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

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

L'examen global de ce tableau souligne que la température moyenne annuelle atteignait 13.5°C pendant l'ère historique ancienne. Par contre durant la deuxième période de référence, cette moyenne est relativement plus élevée ; elle se stabilise dans un intervalle allant de 14.7°C à 15.4°C. Une différence de 1 à 2°C caractérise souvent un changement du climat à tendance vers un réchauffement de l'air.

En somme, ces données révèlent que le chêne-liège à Hafir se situe dans une zone thermique préférentielle bien alignée avec les bornes physiologiques de cette espèce. Sa position correspond à des moyennes annuelles variant entre 13.5°C à 15.4°C. Par ailleurs, les moyennes des températures les plus basses durant le mois le plus froid restent largement supportables pour cette espèce ($m > 0^{\circ}\text{C}$), soulignant l'absence de gelées hivernales restrictives actuellement. Enfin, l'interprétation des données indique que les moyennes des températures maximales annuelles (M) demeurent modérées malgré l'effet de l'altitude, oscillant généralement entre 18°C et 22°C.

1.4.4. Autres facteurs climatiques

Outre les régimes de pluie et de température, qui sont des facteurs directs du bioclimat, d'autres éléments atmosphériques ont un impact non négligeable sur la croissance et l'évolution du chêne-liège. L'humidité relative de l'air, le niveau de la neige et le schéma des vents, bien qu'ils

soient des éléments secondaires mais restrictifs, ont un impact crucial sur la gestion des fonctions physiologiques principales de l'arbre.

L'ouverture des stomates et la régulation de la transpiration foliaire, mécanisme essentiel pour la survie de l'espèce en période de sécheresse estivale, sont directement influencées par l'humidité relative, qui conditionne le déficit de pression de vapeur (DPV). Bien que sporadique et dépendant de l'altitude de la subéraie (1270 m), l'enneigement constitue un apport d'humidité printanier non négligeable lors de sa fonte, tout en posant un risque de surcharge mécanique, (bris de branches) ou de gel prolongé pour le feuillage persistant.

Finalement, l'influence du vent est double : premièrement, il augmente l'évapotranspiration potentielle en accentuant le dessèchement de la frondaison ; deuxièmement, les vents forts peuvent entraîner des contraintes mécaniques sur la cime ou amplifier les risques de déracinement dans les sols superficiels. Il est donc essentiel de prendre en compte ces divers facteurs pour comprendre de manière globale le fonctionnement hydrique et la vulnérabilité écologique de la subéraie de Hafir.

2-Milieu forestier

Naturellement, la subéraie de Hafir se caractérise par une cohabitation exemplaire de trois principales espèces de chênes : le chêne-liège, le chêne vert et le chêne zeen. Avec une évaluation historique d'environ 3 500 hectares (Lamey, 1894), les forêts de chêne-liège se structurent suivant un gradient topoclimatique clairement établi. Environ 2 300 hectares de cette superficie sont constitués de peuplements purs. Le reste se compose en assemblages mixtes : le chêne-liège s'associe au chêne zeen dans les sites frais et humides (fonds de vallons, pentes orientées au nord), alors qu'il fusionne avec le chêne vert dans les milieux thermophiles et plus arides (Boudy, 1955).

D'un point de vue structurel, ces groupements exhibent une diversité d'âges allant des jeunes arbres aux phases les plus avancées. Toutefois, la structure forestière actuelle est majoritairement contrôlée par la vieille futaie (Fig. 33), ce qui indique un vieillissement général du peuplement et soulève des questions essentielles concernant le renouvellement et la régénération naturelle de cette subéraie



Figure 33 : Vue générale de la subéraie saine de Hafir (Photos originales, Bouhraoua; a (10/12/ 2014), b (21/06/2010), c (22/04/2013) et d (14/09/ 2012))

La composition des forêts de chêne-liège a été modelée au cours du temps, par les impacts de l'âge, mais également par diverses perturbations d'origine humaine, en particulier les feux de forêt récurrents liés aux changements climatiques (**Appiagyei et al., 2020; Appiagyei et al., 2023**).

Dans le cadre du projet de réhabilitation et développement durable intégré des paysages productifs de forêts de chêne-liège en Algérie, les services forestiers de Tlemcen ont établi récemment une carte de distribution du chêne liège de la forêt de Hafir (**CFT, 2026**).

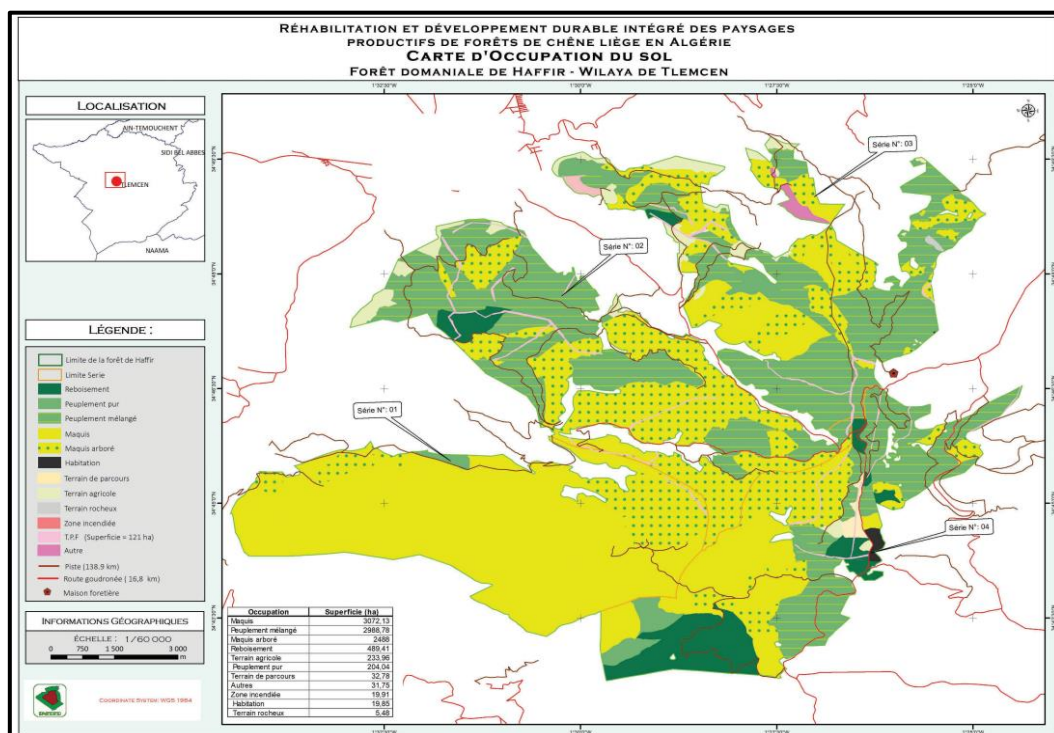


Figure 34 : forêt domaniale de Hafir wilaya de Tlemcen (conservation des forêts de Tlemcen 2026)

L'analyse de cette carte met en évidence la dominance des écosystèmes forestiers dégradés. En effet, plus de la moitié de la surface globale de la forêt s'est transformée en maquis dont une partie conserve des sujets reliques de chêne liège au stade arbre à arbuste (Fig 35).



Figure 35- Subéraie de Hafir dégradée en maquis clair (Photos Bouhraoua: canton Byadha, Sabra, 7 mai 2012)

La majeure partie des peuplements de chêne liège est en mélange avec d'autres espèces de chênes selon les stations et les versants (**Letreuch-Belarouci et al., 2013**). Cependant, les peuplements purs occupent une superficie très restreinte.

3. Importance économique de la subéraie de Hafir

La forêt de Hafir a une valeur socio-économique qui repose presque entièrement sur ses capacités de production de liège. Au niveau national, ce massif est historiquement désigné comme la source fournissant le liège de haute qualité (Boudy, 1955). Cette prééminence

technique et commerciale a été largement corroborée par les travaux de caractérisation qualitatives (Dehane et col., 2014 ; Ghalem et al., 2016).



Figure 36- Liège de Hafir en pile (a: tronc récolté en été 2013, b : pile de liège récolté en 2013 et c : pile de liège récolté en 2017) (photos, Bouhraoua)

Ces études révèlent que le liège de Hafir possède des caractéristiques d'une uniformité remarquable, définies par un taux de porosité idéal ($<4\%$) et des accroissements annuels lents et équilibrés (2.5 mm à 3.0 mm).

La production annuelle du liège fournit par cette forêt a connu une réduction alarmante par rapport à la production pendant l'époque coloniale. La figure 37 représente les données statistiques relatives à la production de liège à Hafir selon les services de la Conservation des forêts de Tlemcen (CFT, 2024).

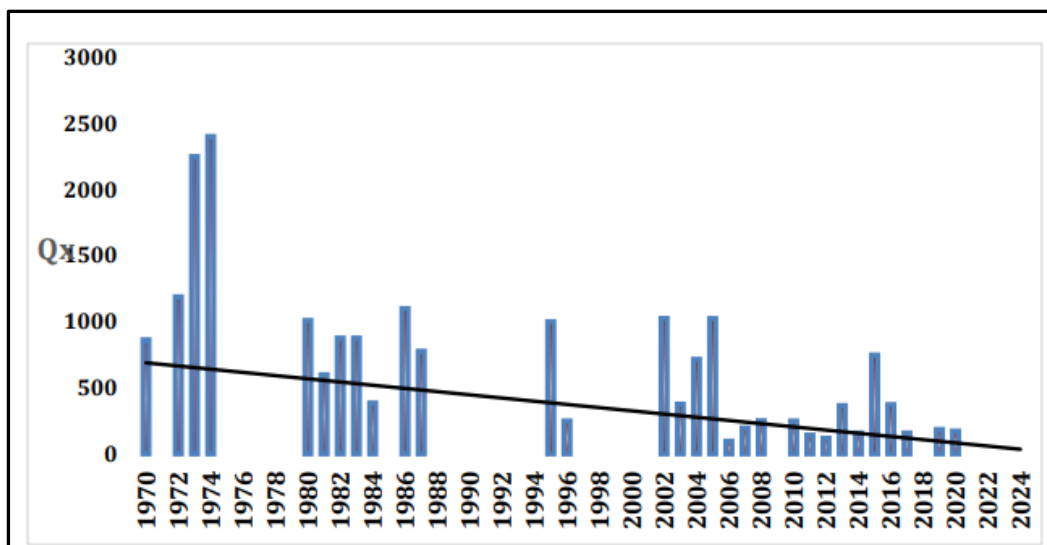


Figure 37 : Production du liège (quintaux) fournie par la subéraie de Hafir après l'indépendance (trait plein : tendance de la courbe) (CFT, 2024)

L'analyse de cette figure montre que la récolte du liège n'a repris qu'en 1970 avec une récolte de 864 qx. Depuis, le rythme d'exploitation du liège a été marqué par une grande instabilité. En effet, les campagnes de récolte ont été effectuées avec une cadence extrêmement irrégulière,

souvent ponctuée de longues périodes creuses s'étendant sur 5 à 7 ans. En plus, le volume moyen de liège récolté est particulièrement faible.

L'analyse rétrospective menée sur une période de 55 ans (1970–2024) confirme la trajectoire nettement régressive de la production de liège au sein du massif de Hafir. Au cours de cette période, l'effort d'exploitation n'a pu être maintenu que sur 30 campagnes totalisant un volume d'environ 20 000 qx ce qui représente une production moyenne annuelle de 362 qx.

Comparativement à la période coloniale (1940 et 1957), la forêt a pu fournir en 17 ans une production totale de liège estimée à 11 000 qx (soit 650 qx en moyenne) (Bouhraoua, 2003).

Le déclin structurel de la forêt dû à une multitude de facteurs interconnectés a des conséquences sur la baisse de la production du liège et la dépréciation de la qualité. Ceci s'explique principalement par la dégradation de la croissance et la santé des arbres par apparition de phénomènes de dépérissement (**Bouhraoua, 2003 ; Appiagyei et autres, 2023**).

Chapitre IV : Matériel et méthode

Dans le cadre du suivi pluriannuel de la subéraie de Hafir, les investigations menées entre la fin de 2025 et début 2026 font suite aux premières observations faites par Lallam-Tani entre octobre 2024 et mai 2025 (**Lallam-Tani, 2025**). Cette approche comparative entre deux années consécutives est essentielle pour détecter les modifications comportementales éventuelles du chêne liège et continuer à évaluer la réponse des arbres aux fluctuations thermiques et pluviométriques récentes.

À l'issue de l'épisode de la sécheresse, tout le massif forestier de Hafir-Zarieffet a révélé un changement de physionomie marquant caractérisé par des altérations structurales du peuplement traduisent graphiquement la souffrance physiologique des arbres face aux déficits hydriques accumulés (**Fig.38**).



Figure 38 vue générale du peuplement du chêne liège à Hafir Tlemcen (photo originale février 2026)

Dans ce cadre, notre démarche s'articule autour des objectifs suivants :

- Assurer le suivi spatiotemporel du comportement des arbres de chêne-liège face à la sécheresse pluviométrique au quelle s'ajoute les vagues de chaleur ;
- Comparer la dynamique de santé des arbres et des peuplements entre la saison végétative écoulée (2024-2025) et la saison actuelle (2025-2026) afin d'identifier les phases de déclin (dégradation) ou de résilience (amélioration),
- Effectuer une étude sanitaire approfondie en évaluant l'évolution des paramètres de vigueur sur les mêmes individus suivis dans le temps ;
- Analyser les paramètres physiologiques détectant les signes de stress hydrique et comprendre la gestion des ressources en eau du sol par l'arbre ;
- Comprendre encore mieux les mécanismes d'adaptation mis en place par l'espèce pour survivre aux conditions défavorables induites par le déficit hydrique prolongé,
- Déterminer si les changements sanitaires et physionomiques observés en 2025-2026 sont imputables aux fluctuations climatiques ou à l'apparition de ravageurs et maladies secondaires.

Pour répondre à ces objectifs, la méthodologie adoptée lors de nos sorties sur le terrain repose sur un protocole rigoureux en trois étapes clés :

1-Tout d'abord nous avons réalisé une analyse sanitaire descriptive des paramètres de vigueur des peuplements de la forêt de Hafir obtenus par Lallam-Tani (2024-2025).

2-Ensuite, nous avons procédé au prélèvement systématique d'échantillons biologiques sur les arbres déjà sélectionnés en 2024 pour observation de prêt au laboratoire.

3-Enfin, ces échantillons ont fait l'objet de suivi de mesures dendrométriques afin de fournir des données quantitatives permettant une comparaison fiable entre l'année 2024-2025 et la période 2025-2026.

Cette approche multidisciplinaire permet de modéliser avec précision la relation eau-sol-arbre et de diagnostiquer la trajectoire de santé de la forêt de Hafir face aux enjeux climatiques actuels.

1. Choix des sites d'étude

Le travail de terrain a été effectué au niveau de deux sites de la subéraie de Hafir. Ces sites ont été choisis de façon aléatoire dans les zones présentant des signes de dépérissement. Ce dernier se traduit par une perte foliaire, une mortalité des rameaux et branches et un affaiblissement général des arbres. A ces arbres, nous avons inclus des arbres de référence pour notre comparaison.

La sélection des sites s'est basée sur l'observation de l'importance des symptômes de vulnérabilité général du peuplement comme le dessèchement et jaunissement du feuillage, déficit foliaire ou absence des feuilles des rameaux. Au niveau de chacun de ces sites, nous avons relevé les paramètres géographiques (GPS) et topographiques (altitude, pente ; versant, ect.). Ce dispositif en 2 sites a été mis en place en octobre 2024 par Lallam-Tani (2025).

2.Choix des arbres

La sélection des unités d'échantillonnage a été effectuée de manière rigoureuse afin de garantir la représentativité statistique de l'étude. Les arbres ont été choisis sans distinction préalable de leur état sanitaire apparent, de leur âge, ou de leur statut d'exploitation (démasclé ou non). De même, l'origine des sujets qu'ils soient issus de semis naturels (franc-pied) ou de rejets de souche n'a pas constitué un critère d'exclusion. Cette approche de sélection aléatoire assure la neutralité de l'échantillonnage.

Au total, le dispositif porte sur un total de 90 arbres, répartis entre 65 arbres dans le premier site et 25 dans le second site.

2.1. Protocole de sélection spatiale

Pour le déploiement du dispositif sur le terrain, la méthode du plus proche voisin a été appliquée par plusieurs auteurs (**Bouhraoua, 2003 ; Naggar, 2021 ; Tekkouk, 2022**). À partir du premier individu repéré de façon indifférente au sein du peuplement, les arbres subséquents ont été intégrés successivement en fonction de leur proximité spatiale.

2.2. Identification et suivi individuel

Afin d'assurer une traçabilité parfaite lors des campagnes ultérieures de mesures et de prélèvements, chaque arbre au sein des deux sites a fait l'objet d'un marquage individuel sur le tronc à l'aide de peinture blanche. Elle permet non seulement de localiser rapidement les sujets lors des missions de terrain, mais aussi de garantir la cohérence du suivi temporel des observations dendrométriques et sanitaires.

2.3. Caractérisation de l'arbre de référence

Pour servir de base comparative à l'ensemble de l'échantillon, un arbre de référence a été toujours soigneusement sélectionné. Ce témoin a été choisi pour sa vigueur optimale, répondant aux critères morphologiques suivants : 1) Une forte densité foliaire ; 2) Une cime dense et bien structurée ; 3) Un feuillage présentant une coloration verte foncé caractéristique (**Fig.39**)



Figure 39- Vue générale de l'arbre de référence (Photo originale, Mai2026)

L'établissement de ce témoin permet d'évaluer, par comparaison directe, les variations de l'état de santé et les modifications architecturales des autres arbres-échantillons. Cette démarche comparative est indispensable pour obtenir une analyse équilibrée des données et aboutir à des résultats scientifiques fiables et reproductibles.

3. Données des sites d'étude

L'analyse de l'état de santé des arbres exige une connaissance approfondie de leur milieu physique et forestier. Une description est cruciale pour identifier, mesurer et comprendre l'origine du dépérissement des peuplements (**El-Tolbi et al., 1998**). C'est dans cette optique que nous avons récolté diverses données sur le terrain, allant des simples observations visuelles des arbres aux mesures techniques les plus précises des feuilles. La méthodologie que nous avons suivie s'appuie sur les standards du réseau européen de surveillance **RENECOFOR (Ulrich, 1992)**, des protocoles qui ont déjà prouvé leur pertinence lors de travaux précédents sur le chêne-liège dans la région de l'ouest algérien (**Bouhraoua, 2003 ; Dehane, 2012 ; Belhoucine, 2013**).

3.1-Caractérisation physique des stations

3.1.1. Paramètres géographiques

Afin de situer nos sites d'étude au sein de la forêt avec une rigueur maximale, nous avons procédé à la détermination de leur position spatiale exacte. Cette opération a consisté à relever les coordonnées géographiques au centre de chaque site en utilisant un récepteur GPS (GPSMAP 64, GARMIN). Pour compléter cette identification cartographique, nous avons également consigné le lieu-dit correspondant à chaque canton forestier, garantissant ainsi une localisation administrative et géographique exhaustive de nos dispositifs expérimentaux.

3.1.2. Paramètres topographiques

Les caractéristiques topographiques influencent fortement la dynamique et la santé de la subéraie de Hafir. **La pente**, mesurée au clinomètre et classée en quatre : classe 1 (pente faible < 5 %), classe 2 (pente moyenne entre 5 et 10 %), classe 3 (pente forte entre 10 et 20 %) et classe 4 (pente abrupte > 20 %). Au-delà de 10 %, le terrain est qualifié d'accidenté, une condition au niveaux d'inclinaison (de faible à abrupte) selon les standards repris par **Bouhraoua (2003)**, devient un facteur limitant au-delà de 10 % en accentuant le ruissellement au détriment de l'alimentation en eau des arbres. **L'exposition**, déterminée à la boussole, régit le microclimat et le taux de dessèchement foliaire (**Bouhraoua et al., 2014**). Enfin, l'altitude, relevée par GPS, conditionne la pluviométrie et la biodiversité végétale, impactant ainsi directement la tolérance du chêne-liège face aux stress environnementaux (**Dahli, 2019**).

3.1.3 - Paramètres pédologiques

Les paramètres pédologiques représentent les descripteurs fondamentaux du milieu, L'importance de cette étude édaphique réside dans la compréhension de la relation étroite entre l'eau, le sol et l'arbre.

La structure du sol, dictée par sa texture et la décomposition de sa roche mère, ne se limite pas à un simple support mécanique ; elle joue le rôle de réservoir hydrique. Ces caractéristiques déterminent la porosité du sol et, par conséquent, sa capacité d'infiltration et de rétention des eaux de pluie. Dans un contexte où la ressource en eau est limitante, ces paramètres deviennent des facteurs discriminants : ils régulent la disponibilité de l'eau pour le système racinaire, influençant ainsi directement la photosynthèse et la vigueur de l'arbre (**Lallam Tani, 2025**).

3.1.3.1- Profondeur du sol

Celle-ci est établie au moyen de sondages à la tarière effectués en divers points des sites. On distingue ainsi quatre niveaux : classe 1 pour un sol superficiel (< 30cm), classe 2 pour un sol moyennement profond (30-60 cm) et classe 4 qualifiant un sol profond (> 60 cm) (**Huchon, 1955**).

3.1.3.2- Autres paramètres pédologiques

Pour étudier les propriétés physiques et hydriques du sol, des prélèvements ont été réalisés sous la projection verticale du houppier des arbres au niveau des deux sites. À l'aide d'une tarière hélicoïdale, les échantillons ont été collectés par horizons successifs de 20 cm jusqu'à 100 cm de profondeur (0-20cm, 20-40cm, 40-60cm, 60-80 cmet 80-100 cm). Les dates de prélèvement ont été enregistrés et les échantillons ont été conditionnés *in situ* dans des sachets hermétiques étiquetés pour être transférés au laboratoire (**Lallam Tani, 2025**).

1-Humidité du sol (%) : État hydrique du sol

L'humidité du sol est le paramètre le plus fluctuant. Elle détermine la disponibilité ou le stockage de l'eau du sol pour les racines. Dans nos conditions de travail, nous avons opté l'approche gravimétrique pour son évaluation. En effet, la méthode gravimétrique (ou méthode par étuvage) est la méthode de référence pour quantifier l'humidité pondérale du sol. Son principe repose sur la mesure de la perte de masse d'un échantillon de sol après élimination complète de son eau par séchage thermique. Le prélèvement est pesé à l'état frais, puis séché à l'étuve à **105°C** pendant 2heures où à l'aire libre jusqu'à l'obtention d'une masse constante

Dans nos conditions de travail, l'ensemble des échantillons de sol prélevés sur le terrain ont été transportés au laboratoire pour y être pesés le lendemain à l'aide d'une balance électronique. Ceci permet d'obtenir le poids humide (Ph). Ces échantillons ont ensuite été soumis à un processus de dessèchement dans une étuve réglée à 70 °C pendant 48 heures, avant d'être pesés à nouveau à leur sortie afin de déterminer le poids sec (Ps). La différence de masse avant et après séchage indique le poids de l'eau et la teneur en eau du sol ou humidité (Hs) est calculée selon la formule suivante :

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

Il convient de signaler que les dates de collecte des échantillons du sol ont été enregistrées ainsi celles des dernières pluies précèdent les prélèvements.

2-Aperçu global de la texture du sol

La texture globale de la texture de nos sols a été appréciée au laboratoire par tamisage mécanique des échantillons prélevés à différentes profondeurs. Le tamisage de la fraction de sol sèche a été réalisé à l'aide d'un tamiseur de marque CISA afin de séparer les particules grossiers et celles fines selon les diamètres suivants :

Eléments grossiers : les particules dont le diamètre est supérieur à 2 mm (Graviers),

Eléments fins : ils contiennent les Sables : diamètre compris entre 2 mm et 50 µm, les Limons : diamètre compris entre 50 et 2 µm et les Argiles : diamètre inférieur à 2 µm

Bien que le tamisage à sec sépare efficacement les fractions grossières, il doit être complété par une méthode de sédimentation sur la terre fine (< 2 mm) pour non seulement isoler les particules fines mais de déterminer la classe texturale exacte du sol.

Dans nos conditions de travail, chaque échantillon a été pesé à l'aide d'une balance puis soumis à un tamisage standardisé d'une minute à travers une colonne de cinq tamis (5 mm, 2 mm, 1 mm, 50 µm, 20 µm et 10 µm). Les refus de chaque tamis ont été pesés individuellement et les fractions de 20 et 10 µm ont été regroupées. Ceci permettent de convertir les résultats en pourcentages massiques par rapport au poids initial (**Lallam Tani, 2025**).

Taux d'éléments grossiers

Le taux d'éléments grossiers détermine souvent la pierrosité du milieu ; il influe sur le drainage, l'aération, la dynamique thermique et la capacité de stockage en eau du sol. Expérimentalement, cette fraction est calculée à partir des masses cumulées retenues par les tamis de 5 mm et 2 mm. Selon le pourcentage pondéral obtenu, le comportement hydrodynamique du sol est évalué d'après trois seuils qualitatifs (**Omany et Pasternak, 2005 ; Schoeneberger et al., 2012 ; NRCS, 2024**) :

< 10 % (Faible) : Conditions favorables au développement racinaire et bonne rétention en eau.

10 à 35 % (Modérée) : Diminution progressive de la réserve utile en eau.

> 35 % (Forte) : Sol squelettique ou pierreux, caractérisé par une faible capacité de stockage hydrique et un risque accru de sécheresse.

Taux d'éléments fins

Pour obtenir un aperçu général sur la texture du sol, les différentes fractions de la terre fine ont été quantifiées et exprimées en pourcentages massiques par rapport à l'échantillon total initial :

- **Les sables** : déterminés en cumulant les sédiments retenus sur le tamis de 1 mm (sables grossiers) et de 50 µm (sables fins).
- **Les limons et argiles** : évalués globalement à partir des fractions fines récupérées sur les tamis de 20 µm et 10 µm.

3.1.4- Paramètres climatiques :

3.1.4.1-Caractérisation de la période de sécheresse (2019-2025)

Pour évaluer l'aléa climatique entre 2019 et 2025 et son influence sur l'état sanitaire de la subéraie de Hafir, nous avons analysé deux paramètres climatiques à savoir les précipitations mensuelles et les températures moyennes (minimales, moyennes et maximales).

Les données proviennent de la station météorologique automatique de Mansourah (Lieu : INRF) complétées par les données fournies par un pluviomètre. Les caractéristiques géographiques de cette station se résument comme suit :

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

3.1.4.2. Caractérisation climatique de l'année d'étude (2025-2026)

La caractérisation climatique de notre année d'étude a été réalisée à partir des données extraites de la même station mentionnée précédemment. Cette analyse couvre une partie de l'année hydrologique 2025-2026, s'étalant du mois de septembre 2025 jusqu'à la fin du mois de mai 2026. La station fournit les données mensuelles durant la période de septembre à décembre 2025 seulement. Par contre à partir de janvier jusqu'à mai 2026, nous analysons seulement la pluviométrie journalière et mensuelle fournie par le pluviomètre.

Pour le traitement de ces précipitations, un « jour de pluie » est défini par un cumul de précipitations supérieur ou égal à 1 millimètre (mm) sur une période de 24 heures. Ce seuil standardisé en climatologie est fréquemment adopté par les services météorologiques internationaux pour écarter les pluies insignifiantes qui s'évaporent avant de pénétrer le sol (**Douguedroit, 1987 ; Rivoire et al., 2019**).

4-Données arbres.

4.1- Caractérisation dendrométrique

Cette phase d'étude repose sur l'analyse de plusieurs paramètres dendrométriques ; elle permet de caractériser précisément la structure du peuplement forestier au sein de chaque site (**Lallam Tani, 2025**).

4.1.1- Circonférence sur écorce (C) :

Elle est mesurée au moyen d'un ruban à une hauteur standardisée de 1,30 m sur écorce. La circonférence interne nous permet d'estimer le diamètre interne (diamètre sous-liège ou au bois) de chaque arbre selon la formule de **Saccardy (1937)**, dont les principes géométriques sont illustrés par la figure 40.

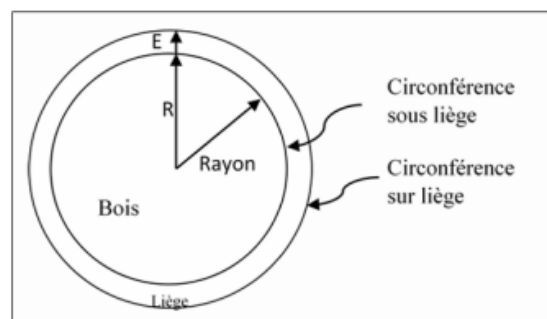


Figure 40 : Circonférence sur liège et sous liège dans une section transversale d'une tige
 $\text{Circonférence sur liège} = \text{Circonférence sous liège} + (2\pi * E)$

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

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

Avec C_{ext} : Circonférence externe sur écorce (cm), E : épaisseur du liège (cm)

Les valeurs de diamètre ainsi calculées ont été regroupées en classes d'amplitude de 10 cm afin d'établir la structure diamétrale du peuplement.

4.1.2. Hauteur totale (Ht)

La hauteur totale des arbres, mesurée sur le terrain à l'aide d'un dendromètre Blume-Leiss (Marchal et Rondeux, 1995), a été répartie en quatre classes : < 5 m, 6-7 m, 7-9 m et > 10 m. Cette variable caractérise la structure verticale du peuplement ; sa stratification reflète la vigueur et la position sociale des sujets. En effet, la hauteur détermine le statut de dominance d'un arbre, son accès aux ressources et son potentiel de croissance futur (Boudru, 1989 ; Gaudin, 1997).

En s'appuyant sur les critères de **Naggar (2021)**, trois classes de dominance sociale (Dm) ont ainsi été distinguées :

Classe 11 (Dominant) : Arbre de la strate supérieure au houppier vigoureux, symétrique et doté d'une excellente croissance verticale.

Classe 12 (Codominant) : Arbre de la strate supérieure mais présentant un houppier asymétrique ou étroit, signe d'une vigueur moindre.

Classe 13 (Dominé) : Arbre exclu du couvert principal, dont le développement vertical est directement limité par la concurrence des arbres voisins.

4.2. Relevés d'exploitation du liège

Ces relevés regroupent les indicateurs quantitatifs et qualitatifs permettant de caractériser la qualité de la dernière campagne de récolte du liège. L'évaluation de cette exploitation repose sur deux mesures fondamentales qui sont l'épaisseur du liège (E, exprimée en millimètres) et la hauteur d'écorçage (Hd, exprimée en centimètres). Les dates de la dernière récolte sont extraites des documents forestiers.

4.2.1. Épaisseur du liège

L'épaisseur du liège est obtenue par la moyenne de quatre mesures radiales effectuées aux quatre points cardinaux à une hauteur de 1,30 m à l'aide d'une jauge à écorce (**Massenet, 2010**). Pour évaluer sa qualité commerciale, ces épaisseurs ont été réparties en 5 classes selon la nomenclature de **Pereira (2007)** dont les détails sont présentés dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Différentes classes de l'épaisseur du liège (Pereira, 2007)

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

5. Relevés sanitaire des arbres

Ce volet caractérise précisément l'état de santé des arbres face au déficit hydrique, en évaluant leurs réponses adaptatives par stratégie de régulation hydrique et leur vulnérabilité aux ravageurs de faiblesse. Pour ce faire, l'évaluation architecturale et symptomatologique de l'état de santé des arbres repose sur une approche combinée, inspirée des protocoles des réseaux d'observation des forêts européennes (CEE) (**DSF, 1991 ; CRPFC, 2014**).

La méthode ARCHI (CRPFC, 2014) : Cette approche diagnostique repose sur l'analyse architecturale du houppier pour évaluer l'état physiologique de l'arbre. Elle s'appuie sur des critères précis tels que la concurrence au sein de la couronne, le contour de la cime hors compétition et l'état des unités architecturales sommitales. Si cette méthode permet de statuer sur la vitalité globale de l'arbre, elle présente la limite de ne pas identifier les causes directes (biotiques ou abiotiques) du dépérissement, ni d'isoler les variations liées à l'âge ou aux pratiques sylvicoles ; de plus, elle est théoriquement optimisée pour des peuplements non soumis à des extrêmes climatiques (**Fig.41**).

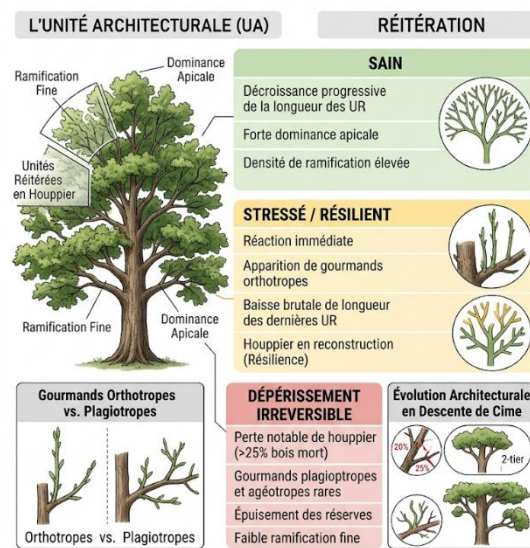


Figure 41-Différents types du protocole ARCHI (CRPFC ,2014)

La méthode DEPEFEU (CRPFC, 2014) :

C'est une méthode complémentaire de la précédente ; elle utilise le déficit foliaire comme principal descripteur de l'état sanitaire. Le principe repose sur une estimation visuelle, réalisée depuis le sol, de la perte de surface foliaire de l'arbre échantillonné par rapport à un individu sain de référence, ce dernier étant considéré à 0 % de déficit.

5.1. Protocole d'observation et d'examen sanitaire des arbres

La méthode mise en œuvre repose sur une approche visuelle de l'architecture globale de l'arbre et de ses composantes structurales. Ce protocole multiniveau permet de dresser un bilan de vitalité complet et de localiser les symptômes du dépérissement à travers l'examen approfondi de trois compartiments clés : 1) **Le houppier** : analyse de la dynamique de ramification, de l'organisation des branches maîtresses et de la densité de la cime, 2) **Le tronc et les branches** : inspection de l'état du tronc, recherche de blessures, chancres ou galeries d'insectes, et détection de nécroses cambiales, 3) **Les rameaux feuillés** : évaluation de la vigueur des pousses, de la taille et coloration des feuilles, et détection des flétrissements ou défoliations.

5.2-Chronologie des observations et collecte des données de terrain

Contrairement aux espèces caduques, la nature sclérophylle et le feuillage persistant du chêne-liège permettent de réaliser des diagnostics sanitaires et architecturaux constants en toute saison. Exploitant cet avantage, nos campagnes de terrain ont été planifiées régulièrement entre l'hiver et le printemps 2026, assurant ainsi un suivi rigoureux des arbres cibles préalablement sélectionnés et marqués lors de la mission de 2025.

5.2.1-Phase hivernale (Février 2026)

Nous avons procédé à la reconnaissance visuelle des arbres matérialisés à la peinture l'année précédente par **Lallam-Tani (2025)**. Par la suite, nous avons évalué l'état sanitaire des arbres-

échantillons. Pour chaque sujet, nous avons minutieusement complété une fiche de notation regroupant un ensemble de paramètres sanitaires et architecturaux clés.

Ce diagnostic individuel s'est focalisé sur certains critères précis tels que l'estimation du déficit foliaire (DF), la transparence du houppier (TR), la mortalité des rameaux (MR), ainsi que le niveau de dégradation de la ramification fine.

À l'issue de ces évaluations visuelles, nous avons procédé à l'échantillonnage de rameaux situés exclusivement au centre proche de sommet du houppier et prélevés à l'extrême périphérie de la couronne ; ce ciblage positionnel rigoureux a été appliqué afin de garantir la collecte des unités terminales et de cibler précisément les rameaux formés lors de la saison de croissance précédente (2025).

5.2.2-Phase printanière (Fin avril - Début mai 2026) :

Des sorties de terrain ont été réalisées au cours de cette période charnière entre début débourrement, plein feuillaison et début floraison. Les prélèvements de matériel biologique ayant été finalisés lors de la phase précédente. Ces visites ont été exclusivement réservées à la mise à jour du diagnostic sanitaire visuel et à l'enregistrement de la dynamique de reprise végétative et de la floraison. Ce stade de développement foliaire actif a permis d'obtenir des descripteurs phénologiques essentiels pour le suivi de la santé des houppiers.

Afin de garantir une traçabilité scientifique optimale, chaque échantillon de rameau feuillé a été immédiatement placé sur le terrain dans un sachet individuel étiqueté, puis soumis à une congélation dès le retour au laboratoire. Ce protocole a été appliqué pour figer les propriétés physiologiques du matériel végétal et écarter tout risque de dégradation biologique avant les manipulations. Ces échantillons stabilisés ont ensuite permis de procéder à la mesure morphométrique précise des rameaux de 2025.

5.3- Protocole d'évaluation et conduite des observations

La caractérisation de l'état de la cime s'est appuyée sur l'analyse simultanée de plusieurs descripteurs morphologiques et architecturaux. Le protocole repose sur le principe d'une estimation visuelle réalisée depuis le sol, visant à quantifier le déficit de la surface foliaire de chaque individu par comparaison directe avec un arbre témoin local, choisi pour son état de santé optimal et considéré comme la référence saine (0% de perte de feuillage).

5.3.1. Le déficit foliaire (DF) ou perte foliaire

Le déficit foliaire constitue le critère principal pour caractériser l'état sanitaire des arbres (**Landmann, 1988**), complété par l'évaluation des anomalies de coloration du feuillage (**Bonneau et Landmann, 1988**). Ces deux descripteurs non destructifs et reproductibles sont des indicateurs d'état reflétant l'influence des conditions environnementales sur l'activité physiologique de l'arbre. Leur estimation s'effectue par comparaison avec un arbre de référence sain, dont le déficit est théoriquement nul (0%, selon le **CRPFC, 2014**) ou cliniquement négligeable (< 25%, d'après **Bouhraoua, 2003**). De plus, le descripteur « *déficit foliaire* » intègre ici de manière conjointe la chute effective des feuilles et leur sénescence (**Naggar, 2021**).

Dans le cadre de notre protocole, la comparaison interannuelle du déficit foliaire, combinée aux mesures morphométriques des rameaux et de la surface foliaire en laboratoire, a permis de suivre rigoureusement la dynamique des houppiers. Cette approche comparative, essentielle pour évaluer l'évolution de l'état de santé du chêne-liège face au dépérissement (**Bouhraoua, 2003**), a mis en évidence trois tendances distinctes chez les sujets étudiés : une dégradation, une stabilité ou une amélioration.

Sur le terrain, l'évaluation du déficit foliaire est exprimée en pourcentage. Afin d'optimiser la précision de l'estimation visuelle, la couronne de chaque arbre est segmentée et examinée en quatre zones homogènes distinctes (**Fig.42**).

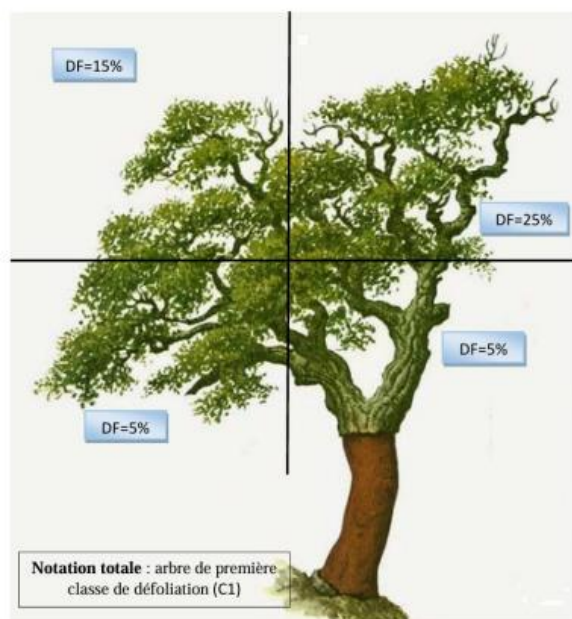


Figure 42 : Protocole de notation de déficit foliaire d'un chêne liège (Naggar, 2021).

Les données collectées sur le terrain ont été regroupées en quatre classes distinctes de déficit foliaire, conformément aux protocoles standardisés du Département de la Santé des Forêts (**DSF, 1991**), de **Nageleisen (2002)** et de **Bouhraoua (2003)**. Ces classes, détaillées dans le **tableau 11**, permettent de traduire une situation sanitaire précise pour chaque individu.

Il convient de souligner qu'un seuil de perte foliaire inférieur ou égal à 25% est considéré comme une fluctuation physiologique mineure, facilement identifiable à l'œil nu. À ce niveau, le déficit foliaire n'est pas nécessairement synonyme de pathologie ou de dépérissement, car elle peut résulter uniquement de phénomènes naturels et cycliques propres à la biologie du chêne-liège (**Bouhraoua, 2003**)

Tableau 11 : Classes de notation de déficits foliaires des arbres (Bouhraoua, 2003)

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

La deuxième catégorie regroupe les individus dits « affaiblis » ; moins sévèrement touchés ; ils s'inscrivent dans une phase d'alerte physiologique. Le diagnostic devient critique à partir de la troisième classe, où les sujets sont formellement qualifiés de gravement atteints ou dépérissant. Ce stade marque le franchissement d'un seuil de dégradation irréversible de l'appareil végétatif (**Bonneau et Landmann, 1988**). De manière générale, l'ensemble des arbres dont les symptômes se classent au niveau de la deuxième catégorie ou au-delà est considéré comme « atteint » au sens pathologique (**Bouhraoua, 2003**).

5.3.2- Autres paramètres sanitaires

Pour caractériser l'aspect du houppier, chaque paramètre s'est vu attribuer une note d'intensité qualitative ou une classe quantitative exprimée en pourcentages (**Stafford et Bodson, 2006**), s'articulant généralement autour d'une échelle de gravité de 0 à 4. L'ensemble de ces descripteurs, consignés dans le tableau 12, est issu des méthodes d'évaluation sanitaire développées pour les essences forestières et adaptées au chêne-liège (**DSF, 1991 ; CRPFC, 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 = moyenne (<50%), 3 = forte (<75%), 4 = très forte (>75%)
Mortalité des rameaux	MR	0 = non (0%), 1 = faible (25%), 2 = moyenne (<50%), 3 = forte (<75%), 4 = très forte (>75%)
Transparence = Visibilité du squelette de l'arbre	TR	0 = nulle (0%) = Non 1 = faible (<25%) = partielle 2 = moyenne (25-50%) = partielle 3 = forte (50-75%) = totale ou entière 4 = très forte (>75%) = totale ou entière
Perte de ramification avant période de stress climatique	PR	0 = nulle (0%), 1 = faible (<25%), 2 = moyenne (<50%), 3 = forte (<75%), 4 = très forte (>75%)
Rameau aux bourgeons ou nu	RB	0 = nul (0%), 1 = faible (<25%), 2 = moyen (25-50%), 3 = fort (50-75%), 4 = très fort (>75%)
Rameau feuillé	RF	0 = nul (0%), 1 = faible (<25%), 2 = moyen (25-50%), 3 = fort (50-75%), 4 = très fort (>75%)
Combinaison des classes des deux types de rameaux	RB-RF	1 = RB0 RF4; 2 = RB1 RF3; 3 = RB2 RF2; 4 = RB3 RF1; 5 = RB4 RF0
Taille des feuilles sur le houppier	%	Très petites feuilles (TPF), petites feuilles (PF), feuilles moyennes (FM), grandes feuilles (FG) et très grandes feuilles (TGF)
Evolution de la ramification		Échancrures (Ech : 0 = non, 1 = oui), Fenêtres (Fn : 0 = non, 1 = oui)
Hors Concurrence	HC	0 = nul (0%), 1 = faible (<25%), 2 = moyen (25-50%), 3 = fort (50-75%), 4 = très fort (>75%)

*Différentes classes sont illustrées dans la figure 27



Figure 43 : Typologie des classes de transparence du houppier chez le chêne-liège a1(nulle), 2(faible), 3(moyenne), 4 (forte) et 6 (très forte) (Photos originales, février 2026)

De surcroît, les paramètres architecturaux comme la mortalité des rameaux et des branches, et la réduction de la ramification fine (RF) permettent de caractériser le degré de visibilité du squelette de l'arbre (absente, partielle ou totale) afin d'évaluer la dégradation de son architecture (Lallam Tani, 2025).

Concernant la transparence du houppier, une échelle de 0 à 4 distingue les sujets sains (classe 0, transparence nulle) des individus présentant une transparence faible (classe 1) ou des déficits foliaires forts à très forts (classes 2 et 3). Enfin, le paramètre de position « hors concurrence » est évalué sur la moitié supérieure de la cime selon les quatre points cardinaux, en comptabilisant le nombre de directions où le houppier entre en contact direct avec la canopée des arbres voisins

5.1.2. Diagnostic sanitaire du tronc

Chaque tronc d'arbre-échantillon a été soumis à un examen visuel approfondi basé sur des descripteurs sanitaires standardisés (**Bouhraoua, 2003 ; Tekkouk, 2022 ; Tekkouk et Bouhraoua, 2022**), synthétisés dans le tableau 13 et illustrés par la figure 44. Ce diagnostic numérique et visuelle cible l'intégrité du liège et des tissus sous-corticaux afin de détecter les indices d'attaques d'insectes xylophages (trous d'émergence, galeries, vermoulure) ainsi que les symptômes de champignons trachéomycosiques (écoulements de sève, chancres ou nécroses cambiales).

Tableau 13 : Différents descripteurs utilisés dans l'examen du tronc (Source : Lallam Tani, 2025)

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

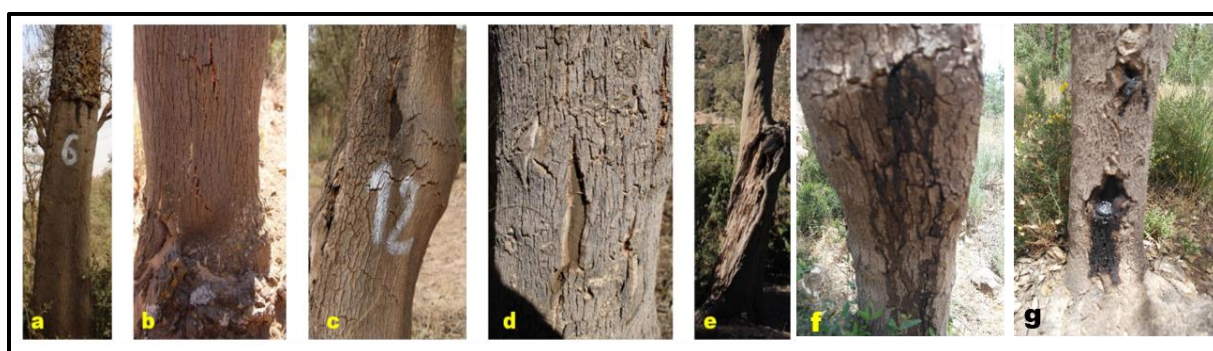


Figure 44 : Différents états de tronc du chêne liège : a (sain), b (sciure xylophage au collet), c (légèrement crevas), d (présence de charbon de la mère), e (tronc sévèrement crevassé), f et g (suintements noirâtres pathologiques) (Photos originales, 2025 et 2026)

L'évaluation sanitaire du tronc repose d'abord sur l'estimation du taux de crevassement, qui matérialise les pertes structurales de tissus ligneux en proportion du volume total du fût. Le tronc est qualifié de « sain » en l'absence de fente, d'« altéré » en présence de fissures, et de «

fortement crevassé » lorsque ces pertes de volume excèdent le seuil de 25% (**Bouhraoua, 2003**).

En second lieu, l'inspection de la surface corticale permet de détecter les infestations par les bio agresseurs secondaires. L'activité du platype (*Platypus cylindrus* Fab.) se manifeste par des rejets de sciure blanche au collet et le long du fût (**Fig. 45**), tandis que le déclin physiologique de l'hôte est évalué par la recherche de nécroses et de croûtes charbonneuses causées par le charbon de la mère (*Biscogniauxia mediterranea*) dans les anfractuosités du liège.



Figure 45 : Observation des attaques du *Platypus cylindrus* au niveau du collet (sciure indiquée par une flèche noire) (Photos originales)

La densité du xylophage est estimée en nombre de trous d'entrée par unité de surface (trous/dm²). Pour cela, nous avons compté globalement le nombre de trous tout autour du collet (circonférence du tronc) et sur une hauteur de 10cm (soit 1dm). Ce nombre reporté à la circonférence nous détermine la densité de l'insecte par décimètre carré.

6- Examen des rameaux

6.1-Echantillonnage

L'évaluation fine des rameaux nécessite le déploiement de protocoles d'observation et d'analyse complémentaires, menés successivement sur le terrain et en laboratoire. À cet effet, une campagne de prélèvement d'échantillons a été orchestrée durant la période hivernale 2026 (février-mars).

Sur le plan méthodologique, le protocole ciblait prioritairement la collecte de rameaux situés dans la partie centrale du houppier proche du sommet de l'arbre. Néanmoins, face aux contraintes structurales de certains arbres présentant un fût particulièrement élancé et une cime hors d'atteinte, l'échantillonnage a dû être standardisé au niveau du tiers inférieur de la frondaison. Les prélèvements ont été rigoureusement effectués au sein des deux placettes d'étude à l'aide d'un sécateur télescopique (**Fig. 46**), garantissant des coupes nettes et préservant l'intégrité des structures végétales à analyser.



Figure 46- Méthode de prélèvement des échantillons de rameaux des arbre (Source : Gauche ; Photo originale 26 février 2026, droite : Lallam Tani, 2025)

L'objectif de cette approche était de prélever des rameaux-échantillons sur l'ensemble des arbres qui ont fait l'objet d'analyses de rameaux, bourgeons et feuilles l'année 2025. Ces arbres ont été retenus indépendamment de leur état de santé. Au total, 29 arbres-échantillons ont fait l'objet de collecte des rameaux ce qui représente environ 33 % de la population d'arbres-échantillons. Ces prélèvements se répartissent entre le site 1 (16 échantillons) et le site 2 (13 échantillons). De plus, deux arbres sains de chaque placette sont intégrés dans cette étude comme référence ce qui totalise 33 arbres étudiés.

Chaque échantillon a été placé dans un sachet en plastique étiqueté avec le numéro de l'arbre et de la placette correspondante, puis transporté au laboratoire pour analyses. Afin de prévenir la déshydratation et le dessèchement des tissus, et ainsi préserver la fraîcheur des rameaux feuillés jusqu'aux observations, les prélèvements ont été conservés au congélateur.

6.2- Examen et caractérisation des rameaux

Au laboratoire, chaque échantillon prélevé a fait l'objet de plusieurs observations et mesures morphologiques.

En effet, chaque rameau de chaque échantillon est répartie entre deux catégories de rameaux : **1-rameaux nus** : Ce sont des rameaux qui portent des bourgeons 2024 et/ou 2025 latents non débourrés au cours la saison végétative 2025. A ceci s'ajoute les rameaux à très petites feuilles ou en début débourrement (**Lallam-Tani, 2025**).

2-rameaux feuillés : Ce sont des rameaux dont les bourgeons ont pleinement débourré pour donner naissance à des jeunes pousses feuillées. Dans cette catégorie de rameau, le protocole a consisté d'abord à mesurer les rameaux courts de l'année 2025. Par la suite, l'ensemble des feuilles portées sur les rameaux été délicatement séparé des axes caulinaires. Un tirage au sort a ensuite été effectué afin de retenir un lot standardisé de 30 feuilles par arbre-échantillon, garantissant la validité statistique des analyses. Sur chaque feuille sélectionnée, la longueur du limbe (L, en mm) a été mesurée le long de la nervure principale (de la base à l'apex), et la largeur (l, en mm) au niveau de la section transversale la plus large, perpendiculairement à la nervure principale. Ces mesures ont été faites à l'aide d'une règle graduée (**Fig.47**). Cette méthode garantit une caractérisation géométrique représentative du feuillage.



Figure 47 : Différents échantillons de rameaux et de feuilles prélevés sur les arbres (Photos originales).

À partir de ces deux variables, nous avons estimé la surface foliaire moyenne (mm^2). Les feuilles ont été classées en cinq catégories morphologiques puis comparées aux caractéristiques d'un arbre sain servant de témoin ou de référence (**Tab.14**). Cette approche permet de quantifier l'impact du niveau de dépérissement sur l'atrophie ou la réduction dimensionnelle des structures foliaires formées en 2025.

Tableau 14 : Différentes catégories de taille des feuille (Source : Lallam Tani, 2025)

Catégories de taille foliaire	Code	Classe longueur (surface foliaire)
Feuille de très petite taille	TPF	<1,5 cm (<2 cm^2)
Feuille de petite taille	PF	1,5 - 2,5 cm (2-4 cm^2)
Feuille de taille moyenne	FM	2,5 - 3,5 cm (4-6 cm^2)
Feuille de grande taille	GF	>3.5 cm (>6 cm^2)

7- Protocole de suivi temporel de l'état sanitaire des arbres

La démarche repose sur le suivi des campagnes d'inventaire sanitaire de terrain itératives à l'aide du dispositif de suivi permanent. Les mesures ont été rigoureusement reconduites sur les mêmes arbres-échantillons que ceux marqués et analysés lors de la campagne précédente (saison 2024-2025). Ceci permet un suivi individuel à moyen voire à long terme de la dynamique de dégradation ou de résilience face à la contrainte climatique. Pour cela, nous avons retenu deux paramètres sanitaires pouvant changer d'une année à l'autre à savoir le déficit foliaire et par conséquent la transparence du houppier. Les autres paramètres varient faiblement entre deux années consécutives comme la mortalité des rameaux, la mortalité des branches, la perte de ramification, etc. En plus de ceci, tous les paramètres forestiers sont invariables (la dominance, la concurrence, état des troncs, etc.).

7.1-. Évolution de la transparence de la cime

L'évaluation de la porosité du houppier repose sur une estimation visuelle de la translucidité de la cime. Ce diagnostic visuelle permet de suivre la trajectoire vitale de l'arbre et de classer son état biologique actuel selon trois modalités : le dépérissement progressif (dessiccation des structures ligneuses), la reprise végétative par résilience (apparition de bourgeons actifs, nouvelles pousses ou rejets épicrotiques), ou la mortalité.

7.2 Évolution du déficit foliaire

Ce paramètre quantifie la perte de la masse photosynthétique par une comparaison interannuelle directe du taux de défoliation globale du houppier. Ce suivi macroscopique permet d'évaluer le maintien ou la dégradation du couvert foliaire de l'arbre d'une saison à l'autre face à l'aridité.

7.3- Reprise végétative

Nous avons suivi la date de reprise végétative des arbres pour 2026. Pour cela, nous avons estimé le taux de débourrement des bourgeons sur terrain indiquant la reprise de la saison végétative. Cette estimation est faite en taux de reprise par rapport au taux de non débourrement des bourgeons.

7.4- Caractérisation morphométrique comparative

Les prélèvements de rameaux dans le houppier permettent de confronter les caractéristiques des organes formés en 2025 avec les données de l'année antérieure (2024). Les analyses en laboratoire ciblent la longueur des unités de croissance de l'année ainsi que les dimensions géométriques (longueur et largeur) des feuilles afin de quantifier précisément la surface foliaire moyenne.

8- Traitement statistique des données

Plusieurs paramètres retenus dans cette étude ont fait l'objet de traitement statistiques simples ou multivariés.

Les variables morphométriques des rameaux mesurées et calculées au cours de cette étude ont été soumises à un traitement statistique univarié. Ce dernier est employé afin de tester l'impact du niveau de dépérissement et des facteurs stationnels sur chaque paramètre morphométrique. Pour cela nous avons appliqué une analyse de variance à un facteur (ANOVA 1) afin de comparer les moyennes permettant de vérifier si les variations d'élongation des rameaux courts et de surface foliaire mesurées expriment une réponse biologique réelle au climat.

L'analyse statistique multivariée a pour but de synthétiser l'information et d'identifier les variables morphologiques et sanitaires les plus discriminantes pour caractériser la variation de l'état de santé des arbres des deux sites entre 2024 et 2025. Pour cela nous avons réalisé une **Analyse en Composantes Principales (ACP)**. Cette analyse nous permet de projeter simultanément l'ensemble des individus et des descripteurs mesurés des deux sites (**Tab.15**) afin de dégager les principales variables explicatives et de regrouper graphiquement les différentes situations sanitaires ou trajectoires de réponses observées sur le terrain. L'ensemble des traitements multivariés sont réalisés par le logiciel R, version 4.3.3 (2024-02-29 ucrt) (FactoMineR).

Tableau 15 : Variables sanitaires et morphométriques soumises à l'ACP

Variable	Unité	code	Modalités
Longueur de rameau court (cm)	cm	R	R4 (rameau 2024) et R5 (rameau 2025)
Surface foliaire	cm ²	SF	SF4 (rameau 2024) et SF5 (rameau 2025)
Reprise végétative	%	Rv	Rv5 (rameau 2025) et Rv6 (rameau 2026)
Déficit foliaire	%	Df	Df4 (rameau 2024) et Df5 (rameau 2025)
Transparence	%	Ts	Ts4 (rameau 2024) et Ts5 (rameau 2025)
Rameaux bourgeons	%	Rb	Rb4 (rameau 2024) et Rb5 (rameau 2025)
Rameaux feuillés	%	Rf	Rf4 (rameau 2024) et Rf5 (rameau 2025)
Feuilles très petites	%	Tpf	Tpf4 (rameau 2024) et Tpf5 (rameau 2025)
Feuilles petites	%	Pf	Pf4 (rameau 2024) et Pf5 (rameau 2025)
Feuilles moyennes	%	Fm	Fm4 (rameau 2024) et Fm5 (rameau 2025)
Grandes feuilles	%	Gf	Gf4 (rameau 2024) et Gf5 (rameau 2025)
Densité du xylophage	Trous/dm ²	Pc	Pc4 (rameau 2024) et Pc5 (rameau 2025)

Chapitre V :

Résultats et Discussion

I-Résultats

1-Caractérisation des sites d'étude

1.1-Caractéristiques physiques

1.1.1-Paramètres géographiques et topographiques

Les données topographiques et géographiques fondamentales des deux sites d'étude font l'objet d'un résumé au sein du tableau 16. Quant à leur insertion spatiale, elle est visualisée dans la figure 48 à travers une superposition de la carte d'état-major de la forêt domaniale de Hafir et Google Maps.

Tableau 16 : Principale caractéristiques géographiques et topographique des site d'étude

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

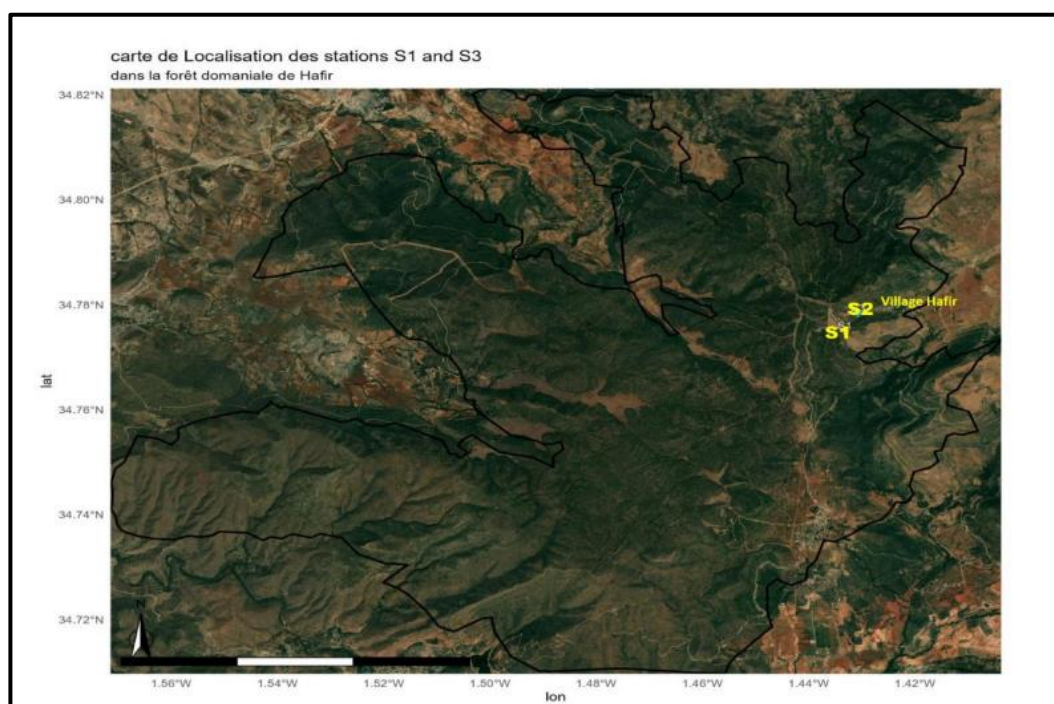


Figure 48 : Localisation géographique des deux stations d'étude S1 et S2 dans la forêt domaniale de Hafir sur Google Mapp

Les relevés géographiques et topographiques indiquent que les deux stations d'étude se situent dans le canton Oued Fernane ; une zone caractérisée par une forte prépondérance du chêne-liège. L'altitude y est relativement homogène, oscillant entre 1263 m (P2) et 1292m (P1). La configuration topographique présente une inclinaison faible (P1) à modérée (P2), des conditions propices à l'accumulation de la matière organique et au développement d'un substrat à la fois profond et fertile (**Masson, 2005a**). Sur le plan de la topo-séquence, la première station est implantée à mi-versant sous une exposition nord, réputée plus fraîche, tandis que la seconde se positionne en bas de versant sous une exposition sud-ouest, globalement plus chaude (**Masson, 2005a**).

1.1.2. Paramètres pédologiques

Les analyses des différents paramètres pédologiques retenus pour cette étude sont consignées dans les tableaux et figures ci-après.

1.1.2.1. Affleurements rocheux et caillouteux

Les observations relatives à la charge pierreuse et rocheuse de surface révèlent une distribution hétérogène entre les deux sites. Au niveau du premier site, les affleurements sont limités et occupent moins de 10 % de la superficie globale. À l'inverse, le second site présente une proportion nettement plus élevée de substrat rocheux et pierreux, se classant ainsi dans la classe 2 (taux de recouvrement compris entre 10 et 25 %).

1.1.2.2-Profondeur et texture du sol

Les caractéristiques physiques du sol, notamment la profondeur et la texture déterminées par les sondages à la tarière réalisés au niveau de deux points différents de la placette d'étude, sont présentées dans le **Tableau 17**. Les fiches de terrain et le détail des analyses de sol sont reportés en **Annexe 1**.

Tableau 17- Résultats de mesures de certains paramètres du sol au niveau de 2 sites

Profondeur	% Eléments Grossier (EG)		Humidité du sol (%)		Eléments fins (EF) dominants* (%)	
0-20 cm	24,89	10,31	9,55	13,18	97,50	90,53
20-40 cm	14,44	10,75	8,99	5,17	98,61	78,72
40-60 cm	4,28	9,74	11,68	10,59	96,62	91,96
60-80 cm	14,66	8,11	6,83	2,39	98,46	97,55
80-100 cm	14,78	7,92	8,23	6,07	97,70	96,49
100-120cm	19,47	24,27	7,57	2,16	97,62	95,29
120-140 cm	11,65		8,44		98,03	
Moyenne	14,88	11,85	8,76	6,59	97,79	91,76

*les taux les plus élevés

L'analyse conjointe des propriétés physiques du sol révèle un sol profond (supérieur à 100 cm) dans les deux points arrière. Les deux sols sont caractérisés par un seuil qualitatif d'éléments

grossiers de type modéré (10 à 35 % : **RCS, 2024**) variant entre 11 et 15%. Cette charge en cet élément peut diminuer progressivement de réserve utile en eau. Ainsi, les profils sédimentaires sont à dominance de fraction d'éléments fins de 50µm. Cette dimension correspond au sable fin ou limon grossier.

La granulométrie se caractérise par une texture globalement limoneuse à limono-sableuse homogène sur l'ensemble des profils Ceci est définie par une proportion de sables fins ou limons grossiers particulièrement élevée variant en moyenne entre 91 % et 97 %. Les proportions élevées de limons dans toutes les profondeurs accentuent les caractères de filtration et de rétention de l'eau dans le sol. Par contre, les proportions infimes de limons fins ou argiles accentuent plutôt le caractère non disponible de l'eau pour les arbres.

L'architecture texturale contrôle donc directement la dynamique hydrique dans le sol. Les données quantitatives confirment que cette composition texturale régule les variations de l'humidité du sol (% H). En surface et dans les horizons moyennement profonds (0-60 cm), la prédominance du sable fin et des éléments fins (EF) permet le maintien de teneurs en eau maximales, oscillant entre 5 % et 10 %, en dépit d'une inflexion intermédiaire (< 5%) imputable aux variations locales des éléments grossiers (EG).

En revanche, dès que l'on franchit le seuil des 60 cm, la faible capacité de rétention induite par cette texture macroporeuse se traduit par un drainage intense : l'humidité subit un fléchissement drastique pour se stabiliser à des valeurs globalement faibles (comprises entre 8,44 % et 14,30 %), corrélées à une réduction progressive de la masse de la matrice fine (EF).

1.1.3-Paramètres climatiques :

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

Précipitations

Les relevés pluviométriques enregistrés à la station de Mansourah sur la période 2019-2025 permettent de donner une idée globale sur l'intensité de la période de sécheresse qui a touché toute la région récemment (**Fig.49**).

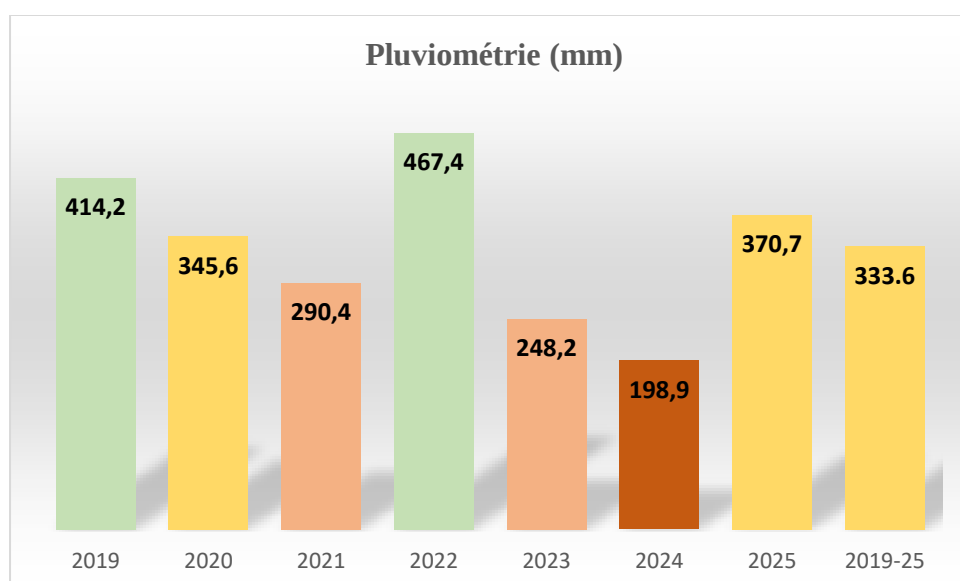


Figure 49 : Évolution de la pluviométrie annuelle et moyenne interannuelle (2019-2025) à la station de Mansourah

L'analyse de la pluviométrie met en évidence une forte irrégularité interannuelle des précipitations. La moyenne sur 7 ans s'établit à 333,6 mm. Cette valeur est beaucoup inférieure à la moyenne historique de la station proche de Mefrouche (509 mm) ce qui représente une diminution de 34%. L'année 2022 représente le maximum pluviométrique de la série avec 467,40 mm, tandis que l'année 2024 marque un minimum critique avec seulement 198,90 mm, illustrant une récurrence marquée des déficits pluviométrique et par conséquent les déficits hydriques dans la région.

Les hauteurs des pluies signalent un coefficient élevé de 28.2%. D'un point de vue éco-physiologique, la récurrence de ces déficits supérieurs à 50%, bien visible à travers la succession d'années déficitaires sur l'histogramme, 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 vigueur du chêne-liège. En limitant ses capacités de défense active, cette contrainte climatique stricte constitue le facteur déclenchant majeur du phénomène de dépérissement observé au sein du peuplement.

Le tableau 18 consigne les précipitations moyennes mensuelles par rapport à la station el Mefrouche pour comparaison.

Tableau18 : Répartition moyenne mensuelle des pluies en (mm) pendant les 6 années

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
1982-20	76,70	61,10	57,00	42,40	40,70	13,90	3,10	4,60	26,50	39,70	77,00	66,60
deficit	-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

La lecture du tableau montre que pratiquement tous les mois ont connu un déficit pluviométrique. Ce déficit varie entre 40 et 72% sauf les 2 mois de mars et avril qui ont connu respectivement une stabilité et une amélioration. Cette analyse des précipitations mensuelles révèle un glissement précoce des pluies printanières et une sécheresse estivale sévère.

Le régime saisonnier des pluies durant la période de sécheresse est de type P.H.A.É. ; il est caractérisé par une concentration des précipitations au printemps (**Tab.19**). 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 de type HP AE.

Tableau 19 : 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
Deficit %	60,25	41,57	-2,15	34,46

Températures

L'évolution mensuelle des températures minimales (m°C), maximales (M°C) et moyennes (T°C) enregistrées pour la période 2019-2025 est illustrée par les courbes de la **figure 50**.

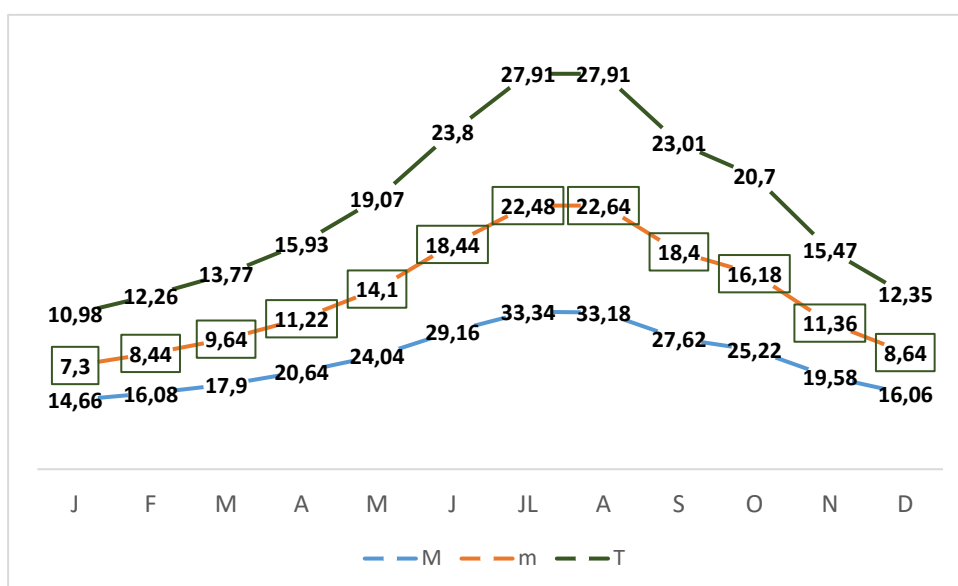


Figure 50 : Courbes des températures mensuelles moyenne minimale (m°C), maximale (M°C) et moyenne (T°C) enregistrées à Mansourah entre 2019 et 2025

La lecture de la figure met en évidence un régime thermique saisonnier typiquement méditerranéen, caractérisé par une forte amplitude thermique et une saison chaude bien marquée. Les températures maximales et moyennes culminent de manière synchrone durant la période estivale, atteignant leurs valeurs absolues en juillet et août avec une moyenne maximale de 33,3°C et une température moyenne maximale de 27,9°C. À l'inverse, la période hivernale affiche les valeurs les plus basses, le minimum thermique étant enregistré en janvier avec une température minimale moyenne de 7,3°C et une moyenne mensuelle de 10,9°C.

Cette configuration des courbes thermiques souligne l'intensité du stress thermique estival (juillet-août) subi par le peuplement forestier. La conjonction de ces fortes températures maximales (supérieures à 33°C) avec l'absence de précipitations durant cette même période accentue l'évapotranspiration potentielle, aggravant ainsi le déficit hydrique cellulaire chez le chêne-liège et favorisant son affaiblissement physiologique global.

La synthèse graphique des conditions ombrothermiques (pluies et températures) ayant régné dans la subéraie du massif forestier de Hafir est illustrée par la **Figure 51**

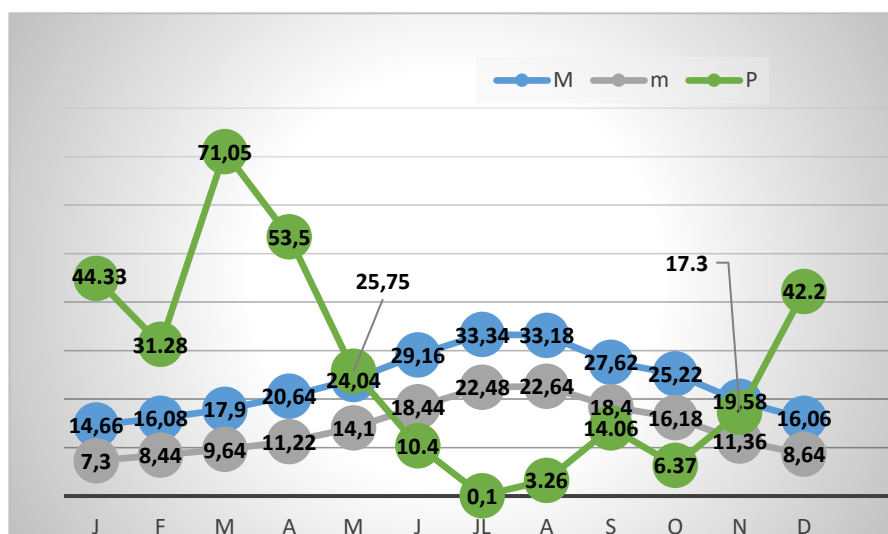


Figure 51 : Conditions climatiques mensuelles (m°C, M°C et Pmm) enregistrées dans la forêt de Hafir

La lecture de cette figure met en évidence l'existence d'une période de sécheresse estivale critique et prolongée, matérialisée par le croisement des courbes où les précipitations s'effondrent sous le double des températures. Ce déficit hydrique culmine en juillet et août, mois durant lesquels les pluies atteignent leur minimum absolu (jusqu'à 1 mm en juillet) tandis que les températures maximales moyennes atteignent leur paroxysme à 33,34°C. Cette sécheresse estivale stricte induit un stress hydrique aigu chez le chêne-liège, limitant sa résilience face aux facteurs de dépérissement. Sur le plan thermique, le mois de Janvier se définit comme le plus froid avec une température minimale moyenne minimale de 7,30 °C. Inversement, les mois de Juillet et Août enregistrent les températures maximales moyennes les plus élevées (33,34 °C et 33,18 °C). Le profil pluvio-thermique montre une concentration des pluies durant les mois frais et une chute drastique de la pluviométrie coïncidant avec les fortes chaleurs estivales.

1.1.3.3.- Caractérisation de l'année hydrologique 2025-2026

Les résultats des données climatiques relevées au cours de l'année hydrologique 2025-2026 (soit entre septembre 2025 et avril 2026) sont présentés dans le **tableau 20**.

Tableau 20 : Caractéristiques climatiques entre septembre 2025 et avril 2026

Paramètres	S	O	N	D	J	F	M	A	Tot (Moy)
Pluies (mm)	14,0	1,8	20,1	88,7	117,4	71,0	82,0	89,5	484,5
m°C (Minimale)	18,8	16,1	10,6	7,2	—	—	—	—	(13,2)
M°C (Maximale)	29,1	25,7	18,8	12,9	—	—	—	—	(21,6)
T°C (Moyenne)	23,95	20,90	14,70	10,05	—	—	—	—	(17,40)

La lecture de ce tableau montre une saison automnale excessivement sèche et déficitaire, cumulant seulement **35,9 mm** sur les trois mois (septembre, octobre et novembre 2025). Le mois d'octobre 2025 s'est avéré presque totalement blanc avec un apport critique de seulement **1,8 mm**. Cette situation traduit un démarrage hydrologique très déficitaire pour le milieu forestier.

Les mois de décembre 2025 et janvier 2026 ont rompu nettement cette sécheresse en enregistrant des précipitations très importantes **88,7 mm** et **117,4 mm** respectivement. Ce retour des pluies hivernales a permis d'amorcer une recharge substantielle des réserves en eau du sol nécessaires au peuplement.

Enfin, le début du printemps prolonge cette dynamique favorable avec une tranche de précipitations de **171,5 mm** répartie entre mars (**82,0 mm**) et avril (**89,5 mm**), garantissant une disponibilité hydrique opportune au moment de la reprise d'activité végétale.

En somme, la quantité de pluies enregistrée durant ces 8 mois atteint un total cumulé de **484,5 mm**, marquant une nette amélioration pluviométrique par rapport aux années de sécheresse aiguë précédentes.

En ce qui concerne les températures documentées pour le premier quadrimestre (septembre à décembre 2025), nous constatons que le début de l'automne est resté très chaud, caractérisé par des valeurs maximales moyennes élevées en septembre (M = 29,1C) et octobre (M = 25,7C), avant de connaître un rafraîchissement progressif à l'approche de l'hiver où la minimale moyenne s'abaisse à **7,2°C** en décembre.

1.2. Caractérisation forestière

L'ensemble des résultats relatifs aux paramètres dendrométriques, sylvicoles et d'exploitation est synthétisé dans le tableau 21 et détaillé à travers différentes figures.

Tableau21 : Caractéristiques dendrométriques, forestières et d'exploitation des deux peuplements de chêne liège

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

1.2.1- Paramètres dendrométriques

1.2.1.1. Diamètre des arbres

La figure 52 illustre la distribution des tiges par classes de diamètre pour les deux sites d'étude. Cette approche offre une perspective complémentaire sur la structure diamétrique des peuplements, permettant d'en caractériser le stade de développement, d'évaluer la dynamique de régénération et d'anticiper leur évolution potentielle

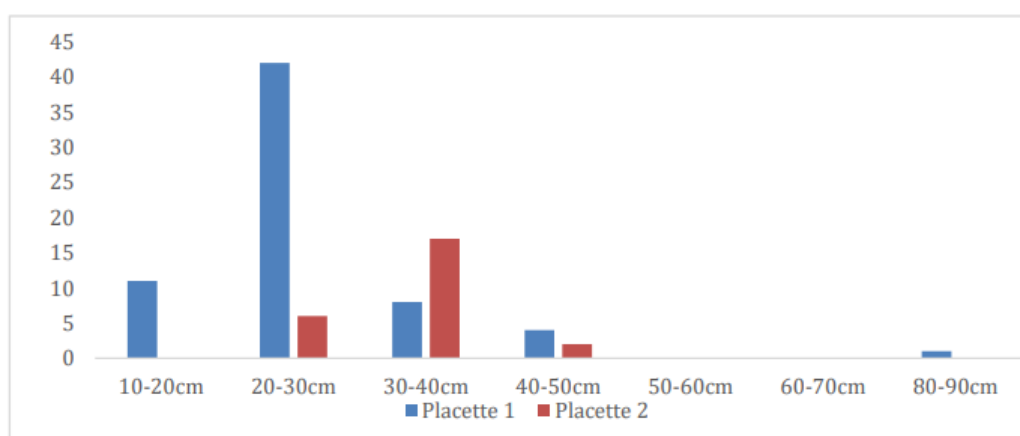


Figure 52 : Histogramme de distribution des arbres par classes de diamètre dans les deux station d'étude

Au niveau du site 1, les individus affichent un diamètre moyen de 25,49cm, avec une forte dispersion des valeurs qui oscillent entre 14 et 85cm (CV = 40%). Le profil de distribution met en évidence une asymétrie positive (asymétrie gauche), caractérisée par une forte concentration

des tiges dans la classe de diamètre 20-30cm. Cette classe modale est immédiatement suivie par deux classes consécutives de moindre importance, tandis que les catégories supérieures à 50 cm s'avèrent quasi absentes. Une telle distribution structurelle reflète un peuplement forestier hétérogène, typique d'une jeune futaie en phase de croissance active.

À l'inverse, le peuplement du site 2 se distingue par une structure diamétrique d'allure symétrique, centrée sur la classe 30-40 cm avec un diamètre moyen de 32cm. La faible variabilité inter-individuelle observée confère à ce second peuplement une structure nettement plus homogène.

1.2.1.2. Hauteur des arbres

Les mesures de la hauteur totale des arbres révèlent une valeur moyenne identique de 8 m pour les deux peuplements. Les hauteurs oscillent globalement entre 4,5 et 10,5m ; toutefois, la dispersion des valeurs s'avère nettement plus marquée au sein de la station 1, alors que la station 2 se caractérise par une plus forte homogénéité, traduite par un faible écart-type (Tab. 21). La distribution des individus par classes de hauteur est illustrée par la figure 53.

Au sein du site 1, la hauteur totale des tiges est comprise entre 6 et 9m. La classe modale s'établit dans l'intervalle 7-9 m, regroupant 43% de l'effectif ; ces individus occupent une position sociale « dominante » au sein de la canopée. Elle est immédiatement suivie par la strate des arbres co-dominants, caractérisée par des hauteurs allant de 6 à 7m. En revanche, les extrêmes à savoir les sujets dominés (plus bas) ou émergents (plus hauts) s'avèrent marginaux.

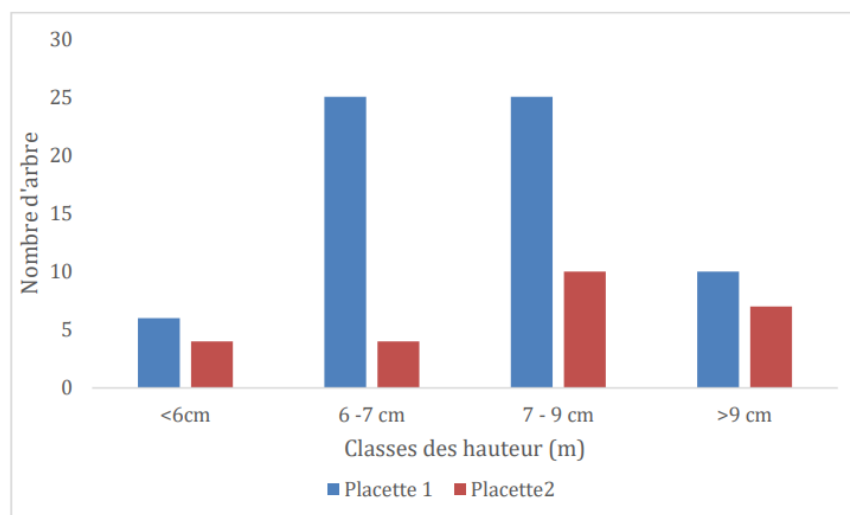


Figure 53 : Distribution des arbres par classes de hauteurs totales

La seconde placette se distingue par une répartition beaucoup plus équilibrée entre les différentes strates de hauteur. La classe dominante (7–9m) occupe une position intermédiaire entre les classes 6–7 m et > 9m, ce qui confirme la faible variabilité verticale du peuplement. Enfin, les arbres dominés (< 6m) n'y représentent qu'une faible proportion.

1.2. 2-Paramètres d'exploitation

1.3.1. Épaisseur du liège

Le peuplement premier site a subi sa dernière récolte en 2016, par contre le site 2 a été exploité en 2015. À la date des inventaires (2024), le liège de reproduction est donc âgé de 8 ans pour la station 1 et de 9 ans pour la station 2. Les épaisseurs moyennes mesurées oscillent entre 22,4 mm (site 1) et 27,2 mm (site 2).

Ces valeurs mettent en évidence un accroissement annuel moyen du liège s'élevant respectivement à 2,8 mm et 3,0 mm. La figure 54 distribue les mesures des épaisseurs des échantillons selon leur type de liège



Figure 54 : Distribution des épaisseurs selon le type de liège des 2 sites à Hafir

L'analyse de cette figure révèle que, pour le premier site, la majeure partie du liège produit appartient aux catégories « flotte » (38%) et « mince » (42%). La proportion de liège atteignant les calibres commercialement exploitables (épaisseur supérieure à 27 mm : lièges « juste » et « régulier ») reste faible, en dépit d'un cycle de production déjà engagé depuis 8 ans.

En revanche, au niveau du second site, bien que la catégorie du liège « mince » demeure importante (42%) après 9 ans de croissance, elle est suivie par une forte représentativité des lièges exploitables (« juste » et « régulier »), qui totalisent 50% de l'effectif.

Bien que le cycle de production ne soit pas encore arrivé à son terme, la dynamique de croissance annuelle du suber s'avère actuellement peu satisfaisante pour les deux peuplements en raison de la sécheresse et l'état de santé des arbres. La prochaine récolte sera programmée à l'échéance de la 14^{ème} année. Cette rotation plus prolongée devrait ainsi permettre d'optimiser la production d'un liège bouchonnable, dont l'épaisseur cible sera supérieure à 30 mm.

2- Caractérisation sanitaire des arbres des deux sites

2.1-Déficit foliaire ou perte foliaire (DF) :

La répartition des arbres échantillonnés selon les classes de déficit foliaire (DF) pour les deux sites d'étude au cours des années d'inventaire 2024 et 2025 est représentée par les histogrammes dans la **figure 55**.

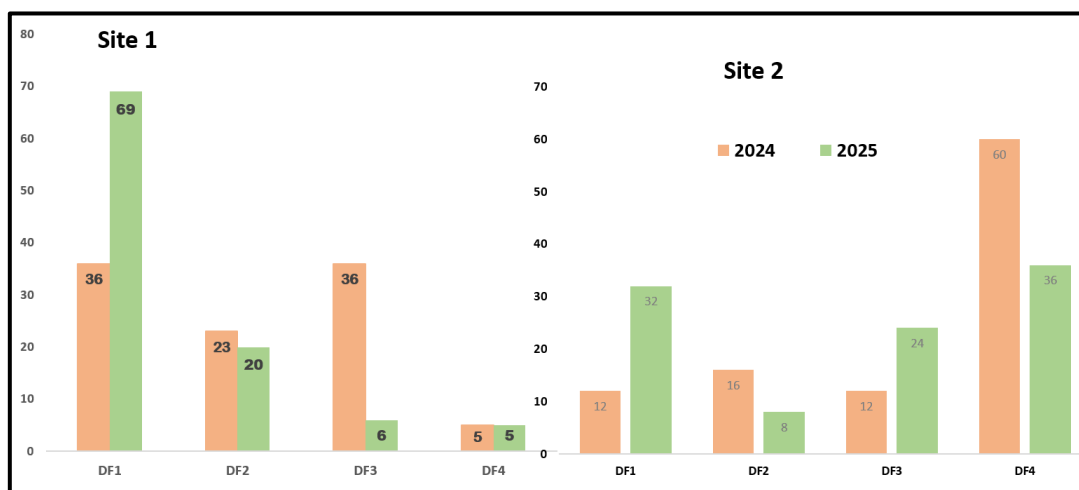


Figure 55 : Histogramme de distribution (%) des arbres par classe de déficit foliaire des arbres des deux sites au cours des années 2024 -2025

L'analyse comparative du paramètre sanitaire « *déficit foliaire* » révèle une dynamique sanitaire contrastée entre les années 2024 et 2025 et entre les deux sites, traduisant ainsi une hétérogénéité dans la réponse des arbres face aux contraintes climatiques récentes :

2.1.1-Site 1

Les arbres de ce peuplement ont connu en 2024 une nette dégradation de leur état sanitaire (**Fig.56**). En effet, les arbres atteints (DF₂ et DF₃) sont dominants avec 59% dont 36% sont représentés par les arbres dépérissants. Les arbres sains (DF₁) sont moins fréquents (23%) et les arbres morts (DF₄) sont de l'ordre de 5%.

En 2025, nous assistons à une amélioration sanitaire marquée par un glissement massif des effectifs vers la classe de perte foliaire la plus faible (DF₁), qui bondit de 36 % à 69 %. Cela s'explique par le passage de la majorité des arbres affaiblis (DF₂) vers la première classe. Parallèlement, la classe des arbres dépérissants (DF₃) s'effondre au profit de la classe 2 en passant de 36 % à 6 %.



Figure 56 : Etat sanitaire général du peuplement du site 1 en 2024 (a : Photo Bouhraoua) et 2025 (b,c : Photos originales)

2.1.2-Site 2

La comparaison entre les deux inventaires, montre une tendance à l'amélioration sanitaire des arbres en seconde année. Beaucoup d'arbres marquent des signes de résilience à la sécheresse (Fig.57).



Figure 57 : Etat sanitaire général du peuplement du site 2 en 2024 (a : Photo Bouhraoua) et 2025 (b,c : Photos originales)

La classe de défoliation la plus sévère (DF₄) régresse notablement en chutant de 60 % en 2024 à 36 % en 2025. Ce taux représente réellement la mortalité des arbres ce qui est très élevée et le reste du pourcentage (24%) a été glissée vers la classe 3. Ce sont des arbres qui étaient considérés comme mort en 2024 (arbres avec rameaux complètement nus : **Lallam-Tani, 2025**) ont pu reprendre faiblement leur végétation en 2025. Les arbres considérés comme dépéris (DF₃) en 2024 (12%) ont connu une amélioration de leur santé en se glissant surtout vers la catégorie d'arbres affaiblie (DF₂ : 8%). La même translation sanitaire est enregistrée chez les arbres affaiblis (DF₂ : 16% en 2024) vers les arbre sains (32%).

Le déplacement global des fréquences d'arbres vers les classes précédentes témoigne d'une reprise de la vigueur foliaire chez une grande des sujets échantillonnés.

En somme, ces résultats mettent en évidence une vulnérabilité stationnelle contrastée : le premier site subit en 2024 une dégradation moins alarmante de son état de santé, par rapport au second site.

2.2-Transparence :

La distribution par classe de transparence du houppier des arbres des deux peuplements pour les deux années d'observation (2024 et 2025) est illustrée par la figure 58 suivante :

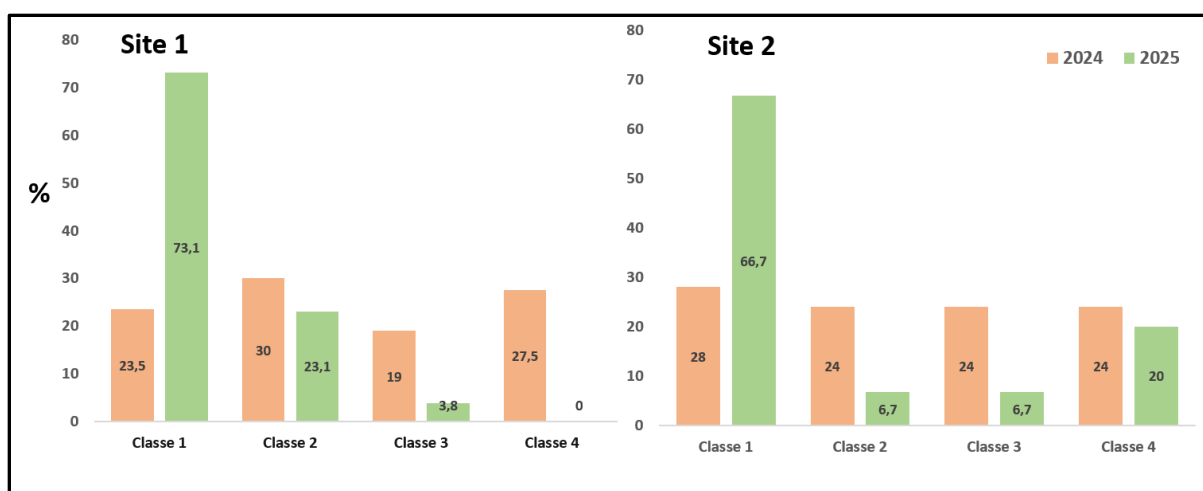


Figure 58 : Distribution des arbres par classe de transparence du houppier en 2024 et 2025
Des deux sites de Hafir

En **2025**, l'état sanitaire des arbres est globalement rassurant et en nette amélioration. Les deux sites sont caractérisés par une forte prédominance d'arbres à faible transparence (Classe 1), représentant **73,1 %** des effectifs pour le site 1 et **66,7 %** pour le site 2. Les arbres au houppier très clair signe de dépérissement (Classe 4) régressent ou disparaissent, témoignant d'une dynamique positive à l'échelle de la station.

2.2.1-Évolution au sein du site 1

On observe une amélioration spectaculaire entre 2024 et 2025. En 2024, le peuplement montrait un stress marqué avec 27,5 % des sujets en classe 4. En 2025, on assiste à un basculement massif vers la classe 1 (qui passe de 23,5 % à 73,1 %), tandis que la classe 4 s'annule complètement (0 %), confirmant une reconstitution efficace du feuillage.

2.2.2-Évolution au sein du site 2 :

Ce peuplement affiche également une **transformation positive**, bien que plus nuancée. En 2024, les classes 2, 3 et 4 se partageaient équitablement le peuplement (24 % chacune). En 2025, la classe 1 explose pour atteindre **66,7 %** (contre 28 % en 2024), alors que les classes 2 et 3 chutent à **6,7 %** chacune. La classe 4 diminue plus lentement, passant de 24 % à **20 %**.

Les deux peuplements montrent une dynamique synchrone de récupération sanitaire. La forte augmentation de la classe 1 en 2025 prouve la résilience à court terme du chêne-liège face aux stress subis durant les années antérieures. Cependant, le site 1 montre une régénération totale (0 % en Classe 4), tandis que la placette 2 conserve un noyau d'arbres fortement touchés (20 %). Cela suggère que la placette 2 subit des contraintes stationnelles plus lourdes ou abrite des arbres ayant dépassé un seuil de non-retour.

2.3-Autres paramètres sanitaires

Beaucoup d'autres paramètres descriptifs de santé des arbres sont brièvement présentés car ils gardent le même statut sur plusieurs années et même définitivement. Parmi ces paramètres on cite :

- La mortalité des branches et des rameaux : elle est dominée pour les 2 années par la classe 1 (<25%) pour les deux sites
- dominance hors concurrence : elle est dominée par la classe des arbres dominants dans le peuplement avec très peu de direction en concurrence avec le houppier des arbres voisins.

3- Caractérisation des rameaux-échantillons

3.1-Distribution des arbres par type de rameaux

La répartition des arbres-échantillons selon les classes de type de rameaux (à bourgeons et feuillés : Tab.11) des deux sites d'étude au cours des années d'inventaire 2024 et 2025 est représentée par les histogrammes dans la **figure 59**.

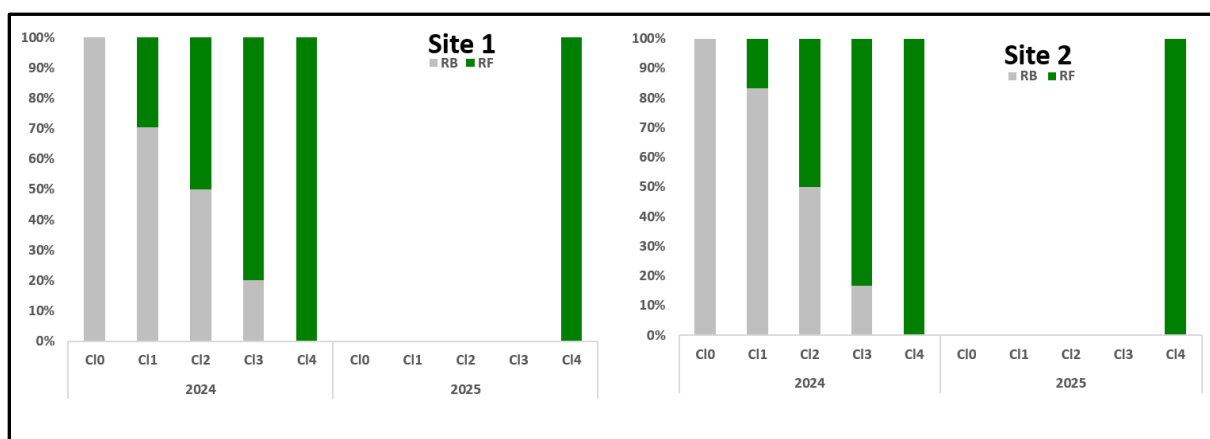


Figure 59 : Répartition des arbres-échantillons selon les classes de rameaux à bourgeons (RB) et feuillés (RF) des deux sites (Site1 : n= 58 ; site2 : n=17) au cours des années d'inventaire 2024 et 2025 est

L'analyse architecturale et sanitaire des arbres (déficit foliaire et transparence) à travers l'état des rameaux (à bourgeons ou feuillés) révèle une homogénéité totale dans leur état phénologique entre les deux sites. En effet, l'ensemble des rameaux observés sur pied contiennent exclusivement des pousses feuillées, correspondant de ce fait à la classe 4. À l'inverse, en 2024 on enregistre plus de rameaux feuillés portant encore des bourgeons non débourrés. Ce type de rameaux varie entre 47% (S2) et 53% (S1) appartenant plus à la classe 0 (rameaux nus) qu'à d'autres classes.

L'absence de rameaux à bourgeons en 2025 et la prédominance absolue des structures feuillées témoignent du caractère résilient des arbres. Cette stratégie phénologique permet à l'arbre de maintenir une activité biologique et une surface assimilatrice active, même durant les périodes de repos végétatif apparent, limitant ainsi la présence de rameaux totalement dénudés avant le débourrement.

3.2-Analyse morphométrique foliaire

Les résultats des mesures morphométriques réalisés sur les rameaux-échantillons prélevés en 2025 (rameaux courts de l'année et taille des feuilles) et ceux obtenus par Lallam-Tani en 2024 des deux peuplements groupés sont consignés dans le tableau 22 suivant. Au total, nous avons mesuré la longueur de 393 pouces et 929 feuilles.

Tableau 22 : Données statistiques des mesures des rameaux et feuilles du chêne liège dans les deux sites durant les saisons végétatives 2024 (Lallam-Tali, 2025) et 2025.

Tableau 22 : Données statistiques des mesures des rameaux et feuilles du chêne liège dans les deux sites durant les saisons végétatives 2024 (Lallam-Tali, 2025) et 2025.

Paramètres /Années	Site 1		Site 2	
	2024	2025	2024	2025
Longueurs des rameaux courts				
Longueur moyenne (cm)	0,91	4,03	0,98	4,22
Valeurs limites	0,6-1,8	3,1-4,7	0,3-1,8	1,5-8,2
Ecart-type (CV%)	0,38 (42)	0,44 (11)	0,43 (43)	0,75 (18)
Nombre échantillons	285	188	268	205
Taille des feuilles				
Longueur moyenne (cm)	1,77	4,17	2,03	4,34
Valeurs limite	1,02-2,61	3,88-4,53	0,78-4,12	2,2-6,5
Écart-type (CV%)	0,58 (33)	0,23 (6)	0,78 (38)	0,50 (12)
Nombre échantillons	390	390	429	539
Surface moyenne (cm2)	2,03	9,73	2,94	9,88
Valeurs limite	0,44-4,38	8,85-11,31	0,45-8,18	2,9-24,7
Écart-type (CV%)	1,27 (63)	0,86 (9)	1,79 (61)	2,25 (22)
Nombre échantillons	390	390	429	539

L'analyse comparative des données morphométriques de ce tableau révèle une nette distinction entre les deux années d'étude, traduisant une forte réactivité végétative du chêne-liège face à l'amélioration des conditions climatiques. En effet, en 2024, l'ensemble des paramètres mesurés (longueur des rameaux de l'année et taille des feuilles) affiche des valeurs particulièrement réduites. La longueur des feuilles varie en moyenne entre 1.77 et 2.03 cm (classe de petites feuilles : tab.13), une surface moyenne de 2 à 3 cm² et des rameaux très courts (< 1cm), ce qui témoigne d'un blocage de la croissance, typique d'un stress hydrique sévère subi par les arbres.

À l'inverse, l'année 2025 est marquée par une augmentation spectaculaire et généralisée de toutes les dimensions : la longueur moyenne des feuilles fait plus que le double pour atteindre un peu plus de 4 cm, la surface moyenne grimpe à près de 10 cm² (avec une variabilité interne

Faible <2%). La longueur moyenne des rameaux fait plus quadruplée pour s'établir à 4 cm. Ce contraste morphologique net entre 2024 et 2025 met en évidence une reprise vigoureuse de l'élongation cellulaire et du développement foliaire, illustrant la résilience et la plasticité de l'appareil végétatif de cette essence après une période de contrainte climatique. Les résultats de comparaison statique des moyennes des mesures des deux années du même site et entre les deux sites montrent des différences hautement significatives pour la longueur des rameaux courts, de la longueur des feuilles et de la surface foliaire (Tab.23)

Tableau 23- Tests de comparaison de deux moyennes des mesures des rameaux courts (RC), de la longueur des feuilles (LF) et de la surface foliaire (SF) des arbres des deux sites d'étude des deux années

	Site 1			Site 2			Site-Site 2		
	RC (cm)	LF (cm)	SF (cm2)	RC (cm)	LF (cm)	SF (cm2)	RC (cm)	LF (cm)	SF (cm2)
<i>tobs</i>	19,36	13,81	18,08	-18,49	-8,83	-13,62	-26,23	-14,57	-20,93
<i>ddl</i>	24	16	21	29	28	28	53	48	50
• <i>P*</i>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

*Signification : NS ($P \leq 0.05$), Significative ' $0.05 < P < 0.01$ ', hautement significative ' $0.01 < P < 0.001$ ' et très hautement significative ' $P > 0.001$ '

La lecture de ce tableau montre que les moyennes des trois mesures varient significativement entre les deux années dans le même site ou entre les deux sites. Cela explique que l'année 2025 a connu une amélioration très significative de l'état de santé des arbres des deux sites et cette suite à une amélioration des conditions climatiques dont pluviométrique.

Par ailleurs, les tableau 24 et 25 consignent les résultats de l'analyse de la variance à un critère des mesures morphométriques des arbres-échantillons durant les deux années.

Tableau 24 : Données statistiques des mesures des rameaux et feuilles du chêne liège dans le site 1 durant les saisons végétatives 2024 (Lallam-Tali, 2025) et 2025 (n=13)

P1	Rameau courts (cm)				Loungers (cm)				surface foliaire (cm2)			
	20 24	20 25	P	Sign	20 24	2025	P	Sign*	20 24	20 25	P	Sign.
7	1,17	4	1.0e-11	***	2,33	3,87	6,6E-16	***	4,38	8,95	4.2e-11	***
11	0,86	3,52	7,0E-23	***	1,52	4,28	4,2E-20	***	0,67	9,84	6,5E-21	***
13	0,43	4,16	2,6E-25	***	1,02	4,29	1,5E-20	***	1,38	9,87	1,3E-29	***
14	1,17	4,73	7,2E-17	***	2,12	4,11	1,2E-19	***	2,37	9,33	1,5E-23	***
16	1,31	3,81	2,3E-14	***	2,61	4,39	9,4E-24	***	4,18	9,83	3,03E-21	***
19	1,15	4,7	4,7E-13	***	1,79	4,11	9,4E-25	***	2,26	9,1	2,6E-21	***
22	0,58	3,68	1,7E-21	***	0,81	3,88	1,1E-37	***	0,44	8,85	3,1E-32	***
23	0,57	4,29	1,9E-26	***	1,92	4,33	4,6E-27	***	2,7	11,19	4,1E-26	***
24	0,88	4,17	5,9E-20	***	2,2	4,53	2,8E-26	***	3,01	10,84	1,E-23	***
27	1,77	4,06	3,1E-09	***	2,56	4,51	5,2E-15	***	1,36	11,31	2,1E-13	***
28	0,6	4,17	7,5E-29	***	1,46	3,88	7,5E-27	***	1,42	9,02	2,9E-29	***
29	0,62	3,14	3,1E-17	***	1,14	3,96	7,2E-34	***	0,71	9,42	4,2E-28	***
36	0,78	3,99	2,4E-16	***	1,53	4,12	6,4E-31	***	1,51	8,97	2,6E-31	***

Sign : degré de signification '***' : très hautement significative, $P < 0.001$

L'analyse conjointe des caractères morphométriques du chêne-liège révèle une transition majeure et très hautement significative ($P < 0,001$,) entre les années 2024 et 2025. Loin d'être isolées, les variations observées au niveau des rameaux courts, des longueurs d'axes et de la surface foliaire s'articulent dans une dynamique de croissance globale et parfaitement synchronisée. L'allongement spectaculaire des rameaux courts (qui quadruplent en passant d'une moyenne de 0,93 cm à 4,05 cm s'accompagne naturellement d'une extension de la longueur totale des branches (de 1,73 cm à 4,14 cm). Cette élongation simultanée de la structure ligneuse offre un support architectural plus vaste, permettant une meilleure répartition des nœuds et des bourgeons.

Cette expansion de la charpente se répercute de manière directe et géométrique sur le développement du feuillage. En bénéficiant d'un support branchial plus long et vigoureux, la surface foliaire moyenne subit une augmentation massive, étant multipliée par plus de quatre pour atteindre 9,68 cm² en 2025 contre seulement 2,11 cm² en 2024. Sur le plan physiologique, cette forte corrélation démontre que l'allongement des axes a directement stimulé l'appareil photosynthétique : un rameau plus développé permet un meilleur déploiement spatial des feuilles, optimisant ainsi la captation de la lumière et l'efficacité photosynthétique de l'arbre.

En conclusion, l'ensemble de ces corrélations morphologiques met en évidence une réponse plastique rigoureuse et uniforme chez tous les individus échantillonnés. Le saut quantitatif enregistré en 2025 traduit une allocation optimale des ressources énergétiques de la plante, déclenchée par un effet d'année très marqué. Cette synergie entre la croissance des axes et l'expansion foliaire témoigne d'un basculement d'un état de restriction ou de dormance en 2024 vers une dynamique de restauration et de forte productivité végétative en 2025, probablement stimulée par des conditions climatiques et édaphiques nettement plus favorable

4- Examen du tronc

L'examen du tronc des arbres de 2025 révèle l'apparition de quelques anomalies sur quelques arbres par rapport à l'année 2024. Il s'agit d'anomalies de nature pathologique qui se manifestent sous forme de tâches huileuses de contours irréguliers mais aussi d'écoulement noirâtre (**Fig. 60**).



Figure 60 : Anomalies relevées en 2025 sur troncs d'arbres (Photos originales)

En plus, nous avons noté la présence de nouvelles attaques de *Platypus cylindrus* sur des arbres nouvellement morts. Sur certains arbres, nous avons noté des indices d'activité plus prononcé du ravageur par rapport à l'inventaire 2024. Il s'agit souvent des arbres dépérissants. Ces anomalies se limitent au peuplement du site 2.

5. Analyse multivariée des variables

Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur des paramètres morphologiques et sanitaires des deux années dans les deux sites (**Tab. 14**) sont présentés dans leurs figures.

5-1-ACP du site 1

5.1.1-Projection (biplot) de l'Analyse en composante principale

Les résultats de l'ACP réalisé sur les arbres du site 1 sont présentés dans les figure 59 et 60. La lecture montre que les deux premiers axes factoriels absorbent à eux seuls **55,8 % de l'inertie totale**, structurant de manière robuste les principales tendances observées.

Le premier axe avec un taux d'inertie de **31,2 %**, représente un gradient de réactivité physiologique et de dégradation. Il oppose :

Sur l'axe positive : les arbres caractérisés par une prédominance de rameaux feuillés sains et fonctionnels (**RF4, RF5**), des feuilles moyennes à grandes (**FM4, FM5**), une surface foliaire développée (**SF4, SF5**) et une bonne croissance des rameaux (**R4, R5, Gf4**). Ces éléments traduisent un état de vigueur morphologique stable, une canopée fonctionnelle et une bonne résilience des individus. Ce sont des arbres qui n'ont pas été affectés par les contraintes climatiques ; ils sont représentés par les arbres de références **R1** et **R2** que nous avons choisi pour comparaison. Les paramètres mesurés en 2024 ne changent pas beaucoup en 2025.

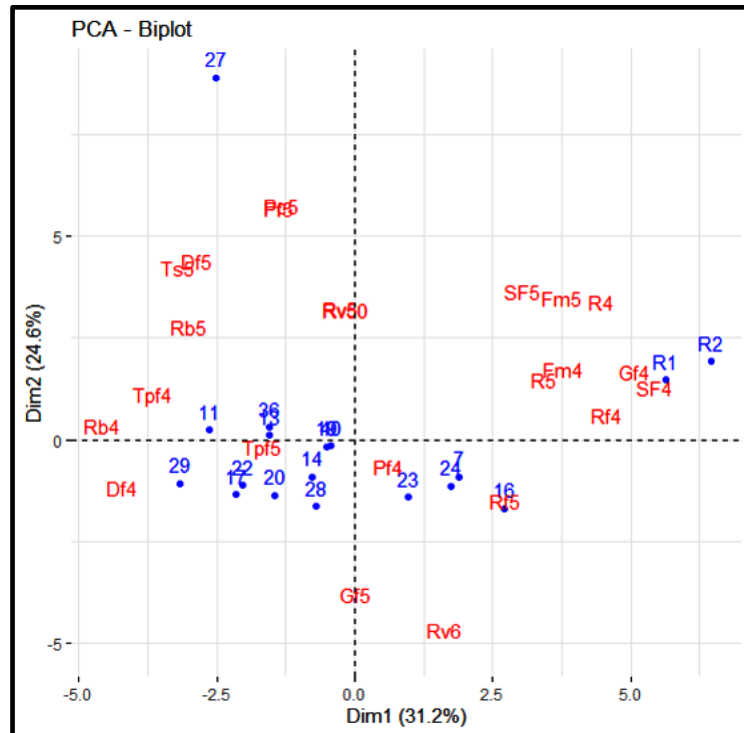


Figure 61 : Projection des paramètres morphologiques, sanitaires et des individus du site 1 sur le plan factoriel (A1xA2)

Sur l'axe négativement : les arbres fortement corrélés aux indices de dégradation et de stress, marqués par un déficit foliaire prononcé (**Df4**, **Df5**), des rameaux nus avec bourgeons non débourrés ou en début de débourrement (**Rb4**, **Rb5**), des rameaux terminaux secs (**Ts5**) et des très petites feuilles (**Tpf4**, **Tpf5**). Ces descripteurs témoignent d'un état de stress physiologique aigu et d'un dépérissement marqué du houppier.

Le second axe, avec un taux d'inertie de **24,6 %**, complète cette typologie en mettant en évidence des stratégies de réponse foliaire ou des variables stationnelles spécifiques. Il distingue :

Positivement corrélées : des variables comme la présence de pousses de l'année ou de réactions spécifiques (**Pr5**) et des pertes de structures (**Bf5**, **Ts5**), isolant de manière remarquable l'individu 27, qui affiche un comportement extrême ou une réponse physiologique foudroyante face au stress.

Négativement corrélées : les variables liées aux bourgeons et à la reprise tardive ou résiduelle (**Gf5**, **Rv6**).

L'organisation des variables confirme une nette sectorisation. Le pôle négatif de l'axe 1 regroupe l'ensemble des indicateurs de stress et de dépérissement foliaire (**Df**, **Rb**, **Ts**, **Tpf**), identifiant un groupe d'arbres hautement vulnérables (situés à gauche de l'origine). À l'opposé, le pôle positif de l'axe 1 rassemble les variables de stabilité et de maintien de la biomasse foliaire

(**RF, FM, SF, R**), illustrant ainsi une trajectoire claire allant d'un état de dégradation sanitaire sévère vers une structure foliaire saine et fonctionnelle

5.1.2- Classification ascendante hiérarchique (CAH) des individus

Afin de confirmer les regroupements d'individus observés lors de l'analyse multivariée et d'établir une typologie précise des comportements face aux contraintes environnementales, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée. Cette approche permet de structurer les arbres échantillonnés en groupes homogènes selon leurs similitudes morphologiques, dendrométriques et sanitaires (**Fig. 62**).

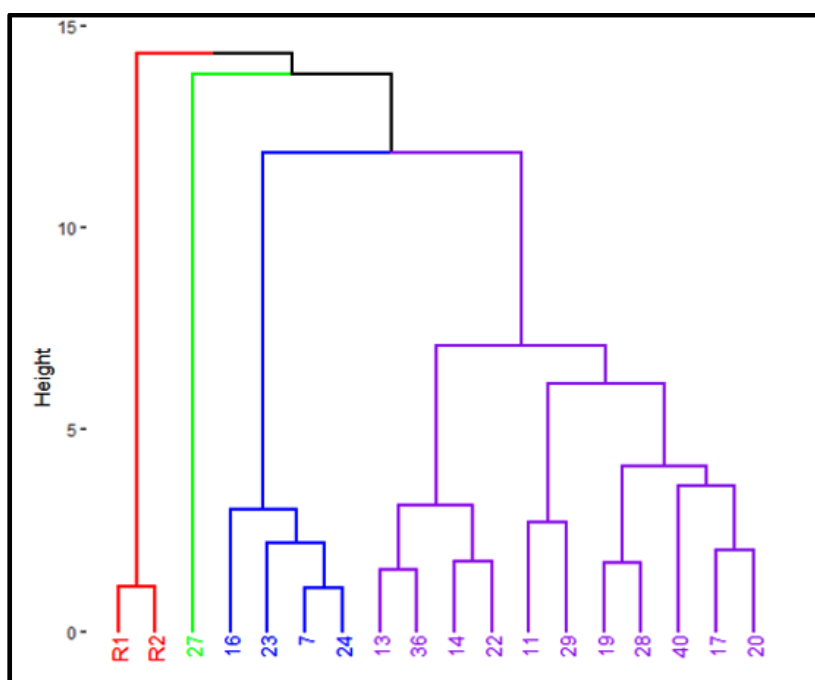


Figure 62- Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique (CAH) des individus basés sur les descripteurs sanitaires et morphologiques de la placette 1

La partition du dendrogramme à une hauteur de coupe optimale permet d'individualiser clairement **quatre grands groupes** de comportement :

Groupe 1 - Pôle de vigueur optimale (Couleur Rouge - 11 % des individus) :

Ce groupe restreint comprend les deux individus de référence **R1** et **R2**. Il se distingue par une distance importante vis-à-vis du reste du peuplement, traduisent un état sanitaire exceptionnellement vigoureux. Ces arbres possèdent une canopée hautement fonctionnelle, une surface foliaire maximale et une dynamique de croissance des rameaux optimale, les positionnant comme les témoins de résilience du site.

Groupe 2 - Profil atypique / Réponse singulière (Couleur Verte - 5,5 % des individus) :

Il est représenté uniquement par un individu **qui** confirme son statut d'atypisme déjà mis en évidence dans l'ACP. Il correspond à un sujet subissant un stress ciblé ou montrant une réaction architecturale exclusive (forte présence de pousses de réaction combinée à des pertes structurales localisées) (individu mort)

Groupe 3 - Arbres sains et résilients en phase de reprise (Couleur Bleue - 22 % des individus) :

Il est composé de 4 individus, ce groupe rassemble les arbres affichant un bon état de santé général. Ils se caractérisent par un feuillage stable, une faible transparence du houppier et des signes actifs de développement ou de récupération végétative, témoignant d'une bonne adaptation aux contraintes de la station.

Groupe 4 - Pôle de dépérissement et de stress chronique (Couleur Violette - 61 % des individus) :

Il s'agit du groupe majoritaire de notre échantillonnage, englobant 11 individus. Ces arbres manifestent encore de profonds signes de vulnérabilité physiologique : un déficit foliaire marqué, une forte proportion de rameaux nus ou en début de débourrement, ainsi que la production de très petites feuilles. Ce profil traduit un impact sévère et généralisé du stress hydrique et climatique sur la majeure partie du peuplement étudié.

5-2-ACP du site 2

Les résultats de l'ACP réalisé sur les arbres du site 2 sont présentés dans les figure 67 et 68. La lecture montre que les deux premiers axes factoriels absorbent à eux seuls **50 % de l'inertie totale**.

5.2.1-Projection (biplot) de l'Analyse en composante principale

Le premier axe avec un taux d'inertie de **31,6 %**, représente un gradient de réactivité physiologique et de dégradation (Fig.67). Il oppose :

Le premier axe (**31.6%**) exprime un **gradient de dégradation sanitaire**, structuré par une opposition nette entre les deux côtés du plan factoriel :

Pôle de vigueur (côté gauche) : il est caractérisé par des arbres fonctionnels et résilients (ex: 3 arbres). Ce côté est fortement corrélé aux variables de bonne santé : surface foliaire non affectée et développée durant les deux années (**SF4, SF5**), les rameaux feuillés sains (**Rf4, Rf5**), pousses de l'année aux grandes feuilles(**Fg5**) ou feuilles de taille normale (**Fm5, R**).

Pôle de dépérissement (à droite) : regroupe les individus subissant un stress hydrique aigu (ex: 3 individus). Ils sont définis par les indicateurs de dégradation du houppier : déficit foliaire prononcé durant les deux années (**Df4, Df5**), les rameaux à bourgeons (**Rb4, Rb5**), rameaux terminaux secs à grande transparence (**Ts4, Ts5**) et très petites feuilles (**Tpf4, Tpf5**).

Le second axe (**Dim.2**) apporte une nuance sur les dynamiques de réaction des arbres :

- **Côté positif :** caractérise des expressions de stress intense ou de débourrement bloqué (**Pr5, Rb5**), isolant un individu comme un sujet au comportement extrême (outlier).
- **Côté négatif met** en évidence les mécanismes de récupération active à travers les variables de reprise végétative (**Rv6**) et de nouvelles pousses (**Fg63**).

En synthèse, l'axe 1 sépare de manière binaire le peuplement entre un pôle de stabilité et de vigueur foliaire (côté positif) et un pôle de défoliation chronique et de stress physiologique majeur (négatif).

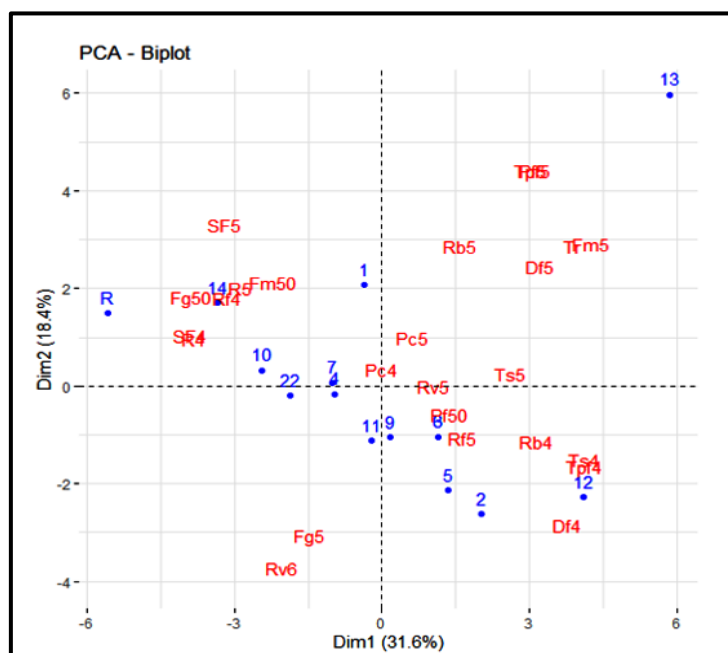


Figure 63 : Projection des paramètres morphologiques, sanitaires et des individus de la placette P2 sur le plan factoriel Dim1\Dim2.

5.2.2-Classification ascendante hiérarchique (CAH) du site 2

La classification ascendante hiérarchique réalisée pour ce site permet de structurer les individus en **quatre grands groupes** distincts selon leurs affinités sanitaires et morphologiques (Fig. 68).

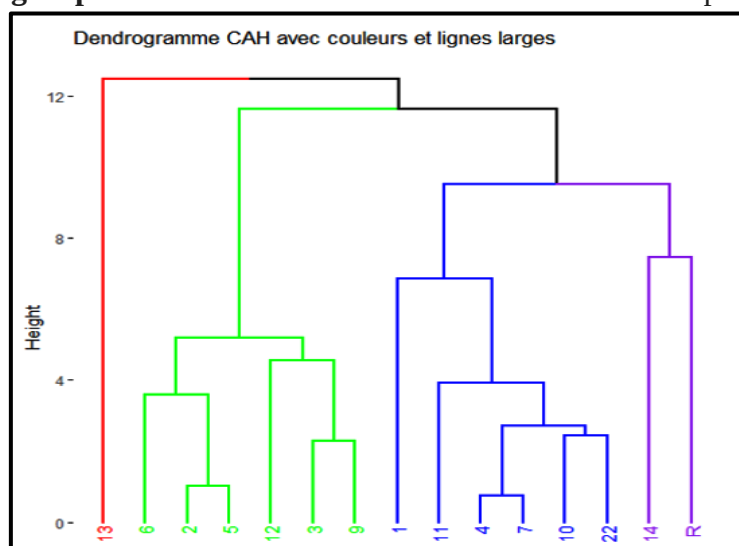


Figure 64 : Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique (CAH) des individus de la seconde placette.

L'analyse du dendrogramme met en évidence la répartition suivante :

Groupe 1 - Profil individuel extrême (Couleur Rouge - 7 % des individus) :

Comprend uniquement un arbre qui s'isole dès le premier nœud à une hauteur maximale, confirmant son statut d'atypisme sévère marqué par un dépérissement aigu et un blocage phénologique précoce.

Groupe 2 - Pôle de dépérissement marqué (Couleur Verte - 43 % des individus) :

Il regroupe 6 arbres qui forment le noyau le plus touché par la dégradation sanitaire sur cette placette, caractérisés par un fort déficit foliaire (**Df4**) et une présence importante de rameaux nus (**Rb4**). Ces arbres n'ont pas pu récupérer leur santé en 2025 malgré l'amélioration du climat

Groupe 3 - Profil intermédiaire en phase de transition / reprise (Couleur Bleue - 36 % des individus) : il est composé de 5 arbres. Ce groupe montre des caractéristiques modérées, oscillant entre des signes de stress et des tentatives de récupération ou de maintien de la biomasse foliaire.

Groupe 4 - Pôle de vigueur et de stabilité (Couleur Violette - 14 % des individus) : il

Comprend un arbre et le témoin **R**. Ce groupe rassemble les individus les plus sains et vigoureux de la placette, maintenant une surface foliaire optimale (**SF5**) et une canopée fonctionnelle face au déficit hydrique.

En conclusion, la CAH valide la structure binaire de l'ACP en opposant clairement un bloc dépérissant majeur (Groupes 1 et 2, soit 50 % du peuplement) à un bloc d'arbres résilients ou stables (Groupes 3 et 4).

II-Discussion

L'analyse combinée des facteurs environnementaux, structuraux et sanitaires de la subéraie domaniale de Hafir permet d'interpréter les dynamiques de dégradation, de stabilité ou de résilience qui régissent ce peuplement face au changement climatique. Les processus observés s'insèrent dans le cadre théorique de la spirale de dépérissement de Manion (1981), où les contraintes stationnelles prédisposent les arbres, le climat déclenche la crise, et les bio-agresseurs opportunistes contribuent à la mortalité finale des individus les plus fragiles.

1. Le complexe physico-édaphique et climatique : des facteurs prédisposants et déclenchants du dépérissement

La dynamique climatique récente subie par la région de Tlemcen se caractérise par une sécheresse pluriannuelle chronique, accentuée par des années de ruptures hydriques extrêmes. Selon les concepts de **Manion (1981)**, ce déficit pluviométrique prolongé agit comme un facteur prédisposant de fond qui épuise progressivement les réserves de l'arbre. Lorsque survient une année de blocage anticyclonique absolu, ce choc thermique et hydrique devient le facteur déclenchant majeur, basculant le peuplement vers un déclin actif.

Cette contrainte climatique stricte est fortement modulée par les propriétés physiques du sol. La texture à forte dominance sableuse observée sur l'ensemble du profil contrôle directement la dynamique de l'eau. Comme le souligne **Masson (2005)**, si les sables fins superficiels permettent de retenir une humidité temporaire bénéfique lors de la reprise phénologique printanière, les horizons profonds souffrent d'une macroporosité excessive. Les limons et les argiles étant trop rares pour retenir l'eau, le sol présente un caractère hautement filtrant entraînant un drainage intense en profondeur.

En période de sécheresse prolongée, cette architecture pédologique empêche la constitution d'une Réserve Utile (RU) pérenne. Le chêne-liège se retrouve rapidement confronté à une rupture de l'approvisionnement en eau dans les couches profondes du sol, alors même que les fortes températures estivales provoquent une demande évaporative maximale. Ce dysfonctionnement édaphique amplifie le signal climatique négatif et précipite le stress hydrique cellulaire.

2. Réponses sylvicoles et sanitaires des peuplements : l'interaction structure-climat

L'évolution de l'état de santé des arbres met en évidence des trajectoires sanitaires divergentes entre les stations, révélant une vulnérabilité stationnelle fortement influencée par la structure dendrométrique, l'âge du peuplement et l'épaisseur du liège.

La dynamique de dégradation (Station 1) : On observe au niveau de cette station un glissement massif et alarmant des effectifs vers les classes de défoliation les plus sévères. Bien que située sur un versant Nord théoriquement plus frais et moins dense, cette jeune futaie en croissance s'est révélée paradoxalement la plus fragile. Cette vulnérabilité s'explique par sa structure démographique dominée par de petits diamètres. Les arbres, plus jeunes, possèdent un système racinaire superficiel qui n'a pas encore colonisé les micro-fissures rocheuses profondes pour puiser l'eau résiduelle. De plus, leur liège, fin et immature, offre une isolation thermique médiocre contre les rayons solaires directs lors des canicules estivales. Ces résultats corroborent les travaux de **Bouhraoua (2003)**, qui rappellent que les jeunes structures subissent un stress de tension hydrique aigu lorsque les horizons supérieurs du sol s'assèchent complètement.

La dynamique de résilience et de stabilisation (Station 2) : À l'inverse, la seconde station amorce une nette tendance à l'amélioration et à la reconstitution des houppiers. Ce peuplement, bien qu'installé sur une exposition Sud-Ouest plus chaude et sur un substrat plus pierreux, montre une meilleure tolérance face à la crise. Cette résilience s'explique par la maturité des arbres (dominance de bois moyens) et la présence d'un liège de reproduction plus épais. Dotés d'un système racinaire pivotant performant et profond, ces individus adultes ont su optimiser immédiatement le retour de pluies hiverno-printanières favorables pour réhydrater leurs tissus conducteurs. L'épaisseur du suber a également joué un rôle protecteur primordial en limitant l'échauffement du cambium, validant les conclusions de **Natividade (1950)** sur le rôle isolant essentiel de l'écorce de liège face aux extrêmes thermiques.

3-Catégories de réponses adaptatives et physiologiques du chêne-liège à la sécheresse

Pour survivre sous des conditions d'aridité sévère, le chêne-liège déploie des mécanismes d'adaptation morphologiques et physiologiques bien spécifiques :

3.1-Stratégie d'évitement morphologique

La chute des feuilles (déficit foliaire) ne doit pas seulement être interprétée comme un signe de dépérissement passif, mais comme une réaction d'adaptation d'urgence. En réduisant sa surface transpirante, l'arbre limite sa perte d'eau par voie cuticulaire et stomatique afin de maintenir une tension hydrique minimale dans ses branches. De plus, face aux stress répétés, l'espèce tend à modifier l'anatomie de son appareil végétatif (sclérophylle et microphylle) pour augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

3.2-Tolérance et opportunisme phénologique

L'analyse phénologique révèle une persistance absolue du feuillage au niveau des rameaux. Comme l'indiquent **Bakali et al. (2020)**, cette stratégie permet au chêne-liège de maintenir une surface photosynthétique active tout au long de l'année. L'arbre fait preuve d'un fort opportunisme phénologique : il est capable de relancer instantanément son activité métabolique dès que l'eau redevient disponible dans le sol, expliquant la récupération rapide observée chez les sujets matures après les pluies d'hiver.

3.3-Le risque d'inanition carbonée

Pendant le paroxysme estival, le chêne-liège ferme précocement ses stomates pour éviter l'embolie xylemique et la cavitation (rupture des colonnes d'eau dans les vaisseaux). Cependant, si la sécheresse persiste sur plusieurs années, cette fermeture stomatique prolongée bloque la photosynthèse et la fixation du carbone. L'arbre est alors contraint de consommer ses propres réserves de glucides (amidon) pour assurer son métabolisme de survie. À terme, il entre dans un état d'**inanition carbonée**, un concept décrit par **McDowell et al. (2008)** comme le point de rupture où l'arbre épuisé perd toutes ses capacités de défense face aux agresseurs biotiques.

3.4- Rôle des agents biotiques opportunistes : les facteurs contributants

L'examen sanitaire des troncs confirme que les pathologies corticales primaires ou les champignons (comme le charbon de la mère) restent marginaux à Hafir. Le déclin est initié par le climat. En revanche, l'action des insectes xylophages, représentés exclusivement ici par ***Platypus cylindrus***, illustre parfaitement le rôle des facteurs contributants de la théorie de Manion.

Le platype montre une sélectivité nette en ciblant préférentiellement les individus stressés et âgés de la station. En situation de stress hydrique prolongé et d'inanition carbonée, les arbres perdent leur capacité à produire des exsudats et des molécules de défense (telles que les tanins) pour repousser les insectes. Le ravageur profite de cette baisse de vigueur pour coloniser les tissus conducteurs, creuser ses galeries et accélérer la mortalité finale des arbres les plus sénescents (**Toumi et al., 2019**).

Conclusion générale

Cette étude apporte une contribution essentielle et novatrice à la compréhension des mécanismes de dépérissement du chêne-liège (*Quercus suber* L.) soumis aux rudes contraintes de l'aridification climatique dans l'Ouest algérien. Nos investigations bisannuelles mettent en évidence qu'un stress hydrique extrême et prolongé marqué par une pluviométrie interannuelle critique de (<400 mm : abaissement historique sous le seuil des 200 mm en 2024) constitue le facteur déclenchant majeur d'une dégradation sanitaire profonde.

Ce phénomène valide empiriquement le modèle de dépérissement en spirale de Manion (1981), où les ruptures physiologiques telles que l'embolie xylémique et l'inanition carbonée rendent l'arbre vulnérable.

L'apport majeur de ce travail réside dans la mise en évidence d'une hétérogénéité spatio-structurelle flagrante au sein de la forêt domaniale de Hafir : alors que le peuplement jeune du versant nord (site 1) subit un effondrement alarmant de sa vigueur avec un déficit foliaire atteignant 69 %, la futaie adulte du versant sud-ouest (site 2) témoigne d'une remarquable plasticité et d'une capacité de réhabilitation foliaire dès le retour de précipitations favorables, en dépit de la présence co-active du ravageur opportuniste *Platypus cylindrus*.

En définitive, la vulnérabilité intrinsèque de la station (nature du sol, topographie et exposition) dicte l'intensité de la crise et le potentiel de résilience de l'essence, confirmant le fait qu'une stratégie de gestion sylvicole uniforme et non contextualisée n'est plus scientifiquement viable face aux enjeux climatiques actuels.

Plusieurs aspects dessinent en perspectives : on cite plus particulièrement :

Pérennisation et extension du réseau d'observation : Prolonger ce suivi pluriannuel afin de capter les trajectoires de résilience sur le long terme, tout en installant de nouvelles placettes d'échantillonnage dans d'autres massifs de l'Ouest algérien pour standardiser un réseau de veille sanitaire à l'échelle régionale.

Caractérisation écophysiological et biochimique : Intégrer des mesures du potentiel hydrique foliaire, de la conductance stomatique et du suivi des glucides non structuraux afin de mieux cerner les seuils de tolérance physiologiques face à l'embolie et à la famine carbonée.

Suivi de la dynamique des bioagresseurs : Approfondir les recherches sur la biologie de *Platypus cylindrus* et des cortèges fongiques associés (notamment les pathogènes de faiblesse), en évaluant l'efficacité de dispositifs de piégeage pour anticiper les pics d'infestation.

Sylviculture adaptative et conservation génétique : Expérimenter à l'échelle pilote des interventions sylvicoles d'urgence, telles que des éclaircies sanitaires raisonnées pour réduire la compétition hydrique, et initier des programmes de sélection massale à partir des semences issues des semenciers de la station 2 ayant démontré la meilleure résilience face à la sécheres

Références bibliographiques

A

- [1] Abourouh, M. (1998). Les ectomycorhizes du chêne-liège : caractérisation et rôle possible dans la régénération. *Actes du séminaire méditerranéen sur la régénération des forêts du chêne-liège*, Tabarka, pp. 164-175.
- [2] Adjami Hachemi Rachedi, Y. (2016). *Étude des facteurs du dépérissement du chêne-liège dans les subéraies de l'Est Algérien* (Thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie.
- [3] Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., Cobb, N., Driscoll, M., ... & Von Allmen E. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684.
- [4] Amorim (2022). *Manual de Boas Práticas de Gestão de Montado*. Rapport technique sur la gestion durable des suberaies.
- [5] Anderegg, L. D. L., & HilleRisLambers, J. (2016). Drought stress limits the geographic ranges of two tree species via different physiological mechanisms. *Global Change Biology*, 22(3), 1029-1045.
- [6] Anderegg, W. R. L., Klein, T., Bartlett, M., Sack, L., Pellegrini, A. F. A., Choat, B., & Jansen, S. (2016). Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(18), 5024-5029.
- [7] Anonyme (1914a). *Rapports forestiers sur l'état sanitaire des subéraies algériennes*. Archives forestières, Direction Générale des Forêts, Alger.
- [8] Anonyme (1914b). Note sur le dépérissement du chêne-liège. *Bulletin de la Société Forestière d'Algérie*.
- [9] APCOR (2019). *Cork Industry Statistics*. Association Portugaise du Liège, Portugal.
- [10] Appiagyei, B. D. (2023). *Dégradation de l'écosystème forestier du Sud de la Méditerranée : Une perspective sur le régime des incendies, les changements de couverture terrestre et la dynamique des stocks de carbone : Cas de Tlemcen - Nord-Ouest de l'Algérie* (Thèse de doctorat). Département des Ressources Forestières, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen.
- [11] Aronson, J., Pereira, J. S., & Pausas, J. G. (2009). *Cork Oak Woodlands on the Edge: Ecology, Adaptive Management, and Restoration*. Island Press, Washington, 315 p.
- [12] Aubert, G. (1978). *Méthodes d'analyses des sols*. CRDP, Marseille.
- [13] Awad, H. (2011). *Étude des déterminants de la vulnérabilité à la cavitation du xylème chez les peupliers* (Thèse de doctorat). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

B

- [14] Baize, D. (2018). *Guide des analyses en pédologie* (3e éd.). Éditions Quæ, Versailles, 272 p.
- [15] Bakali, A., Toumi, L., & Bouhraoua, R. T. (2020). Dynamique phénologique et stratégies d'adaptation du chêne-liège (*Quercus suber* L.) face aux contraintes hydriques en milieu méditerranéen. *Revue Forestière Algérienne*, 14(2), 45-58.
- [16] Bakhti, A., & Bouhraoua, R. T. (2014). Relation entre la pluviométrie et le taux de mortalité du chêne-liège dans le massif de Hafir (Tlemcen, Algérie). *Revue Forêt Méditerranéenne*, 35(2), 123-134.
- [17] Bakry, M., & Abourouh, M. (1995). Les agents biotiques impliqués dans la dépérissement du chêne-liège au Maroc. *Forêt Méditerranéenne*, 16(2), 125-134.

- [18] Bakry, M., Abourouh, M. et al. (1999b). Facteurs de dégradation des subéraies marocaines. *Revue Forestière Française*.
- [19] Barbero, M., Bonin, G., Loisel, R., & Quézel, P. (1990). Changes and future of Mediterranean oaks ecosystems. *Annales des Sciences Forestières*, 47(5), 511-523.
- [20] Barbéro, M., Loisel, R., & Quézel, P. (1992). Biogéographie des chênes-lièges en France. *Revue Forestière Française*.
- [21] Barros, A. M. et al. (2002). *Travaux d'assainissement des subéraies portugaises (1991–2000)*. Instituto da Conservação da Natureza, Portugal.
- [22] Battistini, H. (1938). Histoire de la subériculture méditerranéenne. *Revue des Eaux et Forêts*.
- [23] Becker, M. (1987). Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges : Étude écologique et dendrochronologique. *Annales des Sciences Forestières*, 44(4), 379–402.
- [24] Belhoucine, L., Bouhraoua, R. T., Maatoug, M., Hasnaoui, O., & Saidi, S. (2011). Infestation of cork oak forests by *Platypus cylindrus* Fab. (Coleoptera: Platypodidae) in north-western Algeria: spatial distribution, monitoring and relation to host factors. *Entomologia Generalis*, 33(3-4), 145-162.
- [25] Belhoucine, L., Bouhraoua, R. T., Mecherbi, L., & Puchalka, R. (2011). Impact du dépérissement sur la croissance radiale du chêne-liège (*Quercus suber* L.) : cas de la forêt de Hafir (Algérie). *Publication scientifique spécialisée*.
- [26] Belmokadem, M., et al. (2011). Essai de la régénération assistée du chêne-liège (*Quercus suber* L.) par semis direct et par transplantation. *Revue des Sciences Agronomiques et Vétérinaires (ASJP)*.
- [27] Ben Jamâa, M. L. et al. (2002). *État sanitaire des subéraies tunisiennes*. INAT, Tunis.
- [28] Benoit, P. (2014). *Analyse des réponses écophysologiques et moléculaires lors d'une carence hydrique sévère chez Populus nigra* (Rapport de stage Master 1). Université Blaise Pascal / INRA U.M.R. PIAF, 14 p. HAL Open Science.
- [29] Bonneau, M., & Landmann, G. (1988). Le dépérissement des forêts en Europe. *La Recherche*, 205(19), 1542–1556.
- [30] Boudy, P. (1950). *Économie Forestière Nord-Africaine. Tome I et Tome II(1) : Monographies et traitements des essences forestières*. Larose, Paris, 745 p. / 525 p.
- [31] Boudy, P. (1952). *Guide du Forestier en Afrique du Nord*. La Maison Rustique, Paris, 505 p.
- [32] Boudy, P. (1955). *Économie Forestière Nord-Africaine. Tome IV : Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie*. Larose, Paris, 483 p.
- [33] Bouhraoua, R. T. (2003). *Situation sanitaire de quelques subéraies de l'ouest algérien : étude des facteurs de dépérissement du chêne-liège (Quercus suber L.) et impact de l'entomofaune associée* (Thèse de Doctorat d'État). Université de Tlemcen / Université d'Aix-Marseille III, 283 p.
- [34] Bouhraoua, R. T. (2005). Impact des pratiques sylvicoles et du démasclage sur la vulnérabilité du chêne-liège aux attaques de xylophages. *Génie Forestier*, 22(1), 12-25.
- [35] Bouhraoua, R. T. (2011). Le liège algérien : un bilan sur son importance, sa production et les facteurs de sa dégradation. *Séminaire National sur les Ressources en Liège*, Annaba.
- [36] Bouhraoua, R. T. (2011). Caractérisation de la qualité du liège selon l'état sanitaire des arbres. *Forêt Méditerranéenne*, t. XXXII, n° 1, 39-50.
- [37] Bouhraoua, R. T., Allam, A., Smahi, H., & Roula, S. E. (2019). Wildfires and their effects on the cork oak (*Quercus suber* L.) stands in western Algeria. *Dendrobiology*, 82, 34-45.
- [38] Bouhraoua, R. T., Dehane, B., & Dahmani, K. (2014). *Réhabilitation et développement durable des subéraies de l'Algérie*. Rapport Technique, Université de Tlemcen.

- [39] Bouhraoua, R. T., & Villemant, C. (2005). Influence de quelques paramètres stationnels et sylvicoles sur la santé du chêne-liège dans les forêts de l'Ouest algérien. *Ann. Rech. For. Algérie*, 1, 47-68.
- [40] Bouhraoua, R. T., Piazzetta, R., & Berriah, A. (2014). Les reboisements en chêne-liège en Algérie, entre contraintes écologiques et exigences techniques. *Forêt Méditerranéenne*, t. XXXV, n° 2, 171-176.
- [41] Bouhraoua, R. T., Roula, S. E., & Catry, F. (2019). Facteurs de vulnérabilité des suberaies algériennes aux incendies de forêts dans le contexte du changement climatique. *Forêt Méditerranéenne*, t. XL, n° 4, 391-398.
- [42] Bouhraoua, R. T., Villemant, C., & Chakali, G. (2002). Les insectes xylophages du chêne-liège dans la forêt de M'Sila (Oran, Algérie). *Revue Forestière Française*, 54(3), 205-218.
- [43] Bouhraoua, R. T., Villemant, C., Benkenana, N., & Hasnaoui, O. (2002). État de santé de la subéraie algérienne et principaux facteurs de dépérissement des chênes-lièges. *IOBC/WPRS Bulletin*, 25(5), 1-12.
- [44] Bouhraoua, R. T., Villemant, C., Simonato, M. et al. (2002). Infestation de la subéraie de Hafir (Algérie) par *Coroebus florentinus* (Coleoptera : Buprestidae). *Annales de la Société Entomologique de France*, 38(4), 391-401.
- [45] Bouhraoua, R. T., Villemant, C., & Khelil, M. A. (2014). *Écologie et dynamique des peuplements de chêne-liège face aux insectes ravageurs dans le Nord-Ouest de l'Algérie*. Synthèse de travaux de recherche forestière.
- [46] Boudru, M. (1989). *Forêt et Sylviculture : traitement des forêts*. Les Presses Agronomiques de Gembloux (Belgique), 356 p.
- [47] Boulahia, S. (2012). *Impact du démasclage et des pratiques sylvicoles sur la vigueur, la survie et la gestion de la subéraie algérienne* (Thèse de doctorat / Mémoire de Magister). Université de Tlemcen, Algérie.
- [48] Boulahia, N. (2012). *Contribution à l'étude du dépérissement de la subéraie algérienne : Aspects entomologiques et phytopathologiques* (Thèse de Doctorat). École Nationale Supérieure Agronomique (ENSA), El-Harrach.
- [49] 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(6), 625-644.
- [50] BSRF (1937). Vingt ans d'observation de météorologie forestière en Algérie. *Bulletin de la Station de Recherches Forestières du Nord de l'Afrique*, 2(3), 204-270.
- [51] Buckley, T. N. (2005). The control of stomata by water balance. *New Phytologist*, 168(2), 275-292.
- [52] Buckley, T. N. (2019). How do stomata respond to water status? *New Phytologist*, 224(1), 21-36.

C

- [53] Cabral, M. T. et al. (1993). *Phytophthora cinnamomi* et dépérissement du chêne-liège au Portugal. *Phytopathologia Mediterranea*.
- [54] Calvet, R. (2003). *Le sol : propriétés et fonctions. Tome 1 : Constitution, propriétés physico-chimiques*. Éditions France Agricole, 456 p.
- [55] Canadell, J., et al. (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*.
- [56] Carvalho, E. C. (1992). Problemas fitossanitários do sobreiro em Portugal. *Congresso Florestal Nacional*.

- [57] Catry, F. X., et al. (2012). Factors affecting post-fire crown regeneration in cork oak (*Quercus suber* L.) trees. *European Journal of Forest Research*.
- [58] Chenel, P. (1951). Le liège en Algérie. *Annales de Géographie*, 60(321), 296–299.
- [59] CNIS (2019). *Évolution des exportations du liège entre 2012 et 2014*. Centre National d'Information et de Statistiques, Alger.
- [60] Cochard, H., & Granier, A. (1999). Fonctionnement hydraulique des arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 51(2), 121-134.
- [61] Cochard, H., & Granier, A. (s. d.). *Chapitre II.7 : L'architecture hydraulique, la cavitation et l'embolie chez les plantes* [Support de cours]. UMR PIAF, INRA-Université Blaise Pascal & UMR EEF, INRA-Université de Lorraine. Disponible sur Plantes et Eau (Consulté en mai 2026).
- [62] Cohen, D., Bogeat-Triboulot, M.-B., Vialet-Chabrand, S., Merret, R., Courty, P.-E., Moretti, S., Bizet, F., Guilliot, A., & Hummel, I. (2013). Developmental and Environmental Regulation of Aquaporin Gene Expression across *Populus* Species: Divergence or Redundancy? *PLoS ONE*, 8(2), e55506.
- [63] CRPFC (2014). *Étude de la sensibilité du chêne-liège au changement climatique en Corse*. Centre Regional de la Propriété Forestière de Corse / DRAAF, 101 p.
- [64] Cruiziat, P., & Tyree, M. T. (1990). La Montée de la sève dans les arbres. *La Recherche*, 21, 406-414.

D

- [65] Dahli, F. (2019). *Dynamique et écologie des peuplements forestiers de l'Ouest algérien : influence des facteurs topographiques et édaphiques*. Rapport d'étude / Publication.
- [66] Danjon, F., & Reubens, B. (2008). Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems. *Plant and Soil*.
- [67] David, T. S., Ferreira, M. I., Cohen, S., Pereira, J. S., & David, J. S. (2004). Constraints on transpiration from an evergreen oak woodland in southern Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 122(3-4), 193-205.
- [68] David, T. S., et al. (2013). Root functioning, tree water use and hydraulic redistribution in *Quercus suber* trees: A modeling approach based on root sap flow. *Forest Ecology and Management*.
- [69] Dehane, B. (2012). *Qualité des lièges de quelques subéraies algériennes : étude comparative entre Quercus suber L. et Q. afares Pomel* (Thèse de Doctorat). Université de Tlemcen.
- [70] Dehane, B., Bouhraoua, R. T., De Borja Palacios, M., Guibal, F., & Santana, J. A. S. (2014). Cork quality and growth of cork oak (*Quercus suber* L.) in the forest of Hafir (Tlemcen, Algeria). *Sociobiology*, 61(3), 336-344.
- [71] Delatour, C. (1983). Les dépérissements de chênes en Europe. *Revue Forestière Française*, 35(4), 265–282.
- [72] Delatour, C., & Guillaumin, J. J. (1993). *L'Armillaire et le pourridié agaric des forêts et des plantations / Armillaria et dépérissements forestiers*. INRA, Paris, 195 p.
- [73] DGF (2009 ; 2021 ; 2023). *Statistiques Forestières Nationales et rapports de production du liège en Algérie*. Direction Générale des Forêts, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Alger.
- [74] Dinis, C. O. (2014). *Cork oak (Quercus suber L.) root system: a structural-functional 3D approach* (Thèse de doctorat). Universidade de Évora, Évora, Portugal.
- [75] DSF (1991 ; 1995 ; 1998 ; 2001). *Bilans et réseaux de surveillance de l'état sanitaire des forêts françaises*. Département de la Santé des Forêts (DERF), Ministère de l'Agriculture, Paris.

- [76] Duchaufour, P. (1997). *Abrégé de Pédologie : Sol, végétation, environnement* (5e éd.). Masson, Paris, 292 p.

E / F / G

- [77] El Tolbi, M., Ezzahiri, M., & Belghazi, B. (1998). Apport des techniques d'analyse multivariées à l'évolution de l'état de végétation des peuplements forestiers : Cas du chêne-liège en Mâamora (Maroc Atlantique). *Sécheresse*, 9(3), 219–226.
- [78] Elena, E. (1992). *Situation sanitaire des subéraies espagnoles*. Ministerio de Agricultura, Madrid.
- [79] Eriksson, K., Messaoudène, M., & Hasnaoui, O. (2017). Dynamics of decline in Mediterranean oak forests: a case study of Algerian cork oak woodlands. *European Journal of Forest Research*, 136(4), 589-602.
- [80] Espanol, F. (1964). Insectes ravageurs du chêne-liège en Espagne. *Graellsia*.
- [81] Franceschini, A. et al. (1999a, 2002). Pathogènes fongiques des subéraies sardes. *Phytopathologia Mediterranea*.
- [82] Franklin, J. F., Shugart, H. H., & Harmon, M. E. (1987). Tree death as an ecological process. *BioScience*, 37(8), 550-556.
- [83] Garolera, A. (1988). Dépérissement des chênaies méditerranéennes espagnoles. *Silvae Genetica*.
- [84] Garrec, J. P., Laitat, E., Richardin, I., & Rose, C. (1991). Dépérissement forestier et perturbations minérales aux niveaux histologiques et cellulaire dans les aiguilles de *Picea abies* L. étude par microanalyse X. *Ann. Rech. For*, n°48, pp: 321-332.
- [85] Ghalem, A. (2015). *Analyse de la filière liège en Algérie : Enjeux et perspectives de développement*. Rapport d'étude.
- [86] Giorgi, F., Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 90-104.
- [87] Goumand, J., & Peyre, C. (1992). La subéraie française : superficie et production. *Forêt Méditerranéenne*.
- [88] Gradt, P. (2021). *L'embolie des arbres : comprendre un phénomène hydraulique vital*. Les Compagnons du Bonsaï.
- [89] Granier, A., Loustau, D., & Bréda, N. (2000). A generic model of forest canopy conductance dependent on water status. *Annals of Forest Science*, 57, 755-765.
- [90] Guillaumin, J. J. et al. (1983). Armillaria en forêt méditerranéenne. *Revue de Mycologie*.

H / I / J / K

- [91] Hamrouni, A. (1994). *Précipitations et végétation dans les subéraies tunisiennes*. INAT.
- [92] Houston, D. R. (1967). Dieback and decline of northeastern hardwoods / The role of stress in forest decline. *Trees*, 28, 12-14 / *IUFRO Proceedings*.
- [93] Houston, D. R. (1973). Reaction zone formation in oaks in relation to drought stress. *Phytopathology*, 63(12), 1534-1538.
- [94] Houston, D. R. (1981). *Stress triggered tree diseases: the diebacks and declines*. USDA Forest Service, NE-INF-41-81, 36 p.
- [95] Houston, D. R. (1984). Stress and decline of beech. *Beech bark disease*, USDA Forest Service, pp. 1-14.
- [96] Houston, D. R. (1992). A host-stress-saprogen model for forest dieback-decline diseases. In: Manion P.D. & Lachance D. (Eds.), *Forest Decline Concepts*, APS Press, St. Paul, pp. 3-25.

- [97] I.M.L. (1997 ; 2002 ; 2016). *Guides techniques de subériculture, pathologies de la suberaie en France et Actes du colloque VIVEXPO*. Institut Méditerranéen du Liège.
- [98] IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [99] Joffre, R., et al. (1999). The dehesa system of southern Spain and Portugal as a natural ecosystem mimic. *Agroforestry Systems*.
- [100] Khalla, A. (2006). *Étude de facteurs de dépérissement dans la subéraie d'El-Kala (Nord-est algérien) cas de la subéraie sanobari* (Mémoire d'Ingénieur). Université d'Annaba, 37 p.
- [101] Khelil, M. A., & Villemant, C. (2003). *Les insectes ravageurs des forêts de chêne-liège en Afrique du Nord*. Publication technique.
- [102] Kurz-Besson, C., et al. (2006). Hydraulic lift in a *Quercus suber* L. stand. *Plant and Soil*.
- [103] Kwak, M. J., Lee, S. H., & Woo, S. Y. (2011). Physiological and biochemical traits of different water and light intensities on cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings. *African Journal of Biotechnology*, 10(68), 15305-15319.

L

- [104] Lallam Tani, A. (2025). *Impact de la sécheresse sur la santé du chêne liège : cas de la forêt de Hafir (Tlemcen)* (Mémoire de Master / Rapport de suivi sanitaire inédit). Département des Ressources Forestières, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- [105] Lamey, A. (1893). *Le chêne-liège : sa culture et son exploitation / Notice sur les forêts de l'Algérie et de la Tunisie*. Berger-Levrault, Paris.
- [106] Landmann, G. (1993). Les facteurs dynamiques du dépérissement des chênes en France / Forest decline in Europe. *Revue Forestière Française / Springer*.
- [107] Landmann, G. (1994). Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. *Revue Forestière Française*, 46(5), 405-415.
- [108] Landmann, G., & Bonneau, M. (1994). *Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains*. Springer-Verlag, Berlin, 461 p.
- [109] Larcher, W. (2000). *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. Springer Science & Business Media.
- [110] Letreuch-Belarouci, A. (2002). *Compréhension du processus de dégradation de la subéraie de Tlemcen et possibilités d'installation d'une réserve forestière* (Thèse de Magistère). Université de Tlemcen, 205 p.
- [111] Loup, J. (1962). Le chêne-liège au Maroc. *Revue de géographie de Lyon*, vol. 37, n°2, pp. 131-152.
- [112] Luciano, P., & Prota, R. (1995). Insectes défoliateurs des subéraies sardes. *Bollettino dell'Istituto di Entomologia*.

M

- [113] Manion, P. D. (1981 ; 1991). *Tree Disease Concepts* (1ère et 2e éd.). Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 399 p. / 416 p.
- [114] Marion, J. (1952). La régénération naturelle du chêne-liège en Maâmora. *Ann. Rech. For. Maroc*, Rapport annuel, pp. 25-57.
- [115] Marras, G. et al. (1995). État sanitaire des subéraies de Sardaigne. *Atti del Convegno Internazionale sul Sughero*.

- [116] Martínez-Vilalta, J., Piñol, J., & Beven, K. (2002). A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean. *Ecological Modelling*, 155, 127-147.
- [117] Martinez-Vilalta, J., Prat, E., Oliveras, I., & Piñol, J. (2002). Xylem hydraulic conductivity and vulnerability to cavitation of several Mediterranean woody species. *Plant, Cell & Environment*, 25(12), 1625-1633.
- [118] Massenet, J. Y. (2010). *Chapitre III : Forme et âge d'un arbre, épaisseur de l'écorce*. Lycée forestier, Mesnières, 13 p.
- [119] Masson, P. (2005). *Propriétés physiques des sols forestiers et dynamique de la réserve utile en eau*. Éditions Forestières Européennes.
- [120] Mathieu, C., & Pieltain, F. (1998). *Analyse physique des sols : Recueil de méthodes*. Tec & Doc Lavoisier, Paris, 275 p.
- [121] Maurel, C., Verdoucq, L., Luu, D. T., & Santoni, V. (2008). Plant aquaporins: membrane channels with multiple integrated functions. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 595-624.
- [122] McCorell, N. G. (2011). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others die?. *New Phytologist*, 189(2), 374-383.
- [123] McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yezpe, 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.
- [124] Meddah, M., & Belghazi, B. (2022). Écologie et dynamique de la régénération du chêne-liège (*Quercus suber* L.) en milieu méditerranéen. *Revue des Sciences Forestières*, Vol. 18, n°2, pp. 112-125.
- [125] Meddour-Sahar, O. (2012 ; 2015). *Analyse des causes de dégradation et Les incendies de forêt en Algérie : diagnostic et analyse du risque*. Ouvrages et rapports de recherche.
- [126] Messaoudène, M. (2000). Dépérissement du chêne-liège en Algérie : bilan et perspectives. *Actes du séminaire international sur le chêne-liège*, Tlemcen, pp. 45-62 / *Forêt Méditerranéenne*, 21(1), 91-100.
- [127] Messaoudène, M., Eriksson, K., & Hasnaoui, O. (2013). La crise de la subéraie algérienne : état des lieux et facteurs de dégradation / Analyse de la croissance. *Forêt Méditerranéenne*, 34(2), 115-124 / *Revue Forestière Française*.
- [128] Messat, A. (1992). *Dépérissement de la forêt de la Mamora (Maroc)*. Ministère des Eaux et Forêts du Maroc.
- [129] Mirault, E., & Regad, P. (1992). *Évolution sanitaire des subéraies françaises*. D.S.F., Paris.
- [130] Mitrakos, K. (1980). A theory for Mediterranean plant life. *Acta Oecologica*, 1(3), 245-252.
- [131] Montgolfier, J. de (1986). *Les forêts de la Tunisie*. CTFT, Paris.
- [132] Montoya, J. M., & Meson, M. (1995). *Ecología y selvicultura de las quercineas ibéricas*. INIA, Madrid.
- [133] Morin, X., Fahse, L., Scherer-Lorenzen, M., & Bugmann, H. (2018). Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecology Letters*, 14(12), 1211-1219.
- [134] Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 214 p.

- [135] Naggar, O. (2021). *Étude des potentialités subéricoles de la région Nord Ouest Algérien : Cas de la forêt du Parc National de Theniet-El-Had (W. Tissemsilt)* (Thèse de doctorat). Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.
- [136] Nageleisen, L. M. (1992 ; 1994). *Le dépérissement de l'arbre : mécanismes physiologiques, diagnostic et observation des dépérissements en forêt*. Département de la Santé des Forêts, Paris / *Revue Forestière Française*.
- [137] Nageleisen, L. M., & Hett, J. P. (1989). Premières observations de dépérissement dans les subéraies françaises. *D.S.F.*
- [138] Nageleisen, L. M., et al. (1990). *Bilan des dépérissements du chêne-liège en France en 1989–1990*. D.S.F.
- [139] Nardini, A., Battistuzzo, M., & Savi, T. (2013). Shoot vulnerability to cavitation and hydraulic safety margins of European tree species vis-à-vis target xylem water potentials. *Functional Plant Biology*, 40(9), 871-880.
- [140] Natividade, J. V. / J. P. (1950 ; 1956). *Subericultura / Subériculture*. Direcção-Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas, Lisboa / Trad. École Nationale des Eaux et Forêts, Nancy, 387 p. / 302 p.
- [141] Natuzzi, L., & Almeida, M. H. (1998). Cork oak (*Quercus suber* L.) root development. *Proceedings of the Cork Oak Network meeting*, Évora.
- [142] Nienhaus, F. (1985). Viruses and phytoplasma in declining forest trees. *Plant Disease*.

O / P / Q

- [143] Oliveira, G., Werner, C., & Correia, O. (1996). Are ecophysiological responses influenced by crown position in cork-oak? *Annales des Sciences Forestières*, 53(2-3), 235-241.
- [144] ONM (2024). *Données des stations météorologiques de Mansourah et Mefrouche*. Office National de la Météorologie (ONM), Algérie / Archives de Recherche (2019-2025).
- [145] ONS (2019). *Évolution des exportations du liège entre 2000 et 2015*. Office National des Statistiques, Alger.
- [146] Pansu, M., & Gautheyrou, J. (2006). *Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Springer-Verlag, Berlin, 993 p.
- [147] Paulo, J., Palma, J., Gomes, A., et al. (2014). Predicting site index from climate and soil variables for cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal. *New Forests*, DOI 10.1007/s11056-014-9462-4.
- [148] Pereira, H. (2007). *Cork: Biology, production and uses*. Elsevier, Oxford, UK, 329 p.
- [149] Pereira, J. S., Mateus, J. A., Aires, L. M., Pita, G., Pio, C., David, J. S., ... & Rodrigues, A. (2007). Net ecosystem carbon exchange in three contrasting Mediterranean ecosystems – the effect of drought. *Biogeosciences*, 4(5), 791–802.
- [150] Piazzetta, R. (2005). *La levée du liège, guide technique et de vulgarisation*. Institut méditerranéen du liège, 23 p.
- [151] Pinheiro, A. C., Ribeiro, N., & Surový, P. (2008). Economic valuation of cork oak woodlands ecosystems services. *Cork Oak Woodlands Management*, 145-158.
- [152] Pinto, C. A., Nadezhkina, N., David, J. S., Kurz-Besson, C., Caldeira, M. C., Henriques, M. O., ... & David, T. S. (2013). Transpiration in *Quercus suber* trees under shallow water table conditions: the role of soil and groundwater. *Hydrological Processes*.
- [153] Pintus, A. (1992). *Les subéraies sardes : bilan sanitaire*. Regione Autonoma della Sardegna.
- [154] PNT (2015). *Parc National de Tlemcen – Brochure*. 4 p.

- [155] Poeiras, A. P., Oliveira, T., Reis, J., Surový, P., Silva, M. E., & de Almeida Ribeiro, N. (2022). Influence of water supply on cork increment and quality in *Quercus suber* L. *Central European Forestry Journal*, 68(1), 3-14.
- [156] Prat, R. (2016). *Introduction : Les plantes et l'eau*. Futura-Sciences (Consulté en juin 2026).
- [157] Quézel, P., & Médail, F. (2003). *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Elsevier, Paris, 571 p.

R

- [158] Regad, P. (1996). Évolution sanitaire des subéraies varoises. *Forêt Méditerranéenne*.
- [159] Ribeiro, N. A., Surový, P., & Pinheiro, A. C. (2010). Modeling management options for cork oak woodlands. *Forest Systems*, 19(2), 200-212.
- [160] Ribeiro, N. A., Surový, P., & Pinheiro, A. (2011). Evaluation of management alternatives for cork oak stands under climate change. *IOBC/WPRS Bulletin*, 62, 55-63.
- [161] Ribeiro, N., Surový, P., & Oliveira, T. (2021). Silvicultural strategies to mitigate climate change impacts in cork oak ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 482, 118-129.
- [162] Rolland, C., Michalet, R., Desplanque, C., Aimé, S., & Schweingruber, F. H. (1999). Ecological significance of oak dieback: the case of the French Alps. *Annals of Forest Science*, 56(3), 233-241.
- [163] Rolland, C., Baltensweiler, W., & Petitcolas, V. (1999). The potential for using larch budmoth (*Zeiraphera diniana*) as an indicator of climate change / dendrochronology. *Climatic Change / Forest Ecology and Management*.
- [164] Rolland, C. et al. (1999). Épicormiques et dépérissement du chêne-liège. *Annales des Sciences Forestières*.
- [165] Roloff, A. (2001). *Baumkronen: Verständnis und praktische Bedeutung eines natürlichen Systems*. Ulmer, Stuttgart.
- [166] Rondeux, J. (1999). *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Les presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 251 p.

S

- [167] Saccardy, L. (1937 ; 1938). Note sur le chêne-liège et le liège en Algérie. *Revue Eaux et Forêts*, 75(4), 241-261 / *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, 18(204), 574-593.
- [168] Sack, L., & Holbrook, N. M. (2006). Leaf hydraulics. *Annual Review of Plant Biology*, 57, 361-381.
- [169] Salmon, Y., Torres-Ruiz, J. M., Poyatos, R., et al. (2015). Focusing the lens on carbon starvation in trees: tissue-specific energetics during drought. *New Phytologist*, 205(2), 580-590.
- [170] Santos, M. J. (1995). *Biologia e epidemiologia de Phytophthora cinnamomi nas sobreiras portuguesas*. Instituto Superior de Agronomia.
- [171] Santos, M. J. et al. (1999). Pathologie de *Quercus suber* au Portugal. *European Journal of Forest Pathology*.
- [172] Sebei, H. et al. (2001). Écologie des subéraies tunisiennes dégradées. *Annales de l'INRGREF*, Tunis.
- [173] Sechi, S. et al. (2002). Situation sanitaire des subéraies sardes. *Rivista di Selvicoltura*.
- [174] Seidl, R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., ... & Reyser C.P. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395-402.

- [175] Serra, J. (1992). Situation de la subéraie espagnole. *Forêt Méditerranéenne*.
- [176] Serrano, L., Gazol, A., & Camarero, J. J. (2015). Long-term effects of drought on growth and forest health. *Journal of Ecology*, 103(5).
- [177] Sinclair, W. A. (1964 ; 1967). Comparisons of recent declines of hardwoods (white ash, oaks, and sugar maple) in northeastern United States. *Cornell University Memoir / Proceedings of the International Shade Tree Conference*.
- [178] Smahi, H., Bouhraoua, R. T., & Maatouf-Bouius, M. (2017). Decline of cork oak stands due to *Phytophthora cinnamomi* Rands in Western Algeria. *iForest*, 10, 543-550.
- [179] Smahi, H., Belhoucine-Guezouli, L., Franceschini, A., & Scanu, B. (2017). *Phytophthora* species associated with cork oak decline in a Mediterranean forest in western Algeria. *IOBC-WPRS Bulletin*, 127, 123–129.
- [180] Smahi, H., et al. (2018). Impact of xylophagous insects on *Quercus suber* decline in North-Western Algeria. *Journal of Forestry Research*, 29(4), 1105-1115.
- [181] Soltner, D. (2005). *Les bases de la production végétale : Tome 1, Le sol*. Sciences et Techniques Agricoles.
- [182] Sousa, E. (1995). *Platypus cylindrus* et dégradation des subéraies portugaises. Universidade de Évora.
- [183] Sperry, J. S., & Tyree, M. T. (1988). Mechanism of water stress-induced xylem embolism. *Plant Physiology*, 88(3), 581-587.

T / V / Y / Z

- [184] Tekkouk, F., & Bouhraoua, R. T. (2022). Rythme de récupération sanitaire post-incendie du chêne-liège (*Quercus suber* L.) et aptitude à la récolte précoce du liège flambé. *Revue Agrobiologia*, 12(1), 2941–2950.
- [185] Thomas, F. M., Blank, R., & Hartmann, G. (2002). Abiotic and biotic factors in relation to oak decline in northern Germany. *Forest Pathology*, 32(2), 75-96.
- [186] Toumi, L., Lumaret, R., & Michalakakis, Y. (2018). Climate stress drives cork oak decline and mortality in Algerian forest / Vulnérabilité hydraulique. *Forest Ecology and Management*, 409, 872–882 / *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*.
- [187] Toumi, L., Chouiri, M., & Bouhraoua, R. T. (2019). Infestation de *Platypus cylindrus* Fab. (Coleoptera: Platypodidae) dans les forêts de chêne-liège du Nord-Ouest de l'Algérie : Facteurs favorisant et cinétique du dépérissement. *Journal of Forest Science*, 35(3), 112-126.
- [188] Tuset, J. J. (2002). *Phytophthora cinnamomi* et la « seca » du chêne-liège en Espagne. *Phytopathologia Mediterranea*.
- [189] Tyree, M. T., & Sperry, J. S. (1989). Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 19-38.
- [190] Veillon, S. (1998). *Guide technique de subericulture dans les Pyrénées-Orientales*. Stage de fin d'étude, ENGREF, France, 68 p.
- [191] Vignes, P. (1990). Écologie du Chêne-liège en France. *Revue Forestière Française*.
- [192] Villemant, C. (1999). *Les ravageurs des subéraies du bassin méditerranéen*. INRA, Paris.
- [193] Villemant, C., & Bouhraoua, R. T. (2003). Les insectes du chêne-liège en Algérie. *Bulletin de la Société entomologique de France*.
- [194] Yassad, S. A. (2000). *Le chêne-liège et le liège dans les pays de la Méditerranée occidentale / Étude écologique et dendrométrique* (Thèse de Magister/Doctorat). Éditions ASBL Forêt Wallonne, Louvain-la-Neuve, 190 p. / Université de Tlemcen.
- [195] Yousfi, B. (1995). *Situation sanitaire de la subéraie marocaine*. ENFI, Salé.
- [166] Zapata-Lomba, S. (2010). *L'économie du liège : enjeux et perspectives*. Éditions de l'Université de Séville.

- [197] Zeraia, L. (1981). *Essai d'interprétation comparative des données écologiques, phénologiques et de production subéro-ligneuse dans les forêts de chêne-liège de Provence cristalline (France méridionale) et d'Algérie* (Thèse de doctorat Ès-Sciences). Université Aix-Marseille III, 367 p.
- [198] Zine, A. (1992). Les subéraies algériennes : état, bilan et perspectives. *Annales de la Recherche Forestière en Algérie / Forêt Méditerranéenne*, 13(4), 287–294.

Référence Web :

- [199] SDEC France. *Humidité du sol : les différentes techniques*. <https://fr.sdec-france.com/humidite-du-sol-les-differentes-techniques> (Consulté en décembre 2024).

Annexe 1.

Point 1 de la placette 2			Poids Sec (g) des échantillons selon les tamis						
profondeur (cm)		Poids humide (g)	5 mm	2mm	50 µm	20 µm	1 µm	Poids sec (g)	% Humidité du sol
0	20 cm	764	139	33	506	12	1	691	9,55
20	40 cm	601	55	24	461	6	0,5	547	8,99
40	60cm	582	6	16	475	16	0,6	514	11,68
60	80 cm	410	37	19	321	5	0,02	382	6,83
80	100 cm	413	40	16	315	7	0,4	379	8,23
100	120 cm	489	69	19	355	8	0,65	452	7,57
120	140 cm	628	45	22	498	9	1	575	8,44
Point2 de la placette 2			Poids Sec (g) des échantillons selon les tamis						
profondeur (cm)		Poids hu	5 mm	2mm	50 µm	20 µm	1 µm	Poids sec (g)	% Hu midi

		mid e (g)							té du sol
0	20 cm	584	16	36	43 0	21	1	507	13,1 8
20	40 cm	522	14	33	37 6	13	1	495	5,17
40	60c m	576	12	38	44 6	16	1	515	10,5 9
60	80 cm	545	21	22	47 7	9	1	532	2,39
80	10 0 cm	593	9	35	49 5	15	1	557	6,07
100	12 0 cm	602	44	99	42 5	20	1	589	2,16