

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

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

Département des Ressources Forestières

Laboratoire n°31 : *Gestion Conservatoire de l'Eau, du Sol et des Forêts et Développement
Durable des zones montagneuses de la région de Tlemcen*



MEMOIRE

Présenté par

ATALLAH Sabrina

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Foresterie (Protection des Forêts)

Thème

**Analyse de la décomposition thermique du liège de reproduction: cas de la
subéraie de Tagdempt (w.de Tiaret)**

Soutenu le 21/06/2026 devant le jury composé de :

Président: M. Bouhraoua R.T.	Prof.	Université de Tlemcen
Encadreur: M. Dehane B.	Prof.	Université de Tlemcen
Examinatrice: Mme. Abdelbaki A.	M.A.A.	Université de Tlemcen

Année universitaire 2025/2026

ملخص: تحليل التحلل الحراري للفلين للتكاثري: حالة غابة بلوط تفدامث (ولاية تيارت)

تمت دراسة عملية التحلل الحراري للفلين من غابة بلوط تفدامث الفليني في نطاق درجات حرارة يتراوح بين 150 و500 درجة مئوية، وذلك من خلال دراسة العلاقة بين زمن التحلل الحراري، وفقدان الكتلة، وتأثير الخصائص الفيزيائية للفلين. يُعد تحليل الفلين ضئيلاً عند 150 درجة مئوية بغض النظر عن مدة التعرض للإشعاع الحراري. في المقابل، تزداد حساسية الفلين للحرارة بشكل ملحوظ فوق 200 درجة مئوية، لا سيما في القمم، الذي يتميز بطبقة رقيقة إلى رقيقة جداً. يصبح التأثير الفعلي لتدفق الحرارة كبيراً فوق 300 درجة مئوية، مما يُسبب تحللاً كبيراً للفلين، حيث تصل معدلات التحلل إلى 78% لفلين القمم، و39.3% لفلين المنحدرات، و30.7% لفلين الأراضي المنخفضة. يحدث التأثير القاتل عند 400 درجة مئوية، مما يؤدي إلى تدمير ما يقرب من 97% من بنية فلين التلال، بينما يصل التحلل إلى ما بين 60 و70% لفلين المنحدرات والأراضي المنخفضة. عند درجة حرارة 500 درجة مئوية، يصبح التأثير التدميري شبه كامل، حيث يستهلك 99.75% من فلين التلال، مقارنةً بـ 98.06% لفلين المنحدرات و95.98% لفلين الأراضي المنخفضة. وقد لاحظنا أن الخصائص الفيزيائية الذاتية للفلين (السماكة، والكثافة، والمسامية، والعيوب المختلفة) تتحكم في أنماط الانتشار الحراري، وبالتالي في تحلله التدريجي.

الكلمات المفتاحية:

تفدامث، الفلين، القمم، المنحدرات، المناطق المنخفضة، التحلل الحراري

Résumé

La décomposition thermique du liège de *Quercus suber* L., provenant de la subéraie de Tagdempt a été étudiée dans la gamme de températures 150 ~ 500°C en relation avec la durée de pyrolyse, la perte de masse et l'influence de paramètres physiques du liège. La dégradation du liège est insignifiante à 150°C quel que soit le temps d'exposition aux radiations thermiques. En revanche, la sensibilité thermique du liège devient plus marquée à partir de 200 °C, notamment chez le liège de crête, caractérisé par une épaisseur mince à très mince. L'impact réel du flux thermique apparaît de façon significative dès 300 °C, provoquant une dégradation importante du liège, avec des taux de décomposition avoisinant 78% pour le liège de crête, 39,3% pour celui de pente et 30,7 % pour le liège de bas-fond. L'effet létal se manifeste à 400 °C, entraînant la destruction de près de 97 % de la structure du liège de crête, tandis que la dégradation atteint entre 60 et 70 % pour les lièges de pente et de bas-fond. À 500 °C, l'effet destructeur devient quasi total, avec une calcination de 99,75 % du liège de crête, contre 98,06 % pour le liège de pente et 95,98 % pour celui des bas-fonds. Il a été constaté que ce sont les paramètres physiques intrinsèques au liège (épaisseur, densité, porosité et divers défauts) qui règlent les modes de propagation thermique et par conséquent sa décomposition progressive.

Mots- clé : Tagdempt, liège , crête, pente, bas-fond, décomposition thermique.

Abstract : Analysis of the thermal decomposition of reproductive cork: the case of the cork oak forest of Tagdempt (w.of Tiaret)

The thermal decomposition of cork from *Quercus suber* L., sourced from the Tagdempt cork oak forest, was studied in the temperature range of 150–500°C in relation to pyrolysis time, mass loss, and the influence of physical cork parameters. Cork degradation is negligible at 150°C regardless of the duration of exposure to thermal radiation. In contrast, the thermal sensitivity of cork becomes more pronounced above 200°C, particularly in ridge cork, which is characterized by a thin to very thin layer. The actual impact of heat flux becomes significant above 300°C, causing substantial cork degradation, with decomposition rates approaching 78% for ridge cork, 39.3% for slope cork, and 30.7% for lowland cork. The lethal effect occurs at 400°C, resulting in the destruction of nearly 97% of the structure of ridge cork, while degradation reaches between 60 and 70% for slope and lowland cork. At 500°C, the destructive effect becomes almost total, with 99.75% of ridge cork consumed, compared to 98.06% for slope cork and 95.98% for lowland cork. It has been observed that the intrinsic physical parameters of the cork (thickness, density, porosity, and various defects) govern the modes of thermal propagation and, consequently, its progressive decomposition.

Keywords: Tagdempt, cork , ridge, slope, lowland, thermal decomposition.

Remerciement

Pour commencer, je dois remercier **ALLAH** Le Tout Puissant qui m'a donné la force et le courage .de terminer ce travail.

Mes premiers mots de remerciements et surtout de reconnaissance, vont naturellement vers mon encadreur, Mr. Dehane Belkheir. Il s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer. Qu'il reçoive toute l'expression de ma reconnaissance pour m'avoir proposé ce sujet de mémoire, et, pour tout son dynamisme et ses qualités humaines.

Je tiens à exprimer également, ma profonde gratitude à Mr. Bouhraoua Rachid Tarek (Professeur à l'Université de Tlemcen), qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de mémoire de master. A Madame Abdelbaki Amina (Maitre Assistante A à l'Université de Tlemcen), je veux lui adresser ma profonde reconnaissance pour avoir accepté de consacrer son temps à l'examen de ce travail.

Je tiens à remercier également certaines personnes du laboratoire de chimie organique et environnement et le laboratoire d'écologie et gestion des écosystèmes naturels (Mr Benguella F. et Mr Merzouk A .) qui se sont portées volontaires pour l'utilisation du four à moufle sans conditions préalables. Je pense notamment à Mr. Bensenane Bachir de nous avoir procuré les creusets dans un temps réel , qu'il trouve ici tout mon respect et ma gratitude.

Mes remerciements vont aussi aux agents de la conservation des forêts de la wilaya de Tiaret de nous avoir aidé dans l'extraction des échantillons du liège.

Merci aussi à tous mes enseignants et amis qui se reconnaîtront ici. Je leur exprime ma profonde sympathie et leur souhaite beaucoup de bien.

Dédicaces

A ceux qui ont attendu avec impatience les fruits de leur bonne éducation, leurs efforts, leurs sacrifices et leurs encouragements durant toutes mes études... à mes chers parents.
Je voudrais leur témoigner toute ma gratitude et tout mon amour.

A mon frère et mes sœurs
A toute ma famille qui m'a toujours chéri

A mes amis, (es) avec lesquels j'ai passé des moments et des années inoubliables. Je leur témoigne toute mon amitié.

A toute personne que j'ai connu de près ou de loin.

A tous mes enseignants.

A ma promo de foresterie que je ne pourrais jamais oublier.

Liste des figures

Titre	Page
Figure 1. Chêne liège avec feuilles de l'année et inflorescence en chatons, et fruit	3
Figure 2. Types de subéraies à l'échelle méditerranéenne et nationale	4
Figure 3. Méristèmes responsables de la croissance du liège	7
Figure 4. Différents types de liège produit par le même arbre	8
Figure 5. Types de liège présents dans un peuplement productif	9
Figure 6. Structure cellulaire du liège	10
Figure 7. Forêt méditerranéenne et zones incendiées en 2020	11
Figure 8. Superficies du chêne liège incendiées en Algérie (1985-2020)	12
Figure 9. (a) Probabilité de mortalité de la tige après un incendie et (b) taux de recouvrement de la cime, par rapport au diamètre de la tige et à l'épaisseur de l'écorce	12
Figure 10. Rôle de la morphologie (diamètre et hauteur) dans la protection de l'arbre contre le feu (a) jeune sujet entièrement brûlé de la base à la cime ; (b) arbre adulte de grande taille, superficiellement affecté par le feu.	13
Figure 11. Mécanisme de carbonisation du liège en forêt (liège épais et mince)	14
Figure 12. Carbonisation du liège selon l'épaisseur du liège	14
Figure 13. Phases d'inflammabilité du liège de reproduction par EPI-radiateur (Testé au laboratoire)	15
Figure 14. Courbes contrainte-déformation pour la compression du liège avec micrographies électroniques à balayage présentées en section tangentielle, à différentes déformations de compression axiale	16
Figure 15. Fluctuation de la production annuelle du liège entre 1964 et 2020	18
Figure 16. Situation géographique de la zone d'étude « Safalou »	19
Figure 17. Cartes des pentes dans la forêt de Tagdempt	20
Figure 18. Variations des précipitations annuelles dans la forêt de Tagdempt (1992-2021)	21
Figure 19. Variation mensuelle des précipitations (ancienne et nouvelle période)	22
Figure 20. Répartition saisonnière des pluies dans la subéraie de Tagdempt	22
Figure 21. Fluctuation des températures moyennes annuelles à Tagdempt	23
Figure 22. Indice d'aridité de De Martonne pour les deux périodes de référence	26
Figure 23. Diagrammes Ombrothermiques de la forêt de Tagdempt	27
Figure 24. Quotient pluviothermique et climagramme d'emberger de la forêt de Tagdempt au cours de la période ancienne (Pa) et récente (Pn)	28
Figure 25. les principaux massifs forestiers	29
Figure 26. Surface génératrice de liège par catégorie d'âge du liège	31
Figure 27. Schéma explicatif de l'échantillonnage par itinéraire	32
Figure 28. Méthode d'extraction du liège sur arbre producteur	32
Figure 29. Les deux lots du liège de la pente et du bas-fond	33
Figure 30. Pesée successive de l'échantillon	34
Figure 31. Mesure des épaisseurs du liège par le pied de ligne	34
Figure 32. Calcul du coefficient de porosité par analyse d'image scannée	35
Figure 33. Poudre du liège obtenue après broyage et étiquetage selon la provenance	35
Figure 34. Conservation de la poudre du liège en boîtes plastifiées	37
Figure 35. Séchage et pesée de la masse initiale de l'échantillon par balance analytique	37
Figure 36. Model de creusets pour la calcination du liège dans le four à moufle	38
Figure 37. Four réglé à 150°C Pour la décomposition thermique pendant 10 minutes	38
Figure 38. La masse calcinée à 300°C ; 400°C et 500°C	39
Figure 39. Distribution des effectifs des arbres échantillons selon les variables morphologiques continues : épaisseur du liège, diamètre, hauteur, hauteur d'écorçage et coefficient d'écorçage	41
Figure 40. Moyennes marginales selon les trois niveaux d'échantillonnage	42
Figure 41. Distribution en boîte à moustache pour les variables physiques	43
Figure 42. Variation de la masse résiduelle selon le type du liège et la température	45

Figure 43. Synthèse des masses résiduelles selon les plages des températures	46
Figure 44. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse(150°C)	47
Figure 45. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse (200°C)	48
Figure 46. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse(300°C)	49
Figure 47. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse(400°C)	50
Figure 48. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse(500°C)	51
Figure 49. Synthèse de la décomposition thermique du liège selon la durée d'exposition	52
Figure 50. Schéma explicatif de comportement du feu en montagne	53
Figure 51. Impact du feu sur la structure du liège	54
Figure 52. Exemple d'aspect du liège de crête (en haut : Lignification verticale ; en bas : liège doublé	55
Figure 53. En haut : pores de grand diamètre remplie d'air ; en bas : liège terreux	56
Figure 54. A gauche (Agglomérats de liège.) ; au milieu (Liège expansé MD façade) : à droite (Dalle de sol en liège naturel	59

Liste des tableaux

Titre	Page
Tableau 1. Principaux constituants chimiques du liège	10
Tableau 2. Caractéristiques de la station de référence et périodes d'observation	21
Tableau 3. Indice de continentalité de la forêt de Tagdempt	24
Tableau 4. Indice de sécheresse estivale de la forêt de Tagdempt	24
Tableau 5. Etages de végétation du chêne-liège de la zone d'étude	25
Tableau 6. Indice de De Martonne pour les deux périodes.	26
Tableau 7. Valeurs du « Q2 » et étages bioclimatiques	27
Tableau 8. Les essences forestières recensées et leurs superficies correspondantes	29
Tableau 9. Classes de densité du liège	35
Tableau 10. Statistiques descriptives des variables morphologiques	40
Tableau 11. Statistiques descriptives des variables morphologiques par itinéraire	42
Tableau: 12 Tests des effets inter-sujets pour les variables morphologiques	43
Tableau 15. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (300°C)	43
Tableau 13. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle	48
Tableau 14. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (200°C)	49
Tableau 15. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (300°C)	50
Tableau 16. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (400°C)	51
Tableau 17. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (500°C)	52
Tableau 18. Matrice de corrélation entre les paramètres physiques et les plages de température	57

Abréviations

°C : Degré Celsius

°K : Degrés kelvin

APCOR ; Association Portugaise du liège

CEABN/ISA : Centre d'écologie appliquée de l'Institut supérieur d'agronomie du Portugal

cm : centimètre

CFWT : Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret

CYCITEX: Institut du liège, du bois et du carbone végétal

DGF : Direction générale des Forêts

DSC : La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) joue un rôle clé dans l'évaluation de l'inflammabilité.

DTA : Fait généralement référence à l'Analyse Thermique Différentielle (ou Differential Thermal Analysis en anglais), une technique de laboratoire utilisée pour étudier l'inflammabilité et la stabilité thermique des matériaux.

EFFIS: European Forest Fire Information System

Ha : hectare

IPROCOR: Institut du liège, du bois et du carbone végétal

Kg : kilogramme

km/h : kilomètre par heure

m³ : mètre cube

MJ/kg : Mètre joule par kilogramme

mm : millimètre

Pa : Période ancienne

Pn : Période nouvelle

Qx : Quintaux

TGA : Analyse Thermogravimétrique

W/m*K : watt par mètre kelvin

WWF : Fonds mondial pour la nature

PA : Pluie annuelle

Table des matieres

Introduction générale.....	1
 Chapitre I Synthèse bibliographique	
I.1-Quelques informations sur le chêne liège.....	3
I.1.1- Classification botanique	4
I.1.2-Répartition géographique et superficies.....	5
I.1.3- Habitat naturel et support pédologique	5
I.1.4- Exigences climatiques.....	5
I.1.5- Typologie des subéraies et méthodes de gestion forestière.....	6
I.2-Le liège.....	6
I.2.1-Formation	6
I.2.2- Croissance et classification dimensionnelle du liège	8
I.2.3-Structure microscopique.....	9
I.2.4-Composition chimique.....	10
I.2.5-Réactions du chêne liège au feu.....	11
I.2.6-Principales propriétés et vertus du liège.....	15
I.2.7-Economie du liège.....	17
 Chapitre II Etude du milieu	
II.1-Le milieu physique.....	19
II.1.1-Situation géographique de la zone d'étude.....	19
II.1.2- Géologie et Pédologie.....	20
II.1.3- Topographie et hydrographie.....	20
II.2-Le climat.....	20
II.2.1-Données climatiques.....	21
II.2.1.1- Distribution des précipitations.....	21
1- 1- Répartition annuelle des précipitations.....	21
2-Répartition mensuelle des précipitations.....	21
3-Régime saisonnier des précipitations.....	22
II.2.1.2-Température	22
II.2.1.3-Autres paramètres climatiques	23
II.2.1.3.1-Humidité relative	23
II.2.1.3.2-Le vent	23
II.2.2- Synthèse climatique.....	23
II.2.2.1-Amplitude thermique moyenne ou Indice de continentalité	23
II.2.2.2--Indice de sécheresse estivale	24
II.2.2.3- Etage de végétation ou zonation altitudinale	25
II.2.2.4-Indice de De Martonne	25
II.2.2.5-Approche climatique de Gaussen	26
II.2.2.6-Quotient pluviothermique et climagramme d'Emberger	27
II.3-Description forestière	28
II. 4-Faune	30

II.5-Production subericole	30
II.6 -Incendies.....	31

Chapitre III

Matériels et méthodes

III.1-Echantillonnage et prélèvement sur terrain.....	32
III.2-Travail au laboratoire.....	33
III.2.1-Mesures des paramètres physiques du liège.....	33
III.2.1.1-Séchage et pesée.....	33
III.2.1.2-Mesure de l'humidité d'équilibre.....	33
III.2.1.3-Mesure de l'épaisseur du liège.....	34
III.2.1.4-La densité volumétrique du liège.....	34
III.2.1.5-La porosité du liège.....	35
III.2.2-Broyage des échantillons.....	36
III.2.3-Traitement thermique.....	37
III.3-Traitement de données.....	39

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1- Caractéristiques des arbres-échantillons.....	40
IV.1.1- Mesures de morphologie.....	40
IV.1.2- Mesures physiques.....	43
IV.2- Décomposition thermique du liège.....	45
IV.2.1- Décomposition thermique à 150°C.....	47
IV.2.2- Décomposition thermique à 200°C.....	48
IV.2.3- Décomposition thermique à 300°C.....	49
IV.2.4- Décomposition thermique à 400°C.....	50
IV.2.5- Décomposition thermique à 500°C.....	51
IV.3- Extrapolation des résultats.....	52
Conclusion générale et perspectives.....	59
Références.....	61
Annexe	

Introduction générale

L'inflammabilité du combustible forestier se définit comme l'aptitude d'un matériau à s'enflammer facilement, que ce soit de manière volontaire ou sous l'effet de conditions environnementales particulières (Zhan et al., 2011). Afin de reproduire les conditions rencontrées sur le terrain, plusieurs essais et protocoles expérimentaux normalisés ont été réalisés en laboratoire dans le but d'évaluer l'inflammabilité et de caractériser la conductivité thermique des écorces de diverses essences forestières. Dans ce cadre, on peut citer les travaux de Pinard et Hoffman (1997) portant sur la capacité isolante des écorces de différentes espèces soumises à diverses températures, ainsi que les études menées par Bauer et al. (2010) et Odhiambo et al. (2014), qui se sont intéressées à la distribution de la température le long du tronc.

D'autres recherches se sont intéressées à l'évaluation de l'inflammabilité des combustibles forestiers (Madrigal et al., 2009), tandis que certaines ont exploré la relation entre le degré d'inflammabilité et les probabilités de survie des espèces après un incendie de forêt (Frejaville et al., 2013 ; Catry et al., 2012 ; Pausas et Moreira, 2012).

De manière générale, les premières recherches consacrées à l'inflammabilité et à la combustion des combustibles forestiers en laboratoire ont été menées à l'aide de différentes techniques d'analyse, initialement développées et appliquées principalement aux matériaux de construction, telles que la TGA, la DTA et la DSC (Babrauskas, 2003).

La dégradation thermique des matériaux ligno-cellulosiques, et notamment du bois, a fait l'objet de nombreuses recherches (Nguyen et al. 1981; Shafizadeh et Chin 1977). D'ailleurs, la décomposition thermique par pyrolyse a également été proposée comme outil analytique pour l'étude des composants du bois (Faix et Meier, 1989). Ces études n'ont pas inclus le liège ni d'autres matériaux subérinés, malgré des différences significatives concernant le comportement thermique du liège.

Les recherches sur l'effet de la température sur le liège sont récentes et portent notamment sur la structure cellulaire et les propriétés mécaniques (Rosa et Fortes, 1987 ; Rosa et al., 1991), la perte de masse (Rosa et Fortes, 1988 ; Pereira et Ferreira, 1989) et la spectrométrie de masse des produits de dégazage lors d'un chauffage jusqu'à 250 °C (Bento et al., 1991).

En Algérie, le liège est considéré comme un matériau forestier très rentable écologiquement et économiquement alimentant un tissu industriel très important principalement dans l'Est du pays (Bouhraoua, 2003 ; Dehane et al., 2013). Cette industrie de transformation produit annuellement des tonnes de plaques isolantes très prisées dans le secteur du bâtiment et dans les divers secteurs liés à l'acoustique, au revêtement des sols et des murs. Ces matériaux sont commercialisés et exportés selon leur degré de résistance au feu. Certaines étapes de la transformation industrielle du liège exploitent également la température et un certain degré de dégradation thermochimique. C'est notamment le cas pour la production d'agglomérés expansés, où les granules de liège sont traités dans des autoclaves fermés avec de la vapeur surchauffée à environ 300 °C afin d'obtenir leur expansion et leur auto-agglomération thermique (Pereira et Ferreira, 1989).

En forêt, le liège forme une ceinture isolante qui protège l'arbre contre les rayonnements thermiques des incendies grâce à son épaisseur et aussi sa structure interne typique, ce qui lui

confère une meilleure préservation de ses assises vasculaires à savoir le cambium et le phellogène (Bertrand, 2007).

Dans ce contexte, une meilleure connaissance du comportement thermique du liège pourrait s'avérer importante dans les opérations de lutte contre les incendies de forêts et la gestion post-incendie des subéraies.

Ce travail réalisé pour la première fois en Algérie présente les résultats de la décomposition thermique du liège dans un four à moufle, dans les plages de températures 150 500°C. L'objectif principal est d'affirmer que la dégradation thermique du liège est en effet une pyrolyse de sa structure interne.

Le present travail est charpenté sur quatre chapitres distincts:

- Le premier se rapporte à une synthèse bibliographique sur le chêne liège et le liège.
- Le second donne une idée globale sur le milieu physique de la subéraie de Tagdempt.
- Le troisième explique en détail la méthodologie adoptée pour expliquer la thématique.
- Enfin le quatrième chapitre met en exergue les résultats obtenus du travail au terrain et des tests réalisés au laboratoire.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1-Quelques informations sur le chêne liège

I.1.1-Classification botanique

Le chêne-liège (*Quercus suber* L.) est une essence forestière feuillue appartenant à la famille des Fagaceae. Cette famille regroupe des espèces arborées caractérisées par la présence de fleurs unisexuées et par un fruit de type akène, communément appelé gland, généralement inséré dans une structure cupulaire protectrice appelée cupule (Carneiro, 1961).

L'ensemble des espèces appartenant à cette famille présente une organisation monoïque, c'est-à-dire que les fleurs mâles et femelles sont portées par un même individu, tout en étant nettement différenciées sur le plan morphologique. Les fleurs mâles sont regroupées en inflorescences de type chaton, tandis que les fleurs femelles apparaissent isolées ou en petits groupes (APC0R, 2016).

La classification des chênes (*Quercus*) comprend environ 600 espèces situées majoritairement dans l'hémisphère Nord, dont 8 poussent spontanément en méditerranée (de Vilmorin, 2003):

- **Règne** : *Plantae* (Plantes)
- **Clade** : *Fabidées*
- **Ordre** : *Fagales* (Fagales)
- **Famille** : *Fagaceae* (Fagacées)ç
- **Genre** : *Quercus* (Chênes)
- **Espèce** : *Quercus suber* (Chêne-liège)
- **Sous-espèce** : *suber* (latin pour liège)



Figure 1 . Chêne liège avec feuilles de l'année et inflorescence en chatons, et fruit (Rovira, 2018)

Selon les récits des auteurs suivants (Natividade, 1956 ; Graça et Pereira, 2004 ; ICNF, 2013), la description botanique se résume comme suivant:

- C'est un arbre sempervirent qui peut atteindre une hauteur moyenne comprise entre 10 et 25 mètres. Il se distingue notamment par la présence d'une écorce très développée, épaisse et profondément crevassée.

- Le tronc est généralement robuste et peut être soit relativement rectiligne, soit présenter certaines irrégularités. La couronne, souvent ample et étalée, adopte une morphologie irrégulière résultant du développement des ramifications latérales.
- Le feuillage est constitué de feuilles persistantes disposées de manière alterne sur les rameaux. Le limbe, de consistance coriace, présente le plus souvent une forme elliptique. Ses dimensions varient approximativement entre 3 et 8 cm de longueur et entre 1,2 et 5,5 cm de largeur.
- Sur le plan reproducteur, les fleurs mâles sont regroupées en inflorescences pendantes dont la longueur varie généralement entre 4 et 8 cm. Les fleurs femelles se développent quant à elles sur les jeunes pousses et apparaissent soit isolées, soit réunies en petits groupes comprenant généralement deux à cinq fleurs de coloration jaunâtre.
- Le fruit est un gland, présentant une forme ovoïde et une coloration brun châtaigne à maturité. Ses dimensions peuvent atteindre environ 4 à 4,5 cm de longueur pour près de 2 cm de largeur.

I.1.2-Répartition géographique et superficies

Le chêne liège ne s'adapte géographiquement et climatiquement qu'à la méditerranée occidentale et aux côtes atlantiques (Pereira, 2007). Cette région est limitée à 7 pays (l'Algérie, la France (le sud et les îles de Corse), l'Italie (la Sardaigne et de Sicile), le Maroc, le Portugal, l'Espagne et la Tunisie, ainsi que des zones très limitées sur les îles de Majorque et Minorque (Aronson et al., 2009).

Selon l'Institut Méditerranéen du Liège (IML, 2021), la subéraie mondiale totaliserait environ 2 687 000 hectares répartis sur les sept pays connus: Portugal 32,5%, Espagne 22,1% ; Italie 6,7 % ; France 4,4% ; Maroc 18,1% ; Algérie 12,2% et Tunisie 4%.

Environ 65,7% de la superficie mondiale de chênes-lièges appartient à l'Union Européenne (Europe du Sud), qui contrôle 87% de la production de matières premières (Cork Quality Council, 2019).

Selon l'inventaire de la DGF (Abbas, 2013), la subéraie Algérienne occupe une aire écologique globale de 483 000 ha dont 377 792 ha sur le littoral et 106 008 ha en montagne. La plus grande masse se trouve à El Taref avec 96 965 ha, et la plus petite à Mascara 300 ha (Fig.2).

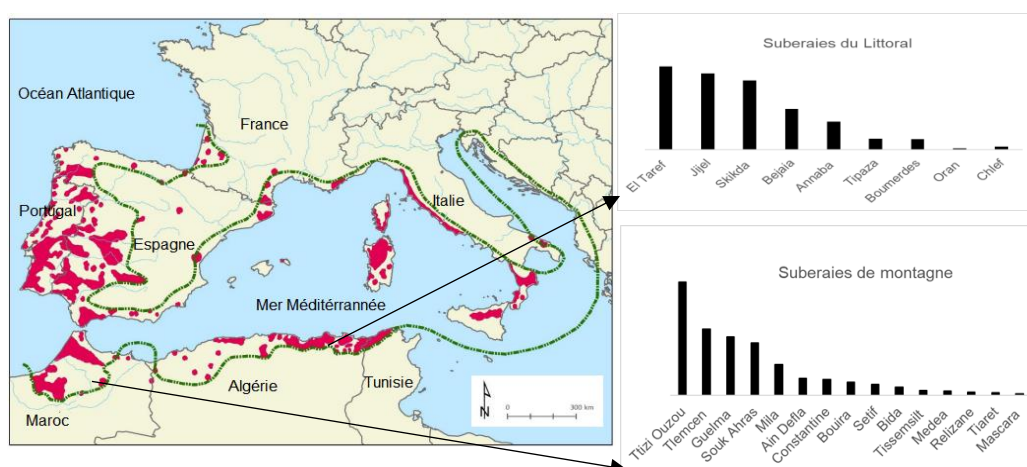


Figure 2.Types de subéraies à l'échelle méditerranéenne et nationale (Frihi, 2025)

En Algérie, le chêne liège se dissémine à travers 22 wilayas couvrant une superficie productive de l'ordre de 230 000 ha entre forêt pures et maquis (Dehane, 2012).

Les forêts de chênes-lièges sont parfaitement adaptées aux zones méridionales de l'Europe et de l'Afrique du Nord (Le Maghreb). Elles jouent un rôle crucial dans la lutte contre la désertification, contribuent à la séquestration du carbone et offrent un habitat privilégié à de nombreuses espèces animales et végétales remarquables (Santos, 2000).

I.1.3-Habitat naturel et support pédologique

-Traditionnellement, le chêne-liège a été considéré comme une espèce calcifuge (Devesa, 1984). Toutefois, qu'il soit réellement calcifuge ou non, il se développe le plus souvent sur des sols acides (Bellinfante et al., 1997).

-Selon Carretero et al.(1996), le pH de ces sols peut varier de modérément acide à fortement acide (3,5 à 5,0). La teneur en matière organique et en azote demeure moyenne à faible (1,2 à 5,9) pour la matière organique et 0,06 à 0,4 pour l'azote dans les 25 premiers centimètres).

- Le chêne-liège préfère les sols meubles et bien drainés, étant particulièrement adapté aux substrats siliceux, et se rencontre rarement sur des dolomies cristallines ou des calcaires fortement lessivés (Jordan et al., 1998). Dans les zones humides et fermées, il peut former de vastes forêts. Il peut se développer depuis les zones littorales jusqu'aux altitudes comprises entre 0 et 1 200–1 300 mètres (Montero et Cañellas, 1999).

I.1.4-Exigences climatiques

- Selon Temperé et al.(2011), le chêne-liège est particulièrement sensible aux climats très continentaux. Il nécessite des précipitations annuelles comprises entre 700 et 800 mm, avec idéalement une pluviométrie estivale moyenne de 150 à 200mm. Bien qu'il puisse se développer dans des régions plus humides, il y subit une concurrence accrue de la végétation locale. Dans les zones où la pluviométrie annuelle moyenne est inférieure à 400–450 mm, l'arbre survit, mais la production de liège est limitée, la récolte devient difficile et sa régénération naturelle très problématique (Winter, 1995).

-Le chêne-liège se développe idéalement dans des régions où la température annuelle moyenne se situe entre 13 et 16 °C, bien qu'il puisse tolérer des climats atteignant 19 °C, ce qui en fait l'une des espèces arboricoles les plus thermophiles. Il ne supporte pas des températures minimales absolues inférieures à -11 à -12 °C lorsqu'elles sont fréquentes, et la température moyenne du mois le plus froid ne doit pas descendre en dessous de 4 à 5 °C. De manière générale, il s'agit d'une espèce de climat tempéré capable de résister à des températures élevées à condition de disposer d'un approvisionnement en eau suffisant (Montero et Cañellas, 1999).

I.1.5-Typologie des subéraies et méthodes de gestion forestière

La gestion durable des suberaies préconise l'adoption du régime de futaie. Avant de déterminer le type de gestion à appliquer à une subéraie, il est essentiel d'identifier le type de peuplement présent. On distingue trois types de suberaies en fonction de l'importance relative des chênes-lièges, de leur âge et de leurs dimensions (Amandier et Santelli, 2004):

-Subéraie régulière : elle se caractérise par une homogénéité de l'âge et de la taille des arbres. Cette uniformité se manifeste généralement par la prédominance d'arbres appartenant à une ou deux classes de diamètre.

- Subéraie irrégulière : ce type de peuplement se distingue par son hétérogénéité. Aucune classe de diamètre ne domine, et les jeunes arbres se mêlent aux plus gros, créant une structure variée en âge et en taille.

-Chêne-liège en accompagnement : lorsque l'espèce n'est pas dominante, elle joue un rôle accessoire ou secondaire au sein du peuplement.

Quel que soit le régime de gestion adopté, qu'il soit régulier ou irrégulier, les interventions sylvicoles sont organisées autour des récoltes de liège, qui ont lieu tous les 10 à 15 ans, constituant ainsi le rythme principal de la sylviculture ou communément la sébericulture).

Les principales opérations sylvicoles pratiquées dans les suberaies sont les suivantes (Devesa , 1984):

- Débroussaillage du sous-bois, généralement réalisé l'année précédant la récolte du liège;
- Abattage des arbres malades ou trop âgés ;
- Sélection, taille, élagage et « démasclage » des jeunes arbres ;
- Éclaircies visant à réduire la densité arborée lorsque celle-ci est trop élevée, afin d'éviter que les houppiers ne se touchent ;

I.2-Le liège

I.2.1-Formation

Par définition, le liège correspond au parenchyme subéreux produit par le méristème secondaire subéro-phellodermique du chêne-liège (*Quercus suber* L.), formant le revêtement du tronc et des branches (Fig.3).

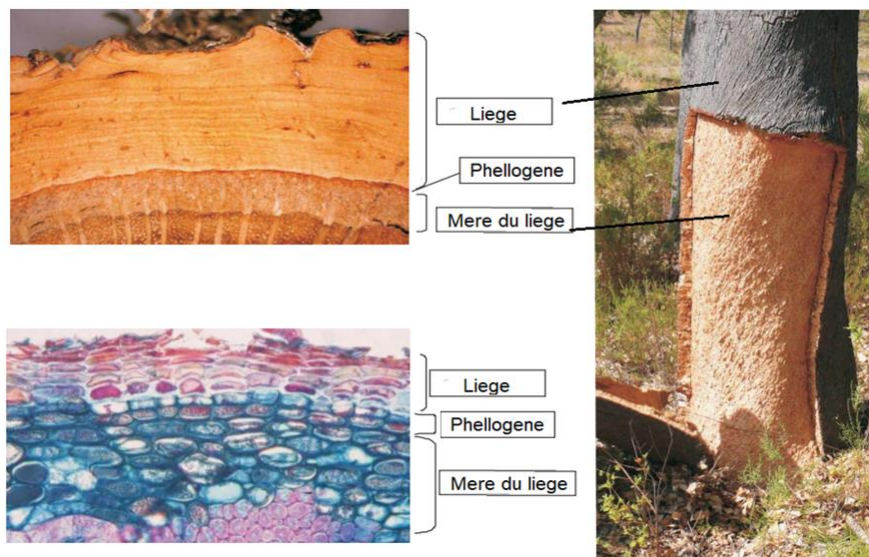


Figure 3. Méristèmes responsables de la croissance du liège (UNAC, 2013)

-La production du liège résulte de l'activité du phellogène, un tissu constitué de cellules mères concentriques avec le cambium vasculaire, responsable de la formation du bois (Fortes, 2004).

-Le chêne-liège possède la capacité de maintenir son phellogène actif tout au long de sa vie, produisant vers l'intérieur le phelloderme et, vers l'extérieur, d'abondantes couches de phellème qui repoussent les anciennes. Vers l'intérieur, la couche mère du liège (liber + phelloderme) peut se cicatriser après chaque écorçage grâce à la formation d'une croûte protectrice (Natividade, 1956).

-Cette zone est progressivement repoussée par les couches successives de nouvelles cellules formées à l'intérieur, donnant ainsi naissance à la « croûte », qui constitue la partie externe du liège. Lorsqu'elle sèche, cette croûte se rétracte et se durcit, se fissurant sous l'effet de l'expansion de son périmètre externe par rapport au périmètre interne, conséquence de la croissance de l'arbre (Pereira, 1987).

- Le premier prélèvement de liège, appelé démasclage, produit ce que l'on nomme le liège vierge ou liège mâle (Fig.4), caractérisé par une surface extérieure très irrégulière. Cette opération n'est autorisée que sur les chênes-lièges dont le périmètre du tronc, mesuré sur le liège à 1,30 mètre du sol, est supérieur ou égal à 70 cm (Dehane, 2006).

-Les prélèvements successifs produisent un liège dont la surface extérieure devient progressivement plus régulière, appelé liège de reproduction (Fig.4). Le premier liège de reproduction, encore légèrement irrégulier, est désigné sous le nom de liège secondaire ou liège femelle et possède des usages similaires à ceux du liège vierge, tels que le broyage, la production de granulés ou la fabrication d'agglomérats (Gil, 1998).

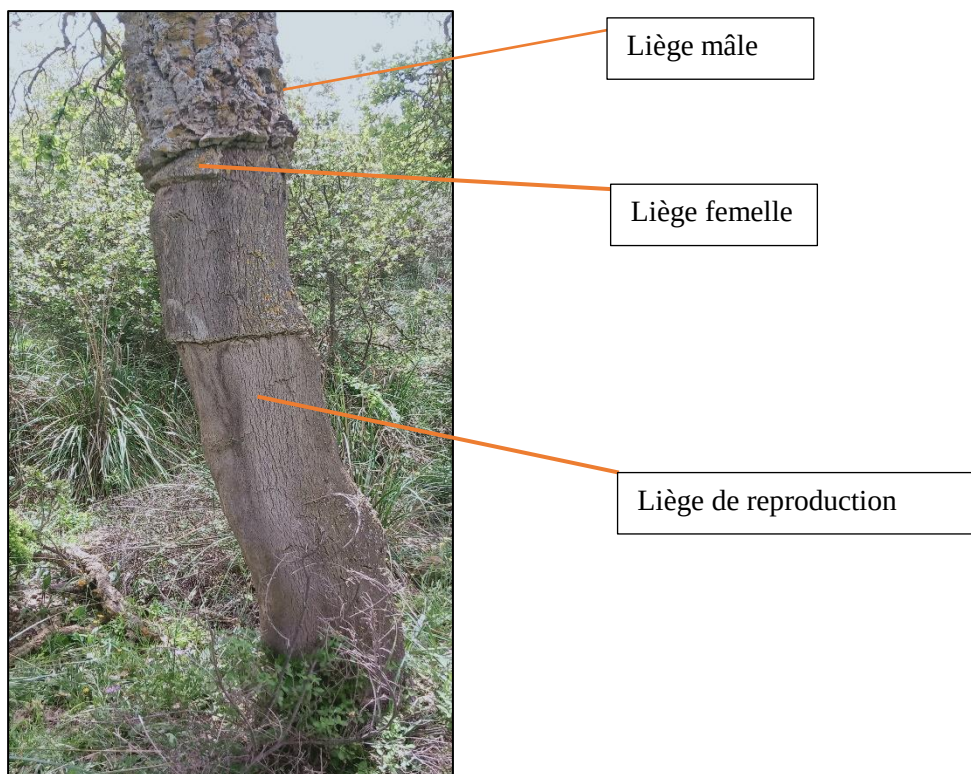


Figure 4. Différents types de liège produit par le même arbre (Atallah, 2026)

I.2.2-Croissance et classification dimensionnelle du liège

La croissance annuelle du liège est influencée par plusieurs paramètres liés notamment à la physiologie de l'arbre (Cambium et phellogène), les réserves hydriques du sol, les travaux sylvicoles (éclaircies, taille de formation ...), les facteurs climatiques (pluie et température), mais surtout la transgression génétique intra spécifique et interspécifique (Lamey, 1893).

Le chêne-liège est un arbre à croissance lente, dont la longévité atteint généralement 250 à 350 ans, bien que la période productive pour le liège se limite à 150–200 ans (Natividade, 1956). La première récolte intervient après 9 ou 12 ans ou parfois 15 ans, avec un rendement variant de 30 à 200 kg par arbre, principalement en fonction de la surface écorcée (Saccardy, 1937). La productivité moyenne s'élève à 8–11 kg/m² de liège par cycle de production, renouvelé tous les 9 ans (Rosa et Pereira, 2004).

Pour un même peuplement, plusieurs épaisseurs du liège sont produites allant du liège très mince de 14-18 mm, au liège régulier de 27-32mm, à l'épais de 32- 40mm et au sur-épais >40mm (Pereira, 2007) (Fig.5).



Figure 5. Types de liège présents dans un peuplement productif (UNAC, 2013)

Cette variation dans la croissance du liège s'explique par l'hétérogénéité des cellules: les membranes cellulaires sont plus fines dans les cellules formées au printemps (1 à 1,25 μm), tandis qu'elles s'épaississent dans celles produites en été et en automne (2 à 2,5 μm) (Fortes, 2004).

Ce phénomène, directement lié à la variation de taille des cellules, influence les propriétés physico-mécaniques du liège. Les lièges à croissance rapide, caractérisés par des anneaux subéreux plus larges, présentent une densité moindre, une compressibilité plus élevée et une élasticité réduite par rapport aux lièges à anneaux fins (Caetano, 1994).

I.2.3-Structure microscopique

-Au niveau microscopique, le liège est constitué de couches de cellules alvéolaires mortes, dont les membranes présentent un certain degré d'imperméabilité. Ces cellules sont remplies d'un gaz similaire à l'air, qui occupe environ 90 % de leur volume (Silva et al., 2005).

-La communication entre les cellules est assurée par de fins canaux traversant la paroi cellulaire, appelés plasmodesmes. Le liège est constitué de cellules disposées de manière compacte et régulière, sans espaces libres, les parois cellulaires représentant environ 10 à 15 % du volume total (Pereira, 2007)(Fig.6).

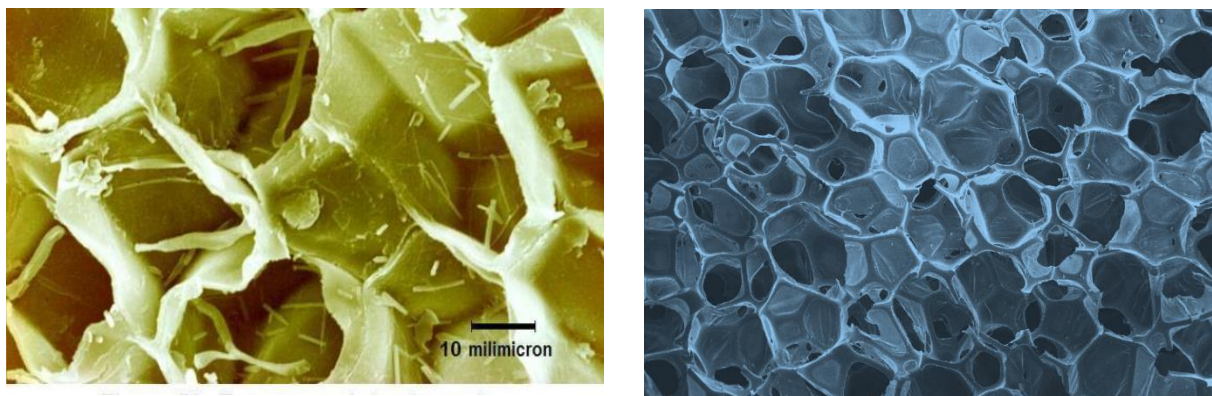


Figure 6. Structure cellulaire du liège (Carvalho,1996)

Comme l'illustre la figure 6, chaque cellule adopte la forme d'un prisme pentagonal ou hexagonal, avec une hauteur variant généralement de 40 à 50 millimicrons, tandis que les cellules les plus petites mesurent entre 10 et 20 millimicrons. En moyenne, un centimètre cube de liège contient environ 40 millions de cellules (Graca & Pereira, 1993).

I.2.4-Composition chimique

Les cellules du liège sont principalement constituées de subérine, qui représente entre 30 et 58 % de leur poids sec (Pereira, 1982). Cette substance complexe reste encore partiellement élucidée sur le plan chimique. La subérine possède des propriétés remarquables: elle est pratiquement insoluble et infusible dans l'eau, l'alcool, l'éther, le chloroforme ainsi que dans des acides concentrés tels que l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique (Pereira, 1988).

Outre la subérine, le liège contient également de la lignine, des polysaccharides, des tanins et des céroïdes. Le tableau ci-après présente une analyse typique de sa composition et illustre l'influence de ces différents constituants sur ses propriétés physico-chimiques et mécaniques.

Tableau 1. Principaux constituants chimiques du liège (Costa, 2019).

	Liege male %	Liege de reproduction %
Cendres	0,7	1,2
Extraits totaux	15,3	15,3
Dichlorométhane	7,3	5,4
Ethanol	5,2	4,8
Eau	2,8	2,8
Subérine	38,6	39,4
Lignine	21,7	21,8
Polysaccharides	18,2	19,9
Tanin	5	6
Céroïdes	4	5

Selon Pereira(1988), chaque composant a un rôle bien défini dans les paramètres physiques et mécaniques du liège :

- **Subérine** : constituant principal des cellules du liège, elle détermine fortement son élasticité ainsi que son imperméabilité aux liquides et aux gaz.

- ❑ **Lignine** : influence les propriétés thermiques, acoustiques et vibratoires du liège.
- ❑ **Tanins** : participent à la coloration naturelle du liège.
- ❑ **Polysaccharides** : interviennent dans la texture et la structure du liège.
- ❑ **Céroïdes** : composés hydrophobes, ils contribuent au degré d'imperméabilité du liège.

I.2.5-Réactions du chêne liège au feu

- Depuis 2020, les incendies de forêt affectent en moyenne près de 600 000 hectares chaque année à l'échelle du bassin méditerranéen. En 2021, la situation a atteint un niveau particulièrement préoccupant dans les pays méditerranéens de l'Union européenne, où les surfaces incendiées ont totalisé 434 591 hectares au 18 août, soit environ 2,5 fois la moyenne enregistrée entre 2008 et 2020 (183 852 hectares) (Breteau, 2021).

À titre illustratif, le sud de l'Espagne figure parmi les régions les plus affectées entre 2008 et 2020, avec une superficie forestière détruite par les incendies multipliée par 1,6 ; atteignant 64 269 hectares contre une moyenne de 40 008 hectares. L'Algérie a également connu une aggravation notable de la situation, les surfaces incendiées ayant augmenté dans les mêmes proportions, passant d'une moyenne de 25 000 hectares à 39 000 hectares brûlés (Lebricon, 2020)(Fig. 7).

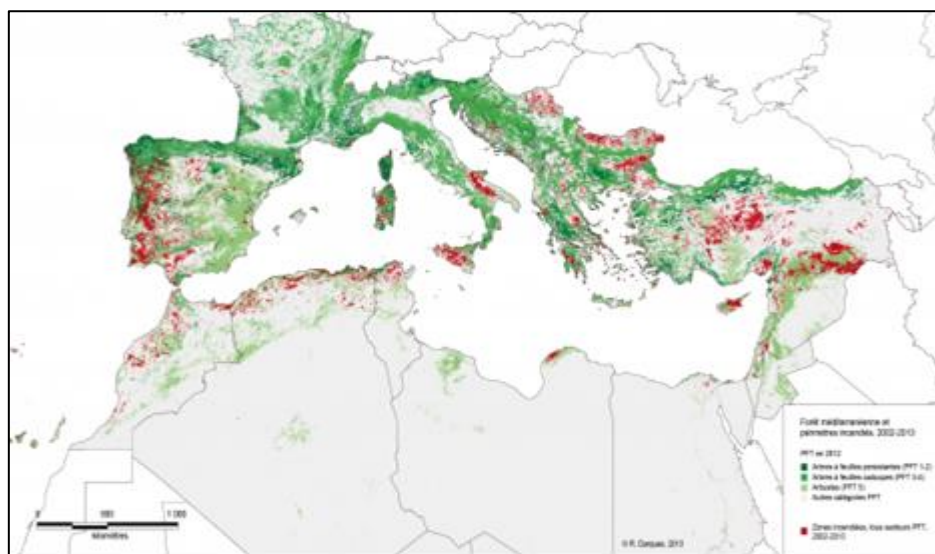


Figure 7. Forêt méditerranéenne et zones incendiées en 2020 (EFFIS , 2021)

En Algérie, malgré cette réalité préoccupante, l'histogramme des superficies de chêne-liège touchées par les incendies met en évidence une situation particulièrement alarmante et désastreuse(Fig.8).

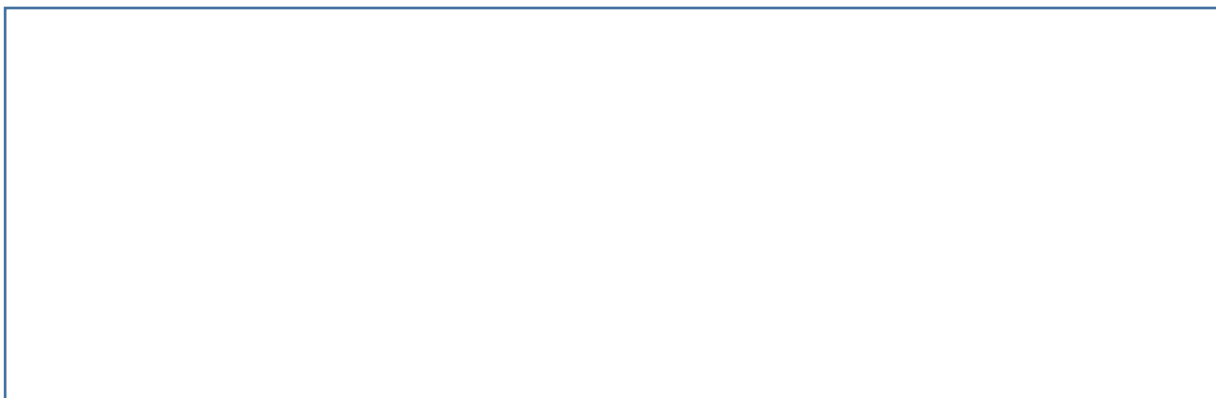


Figure 8. Superficies du chêne liège incendiées en Algérie (1985-2020) (Benhalima, 2024)

Malgré la mise en œuvre d'importants programmes forestiers dédiés au reboisement et à la réhabilitation des subéraies à l'échelle nationale, les forêts de chêne-liège ont subi une régression considérable entre 1985 et 2020. Au total, près de 217 598 hectares ont été perdus, soit une moyenne annuelle d'environ 6 500 ha/an, en tenant compte des six pics dépassant les 10 000 hectares enregistrés durant les années 1990, 1993, 1994, 2000, 2007 et 2012 (Dehane et al., 2013 ; Benhalima, 2024).

À elles seules, ces six années exceptionnelles totalisent 132 564 hectares détruits, représentant ainsi 60,92 % de la superficie totale ravagée par les incendies. L'année 1994 demeure particulièrement marquante dans les archives forestières nationales, avec une perte estimée à 63 328 hectares en seulement quelques jours. Par ailleurs, l'évolution de la courbe de tendance semble étroitement liée aux événements sécuritaires ayant profondément affecté le pays durant la période 1990-2001 (Dehane et al., 2013).

-Face aux incendies, la morphologie du chêne-liège constitue une barrière naturelle limitant la propagation des flammes vers la cime. Selon Pausas et al. (2009), l'âge de l'arbre est déterminant : les jeunes individus, dont l'écorce est encore mince, sont plus vulnérables au feu, car elle protège insuffisamment les bourgeons dormants. En revanche, les arbres ayant un diamètre du tronc supérieur à 12 cm survivent généralement et peuvent régénérer des bourgeons épïcormiques. Par ailleurs, Dubois (1990) indique qu'un taux de survie de 50 % est observé chez les arbres atteignant 7 cm de diamètre à la base (Fig.9).

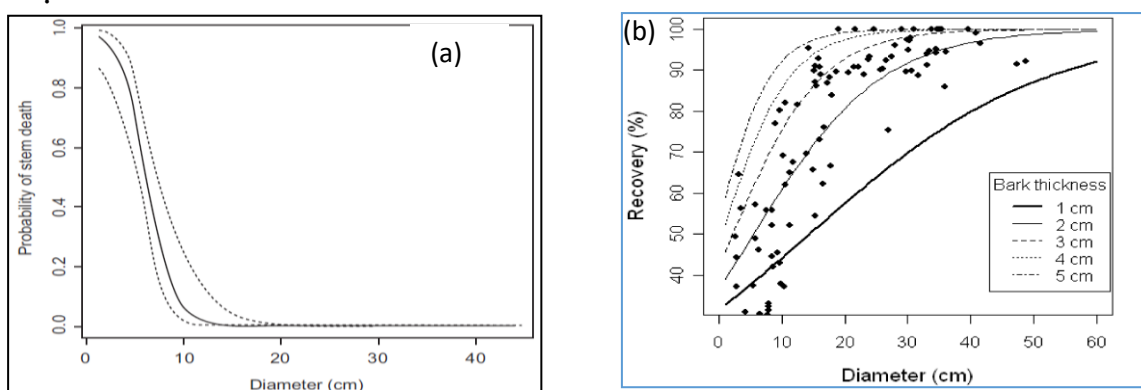


Figure 9. (a) Probabilité de mortalité de la tige après un incendie et (b) taux de de recouvrement de la cime, par rapport au diamètre de la tige et à l'épaisseur de l'écorce (Pausas 1997)

-Selon Bertrand (2007), les chênes lièges affectés par le feu présentent une moindre élancement que les arbres non perturbés, jusqu'à atteindre environ 150 cm de circonférence et 11 m de hauteur. Ainsi, les individus survivants sont généralement de grand diamètre et dépassent 12 m. Le feu endommage en effet les branches, notamment aux extrémités, pouvant entraîner leur rupture et réduire la taille de l'arbre ainsi que celle du houppier (Dubois, 1990) (Fig.10).



Figure 10. Rôle de la morphologie (diamètre et hauteur) dans la protection de l'arbre contre le feu (a) jeune sujet entièrement brûlé de la base à la cime ; (b) arbre adulte de grande taille, superficiellement affecté par le feu (Saoudi, 2016)

- Une fréquence accrue des incendies altère durablement les paramètres chimiques et biologiques, notamment les cycles de l'azote et du carbone. Dans ce contexte, Ubeda et al. (2009) montrent qu'à des températures du sol supérieures à 300 °C, le carbone augmente dans les cendres issues de la litière, ce qui pourrait traduire la formation de carbone noir. En revanche, à 450 °C, la combustion devient complète, entraînant une forte diminution du carbone total dans les cendres.

- Face aux incendies, le liège agit comme une barrière isolante contre la chaleur des flammes (il s'agit en premier lieu de l'épaisseur proprement dite du liège (épaisse ou mince)). Cette propriété résulte de sa structure anatomique particulière, caractérisée par une forte proportion d'air (environ 90 %), une faible humidité et une richesse en subérine (Benhalima. 2024). (Fig.11).

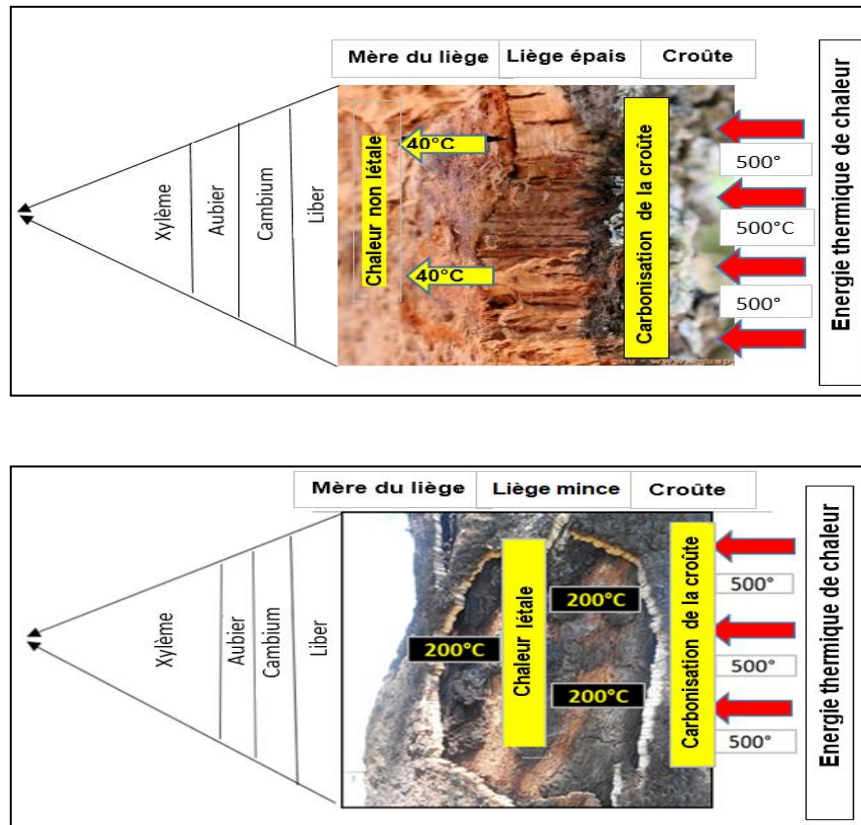


Figure 11. Mécanisme de carbonisation du liège en forêt (liège épais et mince) (Benhalima, 2024)

- La survie du chêne-liège après incendie atteint environ 70 %, grâce à l'effet protecteur de son liège et à sa forte capacité de régénération. Ce taux augmente lorsque l'épaisseur du liège dépasse 20 mm, seuil assurant une protection efficace contre le feu (Dejaegere, 2005).

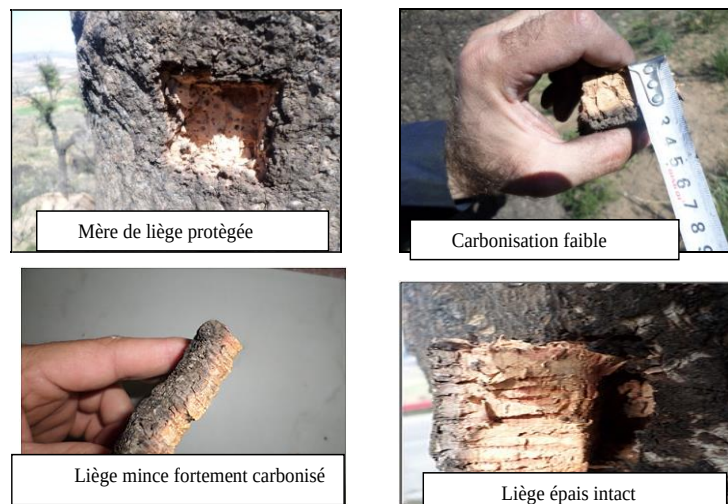


Figure 12. Carbonisation du liège selon l'épaisseur du liège (Saoudi, 2016)

- Selon Benhalima(2024), les phases d'inflammabilité du liège testé au laboratoire d'incendie correspondent en réalité à une diffusion progressive de la chaleur libérée par la croûte (Fig.13).

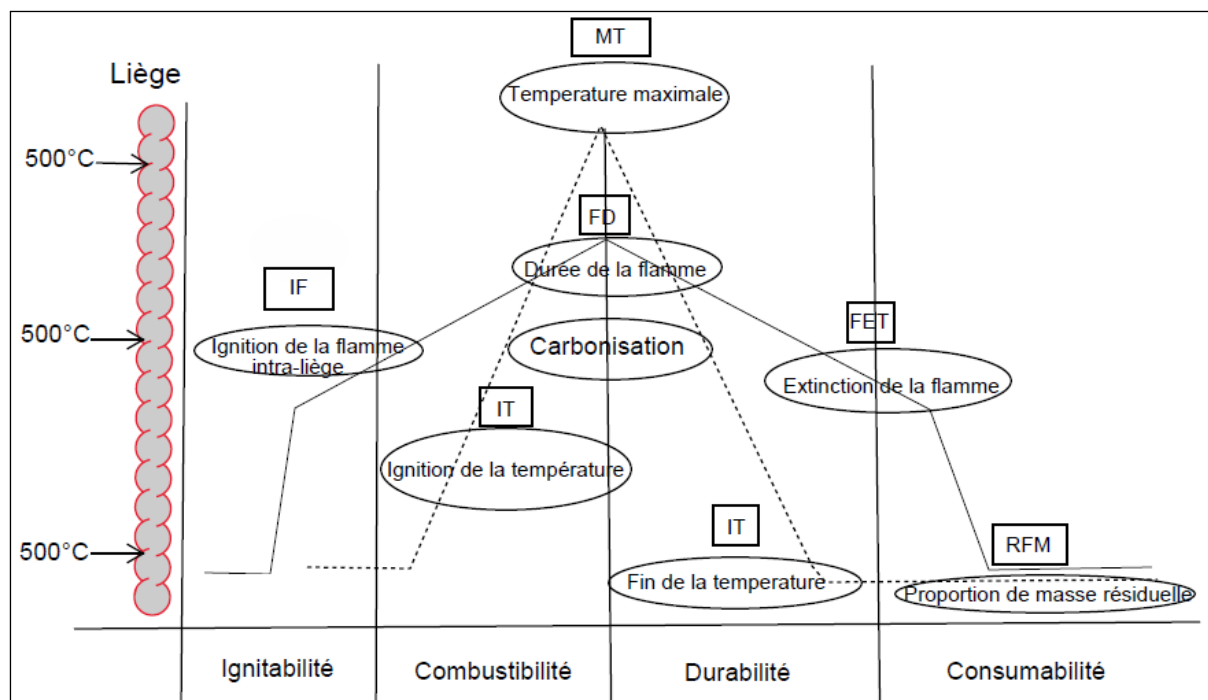


Figure 13. Phases d'inflammabilité du liège de reproduction par EPI-radiateur (Testé au laboratoire) Benhalima(2024)

-Selon la figure 13, une fois la consommation de la croûte achevée, une nouvelle ignition se produit dans le liège, mais de manière lente. Cela limite l'élévation de la température et sa propagation dans le tissu subéreux, avec un pic thermique faible. La faible hauteur et la courte durée des flammes témoignent de la grande résistance du liège à l'inflammabilité. En effet, il carbonise lentement et se consume difficilement.

-Face au feu, la qualité du liège chute fortement en raison de sa carbonisation, entraînant un impact économique négatif sur les peuplements productifs. Les planches brûlées perdent leur valeur commerciale et la productivité peut chuter de 50 %. Pour les arbres morts sur pied dans les zones fortement brûlées, l'exploitation de liège de bonne qualité est estimée à 40 ans (Pereira, 2007).

I.2.6-Principales propriétés et vertus du liège

- Sous compression mécanique, les cellules du liège se plient et se replient, limitant ainsi son expansion latérale, avant de retrouver leur forme initiale. Bien que le liège soit anisotrope, son comportement en compression reste globalement similaire selon les directions, présentant toutefois une résistance plus élevée dans la direction radiale que dans les directions axiale et tangentielle. Les valeurs du module de Young du liège, rapportées dans la littérature, varient entre 10 et 20 (Rosa et al., 1990 ; Rosa et Pereira, 1994 ; Pereira et al., 1992 ; Anjos et al., 2008) (Fig. 14).

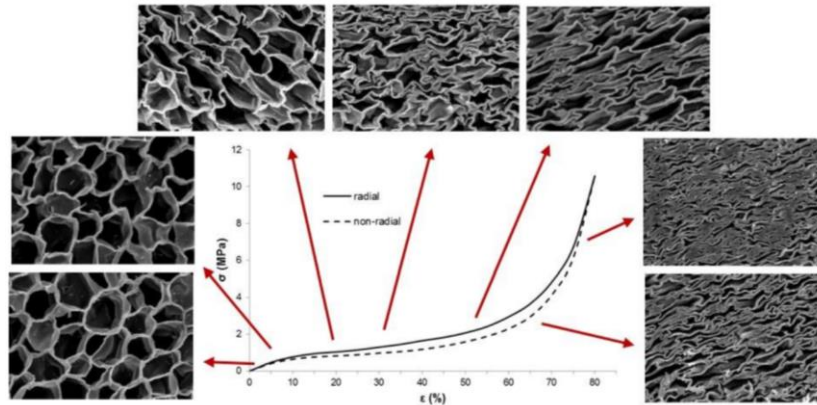


Figure 14. Courbes contrainte-déformation pour la compression du liège avec micrographies électroniques à balayage présentées en section tangentielle, à différentes déformations de compression axiale (Pereira, 2015)

-La capacité d'amortissement du liège est due à la déformation et à la flexion de ses parois cellulaires, une propriété essentielle pour des applications telles que les bouchons, l'industrie automobile ou les semelles de chaussures (Anjos et al., 2008).

- La forte proportion d'air dans ses cellules permet au liège de se comprimer jusqu'à près de la moitié de son volume sans perte de flexibilité, puis de retrouver sa forme et son volume initiaux une fois la pression relâchée. Lorsqu'il est soumis à une pression, le liège se comporte comme un matériau compressible, élastique et résilient. Il est unique parmi les solides en ce sens que la compression d'un côté n'entraîne pas d'expansion compensatoire de l'autre (Gosuber, 2020).

-Le liège est également un matériau qui dissipe l'énergie de déformation. Sa densité moyenne est d'environ 200 kg/m^3 et sa conductivité thermique est faible comprise entre $0,035\text{--}0,040 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Silva et al., 2005)..

- Le liège possède également une excellente résistance au feu. Une flamme d'acétylène à 700°C a pu le brûler pendant trois heures sans dégager de gaz nocifs, ce qui lui confère une classification B2 en termes d'ignifugation. En cas d'incendie, le liège peut ralentir efficacement la propagation des flammes, augmentant ainsi le temps disponible pour l'évacuation et la sécurité (Pinard et Huffman, 1997).

-Sa faible densité et sa porosité élevée permettent au liège d'absorber la majorité des ondes sonores, qui sont transformées en énergie thermique. Il constitue ainsi un excellent isolant thermique et acoustique, capable d'absorber plus de 60 % des ondes sonores frappant sa surface, ce qui le rend particulièrement efficace comme matériau de correction acoustique (Pereira, 2007).

- Grâce à sa structure cellulaire, le liège présente une haute résistance au glissement, avec un coefficient de frottement élevé compris entre 0,35 et 0,76 pour une interface liège-verre. Cette propriété est en grande partie due à l'effet de ventouse généré par la surface irrégulière des cellules (Vaz et Fortes, 1998).

- Le liège est hygroscopique, s'hydratant en fonction des conditions environnementales. De plus, diverses études ont montré son potentiel à adsorber des contaminants émergents, ce qui en fait un matériau biosorbant efficace (Silva et al., 2005).
- En outre, le liège est 100 % naturel, recyclable et renouvelable, étant d'origine végétale. Il peut être prélevé sans nuire à l'arbre, et se régénère avec le temps, ce qui permet de concilier une gestion durable des suberaies avec les activités humaines (APCOR, 2015).
- Les forêts de chênes-lièges possèdent également une capacité remarquable de séquestration du carbone, absorbant en moyenne 14,7 tonnes de CO₂ par hectare. À l'échelle mondiale, les suberaies du bassin occidental de la Méditerranée retiennent environ 30,66 millions de tonnes de CO₂. Le carbone fixé par les chênes-lièges est en grande partie stocké dans le liège, où il reste emprisonné pendant toute la durée de vie du produit, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique tout en valorisant un matériau renouvelable (APCOR, 2016).
- Le chêne-liège constitue également une barrière naturelle contre la désertification. Selon une étude du WWF (Fonds mondial pour la nature) et du CEABN/ISA (Centre d'écologie appliquée de l'Institut supérieur d'agronomie du Portugal), le chêne-liège est le seul élément naturel capable de freiner ce phénomène. L'étude indique qu'en absence d'une gestion forestière adéquate des suberaies, la désertification pourrait progresser à un rythme supérieur à 1 000 mètres par an (Baeta, 2020).
- En pharmacologie, la poudre de liège est largement utilisée pour traiter les intoxications aux métaux lourds. Plusieurs études ont montré son potentiel à adsorber divers contaminants émergents, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (Olivella et al., 2011), ainsi que les métaux lourds (Pintor et al., 2012), et certains pesticides (Jové et al., 2017).
- Le liège est hypoallergénique, anallergique, antimicrobien, antistatique, très hygiénique, orthopédique et hautement recyclable. Il est non toxique, que ce soit au contact de la peau ou en cas d'ingestion accidentelle (Gonçalves et al., 2016).
- Le liège est utilisé en technologies spatiales comme bouclier thermique pour protéger les véhicules spatiaux lors de leur entrée atmosphérique. Il empêche la chaleur d'atteindre la structure de la navette et prévient ainsi sa destruction (Roger et al., 2001).
- Le liège peut améliorer la qualité du sommeil grâce à sa texture douce et moelleuse, qui procure confort et relaxation. Il agit également comme un régulateur thermique naturel, maintenant une température corporelle agréable (Liege 24, 2024).

I.2.7-Economie du liège

La production mondiale de liège dépasse 340 000 tonnes, concentrée principalement dans sept pays : Portugal, Espagne, Maroc, Tunisie, Algérie, Italie et France (Cork Quality Council, 2019). Le Portugal et l'Espagne représentent à eux seuls 88 % de cette production. Au Portugal, les exportations annuelles de liège atteignent environ 1,1 milliard de dollars américains. La majorité de cette production alimente les secteurs du bâtiment, de l'automobile, de la mode, de l'industrie aérospatiale, etc (Sampaio, 1985 ; APCOR, 2016).

-En Algérie, entre 2001 et 2011, les forêts de chênes-lièges ont produit en moyenne 7 000 tonnes de liège par an, contre 15 000 tonnes annuellement entre 1964 et 1975 (Dehane, 2012). Actuellement, sur la période 2020-2024, la production nationale annuelle ne dépasse pas 6 000 tonnes, avec l'espoir d'atteindre à nouveau 15 000 tonnes (Taferka, 2008).

La figure 15 illustre les fluctuations périodiques de la production de liège en Algérie.



Figure 15. Fluctuation de la production annuelle du liège entre 1964 et 2020 (DGF, 2021)

Chapitre II

Etude du milieu

II.1-Le milieu physique

II.1.1-Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude est localisée au sein du canton de Safalou, appartenant à la forêt domaniale de Tagdempt. Cette dernière s'étend sur le territoire de la commune de Tagdempt, relevant de la daïra de Mechraa Safa. Située à environ 9 km à l'ouest de la ville de Tiaret, elle est desservie par la route de wilaya n° 11 (Chedad, 2016).

La forêt domaniale de Tagdempt s'étend sur une superficie totale de 4 329 hectares, avec une altitude moyenne comprise entre 950 et 1100 m, et se situe entre les coordonnées géographiques suivantes :

- Latitude : 35°23'14"N
- Longitude : 1°10'42"E

Cette forêt est subdivisée en huit cantons. Leurs dénominations et leurs superficies respectives s'identifient ainsi (CFWT, 1995):

- Mesguida : 1003 ha
- Mimounia: 687 ha
- Ain Keda : 643 ha
- Sefalou : 532 ha
- Kliab: 468 ha
- Pins: 421 ha
- Hardjah: 386 ha
- Merdjem Nokas: 189 ha

Le canton Safalou est limité géographiquement au nord par le canton Ain Keda, à l'ouest par Djebel Azzouania, à l'est par le canton Merdjem Nokas et au sud par le canton Mimounia (Fig. 16).

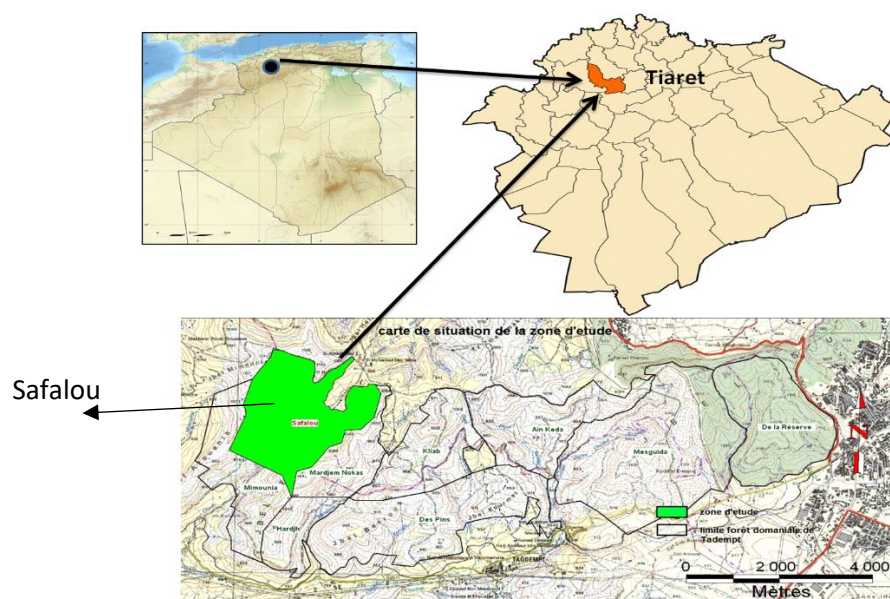


Figure 16. Situation géographique de la zone d'étude « Safalou » (Chedad, 2016)

II.1.2- Géologie et Pédologie

Les formations géologiques de la forêt datent du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur (Collignon, 1986). D'ailleurs, une grande partie des peuplements de la forêt de Tagdempt poussent sur une formation pédologique des grès et des sols présentant différentes textures y compris ceux du canton de Safalou. Selon les données fournies par la conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, les sols de la dite forêt se représentent ainsi (CFWT, 2013) :

- Des sols silico-calcaires moyennement profond sur environ 130 ha;
- Des sols argileux profonds sur 80 ha;
- Des sols siliceux sur tout le versant avec des rochers de grès sur les mamelons;
- Des sols frais profonds et de bonne qualité dans les bas-fonds.

II.1.3- Topographie et hydrographie

La dénivelée dans la zone d'étude n'est pas assez abrupt. Il s'agit d'un relief montagneux se présentant à travers deux versants : Nord et Sud. Le versant nord est d'un relief accidenté et une pente moyenne de 12° . Le versant sud, non accidenté, est d'une pente faible ne dépassant guère 6° , avec une altitude moyenne de 1150m. Les principaux oueds sont : Oued Mesguida, Oued Safalou (CFWT, 2013) (Fig. 17).

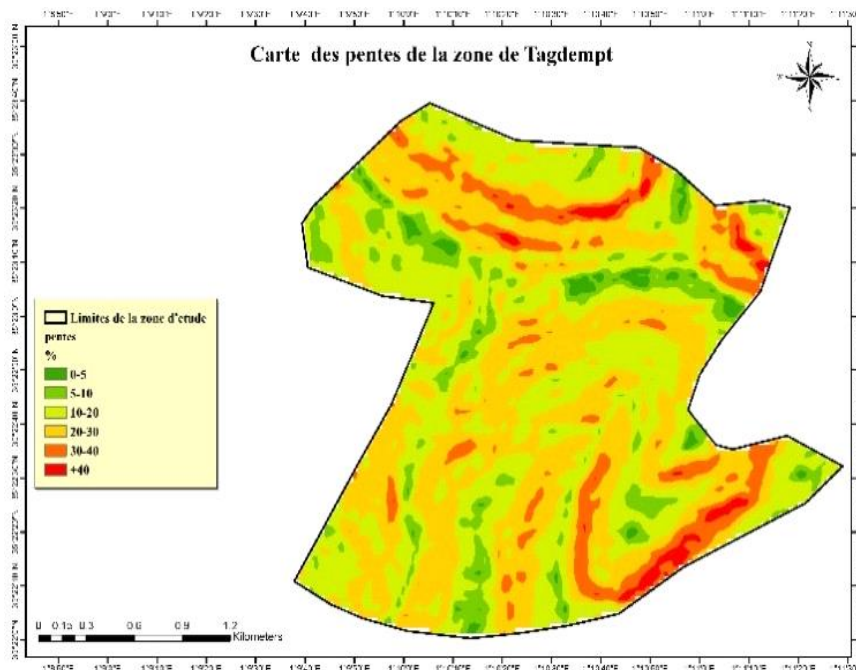


Figure17. Cartes des pentes dans la forêt de Tagdempt (Benhalima, 2024)

II.2-Le climat

Le climat constitue un facteur déterminant dans la répartition spatiale de la végétation et dans son adaptation au froid et à la sécheresse. Il représente le paramètre de base pour toute étude portant sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers (Thinthoin, 1948). Les données

climatiques, incluant les précipitations et les températures, proviennent de la station météorologique de Tiaret et couvrent la période 1992-2021 (Tab.2).

Tableau 2. Caractéristiques de la station de référence et périodes d'observation

Longitude	Latitude	Altitude (m)	Situation	Paramètres climatiques	Période d'observation
1°10'42"E	35°23'14"N	1100m	Tiaret	Pluviométrie Température	1992 - 2021

Source: CFWT (2019)

Les données climatiques ont été aussi comparées à une période de référence ancienne de 25 ans (1913-1938) (Seltzer, 1946).

II.2.1-Données climatiques

II.2.1.1. Distribution des précipitations

1.Répartition annuelle des précipitations

Au cours de la période 1992-2021, la subéraie de Tagdempt a enregistré des variations pluviométriques notables. Les valeurs extrêmes ont été observées en 2009, avec un minimum de 542,54 mm, et en 2013, avec un maximum de 662,19 mm, soit une variation de 33,8 % entre ces deux années.

(Fig.18).

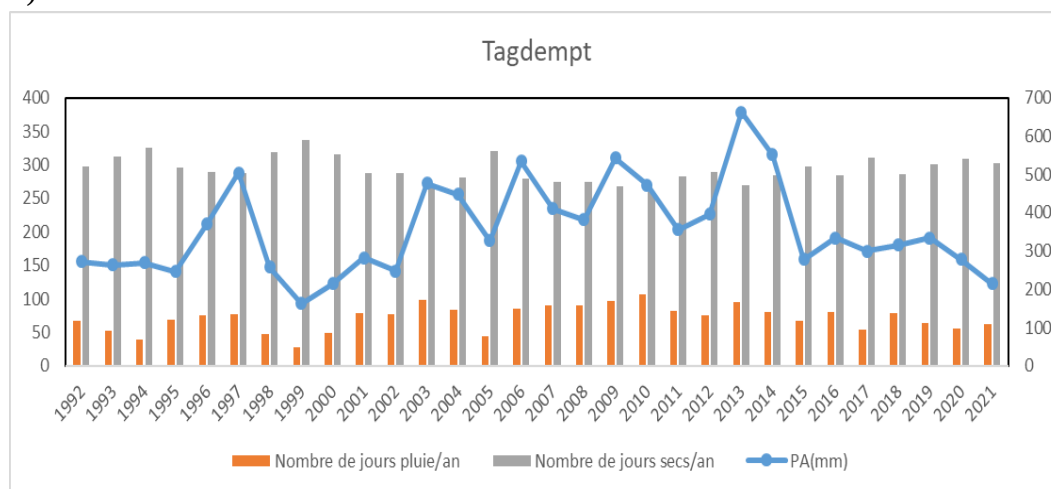


Figure18.Variations des précipitations annuelles dans la forêt de Tagdempt (1992-2021)

La figure 18 montre que le nombre moyen de jours de pluie est d'environ 72 jours par an. En revanche, les jours sans précipitations sont largement prédominants, avec une moyenne de 266 jours par an. Cette répartition met en évidence le caractère relativement aride du climat de la forêt et souligne l'importance du déficit hydrique qui l'affecte.

2-Répartition mensuelle des précipitations

La répartition mensuelle des précipitations pour les deux périodes de référence (1913-1938) et 1992-2021) est présentée dans la figure 19.

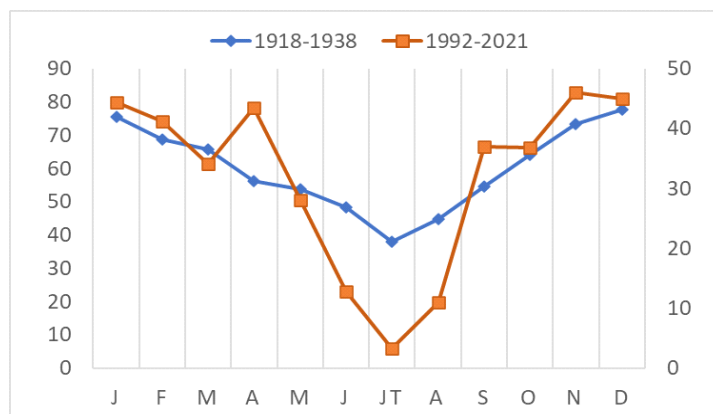


Figure19. Variation mensuelle des précipitations (ancienne et nouvelle période)

Il apparaît que durant l'ancienne période, le régime pluvial ne connaissait pas de saison sèche estivale marquée, avec une moyenne de 43,67 mm pour les mois de juin, juillet et août. Cela indique que la zone bénéficiait de pluies estivales fréquentes, situation beaucoup moins prononcée aujourd'hui, où la moyenne estivale chute à seulement 9mm.

II.2.1.3-Régime saisonnier des précipitations

La subéraie de Tagdempt présente un régime saisonnier des précipitations de type AHPE. Sur une période de trente ans, le cumul moyen des précipitations par saison est le suivant : 3 878 mm en automne, 3 475 mm en hiver, 2 533 mm au printemps, et 1 477 mm en été. Ce dernier chiffre souligne l'importance des averses estivales dans la zone (Fig . 20).

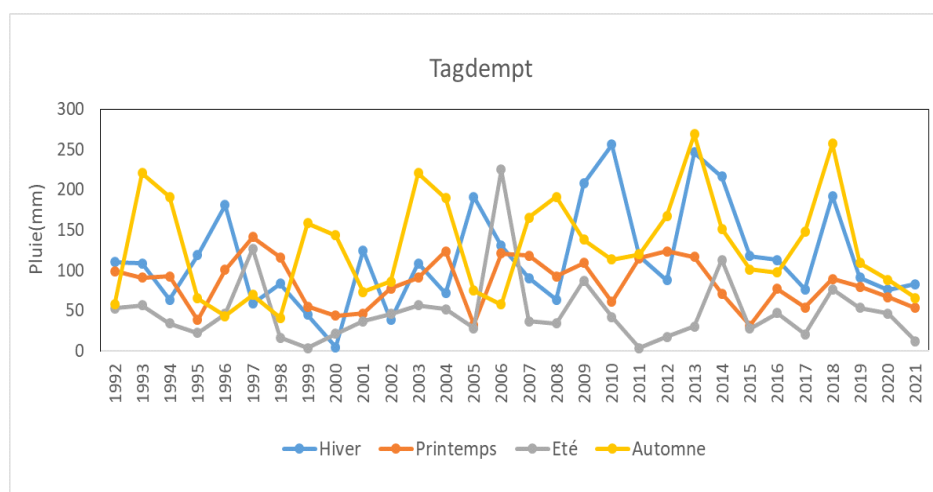


Figure 20. Répartition saisonnière des précipitations dans la subéraie de Tagdempt (1991-2021)

II.2.1.4-Température

Les températures moyennes annuelles ont connu une augmentation notable depuis 1992. En se basant sur une normale climatique calculée sur une période de 30 ans (1992-2021), la température moyenne annuelle présente un écart à la normale de +0,86 °C en 2021, tandis qu'un écart négatif de -1,84 °C a été enregistré en 1992. Par ailleurs, la période 2015-2017 se

caractérise par une légère augmentation de la température, avec une hausse d'environ 0,62 °C(Fig. 21).

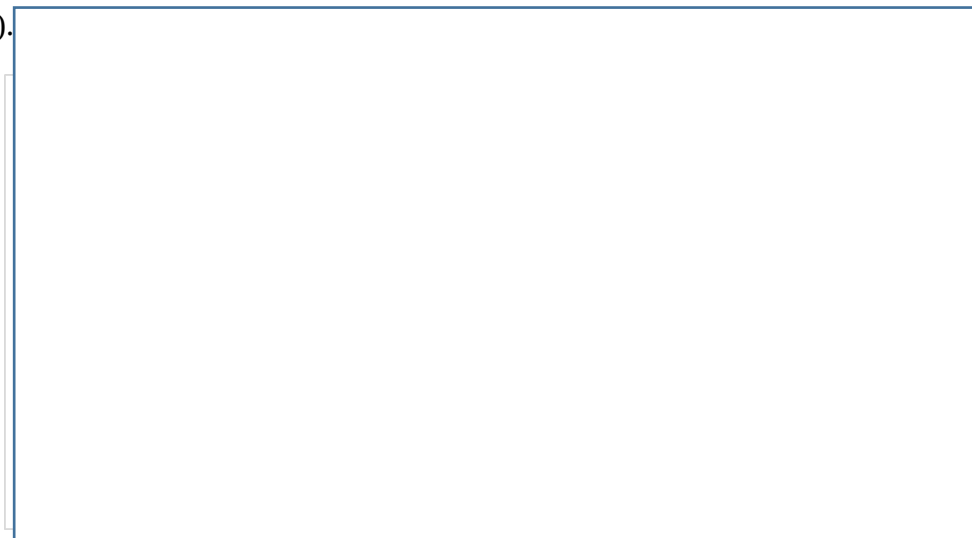


Figure 21. Fluctuation des températures moyennes annuelles à Tagdemt (1991-2021)

II.2.1.5-Autres paramètres climatiques

II.2.1.5.1-Humidité relative

L'humidité joue un rôle essentiel dans le développement du chêne-liège. Lorsqu'elle est élevée, elle permet souvent de compenser le déficit pluviométrique observé durant la saison sèche, notamment dans les régions appartenant à l'étage semi-aride. Dans la forêt de Tagdemt, l'humidité relative moyenne annuelle atteint son niveau maximal entre décembre et janvier, avec des valeurs dépassant 70 %. En revanche, durant les mois de juin, juillet, août et septembre, l'humidité relative diminue et reste inférieure à 50 % (CWFT, 2013).

II.2.1.5.2-Le vent

Le vent constitue un facteur climatique important, caractérisé par sa direction, sa fréquence et son intensité. Il influence notamment les variations de température et d'humidité de l'air. La période estivale est marquée par la présence du sirocco, un vent chaud et sec qui souffle en moyenne entre 24 et 29 jours par an, principalement durant les mois de mai, juin et juillet. La vitesse moyenne du vent varie au cours de l'année : elle reste relativement faible pendant l'été, puis augmente à partir du mois d'octobre pour atteindre ses valeurs maximales en décembre. Les vitesses enregistrées oscillent généralement entre 10 et 17 km/h (CWFT, 2015).

II.2.2- Synthèse climatique

II.2.2.1-Amplitude thermique moyenne ou Indice de continentalité

L'amplitude thermique extrême moyenne (M-m) est un facteur climatique permettant de définir l'indice de continentalité d'une région donnée et par conséquent définir si elle est sous influence maritime ou continentale.

C'est en fonction des limites de (M-m) que Debrach (1953) s'est basé pour proposer une classification thermique des climats :

Climat insulaire	$M-m < 15^{\circ}\text{C}$
Climat littoral	$15^{\circ}\text{C} < M-m < 25^{\circ}\text{C}$
Climat semi – continental	$25^{\circ}\text{C} < M-m < 35^{\circ}\text{C}$
Climat continental	$M-m > 35^{\circ}\text{C}$

Tableau 3. Indice de continentalité de la forêt de Tagdempt

Forêt	Périodes	m (°C)	M (°C)	(M – m) (°C)	Type de climat
Tagdempt	1913 – 1938	1,7	33,0	31,3	Semi continental
	1992-2021	1,19	34,90	33,71	

Selon la classification thermique de Debrach (1953), fondée sur la valeur de l'écart thermique, la forêt de Tagdempt se caractérise par un climat méditerranéen à tendance semi-continentale, ou de type montagnard (d'altitude).

II.2.2.2--Indice de sécheresse estivale ou indice xérothermique.

Cet indice est calculé à partir du rapport entre les précipitations estivales moyennes PE (en mm) et la température maximale moyenne du mois le plus chaud M (en °C), selon la formule proposée par Emberger (1942) :

$$I.e. = P.E / M$$

L'auteur affirme que cet indice ne dépasse pas « 7 » pour le climat méditerranéen.

Daget (1977), limite cet indice à « 5 » pour mieux distinguer le climat méditerranéen des climats océaniques

Le calcul de cet indice pour la zone d'étude, réalisé sur les deux périodes de référence, est présenté dans le tableau suivant :.

Tableau 4. Indice de sècheresse estivale de la forêt de Tagdempt

Forêt	Périodes	Pluviosité estivale P.E (mm)	Valeur de M (°C)	Indice de sécheresse « I.e. »
Tagdempt	Pa	131	33,0	3,96
	Pn	27,06	34,9	0,77

L'analyse de ce tableau montre que l'indice de sécheresse est nettement inférieur à 5 pour les deux périodes étudiées. Cela confirme que cette forêt relève d'un climat méditerranéen, selon la classification de Daget (1977), tout en indiquant que la sécheresse s'est nettement accentuée au cours de la période récente.

II.2.2.3- Etage de végétation ou zonation altitudinale

En s'appuyant sur les travaux de Quézel (1976-2000), Rivas Martínez (1981) et M'Hirit (1993) concernant la répartition de la végétation méditerranéenne selon les gradients thermique ($m^{\circ}C$) et altitudinal (m), nous avons pu déterminer l'étages de végétation auquel appartient la zone d'étude (Tab,5).

Et elle correspond aux étages de végétations suivants :

- Pour $T > 16^{\circ}C$ et $m > 3^{\circ}C$: Etage Thermo-méditerranéen.
- Pour $12^{\circ}C < T < 16^{\circ}C$ et $0^{\circ}C < m < 3^{\circ}C$: Etage Mésoméditerranéen.
- Pour $8^{\circ}C < T < 12^{\circ}C$ et $-3^{\circ}C < m < 0^{\circ}C$: Etage Supra-méditerranéen.

Tableau 5. Etages de végétation du chêne-liège de la zone d'étude

Périodes	Valeur du « m » ($^{\circ}C$)	Valeur du « T » ($^{\circ}C$)	Altitude moyenne (m)	Etage de végétation
Pa	1,7	14,81	1150	Meso-méditerranéen
Pn	1,19	15,25		

D'après le tableau 5, il apparaît que le chêne-liège de la forêt de Tagdempt s'inscrit dans l'étage de végétation mésoméditerranéen, caractérisé par un gradient thermique minimal compris entre 0 et $3^{\circ}C$ et une température moyenne annuelle T comprise entre 12 et $16^{\circ}C$.

II.2.2.4- Indice de De Martonne

De Martonne (1926) a défini un indice d'aridité permettant d'évaluer l'intensité de la sécheresse, exprimé par la relation suivante : $I = P/T + 10$

- P : Pluviométrie moyenne annuelle (mm)
- T : Température moyenne annuelle ($^{\circ}C$)

Cet indice est particulièrement utile pour analyser les interactions entre le climat et la végétation forestière, et pour situer la station d'étude dans un type climatique précis. Sa valeur augmente proportionnellement avec l'humidité du climat (Tab.6).

Tableau 6. Indice de De Martonne pour les deux périodes

Forêt	Période	I (mm/°C)	Type de Climat
Tagdempt	Pa	29,02	Zone tempérée à drainage extérieur
	Pn	15,10	Semi-aride sec, à écoulement temporaire

Pour l'ancienne période, l'indice de De Martonne calculé pour notre zone d'étude était de 29,02, tandis qu'il tombe à 15,10 pour la période récente. La comparaison des valeurs entre ces deux périodes montre une baisse progressive de l'indice, traduisant une augmentation de l'aridité. Selon cet indice, la zone d'étude se situe désormais, pour la nouvelle période, dans un climat semi-aride sec à écoulement temporaire. Ce régime climatique favorise le développement de formations arbustives limitées ou relictuelles, en raison du stress hydrique marqué, avec une prédominance de végétation herbacée annuelle et/ou vivace (Fig. 22).

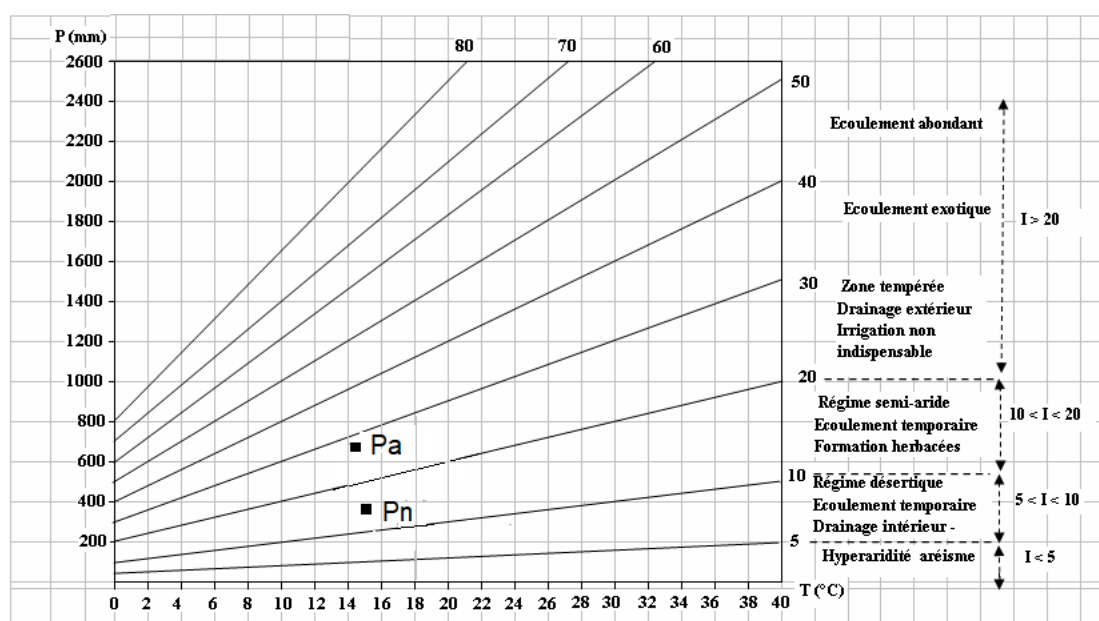


Figure 22. Indice d'aridité de De Martonne pour les deux périodes de référence

II.2.2.5-Approche climatique de Bagnouls & Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls & Gaussen(1952) permet de représenter simultanément les précipitations et les températures afin de déterminer la durée de la saison sèche sur un seul graphique. Pour ce faire, les auteurs ont superposé les courbes de précipitations (courbes ombriques) et de températures (courbes thermiques), donnant naissance aux diagrammes ombrothermiques. L'échelle des précipitations est double de celle des températures, distinguant les périodes humides et sèches.

Pour la période « 1918-1938 », la figure 23 montre que la saison sèche dure seulement 3 mois (juin, juillet et août). En revanche, l'analyse du diagramme pour la période « 1992-2021 » révèle que la saison sèche s'étend désormais sur plus de 5 mois voire 6 mois de Mai à Octobre .

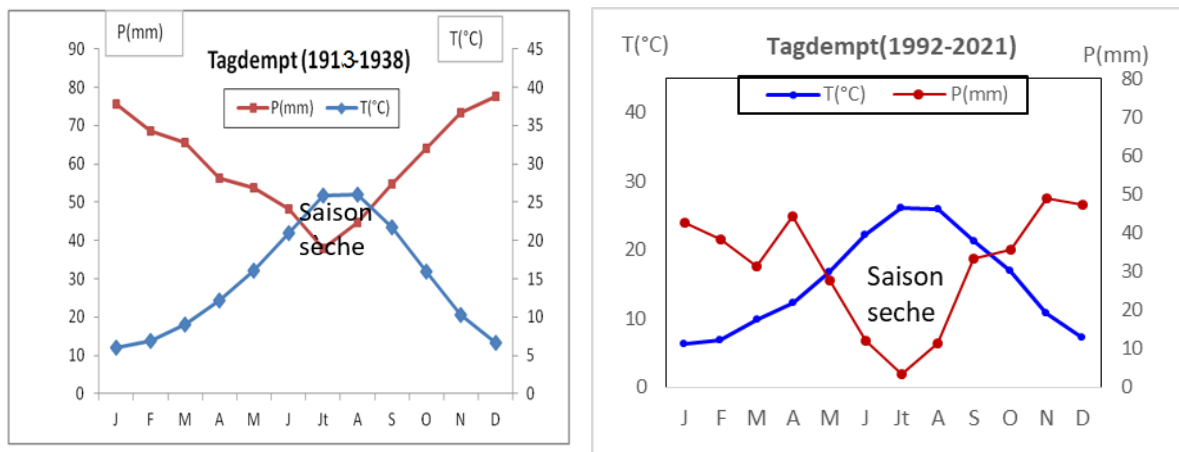


Figure 23. Diagrammes Ombrothermiques de la forêt de Tagdempt

II.2.2.6-Quotient pluviothermique et climagramme d'Emberger

La classification la plus largement adoptée pour la caractérisation du climat méditerranéen d'une localité est celle proposée par Louis Emberger en 1939. Elle s'appuie sur un diagramme bidimensionnel où le quotient pluviothermique est porté en ordonnée, tandis que la température moyenne du mois le plus froid de l'année est représentée en abscisse.

L'analyse et la représentation de plusieurs stations appartenant à la région biogéographique méditerranéenne ont permis de distinguer quatre grands étages climatiques : aride, semi-aride, sub-humide et humide. Le positionnement d'une station au sein de ce diagramme dépend de la valeur du quotient pluviothermique Q₂, déterminé selon la formule suivante :

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

P : moyenne des précipitations annuelles (mm)

Température maximale(M) : moyenne des maxima du mois le plus chaud (°K=°C+273,2)

Température minimale(m) : moyenne des minimas du mois le plus froid (°K=°C +273,2)

Tableau 7 : Valeurs du « Q₂ » et étages bioclimatiques

Périodes	Pluies (mm)	« M » (°C)	« m » (°C)	Q ₂	Etage bioclimatique	Sous-étage	Variante thermique
Pa	720,67	33	1,7	79,24	Sub-humide	Supérieur	Frais
Pn	383,49	34,9	1,19	39,06	Semi-aride	Supérieur	Frais

Le calcul de ce quotient (Tab.6) a permis de situer notre forêt au sein des étages climatiques correspondants (Fig.24).

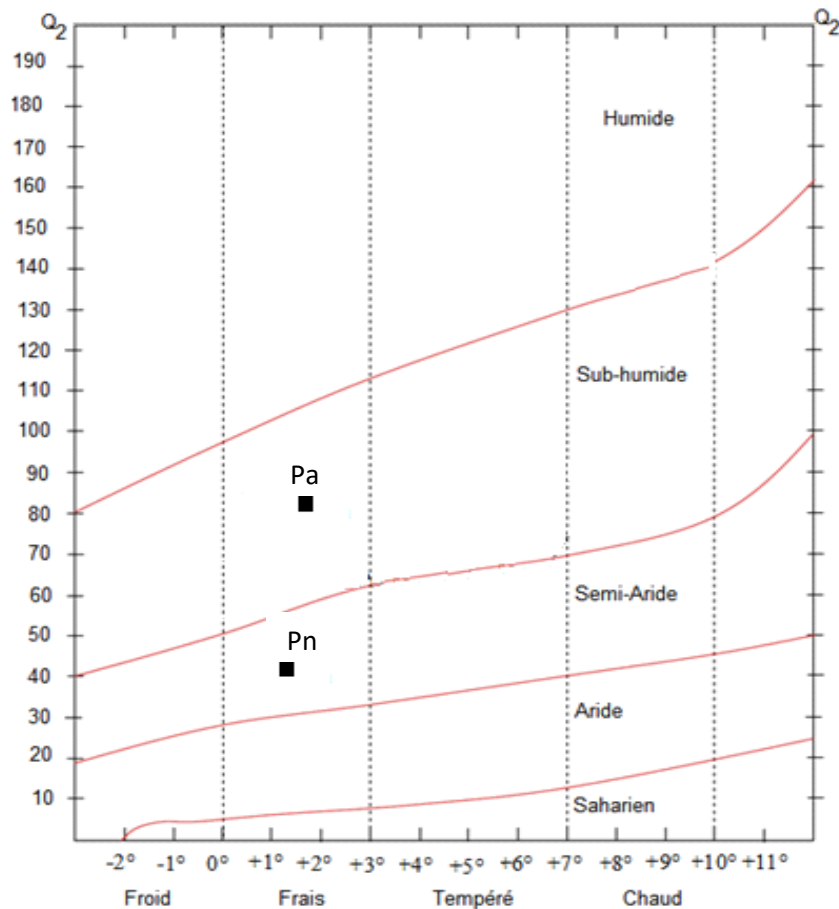


Figure 24. Quotient pluviothermique et climatogramme d'Emberger de la forêt de Tagdempt au cours de la période ancienne (Pa) et récente (Pn)

L'analyse de ce climatogramme montre que notre zone d'étude se situe entre deux types de bioclimat. Pendant la période ancienne, la forêt bénéficiait d'un climat sub-humide moyen, avec une pluviométrie annuelle supérieure à 720 mm. Aujourd'hui, le climat tend vers un sous-étage inférieur ou même semi-aride supérieur, avec des précipitations annuelles inférieures à 400 mm.

II.3-Description forestière

Selon les données fournies par la conservation des forêts, La wilaya de Tiaret comprend plusieurs massifs forestiers importants dont les principaux sont les suivants (CFWT.2015):

- Le massif des Sdamas Chergui
- Le massif des Sdamas Gharbi
- Le massif des forêts de Tagdempt
- Le massif de Nador

En dehors des formations forestières, l'espace steppique s'étend sur une superficie de 981 826 hectares, dont 219 890 hectares occupés par les nappes alfatières. Les milieux forestiers et steppiques constituent ainsi deux composantes majeures offrant d'importantes potentialités sur les plans économique, social et touristique (Fig. 25).

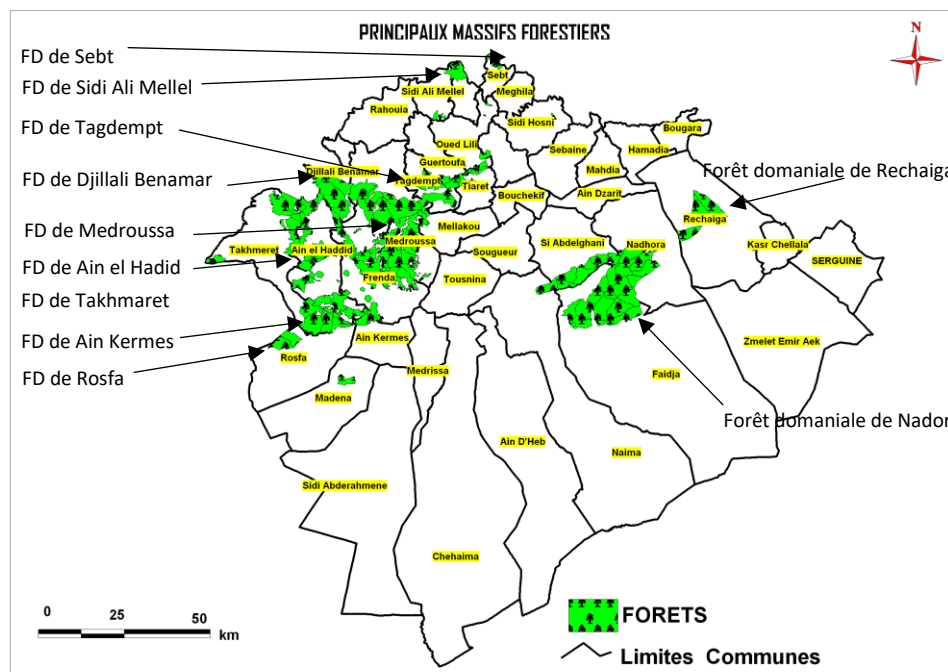


Figure 25 . Les principaux massifs forestiers de la wilaya de Tiaret(CFWT, 2015)

Par sa richesse et sa diversité floristique, la couverture végétale des massifs de la wilaya contribue de manière déterminante au maintien de l'équilibre écologique et exerce une influence considérable sur l'environnement (Tab.8).

Tableau 8.Les essences forestières recensées et leurs superficies correspondantes (CFWT, 2014)

Essences	Superficie (ha)
<i>Pinus halepensis</i> (pin d'Alep)	41487
<i>Quercus Rotundifolia</i> (chêne vert)	6592
<i>Quercus suber</i> (chêne liège)	400
<i>Tetraclinis articulata</i> (Thuya de berberie)	17659
<i>Cupressus sempervirents</i> (cyprés vert)	479
<i>Eucalyptus sp</i>	58
TOTAL	66342

D'autres espèces appartenant aux strates arbustives et subarbustives, réputées pour leurs vertus médicinales et aromatiques, contribuent également à la richesse paysagère et écologique de la région (CFWT, 2016). Parmi les principales espèces recensées figurent le chêne kermès *Quercus coccifera*, la filaire *Phillyrea media*, le genévrier oxycèdre *Juniperus oxycedrus*, l'arbousier *Arbutus unedo* ainsi que les cistes *Cistus ladanifer*. Le peuplier blanc *Populus alba* y est également observé, bien que de façon sporadique et isolée.

La couverture forestière comprend par ailleurs d'autres espèces caractéristiques, telles que *Calycotome spinosa*, *Artemisia herba-alba*, *Ampelodesma mauritanica* et *Chamaerops humilis*, renforçant davantage la diversité floristique de ces écosystèmes.

II. 4-Faune

La forêt de Tagdempt se distingue par une biodiversité animale importante, comprenant des mammifères, des reptiles, des oiseaux et des scorpions. Parmi les mammifères, on retrouve notamment *Canis aureus* et *Vulpes rueppelli*. Du côté des reptiles, sont signalés *Malpolon monspessulanus*, *Psammodromus algirus* et *Ocellatus*. Quant aux oiseaux présents, on peut citer *Passer domesticus*, *Carduelis carduelis*, *Carduelis chloris* et *Perdrix gambra* (*Alectoris barbara*) (CFWT, 2016).

II.5-Production subéricole

Dans le fascicule de gestion établi par le service forestier durant la période coloniale, les opérations de récolte du liège étaient déjà pratiquées selon une rotation de trois ans. Des données biométriques relatives au liège ont été rapportées dans le compte rendu rédigé le 15 février 1945 par le Chef de Cantonnement des Eaux et Forêts, à l'occasion de l'inventaire des peuplements de chêne-liège du canton de Safalou.

Les potentialités de production y étaient globalement considérées comme favorables, avec des surfaces productrices de liège variant entre 113,83 m² et 274,11 m². À cette période, la forêt se distinguait par une productivité remarquable, caractérisée à la fois par l'abondance de la ressource et par une capacité de production durable (Fig. 26) (CFWT, 2013).

En 2018, la production du liège totalisait à 600 Qx de liège de reproduction, et 300 Qx de liège mâle pour une rotation de 12 et 14 ans (CFWT, 2019).

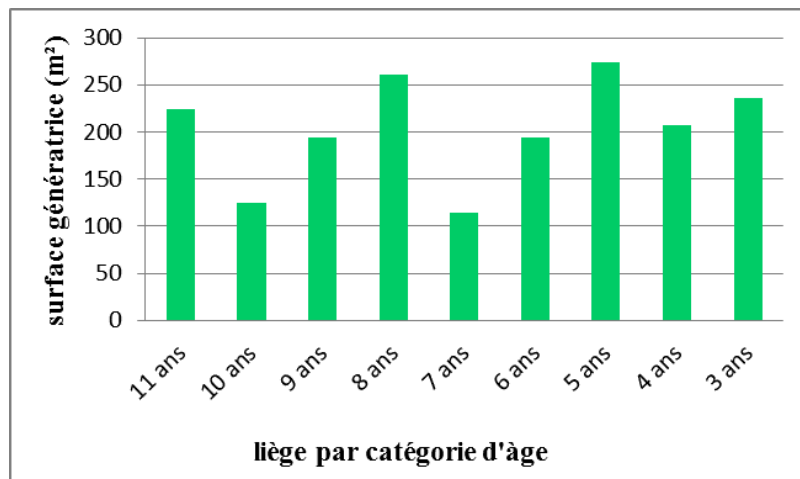


Figure 26. Surface génératrice de liège par catégorie d'âge du liège (CFWT, 2013)

II.6-Incendie

En raison de la présence d'un *Quercetum suberis* à caractère pyrophile, les incendies ont été fréquemment signalés par les services forestiers. Néanmoins, le chêne-liège se distingue par une capacité exceptionnelle de régénération après le passage du feu, principalement grâce à son épaisse couche de liège protectrice.

Le liège constitue en effet un excellent isolant thermique, propriété liée à sa structure alvéolaire composée de cellules remplies d'air, à sa faible teneur en humidité ainsi qu'à sa composition chimique spécifique. Sa conductivité thermique, particulièrement faible, est estimée à près de trente fois inférieure à celle du béton (Santiago Beltran et al., 2004).

Sous l'effet de l'imprudence, d'actes de malveillance ou encore de facteurs anthropiques dont les causes demeurent insuffisamment élucidées, cette forêt a connu de nombreux incendies entre 1882 et 1950. Par ailleurs, la Conservation des Forêts de la wilaya de Tiaret a également signalé plusieurs sinistres survenus au cours des dernières décennies.

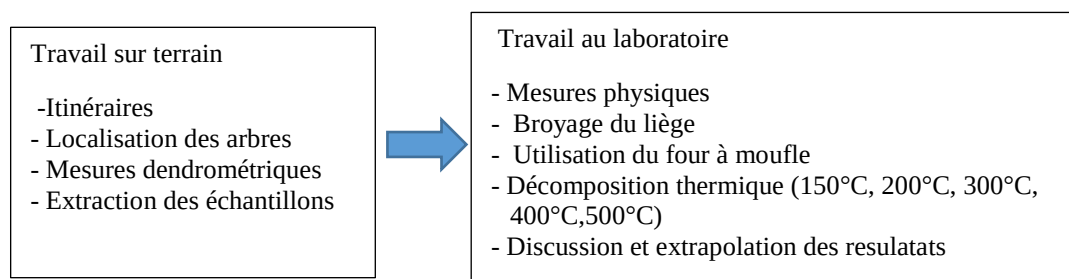
Parmi les incendies les plus marquants figure celui de 1992, qui a détruit entre 800 et 1 000 ha y compris le chêne-liège. Ce feu n'a pu être maîtrisé qu'après plusieurs jours d'intervention, principalement en raison de l'insuffisance des moyens de lutte disponibles à cette époque (CFWT, 2013).

Chapitre III

Matériels et méthodes

III.1-Organigramme Méthodologique

L'organisation de cette recherche s'est articulée autour de l'organigramme de travail suivant, qui résume les principales étapes méthodologiques mises en œuvre.



III.2-Echantillonnage et prélèvement sur terrain

L'échantillonnage a été réalisé au mois de septembre selon des itinéraires entrepris dans les trois niveaux du terrain : crête, pente et bas-fond couvrant topographiquement la répartition spatiale du chêne liège dans une subéraie de montagne. Cette méthode est largement utilisée en Espagne et au Portugal dans le cas des peuplements à faible densité de chêne liège (CICYTEX, 2015) (Fig. 27).

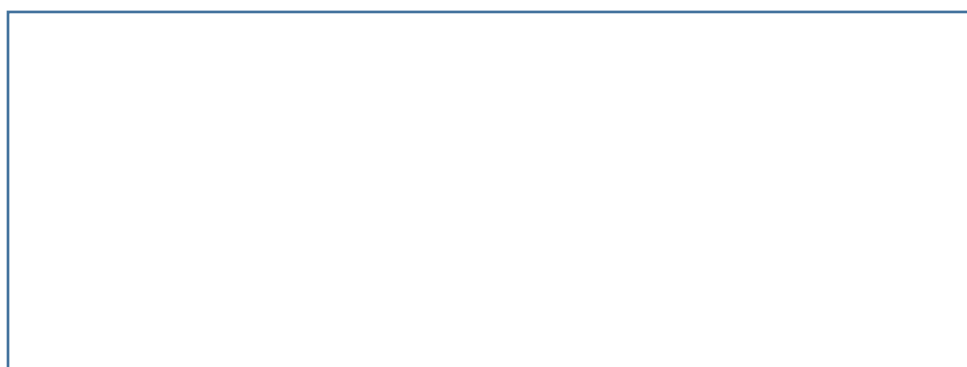


Figure 27. Schéma explicatif de l'échantillonnage par itinéraire (Chorana, 2021)

Sur chaque niveau, 10 chênes lièges adultes en production (de liège) proche de l'exploitation ont été sélectionnés aléatoirement sur des intervalles de 100m en forme de lignes en zig zag, à l'exclusion des arbres présentant des dommages phytosanitaires visibles.

Sur le premier arbre repéré sur l'itinéraire, un carré de 20cm par 20cm est tracé à la craie sur le tronc à hauteur de poitrine (1,3 m du sol), puis prélevé manuellement à l'aide d'un marteau et un burin sans blesser la mère du liège (Fig.28).

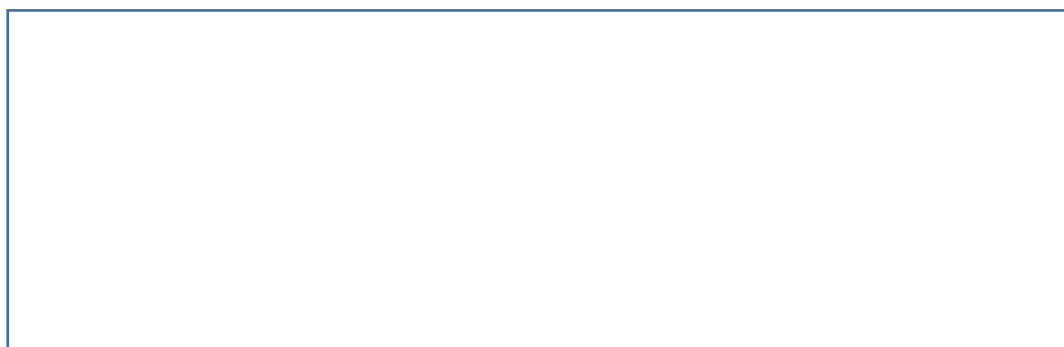


Figure 28. Méthode d'extraction du liège sur arbre

Sur une fiche imprimée, chaque échantillon extrait est étiqueté selon son numéro d'ordre ainsi que les caractéristiques dendrométriques et d'exploitation de l'arbre-échantillon (hauteur, diamètre, épaisseur du liège, hauteur d'écorçage).

III.3-Travail au laboratoire

III.3.1-Mesures des paramètres physiques du liège

III.3.1.1-Séchage et pesée

Au laboratoire, les 30 échantillons séparés en 3 lots (crête, pente et bas-fond) ont été séchés dans une étuve jusqu'à l'état anhydre (à 103 ± 2 °C) (Fig. 29).



Figure 29. Les deux lots du liège de la pente et du bas-fond (Atallah, 2026)

III.2.1.2-Mesure de l'humidité d'équilibre

L'humidité d'équilibre est donnée par la formule Gonzalez- Hernandez et al(2000):

$$\text{Humidité d'équilibre (\%)} = \frac{(\text{Masse humide} - \text{Masse anhydre}) \times 100}{\text{Masse anhydre}}$$

Chaque échantillon est pesé sur une balance de précision (à 0,01g près) (Fig. 30).

L'humidité d'équilibre (H) est atteinte une fois la masse des planches devient pratiquement constante, C'est la différence de masse entre deux pesées successives effectuées à 3h d'intervalle soit inférieure à 0,1%.

Exemple : Si la masse mesurée de l'échantillon est de 31 g lors de la première pesée et de 30,5 g lors de la deuxième, cela traduit une perte de masse de 0,5 g entre les deux mesures.

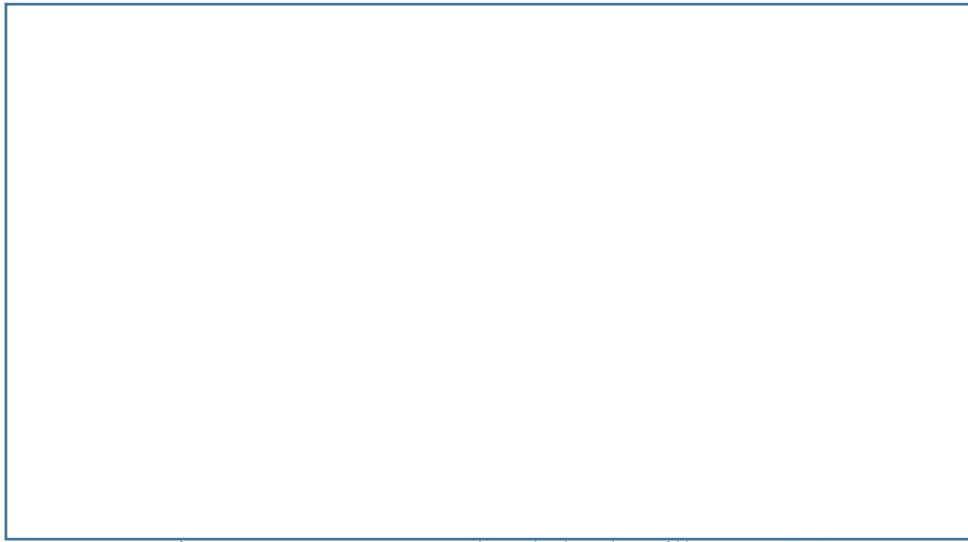


Figure 30. Pesée successive de l'échantillon (Atallah, 2026)

III.2.1.3-Mesure de l'épaisseur du liège

Les mesures des épaisseurs du liège ont été effectuées au moyen d'un pied de ligne d'une précision de 0,1 à 0,01mm. Sur chaque échantillon est tracé trois lignes verticales dans les deux sections transversales. La moyenne enregistrée pour chaque cala (échantillon) et celle des trois mesures tracées verticalement (Fig.31).

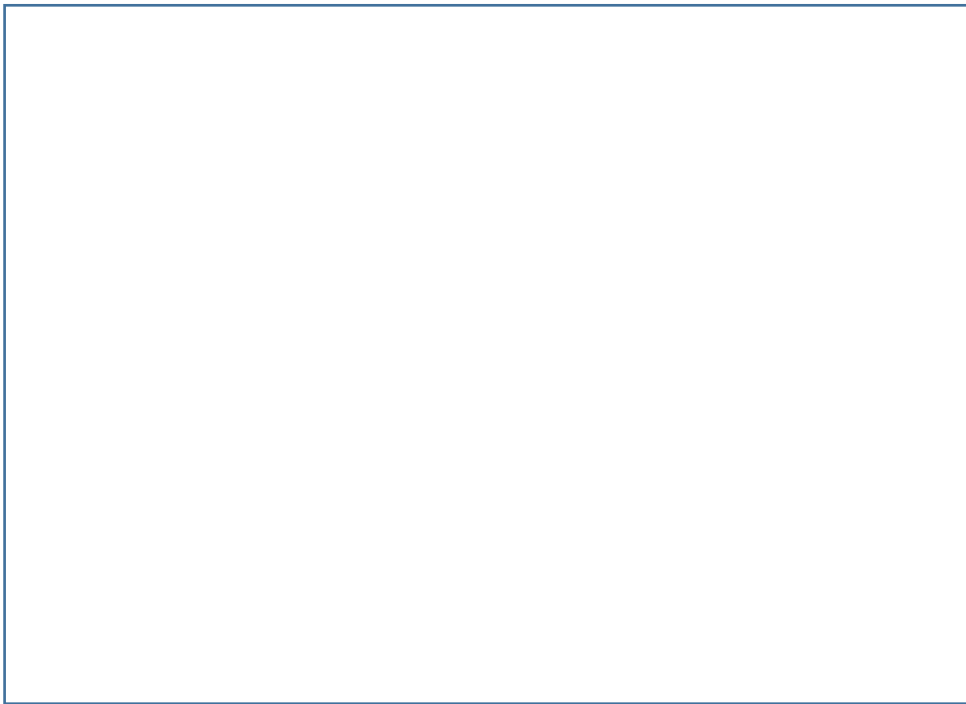


Figure 31. Mesure des épaisseurs du liège par le pied de ligne (Atallah, 2026)

III.2.1.4-La densité volumétrique du liège

La densité volumétrique est calculée selon la masse obtenue (kg) par unité de surface génératrice du liège (m^3) (longueur * largeur * épaisseur) (kg/m^3) (Tab. 9).

Tableau 9. Classes de densité du liège

Classes	Limite de densité (kg/m ³)	
1	<150	Densité faible
2	150-225	Densité acceptable
3	225-300	Densité forte
4	>300	Densité très forte

Source: Gonzalez-Hernandez (2000)

III.2.1.5-La porosité du liège

La porosité est un paramètre principal de la technologie du liège définie par la surface occupée par les canaux lenticulaires qui se développent de la mie du liège vers l'écorce dans une direction à la fois radiale et transversale. La porosité est exprimée par le coefficient de porosité CP (%), dont les valeurs établissent des limites de qualité des lièges d'une récolte à des fins industrielles (Fortes et al., 2004). Les mesures des coefficients de porosité ont été réalisés par le logiciel Image J (Fig. 32).

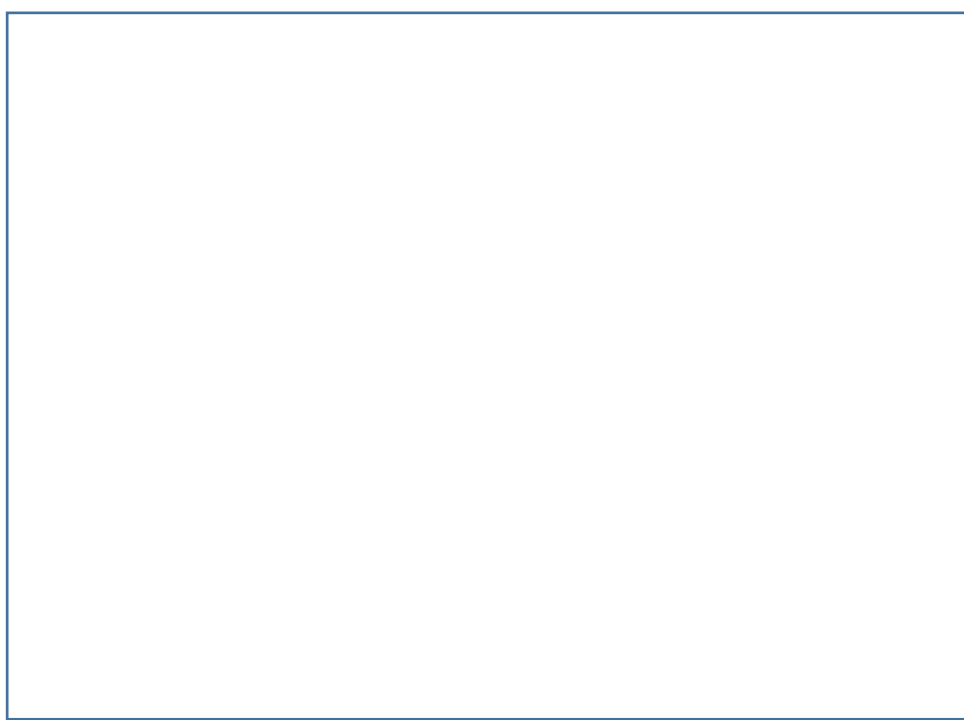


Figure 32. Calcul du coefficient de porosité par analyse d'image scannée (Atallah, 2026)

Les coefficients de porosité transversale calculés pour chaque échantillon et provenance sont ordonnés selon les normes industrielles de classification du liège (Pereira , 2007):

- Qualité élevée : Porosité faible ou basse ($CP < 3\%$)
- Qualité moyenne : Porosité moyenne ou acceptable ($3 < CP < 6\%$)
- Qualité mauvaise : Porosité forte ($CP > 6\%$)

III.2.2-Broyage des échantillons

Avant d'entamer l'analyse thermique du liège, chaque échantillon a subi l'extraction volontaire de sa croûte (la couche ligno-cellulosique externe et morte qui protège le liège (phloème mort)). Cette opération a été effectuée avec une scie sauteuse.

Pour une élimination complète de la couche ligno-cellulosique, un ponçage complémentaire a été opéré sur 3 mm supplémentaires sur le liège sous-jacent (Fig. 33).

Chaque lot de liège a été broyé dans un broyeur à grande vitesse (Marque Xinsheng, Chine).

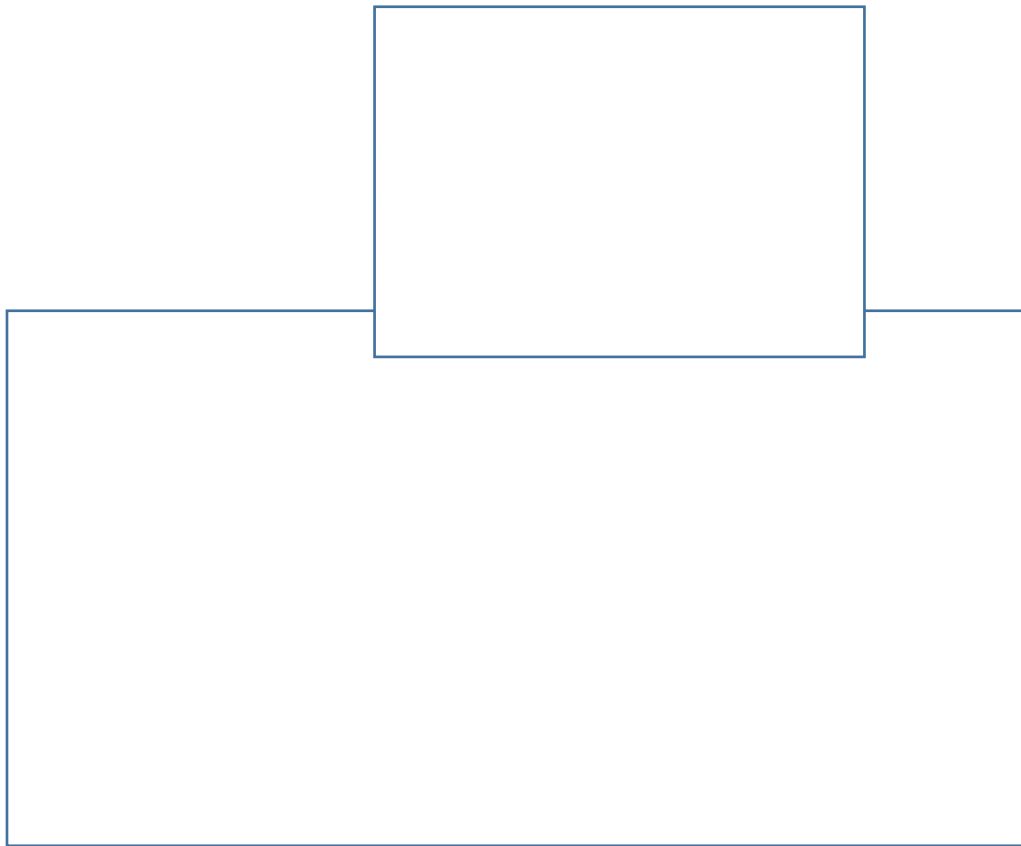


Figure 33. Poudre du liège obtenu après broyage et étiquetage selon la provenance (Atallah, 2026)

Pour éviter toute contamination avec le milieu ambiant (poussière et insectes), les trois lots ont été conservés dans des boîtes en plastic bien étiquetées (Fig. 34).

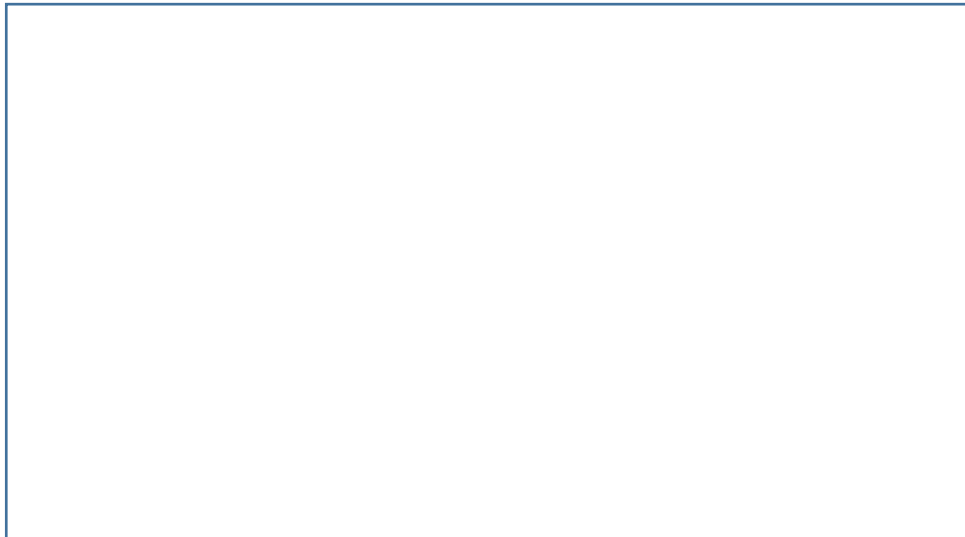


Figure 34. Conservation de la poudre du liège en boîtes plastifiées (Atallah, 2026)

III.2.3-Traitement thermique

- Pour les opérations de pyrolyse des creusets ont été utilisés. Il s'agit d'un pot en matériau réfractaire (Porcelaine) très résistant à la chaleur intense et servant à la calcination d'un matériel végétal.

-Pour obtenir un résultat précis, la poudre du liège doit être à nouveau débarrassée de son eau avant calcination par:

- Séchage dans une étuve à 105°C pendant 24h pour obtenir la matière sèche.
- Pesée initiale (M1) de l'échantillon séché dans un creuset auparavant taré (Fig.35).

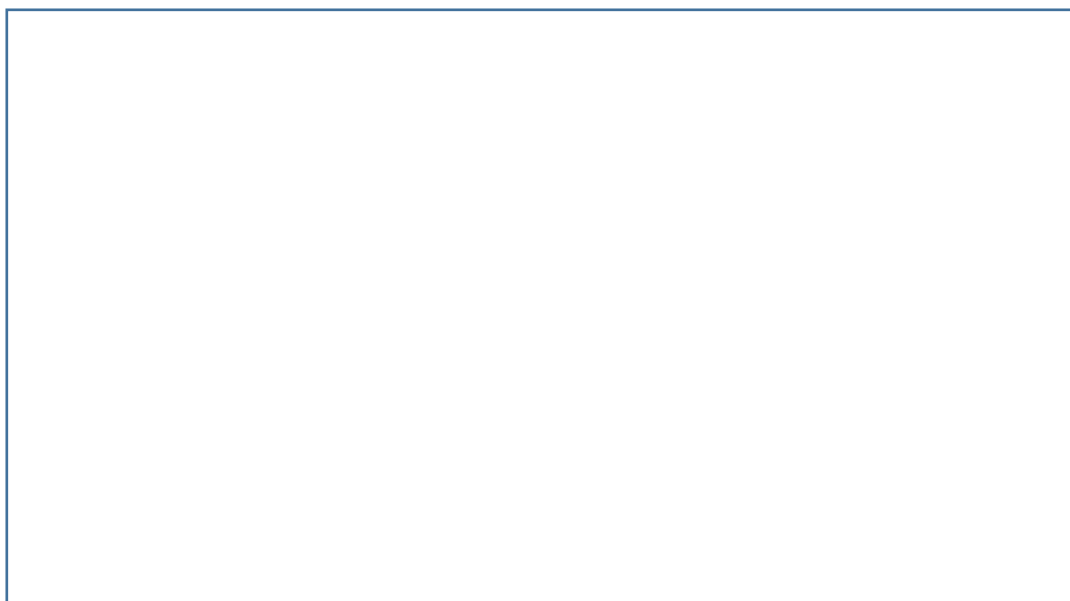


Figure 35. Séchage et pesée de la masse initiale de l'échantillon par balance analytique (Atallah, 2026)

-Le traitement isotherme a été réalisé dans u four à moufle dont les températures oscillent de 100°C~1200°C. Il s'agite de :

- Placer le creuset dans un four à moufle à une température réglée pour des plages de temps définis (Fig.36).



Figure 36. Model de creusets pour la calcination du liège dans le four à moufle (Atallah, 2026)

-De chaque lot de liège en poudre, 10 échantillons pesant 2 g chacun ont été isolés à part puis introduit dans des creusets étiquetés selon leur provenance (crête, pente et bas -fond).

- La décomposition thermique du liège a été entamée en réglant automatiquement le four à des températures bien définis : 150°C, 200°C, 300°C, 400°C et 500°C.

- Pour chaque plage de température, 10 répliques ont été réalisées pour chacune des durées de calcination différentes exprimées en minutes : T10min, T30min, T60 min et T90min (Fig. 37).



Figure 37. Four réglé à 150°C pour la décomposition thermique pendant 10 minutes (Atallah, 2026)

- Après chaque opération de pyrolyse, le creuset est évacué du four puis refroidi à l'air libre, et pesé par une balance analytique afin de déterminer la perte de masse ou la masse résiduelle (Fig 34). Pour calculer la perte de masse l'étape suivante est primordiale :

- Pesée finale (M2) du creuset contenant le liège calciné (Fig.38).

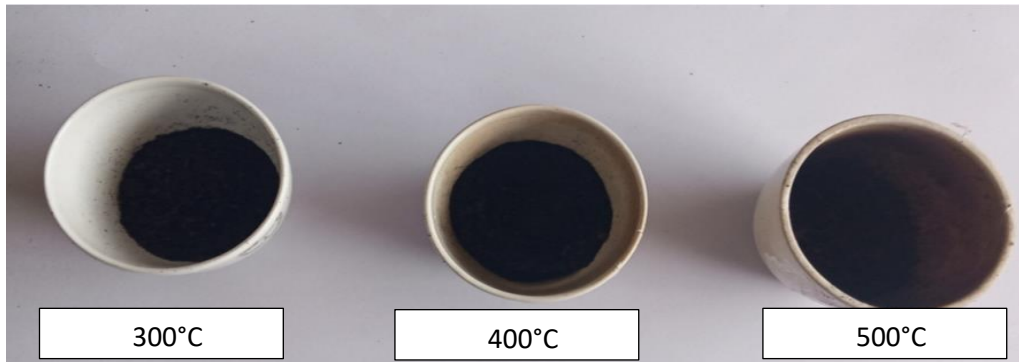


Figure 38. La masse calcinée à 300°C ; 400°C et 500°C (Atallah, 2026)

La perte de masse du liège après calcination est exprimée en pourcentage de masse restante par rapport à la masse initiale (Rosa et Fortes, 1988) :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{(\text{Masse séchée} - \text{Masse calcinée})}{\text{Masse séchée}} \times 100$$

La masse résiduelle (%) exprime le pourcentage restant de la perte de masse calculée selon la formule précédente.

Pour chaque lot de liège calciné, une base de données est montée sur Excel à des fins de traitement statistique.

III.3-Traitement de données

Les résultats des différentes mesures ont été analysés à l'aide de tests statistiques paramétriques et non paramétriques. Les paramètres de position et de dispersion, notamment la moyenne et l'écart type, ont été calculés. D'autres analyses ont été réalisées avec les logiciels SPSS 21 et Excel, incluant le coefficient de variation et l'analyse de variance à un seul critère, selon les seuils de signification suivants :

- Si $p > 0,05$: la différence n'est pas significative (NS)
- Si $p \leq 0,05$: la différence est significative (*)
- Si $p < 0,01$: la différence est très significative (**)
- Si $p < 0,001$: la différence est hautement significative (***)
- Si $p < 0,0001$: la différence est très hautement significative (****) .

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1. Caractéristiques des arbres-échantillons

IV.1.1- Mesures de morphologie

Les résultats des principales mesures de morphologie effectuées sur les 30 arbres échantillons sont renseignés sur le tableau 10.

Tableau 10. Statistiques descriptives des variables morphologiques

	Epaisseur	Diamètre	Hauteur	Ecorçage	Coefficient d'écorçage
Moyenne	25,50	35,84	11,33	2,56	2,37
Ecart-type	4,486	9,888	2,56	0,65	0,71
Minimum	15,00	20,00	6,00	2,00	1,38
Maximum	39,00	59 ,00	16,00	4,00	4,77
CV(%)	17,59	27,58	22,62	25,59	30,05

L'analyse de ce tableau 10 met en évidence une variabilité intra-arbre marquée, avec des coefficients de variation de 17,59 pour le calibre et 27,58% pour le diamètre.

L'épaisseur moyenne du liège (25,50mm) chevauche entre 15 et 39 mm, indiquant une bonne activité subéreuse dans ce massif. Les arbres étudiés sont globalement adultes et en production, avec un diamètre moyen sur liège d'environ 35,84.

La hauteur totale moyenne de 11,33 m varie entre 6 et 16 m, traduisant des arbres élancés en quête de lumière dans un maquis dense. La hauteur d'écorçage, oscillant entre 2 et 4 m, reste peu respectée. Le coefficient moyen d'écorçage est d'environ 2,37 m, valeur peu adaptée aux conditions écologiques dégradées du milieu (sécheresse, densité du sous-bois et incendies).

La distribution des variables selon leurs fréquences absolues est de type gaussien, indiquant que les arbres échantillonnés ne relèvent pas d'un seul itinéraire ni d'un seul peuplement (Fig.39).

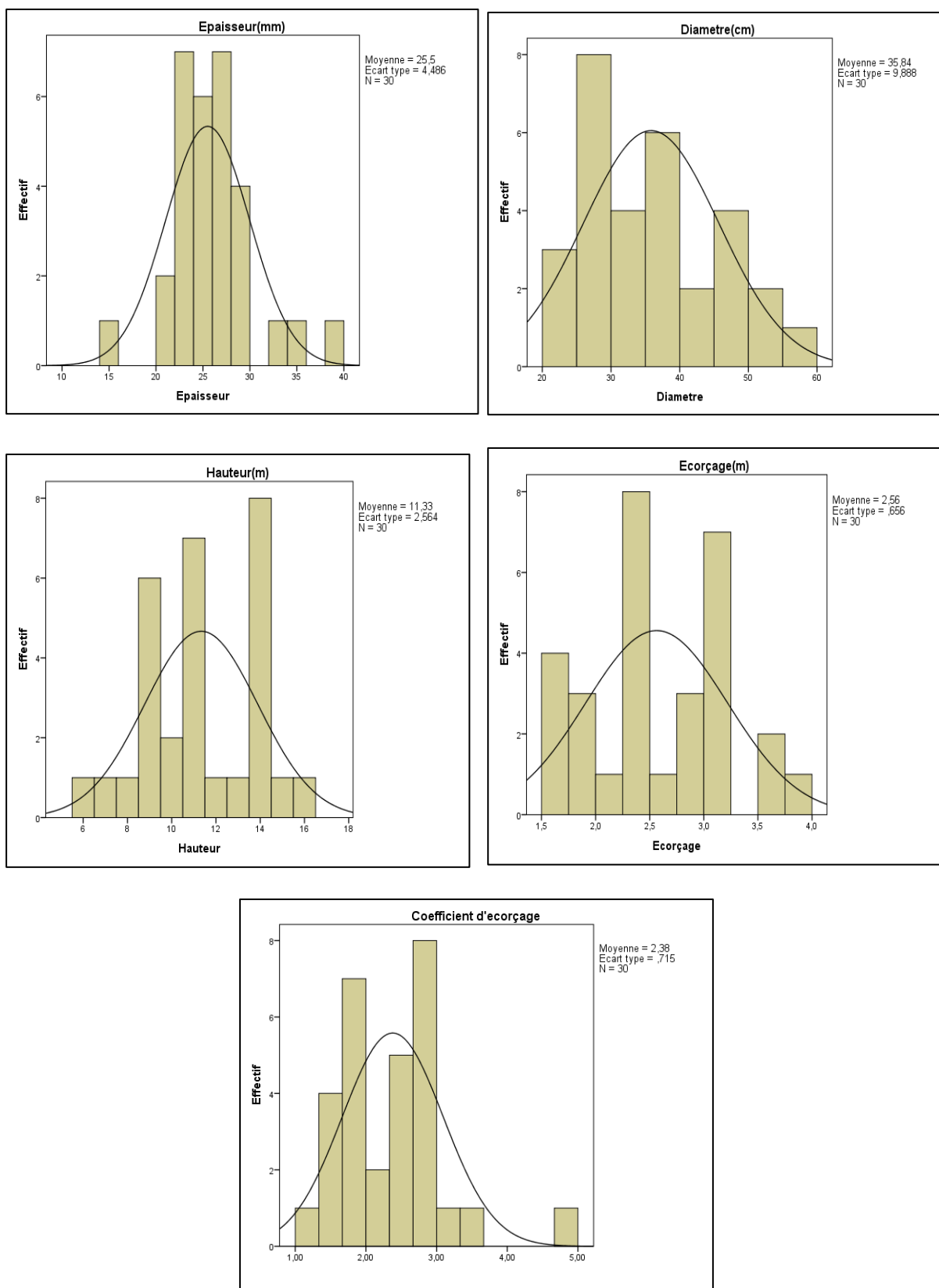


Figure 39. Distribution des effectifs des arbres échantillons selon les variables morphologiques continues : épaisseur du liège, diamètre, hauteur, hauteur d'écorçage et coefficient d'écorçage

En superposant les variables de morphologie sur les trois niveaux de prélèvement il s'avère que les moyennes issues des bas-fonds demeurent meilleures que celles des crêtes et des pentes (28,80mm -44,93cm-13,40m contre 22,40m- 27,33cm-9,20m). Il s'agit d'un liège épais à ordinaire dans les bas-fonds et les pentes voire mince à très minces dans crêtes. L'élévation du terrain semble ralentir la croissance méristématique des arbres (Tab.11) .

Tableau 11. Statistiques descriptives des variables morphologiques par itinéraire

Topo		Moyenne	Ecart-type	N
Epaisseur	Bas fond	28,80	5,245	10
	Crête	22,40	3,098	10
	Pente	25,30	2,214	10
	Total	25,50	4,486	30
Diametre	Bas fond	44,93	8,885	10
	Crête	27,33	5,124	10
	Pente	35,27	6,111	10
	Total	35,84	9,888	30
Hauteur	Bas fond	13,40	1,647	10
	Crête	9,20	1,229	10
	Pente	11,40	2,675	10
	Total	11,33	2,564	30
Hauteur d'écorçage	Bas fond	2,91	,380	10
	Crête	2,15	,708	10
	Pente	2,63	,645	10
	Total	2,56	,656	30

La figure 40 ci-dessous est une représentation des moyennes marginales estimées selon les trois niveaux de prélèvement.

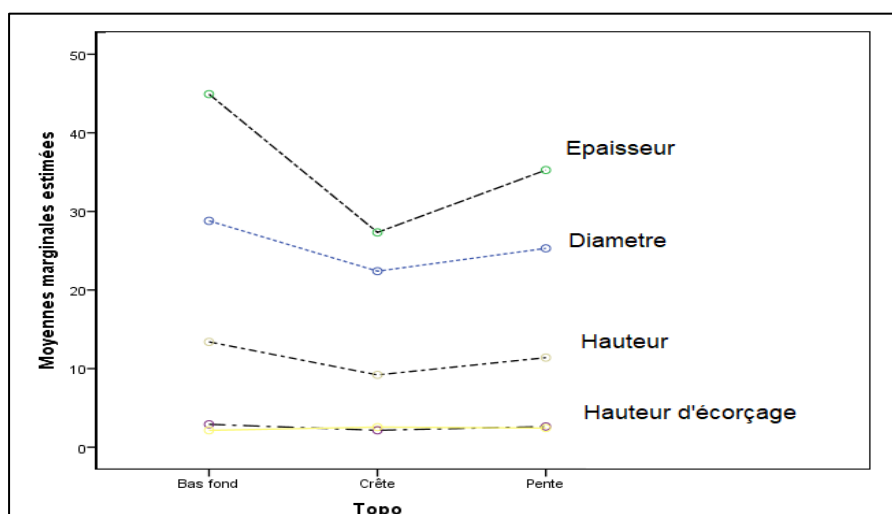


Figure 40. Moyennes marginales selon les trois niveaux d'échantillonnage

L'analyse statistique a révélé une différence hautement significative des quatre variables selon l'itinéraire entrepris (Tab. 12).

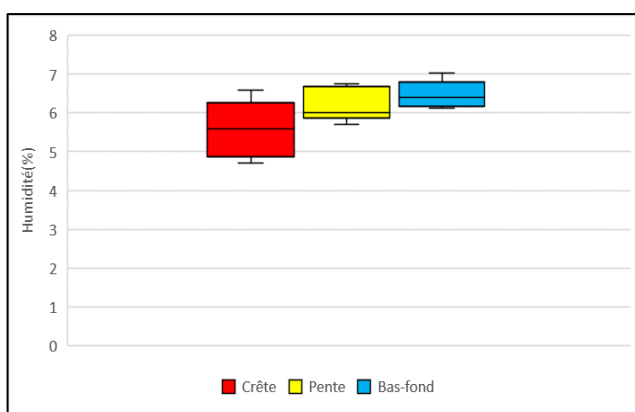
Tableau 12. Tests des effets inter-sujets pour les variables morphologiques

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Ordonnée à l'origine	36146,03	1	36146,033	3490,419	0,000
Topo	815,431	2	407,715	39,371	0,000
Erreur	279,606	27	10,356		

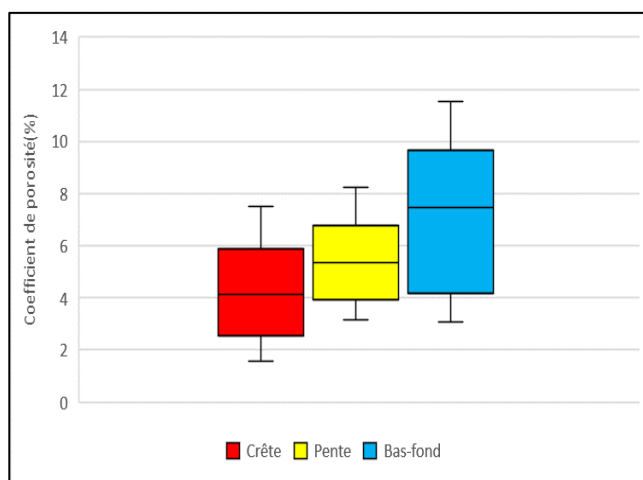
En effet, la topographie du terrain agit différemment sur les paramètres morphologiques des arbres. Le diamètre du tronc, la hauteur des arbres et l'épaisseur du liège perdent de grandeur à chaque élévation du terrain, principalement sur la crête.

VI.1.2- Mesures physiques

Les mesures physiques se rapportant à la densité volumétrique, l'humidité et à la porosité sont renseignées dans la figure 41 sous forme de box splot ainsi que leur statistique descriptive.



	Topographie	Moyenne	Ecart-type
Humidité (%)	Bas-fond	6,48	0,32
	Crête	5,62	0,68
	Pente	6,17	0,39
	Total	6,09	0,59



	Topographie	Moyenne	Ecart-type
Coefficient de porosité (%)	Bas-fond	7,12	2,91
	Crête	4,22	1,89
	Pente	5,43	1,66
	Total	5,59	2,46

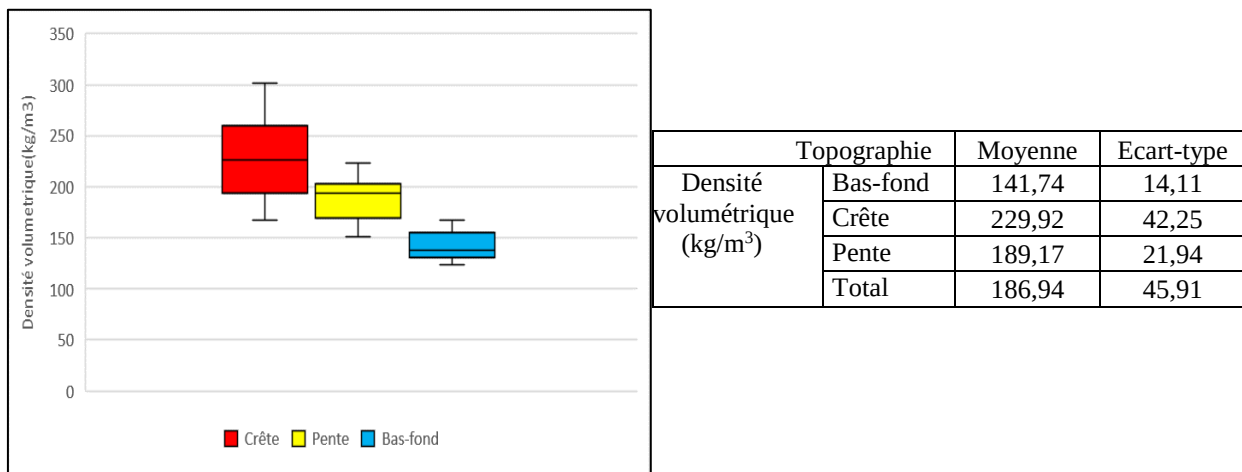


Figure 41. Distribution en boîte à moustache pour les variables physiques

Les constatations tirées de la figure font état d'une masse volumiques montant en crescendo des basfonds vers les crêtes ; soit une moyenne allant de 141,74 à 229,92 kg /m³. Une différence hautement significative a été relevée entre les trois niveaux de prélèvement ($F=1275,462$; $p<0,000$).

Les moyennes obtenues s'articulent autour d'une valeur globale de 186,94 kg/m³, avec des valeurs comprises entre 141,74 kg/m³ et 229,92 kg/m³. Comparés aux résultats rapportés par Aloui et al. (2006), et Messaoudène et Metna (2010), qui indiquent respectivement des moyennes de 254 kg/m³ et 192,92 kg/m³. Les lièges étudiés présentent une densité plus faible, traduisant ainsi un matériau globalement plus léger.

L'humidité d'équilibre demeure plus rapide pour les échantillons issus de la crête que ceux des pentes et des bas-fonds (5,62%-6,17%-6,48%). En ce qui concerne le critère d'humidité, paramètre essentiel pour la qualité du liège, les valeurs obtenues s'inscrivent dans l'intervalle défini par Amorim (2000), correspondant à une teneur en humidité comprise entre 4 % et 8 %, caractéristique d'un liège de bonne qualité. Cette faible humidité génère des conditions défavorables au développement de micro-organismes et, par conséquent, lui confère une durabilité illimitée (IPROCOR, 1999).

L'influence de ces deux variables (densité et humidité) par rapport aux échantillons de la crête s'explique par l'exposition continue de ces arbres au vent, ainsi que par le déficit en humidité du sol et en nutriments. Dans ces conditions, le liège produit se caractérise par une forte élasticité et une dureté élevée au toucher (Frihi, 2025).

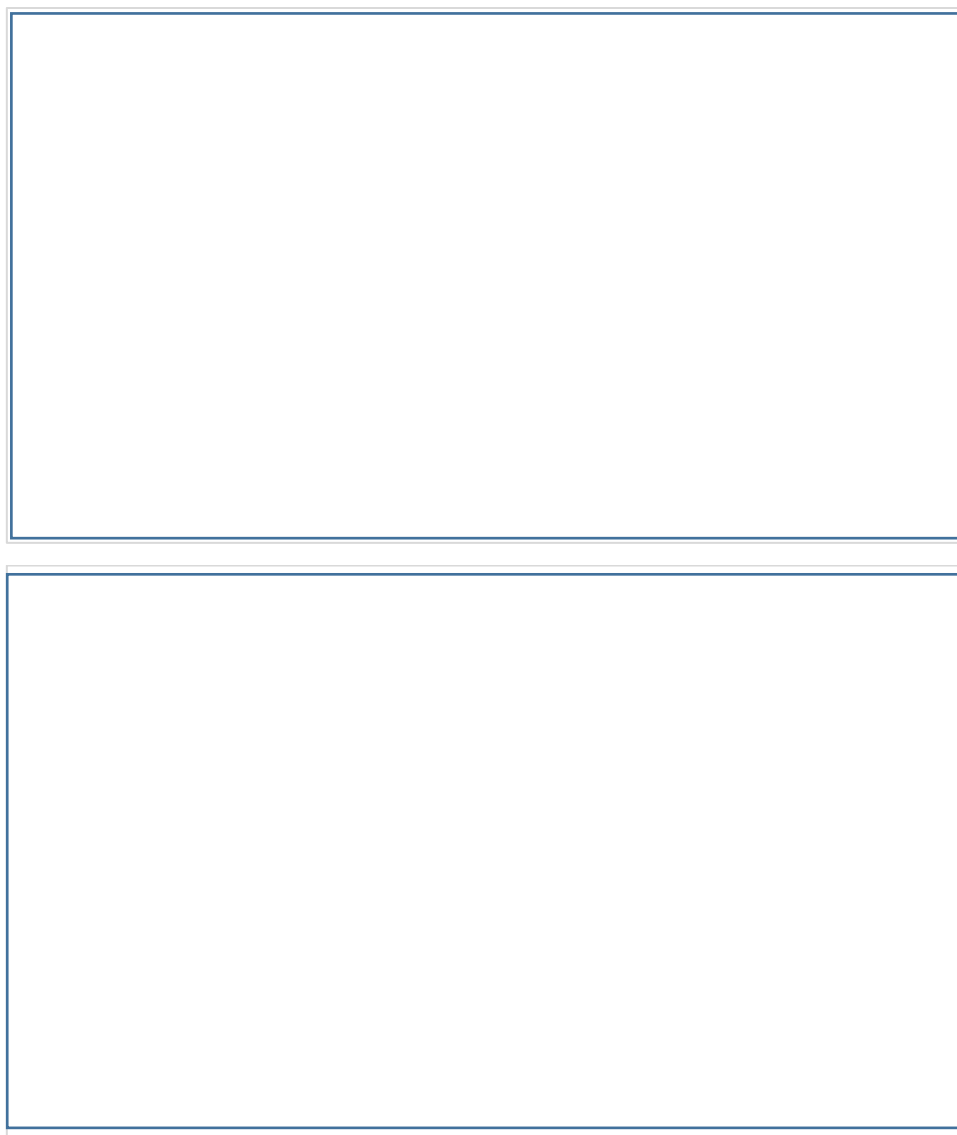
En ce qui concerne la porosité, il s'avère que les coefficients de porosité s'accroissent dans les bas-fonds. Ces derniers passent respectivement de 4,2% à 5,43% et puis vers 7, 12%. Une différence hautement significative a été enregistrée entre les trois niveaux de prélèvement ($F=189,099$; $p<0,000$).

Selon Oliveira et al(2012), ce coefficient varie fortement, allant de moins de 1 % à plus de 15 %, selon les échantillons étudiés.

La faible porosité du liège est le principal paramètre de sa bonne qualité. Elle est très souvent corroborée aux terrains secs et caillouteux. D'ailleurs il admit que les chênes lièges issus des sols trop humides des bas-fonds ne produisent que du liège soufflé remplis de lenticelles de qualité moindre (Lamey ,1893).

IV.2- Décomposition thermique du liège

La dégradation thermique du liège est illustrée dans les figures 42 et 43 selon le type de liège et la masse résiduelle.



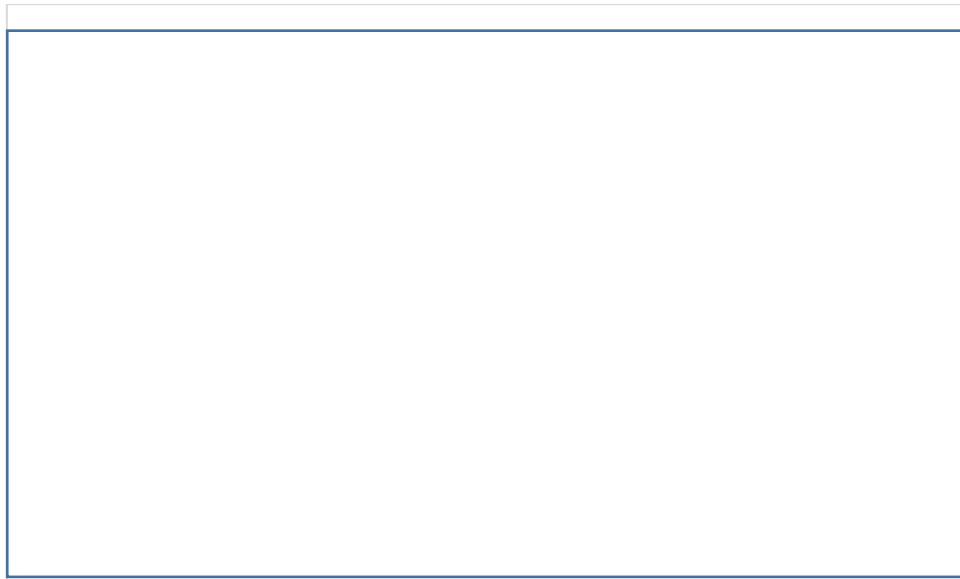


Figure 42. Variation de la masse résiduelle selon le type du liège et la température

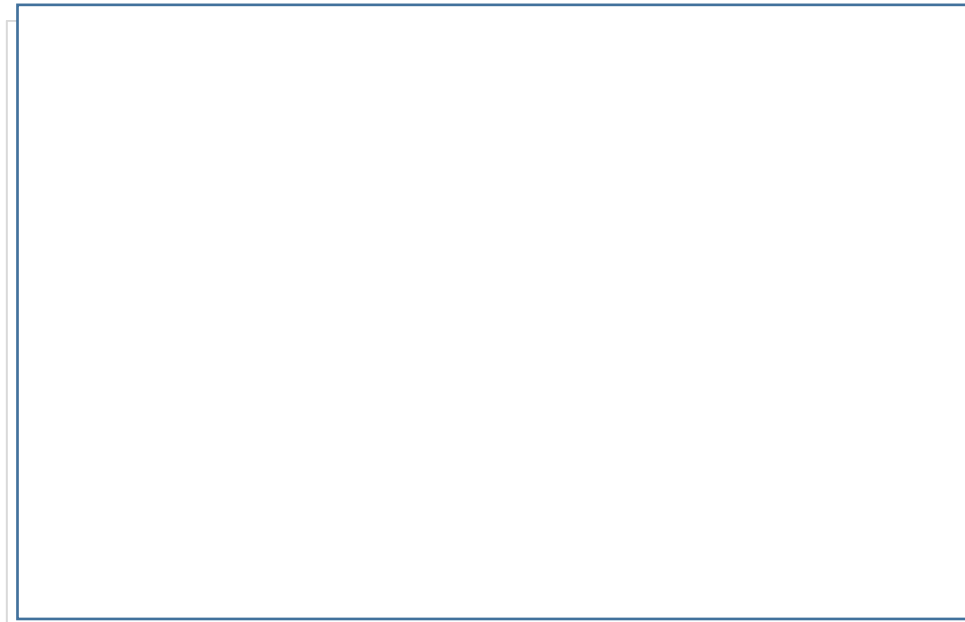


Figure 43. Synthèse des masses résiduelles selon les plages des températures

-

-La figure 43 met en exergue une différenciation marquée de la décomposition thermique des trois lièges.

En effet, le liège de crête, de nature mince présente une dégradation plus rapide qui s'amorce réellement à partir de 150°C en perdant en moyenne 6,5% de la masse initiale de l'échantillon (soit une masse résiduelle de 93,5). Entre les plages 200-300°C, ce type de liège ne garde respectivement que 67,47% et 22% de sa masse initiale soit une déperdition allant de 33,53 à 78% . Entre les plages 400-500°C, c'est presque la décomposition totale ne laissant que les cendres (soit une masse résiduelle oscillant entre 3 et 0,4%.

En ce qui concerne le liège de pente de nature ordinaire, la décomposition thermique semble lente. Elle se déclenche insensiblement à partir de 150°C (soit 99% de masse résiduelle) puis

atteint légèrement les 85,4 % 200°C. Entre les plages 300-400°C, ce type de liège garde en moyenne entre 60,6 et 29,3% de sa masse initiale (soit une perte de 39,3 et 71,7%). Entre les plages 400-500°C, la dégradation devient rapide, elle passe de 29,3% à 1,94%.

Le liège du bas-fond de type épais, n'exprime aucune réaction face à une température de 150°C(100% de la masse résiduelle). D'ailleurs, la décomposition débute très lentement à partir de 200°C(93,4% de la masse résiduelle) puis fléchit lourdement pour atteindre 70,3% à 300°C . A 400°C. ce liège garde encore 40,4% de sa structure. A 500°C, il reste encore 4,1 % de suber.

Globalement, on peut attester que la composition thermique du liège démarre rapidement sur le liège des crêtes, lente sur celui des pentes et très lente sur celui des bas-fonds.

IV.2.1- Décomposition thermique à 150°C

La dégradation thermique du liège à 150°C selon les quatre durées de pyrolyse T10 , T30, T60 et T90 est mentionnée dans la figure 44.

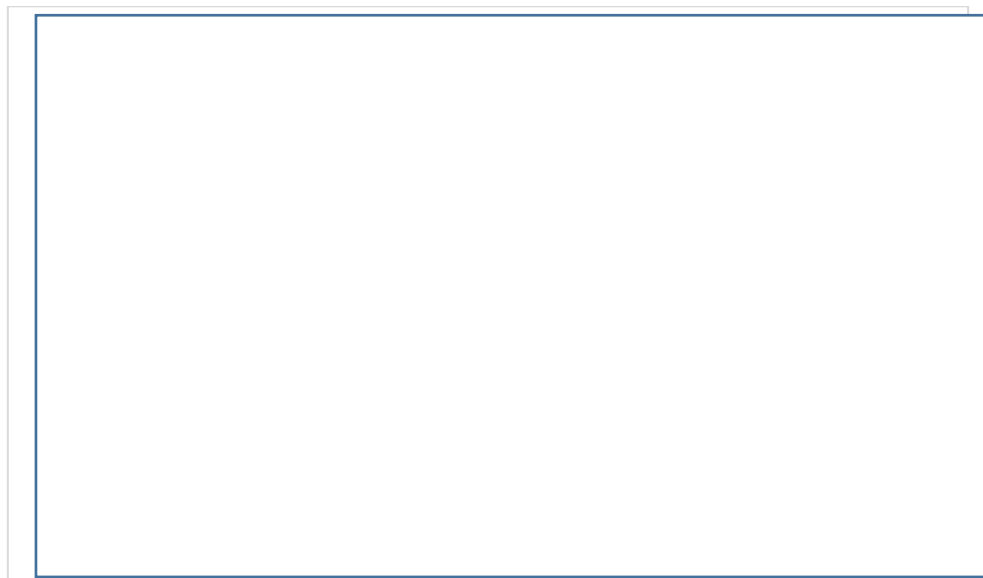


Figure 44. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse(150°C)

La figure 44 met en évidence une variation très faible de la composition thermique du liège à 150°C pour les trois types de suber (Crête, pente et bas-fond):

-En effet, après 10minutes de combustion(T10), les 30 échantillons gardent en moyenne 94,6% de leur masse résiduelle soit une perte de masse de 5,4% .

-Après 30 minutes de combustion (T30), les 30 échantillons conservent en moyenne 93,6 % de leur masse initiale, soit une perte de masse de 6,4 %.

- Au bout de 60 minutes de combustion (T60), les 30 échantillons présentent une masse résiduelle moyenne de 93,4 %, correspondant à une perte de masse de 6,6 %.

- Enfin, après 90 minutes de pyrolyse (T90), les 30 échantillons conservent en moyenne 93,06 % de leur masse, soit une décomposition de 7 %.

L'analyse de variance pour les quatre durées de combustion enregistrent une différence non significative point de vue perte de masse ($p > 0.05$) (Tab.13).

Tableau 13. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité
T10	3,8	2	1,9	0,54	0,59
T30	0,8	2	0,4	0,15	0,86
T60	1,27	2	0,63	0,16	0,85
T90	0,27	2	0,13	0,04	0,96

On conclut que, indépendamment du type de suber et de la durée de pyrolyse, le liège de reproduction demeure très peu sensible à la décomposition thermique à 150 °C.

IV.2.2- Décomposition thermique à 200°C

La figure 45 présente la dégradation thermique du liège à 200 °C pour les quatre durées de pyrolyse T10, T30, T60 et T90.

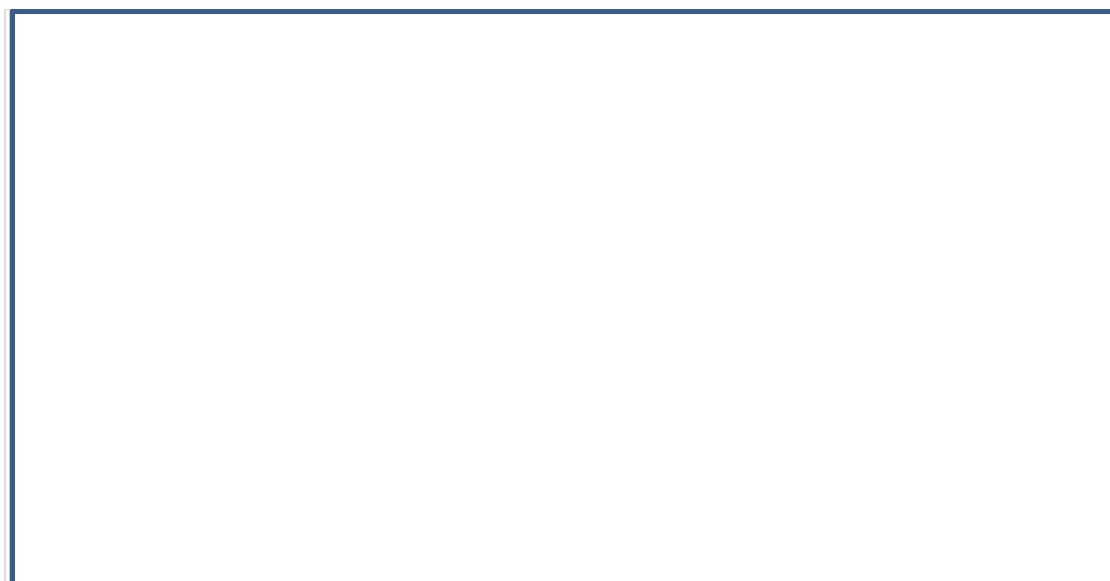


Figure 45. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse (200°C)

La composition thermique du liège à 200°C semble affecter plus le liège issu de la crête :

- Les résultats obtenus montrent une masse résiduelle de 72,7%-68,1%-65,8% et 63,3% respectivement pour les durées de combustion T10, T30, T60 et T90.

Pour les deux autres types de liège, la dégradation thermique reste lente et relativement stable au cours du temps :

- le liège de pente présente une perte moyenne de 15 % de sa masse initiale, correspondant à une masse résiduelle de 85% pour les quatre durées.
- le liège de bas-fond se caractérise par une faible sensibilité à la décomposition thermique, avec une perte d'environ 7%, soit une masse résiduelle de 93% au cours des quatre temps.

L'analyse de variance pour les quatre durées de combustion enregistrent une différence hautement significative point de vue perte de masse ($p < 0.000$) (Tab).

Tableau 14: Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (200°C)

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité
T10	2182,46667	2	1091,23333	286,05	0,000
T30	4018,4	2	2009,2	655,17	0,000
T60	3192,47	2	1596,23	166,15	0,000
T90	4850,60	2	2425,30	370,80	0,000

Il s'avère qu'à 200°C, et à l'opposé du liège de pente et du bas-fond, le liège de crête détient une sensibilité accrue à la dégradation thermique. Il peut perdre jusqu'à 35 à 37% de masse initiale.

IV.2.3- Décomposition thermique à 300°C

La figure 46 illustre la dégradation thermique du liège à 300 °C pour les quatre temps de pyrolyse : T10, T30, T60 et T90.

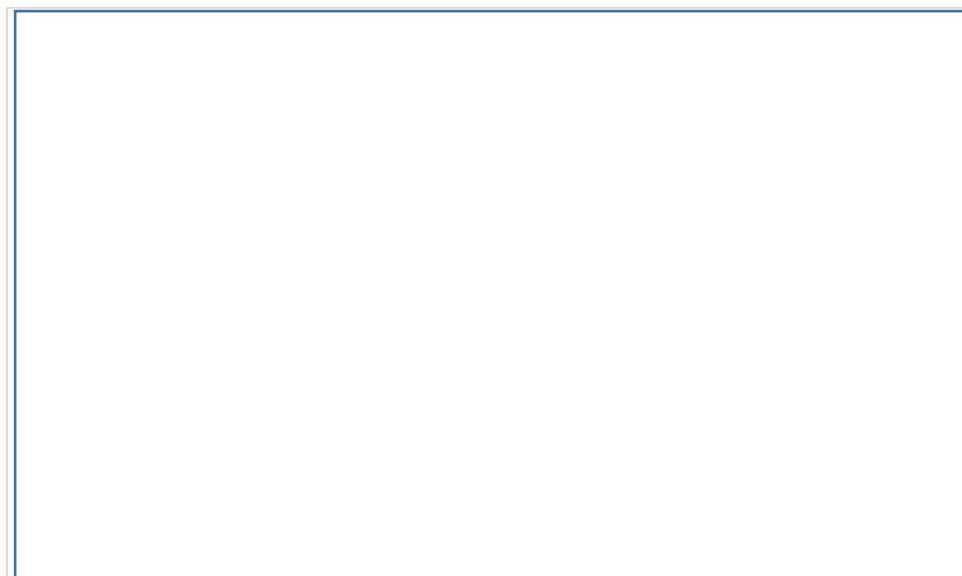


Figure 46. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse (300°C)

À 300°C, la composition thermique semble davantage toucher le liège émanant de la crête, dont la masse résiduelle se stabilisant à 22% entre T10 et T90.

En revanche, la dégradation thermique des autres types de liège reste sans variations marquées :

-le liège de pente maintient environ 60,6 % de sa masse initiale, avec un minimum de 58% et un maximum de 63%.

-Par ailleurs, le liège de bas-fond persiste et se stabilise en moyenne à 70 % en perdant seulement 30% de sa masse initiale pour les quatre plages de temps.

L'analyse de variance des quatre durées de combustion révèle une différence hautement significative en termes de perte de masse ($p < 0,000$)(Tab.15).

Tableau 15. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (300°C)

	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité
T10	13173,07	2	6586,533	1170,75	0,000
T30	13078,07	2	6539,03	2129,72	0,000
T60	13114,47	2	6557,23	1643,87	0,000
T90	12826,67	2	6413,33	2211,49	0,000

À 300 °C, contrairement aux lièges de pente et de bas-fond, le liège de crête présente une forte sensibilité à la dégradation thermique, avec une perte pouvant atteindre 78% de sa masse initiale.

IV.2.4- Décomposition thermique à 400°C

La décomposition thermique du liège à 400°C simultanément pour les quatre durées de combustion est mentionnée dans la figure 47.

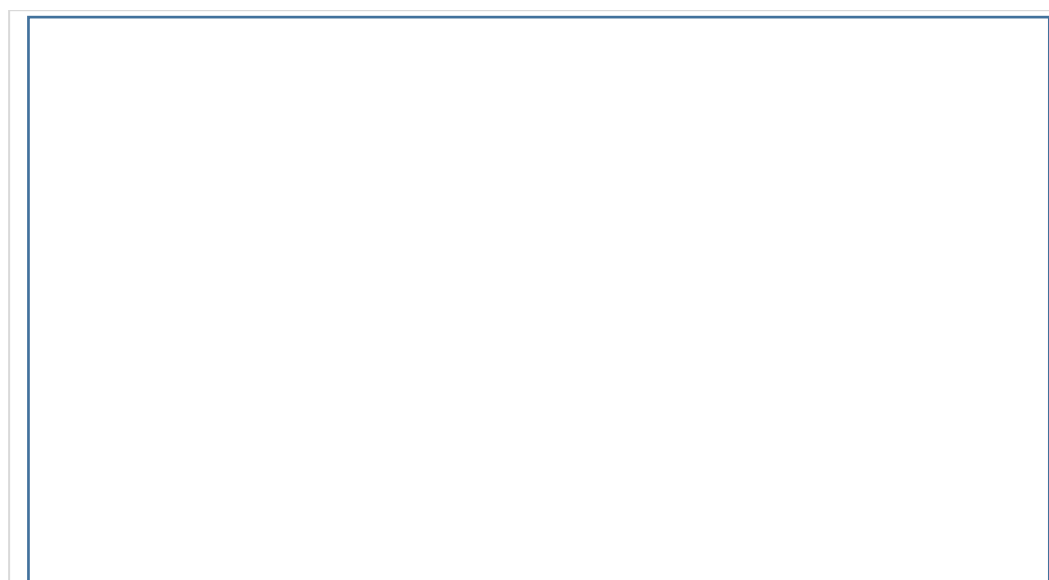


Figure 47. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse (400°C)

Pour une pyrolyse de 400°C, la décomposition du liège de crête est à son optimum régressif ne perpétrant que 3% de sa masse résiduelle.

Le liège de pente enregistre une masse résiduelle moyenne de l'ordre de 29,3% . Cette perte oscille entre 58% à T10 et 79,4% à T90.

En ce qui concerne le liège du bas-fond, la masse résiduelle se stabilise en moyenne à 40,3%. Elle se fixe à 36,6% à T60 et 33,4% à T90. A T10, ce type de liège garde encore 47,5% de sa masse initiale.

L'analyse de variance des quatre durées de combustion enregistre une différence hautement significative en termes de perte de masse ($p < 0,000$)(Tab.16).

Tableau 16. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (400°C)

Anova	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité
T10	12190,07	2	6095,033	1725,01	0,000
T30	8391,80	2,000	4195,900	1173,982	0,000
T60	5574,60	2	2787,300	722,24	0,000
T90	4723,47	2	2361,73	773,87	0,000

À 400 °C, contrairement aux lièges de pente et de bas-fond, le liège de crête se dégrade presque totalement soit une perte de masse moyenne de l'ordre de 97%. Les deux autres subers perdent simultanément entre 70 et 60%.

IV.2.5- Décomposition thermique à 500°C

La figure 48 présente la décomposition thermique du liège à 500 °C pour les quatre durées de combustion.

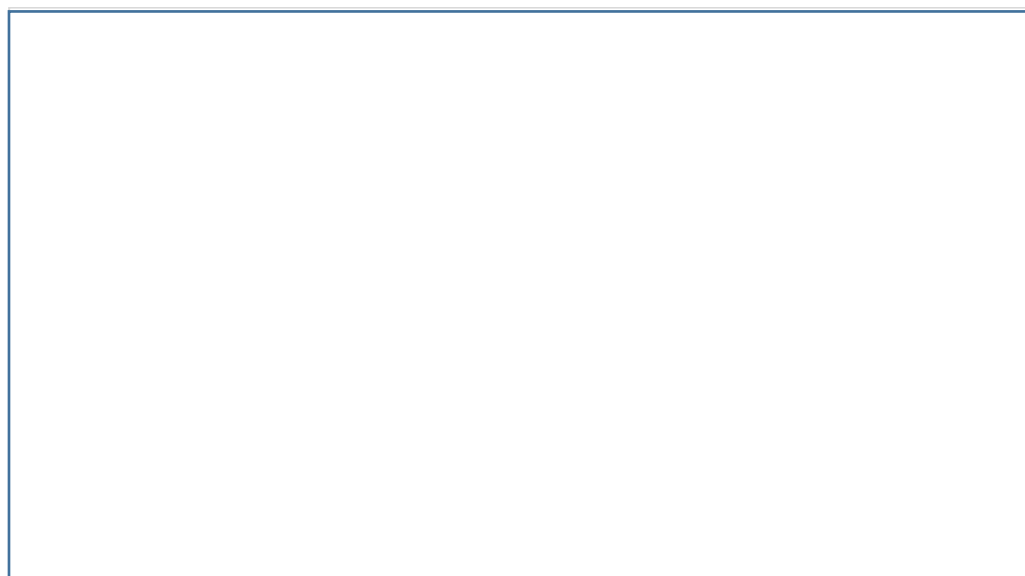


Figure 48. Variation de la masse résiduelle selon le temps de pyrolyse (500°C)

La figure 45 met en exergue une dégradation thermique presque totale du liège de la crête, soit une masse résiduelle de l'ordre de 0,35%, c'est-à-dire une perte de 99,75% .

Sur le liège de la pente, cette perte atteint 98,06% alors qu'elle frôle les 95,98% pour celui des bas-fonds.

L'analyse de variance des quatre durées de combustion enregistre une différence hautement significative en termes de perte de masse ($p < 0,000$) (Tab.17).

Tableau 17. Analyse de variance inter durée selon la masse résiduelle (500°C)

Anova	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	F	Probabilité
T10	229,59	2,00	114,80	153,13	0,000
T30	73,93	2,00	36,97	70,50	0,000
T60	29,52	2,00	14,76	63,91	0,000
T90	15,78	2,00	7,89	60,17	0,000

À 500 °C, la chaleur provoque une forte dégradation des trois types de liège, avec des pertes de masse dépassant 95%, particulièrement pour le liège de crête qui atteint presque une destruction totale de sa masse initiale.

La figure 49 synthétise d'une manière claire la dégradation thermique du liège proportionnellement aux durées de calcinations différentes.

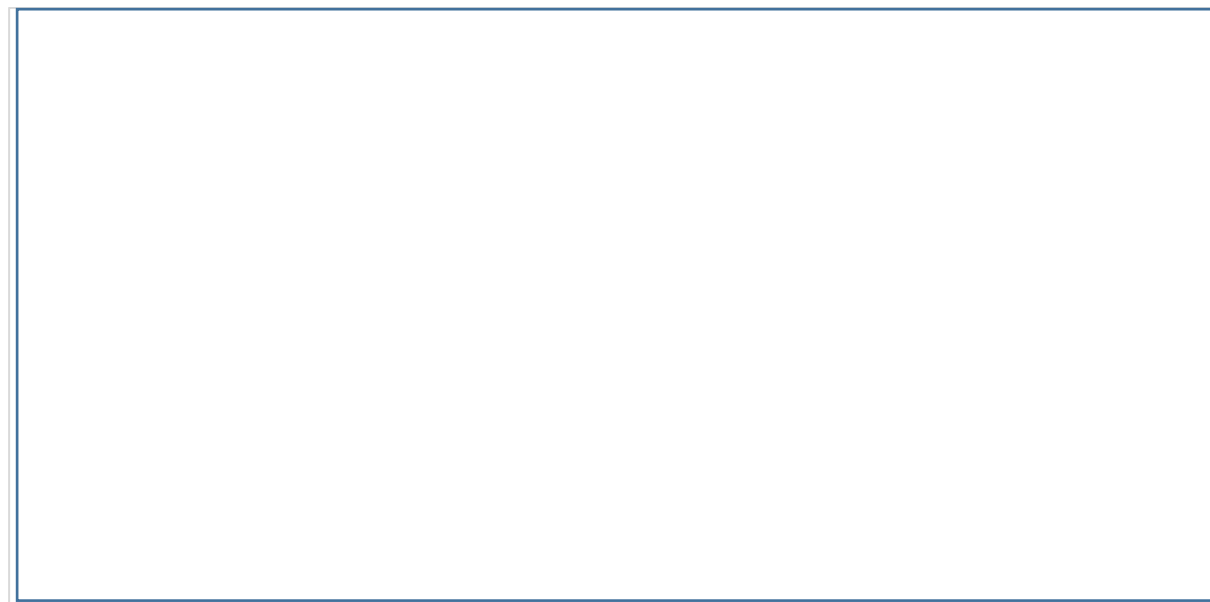


Figure 49. Synthèse de la décomposition thermique du liège selon la durée d'exposition

IV.3- Extrapolation des résultats

Les résultats obtenus concordent avec les données de la littérature relatives à la dégradation thermique du liège en présence d'air, notamment celles issues d'analyses

thermogravimétriques. Elles montrent qu'une perte de masse notable s'amorce dès 200–250 °C, avant de s'accélérer rapidement jusqu'à 500 °C, température à laquelle le matériau est pratiquement entièrement réduit en cendres (Rosa et Fortes, 1988 ; Pereira, 1992).

En superposant, les résultats des tests thermiques au laboratoire aux observations pratiques du terrain, il apparaît claire que le risque d'apparition et de propagation d'un incendie en forêt n'est jamais nul. Il dépend toutefois des caractéristiques de la végétation et du climat, qui peuvent en favoriser le développement. L'intensité, la fréquence et l'ampleur des incendies sont aussi liées au milieu physique, notamment les reliefs et la géomorphologie des paysages.

Dans ce contexte, la topographie influence fortement le comportement du feu, en accélérant ou en ralentissant sa propagation. Sur des pentes ascendantes, surtout dans le sens du vent, le feu se propage plus rapidement, tandis qu'il ralentit en descente, avec toutefois un risque de reprise sur le versant opposé par effet de sautes de feu ou des flammèches (Fig.50).

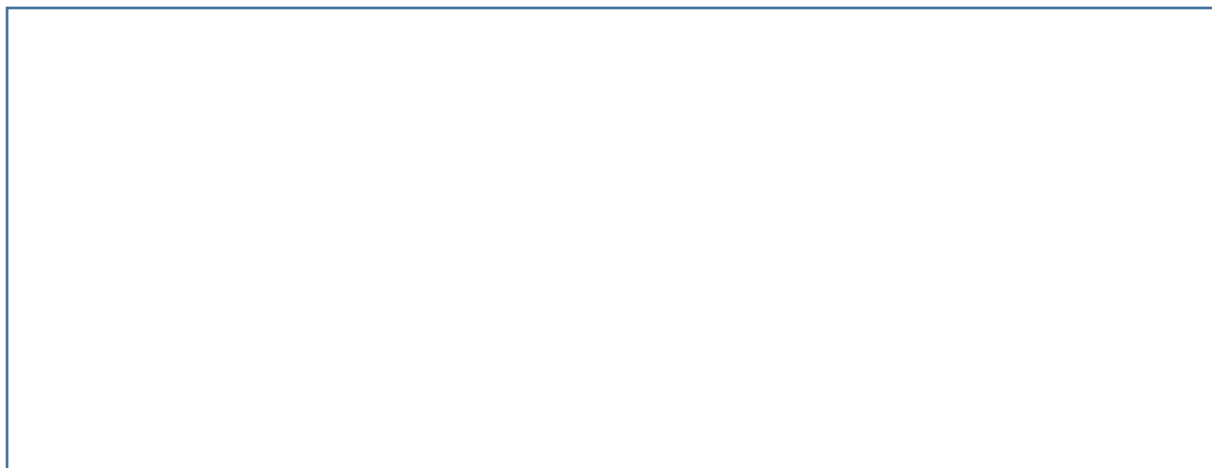


Figure 50. Schéma explicatif de comportement du feu en montagne (Atallah, 2026)

Selon la figure explicative, le feu progresse sur les versants ensoleillés (versant sud), dans le sens du vent et en remontant la pente, avec un risque de foyers secondaires à l'approche de la **crête**. Le feu remonte la pente sur le versant ombragé (versant nord) , à contre-vent, avec une intensité plus faible.

La pente est déterminante, le feu progresse plus vite en montée, où le préchauffage du combustible est favorisé par la proximité des flammes. En effet, en montée, l'angle entre le feu et son combustible se trouve réduit, c'est le contraire en descente, il devient plus large (Pausas, 2004).

Le pourcentage de pente influence directement le comportement du feu en renforçant les transferts thermiques de rayonnement, de conduction et de convection, ce qui accélère sa propagation. Des études montrent que sa vitesse double sur une pente de 10 à 15 % et quadruple à 20 % (Keeley and Pausas , 2022).

Le chêne-liège de montagne subit davantage les effets du feu en pente, et surtout sur les crêtes, où les transferts thermiques (rayonnement et convection) sont maximaux. L'intensité évolue ainsi d'un feu faible en bas-fonds, lié à l'humidité du sol, à un feu moyen à fort sur les pentes, puis de fort à très fort sur les crêtes, sous l'effet des courants d'air chaud ascendants (Kecir, 2024).

Dans les trois configurations du niveau du terrain, c'est l'écorce du chêne liège qui va subir les radiations de l'incendie. Selon Pimont et al (2012), sous l'effet du vent et du diamètre du tronc, la flamme s'applique et s'attache fortement sur sa face aval, ce qui accroît le taux de combustion et la durée de résidence du feu. Les transferts thermiques ont lieu en premier par convection et rayonnement sur la surface extérieure de l'écorce puis la chaleur se propage vers l'intérieur de l'écorce par conduction en traversant la croûte et en atteignant le liège (Fig.51).

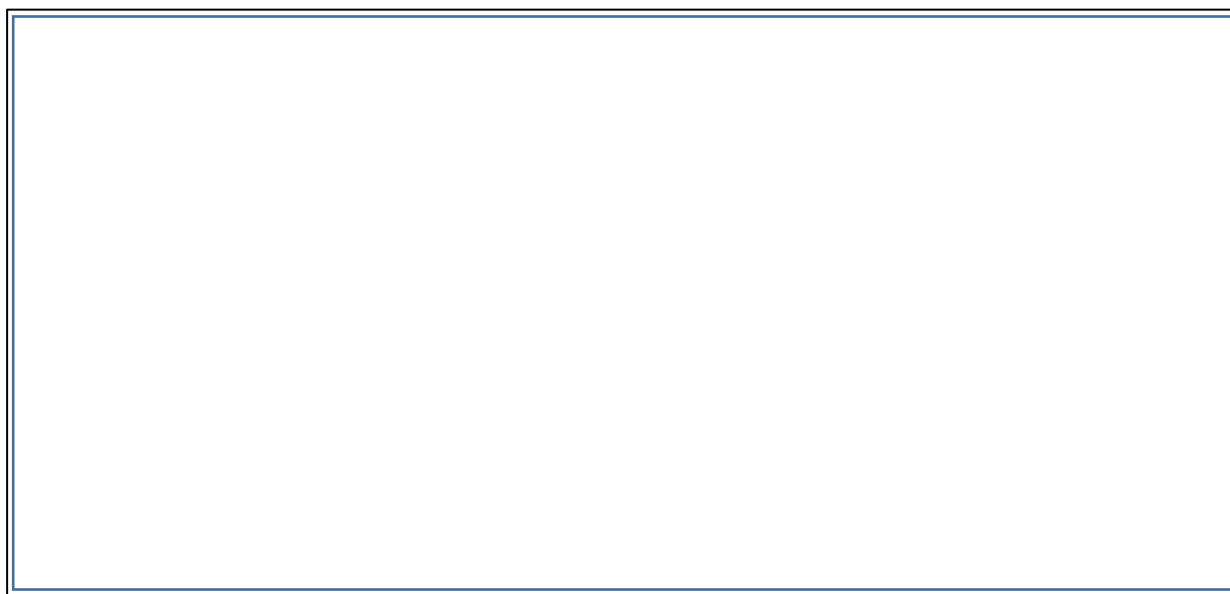


Figure 51. Impact du feu sur la structure du liège (Atallah, 2026)

La carbonisation du liège, ou sa pyrolyse, dépend principalement de son épaisseur, de sa structure cellulaire et de son aspect externe (Dehane et al., 2015).:

- Les lièges fins (minces à très minces) (<2 cm) s'enflamment facilement, car leur croûte de nature épaisse dépasse généralement 6 mm (Dehane, 2012). La chaleur captée par le tissu ligneux (la croûte) se propage rapidement au tissu subéreux, déclenchant la décomposition thermique du liège.

Dans ce contexte, Benhalima (2024) associe l'inflammabilité du liège fin à un temps d'ignition relativement court au sein de la croûte. Ainsi, une croûte d'une épaisseur de 6,36 mm, exposée à une radiation thermique de 500 °C, présente un temps d'ignition rapide de 34,92 secondes. Par ailleurs, la chaleur transmise par conduction vers le liège atteint une température maximale d'environ 262,81 °C, valeur comparable à celles observées pour d'autres espèces ligneuses (Cruz et al., 2006 ; Madrigal et al., 2019).

Ce transfert de chaleur intense s'explique aussi par une croissance ralentie du chêne liège sur les crêtes, avec des accroissements annuels très rapprochés ce qui confère à ce liège une densité accrue et une forte élasticité. Le fort embrasement du liège mince est dû aussi à la présence d'une panoplie de défauts sur le tissu subéreux à l'instar de la lignification verticale et horizontale, l'inclusion du liber à l'intérieur des tissus subéreux et le liège doublé (Dehane, 2012)(Fig.52).



Figure 52. Exemple d'aspect du liège de crête (en haut : Lignification verticale ; en bas : liège doublé (Atallah, 2026)

Selon Nguyen et al(1981), la forte présence de ces défauts augmente le temps de résidence de la chaleur thermique en consommant rapidement les tissus subéreux. Cette information corrobore les résultats du présent travail, la dégradation thermique du liège de crête est plus rapide.

Dans le même sens, Pereira (1992), considère des températures supérieures à 200 °C comme des seuils critiques entraînant une dégradation structurelle du matériau mince. Dans le contexte des incendies de forte intensité, ces conditions thermiques peuvent provoquer des dommages irréversibles au phellogène, au liber, et au cambium entraînant la mortalité différée ou totale des arbres et en perpétuant des formes de résilience post-incendie faibles.

-Les lièges réguliers (ordinaires à épais), d'une épaisseur supérieure à 2 cm, présentent une faible inflammabilité et une ignition lente, en raison de la minceur de leur croûte (1 à 3 mm) (Dehane, 2012). Le temps d'ignition de la flamme varie ainsi entre 37 et 45 secondes. Lorsqu'une croûte de 1 à 3 mm d'épaisseur est exposée à une radiation thermique d'environ 500 °C, la température transmise au liège oscille entre 129,1 °C et 217,49 °C (Benhalima, 2024).

Ces valeurs restent globalement inférieures et proches au seuil critique de 200 °C, limitant ainsi la dégradation thermique du matériau. Ce type de liège confère à l'arbre une barrière isolante contre le feu de faible et de moyenne intensité, en protégeant le phellogène et le cambium.

Dans le cas d'un feu de forte intensité assimilé dans notre travail à une température chevauchant entre 400 et 500°C , la résistance du liège ordinaire et épais se réduit fortement suite à la présence de certaines protubérances typiques à ces lièges de pente et de bas-fond.

Il s'agit des canaux lenticulaires de grand diamètre qui traversent radialement et transversalement le suber et la prolifération du liège terreux (Natividade,1956). Leur diamètre oscille entre 0,2 et 8 mm de diamètre et leur nombre varie entre 30 et 270 par cm². Leur forme est généralement cylindrique (IPROCOR , 1999).

En effet, ces canaux en forme de méats assurant les échanges gazeux entre l'arbre et le milieu extérieur constituent aussi une sorte de cheminés véhiculant une forte proportion d'air, qui lors de l'incendie accélère les transferts par convection en décomposent rapidement le suber (Fig. 53) . En revanche, le liège terreux se présente sous forme de matière poudreuse non subérifiée riche en lignine et très inflammable (Pereira, 2007)(Fig. 53).



Figure 53. En haut : pores de grand diamètre remplie d'air ; en bas : liège terreux (Atallah, 2026)

Lors du broyage des échantillons, tous ces ingrédients étaient enfouis dans le liège et faisaient partie intégrante de sa structure et de son aspect. Dans notre simple opinion, la résistance à la décomposition thermique ou la sensibilité aux plages de température testées étaient fortement corrélées à la proportion de ces paramètres physiques.

Afin d'identifier d'éventuelles relations entre les différents paramètres étudiés, une matrice de corrélation a été établie (Tab.18).

A blank sheet of white graph paper with a light gray grid. The grid consists of small squares, approximately 1 cm by 1 cm. There are 20 columns and 20 rows of squares. A thicker vertical line runs down the left side, creating a margin. A thicker horizontal line runs across the top, creating a header area. The intersection of these two lines forms a small square at the top-left corner.

** La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Les principales relations tirées de la matrice de corrélation concernent essentiellement l'épaisseur du liège, sa densité et son humidité, la porosité et la masse résiduelle aux différentes plages de température testées.

Une corrélation significative a été observée entre l'humidité et la porosité ($r = 0,62$). Cette relation peut être attribuée à l'importance des surfaces poreuses, qui favorisent les échanges

avec le milieu extérieur. Selon González Hernández et al(2000) , ces échanges entraînent une oxydation accrue des cellules constituant les canaux lenticellaires, ainsi qu'un dessèchement plus marqué, se traduisant par une diminution du taux d'humidité . D'ailleurs, il est admis que le liège a la capacité de retenir à sa surface, par le phénomène d'absorption certaines molécules d'origines diverses, provenant du milieu ambiant (IPROCOR, 1999).

Aucune corrélation significative n'a été observée entre les paramètres physiques et la masse résiduelle après pyrolyse à 150 °C ($r = 0,119$; $r = 0,162$; $r = 0,003$; $r = -0,13$). À cette température, la structure alvéolaire du liège, qui limite la circulation de l'air, associée à sa faible teneur en eau et à la faible conductivité thermique de ses constituants, lui confère un remarquable pouvoir isolant. Le liège présente ainsi une résistance à la chaleur environ 30 fois supérieure à celle du béton (González-Adrados et al., 2000).

Paradoxalement, des relations significatives et hautement significatives associent les paramètres physiques à la décomposition thermique aux plages 200°C, 300°C, 400°C et 500°C. En effet, à ces stades ce sont les protubérances qui rongent le liège qui vont s'interagir aux radiations thermiques. Selon Amorim (2000), la forte abondance de cavités ou lenticelles accentue la teneur en composés phénoliques dans le liège qui par conséquent déclenchent les phénomènes de conduction et de convection proportionnellement à l'augmentation de la température et du temps d'exposition. Ce schéma reste valable pour les incrustations ligneuses et le liège terreux.

Fortes (2004), souligne que les parois cellulaires du liège à base de cellulose confèrent une résistance élevée à la traction, tandis que l'hémicellulose joue un rôle de matrice en assurant le pontage entre les fibres de cellulose et leur liaison à la lignine, contribuant ainsi à la rigidité de l'ensemble. C'est cette structure interne du liège qui va accentuer la calcination du suber jusqu'à le rendre en cendre à plus de 500°C.

L'ensemble de ces relations de cause à effet influence directement la décomposition thermique du liège. Qu'il s'agisse de simulations au laboratoire ou de conditions réelles d'incendies de forêt, le constat demeure similaire: plus l'épaisseur du liège est importante (> 2 cm), plus des transferts de chaleur par conduction et convection restent minimes. Ce comportement s'explique principalement par la structure cellulaire associée aux proportions des paramètres physiques étudiés à savoir la densité volumique, l'humidité et la porosité et certaines anomalies.

Conclusion générale et perspectives

La décomposition thermique du liège par perte de masse n'a jamais fait l'objet d'études en Algérie et même ailleurs.

Les résultats de l'altération thermique du liège de la subéraie de Tagdempt peuvent être dupliqués sans bavure sur les autres subéraies Algériennes menacées d'incendies.

La fonction naturelle du liège très appréciés par rapport aux autres essences forestières est de protéger les parties vivantes de l'arbre au moment de l'incendie. Cette isolation naturelle n'est permise qu'à travers une écorce de liège suffisamment épaisse et saine poussant sous des conditions normales de végétation.

La littérature scientifique est unanime sur le fait que le liège est un matériau non ligneux faiblement inflammable par rapport au bois. Cette hypothèse n'est pas toujours valable quand il s'agit de sa structure et de ses composants physiques.

Les résultats dégagés à travers des lièges prélevés selon la topographie du terrain forestier (bas-fond, pente et crête) mettent en évidence une sensibilité variée aux radiations thermiques émises par un four de calcination réglés à des températures et des durées prédéfinies.

Globalement, nos résultats montrent qu'une radiation thermique de 150 °C n'entraîne aucune décomposition notable du liège, quelle que soit la durée d'exposition aux radiations.

En revanche, la sensibilité thermique du liège devient plus marquée à partir de 200 °C, notamment chez le liège de crête (caractérisé par une épaisseur mince à très mince) et reste stable dans le liège des pentes et des bas-fonds.

L'impact réel du flux thermique apparaît de façon significative dès 300 °C, provoquant une dégradation importante du liège, avec des taux de décomposition avoisinant 78% pour le liège de crête, 39,3% pour celui de pente et 30,7 % pour le liège de bas-fond.

L'effet létal se manifeste à 400 °C, entraînant la destruction de près de 97 % de la structure du liège de crête, tandis que la dégradation atteint entre 60 et 70 % pour les lièges de pente et de bas-fond.

À 500 °C, l'effet destructeur devient quasi total, avec une consommation de 99,75 % du liège de crête, contre 98,06 % pour le liège de pente et 95,98 % pour celui des bas-fonds.

Ces résultats de la composition thermique sont fortement corrélés aux protubérances qui parsèment le tissu subéreux et qui sont occasionnés par la diversité des origines et des conditions de croissance du chêne-liège.

Les résultats de cette étude mériteraient d'être approfondis, notamment par des analyses thermochimiques principalement sa composante principale qui est la subérine.

Dans un autre contexte, les résultats des tests de la décomposition thermique du liège selon sa structure confirment sa forte utilisation dans l'industrie de l'aggloméré.

En effet, l'utilisation de la poudre de liège dans la fabrication des agglomérés expansés comme matériaux isolants dans les parois des murailles ou dans les revêtements des sols donne une idée claire de la résistance thermique du liège dans l'atténuation de l'effet du feu (Fig.54).

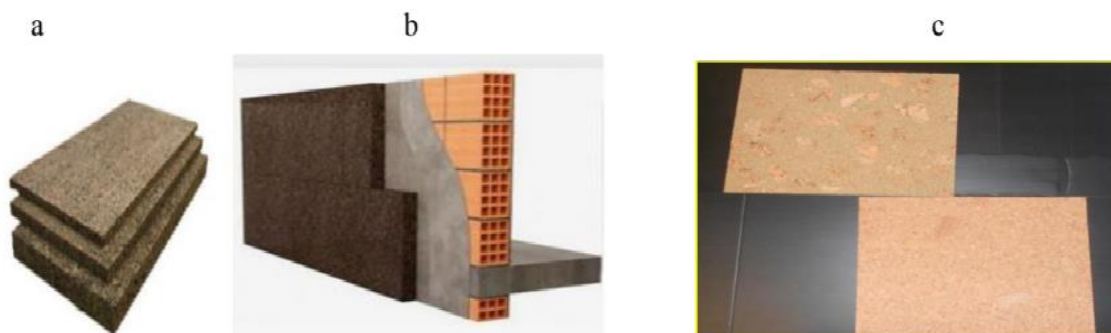


Figure 54. A gauche (Agglomérats de liège.) ; au milieu (Liège expansé pour façade) : à droite (Dalle de sol en liège naturel) (a et b : Gil, 1998; c: Dehane, 2012).

Selon la manière dont il est traité, le liège appartient à la classe des matériaux de construction B1 (difficilement inflammable) et fait donc partie des isolants écologiques présentant de bonnes propriétés de protection contre l'incendie (Gil , 998).

Au contact du feu, ce matériau bloque la propagation du feu et des fumées toxiques. Ainsi ces solutions sont obligatoires dans les zones à risque pour épargner des menaces d'incendie c'est le cas des usines, des hôpitaux, des bureaux, des bâtiments, et les salles de sport.

Ce travail nous a permis de certifier que le liège est thermiquement stable jusqu'à 200 °C et se tient comme un coffre-fort véritablement ignifugé.

A 400°C, quand il est suffisamment épais, sa masse résiduelle se stabilise en moyenne à 40,3%. Elle se fixe à 36,6% à T60 et 33,4% à T90. Il faut attendre 90 minutes avant que le feu ne le traverse et que les températures dépassent les 500°C pour le décimer totalement.

Dans notre opinion personnelle, ce temps est largement suffisant pour l'arrivée des moyens de lutte en forêt ou dans les zones urbaines ou industrielles.

Références

- Abbas M., 2013. Incidence économique des feux de forêts sur les subéraies. Journées d'étude sur la réhabilitation des suberaies incendiées et Reboisement Université de Tlemcen du 16 - 17 janvier 2013.
- Aloui A., Rjaibi A., Ben Hamadi N., 2006 : Etude de la qualité du liège de reproduction des subéraies d'Aïn Braham. Actes des Journées Scientifiques de l'INRGREF, Gestion intégrée des forêts de chêne liège et de Pin d'Alep. Annales de l'INRGREF, 9 (1), n° spécial : 45-59.
- Amandier L., Santelli J.,(2004), Typologie des suberaies varoises, ONF, CRPF PACA, IML Vivès, ASL Suberaie varoise, 175 p.
- Amorim, 2000 : Investissement et participation, S.G.P.S., S.A., Site Internet développé par Proxima Créative.
- Anjos O., Pereira H., Rosa M.E.,2008. Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork. Holz Roh – Werkst, 66(4):295–301. [https:// doi. org/ 10.1007/ s00107- 008- 0248-2](https://doi.org/10.1007/s00107-008-0248-2)
- APCOR, 2016. Cortiça em números. Associação Portuguesa da Cortiça, Information Bureau.
- APCOR. 2016. Manual Técnico Rolhas. [https:// www.apcor. pt/wpcontent /uploads /2016/01/ManualRolhas_PT_VF.pdf](https://www.apcor.pt/wpcontent/uploads/2016/01/ManualRolhas_PT_VF.pdf)
- Aronson J., Pereira J.S., & Pugas J.G., 2009. Cork Oak Woodland on the edge. Islandpress. Washington. Covelo. London, 350p.
- Babrauskas V.,2003. Heat release rate: the single most important variable in fire hazard Fire safety journal 18 (3), 255-272.
- Baeta N., 2020. Role de la suberaie dans la lutte contre la désertification. Centre d'écologie appliquée de l'Institut supérieur d'agronomie du Portugal . 50p
- Bauer G., Speck T., Blömer J., Bertling J., Speck O., 2010. Insulation capability of the bark of trees with different fire adaptation. J. Mater. Sci. 45 (21) : 5950–5959.
- Bellinfante N., Gómez I. A., Ruiz, M. A. & Paneque, G., 1997. Suelos sobre areniscas silíceas del Parque Natural Alcornocales. Edafología , 3 (2): 309-314.
- Benest M., 1985 . " évolution de la plate forme de l'ouest algérien et du Nord-est Marocain au cours du jurassique supérieur et au début du crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire" .Doc –Lab-Géol. Lyon n°95. (Fasc1). département des sciences de la terre. Université Claude Bernard. Lyon. 367p.
- Benhalima Y.,2024. Analyse de l'effet de carbonisation du liège sur la résilience des subéraies dans la région de Tlemcen. Thèse. Doct. LMD. Département des ressources forestières. Fac. SNV-STU. Univ.Tlemcen. 210 p.
- Bertrand R. 2007. Etude de l'impact du régime d'incendie sur la végétation et le chêne-liège (Quercus suber) en Provence siliceuse: mortalité, capacité de régénération et morphologie. Mastère spécialisé « Forêt, Nature et Société », 95p.
- Bertrand R.,2007. Etude de l'impact du régime d'incendie sur la végétation et le chêne-liège (Quercus suber) en Provence siliceuse: mortalité, capacité de régénération et morphologie. Mastère spécialisé « Forêt, Nature et Société » .Cemagref.95p.
- Bouhraoua R.T., 2003. Situation sanitaire de quelques forêts de chêne –liège de l'ouest algérien.Etude particulière des problèmes posés par les insectes.Thèse. Doct. Dept. Forest. Fac.Sci.,Univ.Tlemcen , 267 p.
- Breteau P.,2021. Incendies en Grèce, Finlande, Algérie... visualisez l'ampleur des feux en Europe et dans le bassin méditerranéen. Le monde, article publié le 20 août 2021.
- Caetano M. J. L., 1994.Aprovisionamento de Matérias-Primas”, 4º Painel I.B. Portugal.
- Carneiro, A ,1961 . Visão Panorâmica Económico - Social da Indústria Nacional da Cortiça, Ontem-Hoje-Amanhã. Lisboa: Edição do Gabinete de Estudos de Divulgação Económica, social e Turística.

- Carretero M. P., Sanchez O. & González M. R., 1996. Tipificación edáfica de los alcornocales gaditanos (Parque de los Alcornocales). En: Comunicaciones al IV Congreso de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Lérida. pp 327-332.
- Carvalho, A. 1996. Madeiras Portuguesas. Estrutura anatómica, propriedades, utilizações. Vol. I. Inst. Florestal, Lisboa. Science, 33 (8): 2087-2093.
- Catry F.X., Rego F, Moreira F., Fernandes P.M., Pausas J.G., 2012. Post-fire tree mortality in mixed forests of central Portugal. *Forest Ecology and Management* 206: 1184–1192.
- FWT, 2019. Compagne d'exploitation du liège de la forêt domaniale de Tagdempt, 2p
- CFWT, 2016. Monographie de la wilaya de Tiaret, 40p
- CWFT, 2015. La Forêt de Tagdempt entre passé et présent, 10p.
- CFWT, 2014. Etat des forêts de la wilaya de Tiaret , 25p.
- CFWT, 2013. Monographie de la wilaya de Tiaret, 70p.
- CFWT, 1995. La forêt domaniale de Tagdempt passé et perspectives, 14p.
- Chedad O., 2016- Contribution à l'étude de la qualité du liège de la suberaie de Tagdempt (Wilaya de Tiaret). Mém. Master. Département des Ressources forestiers-Univ-Tlemcen, 85p.
- Chorana A., 2021. Etude et élaboration de la carte de qualité du liège de la région Nord-Ouest d'Algérie. Thèse. Doct. LMD. Département des ressources forestières. Fac. SNV-STU. Univ.Tlemcen. 261p.
- CICYTEX .2015. Guide des bonnes pratiques en matière de détermination de la qualité du liège et récolte de liège avec des nouvelles technologies [Guide to good practices in cork quality determination and cork harvesting with new technologies]. [WWW document] URL <http://cicytex.juntaex.es/descargas/descargar.php?id=265>
- Collignon B., 1986.- Hydrologie appliqué des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen (Algérie), Tome 1. Mémoire de Doctorat nouveau régime, en hydrogéologie, Univ. D'Avignon.
- Cork Quality Council, 2019 . Cork Quality Council Reveals Results of Annual Natural Cork Audit. WBM , 3p.
- Costa, R. A. R., 2019 . Chemical composition of cork, phloem and xylem of *Quercus suber* L. from different provenances. Lisboa: ISA , 63 p.
- Cruz M.G., Butler B.W., Alexander M.E., 2006. Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part II: model evaluation. *Int. J. Wildland Fire* 15, 61–72.
- Daget P .H. ., 1977. Les bioclimats méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation vegetacio. 34 (1). pp.1-20.
- DE Martonne E., 1926. Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité. *La météo.* 449-459 .
- Debrach J., 1953. Notes sur les climats du Maroc occidental. *Maroc médical*, 32 (342) : 1122-1134.
- Dehane B., Bouhraoua R.T., Hamani F.Z., Belhoucine L., (2013). La filière liège entre passé et présent. *forêt méditerranéenne* n° 35, 1-10.
- Dehane B.. 2012. Incidence de l'état sanitaire du chêne liège sur les accroissements annuels et la qualité du liège de deux suberaies oranaises : M'Sila (w.Oran) et Zariéffet (w.Tlemcen). Thèse. Doct. Dept. Forest. Fac.Sci.. Univ.Tlemcen. 293 p.
- Dehane B., 2006. Incidences des facteurs écologiques sur les accroissements annuels et la qualité du liège de quelques suberaies du nord-ouest algérien. Thèse. Mag. Dept. Forest. Fac.Sci., Univ.Tlemcen , 129 p.
- Dejaegere C., 2005. Incidence des incendies répétés sur les suberaies varoises. Rapport de stage de Technicien Supérieur de gestion forestière, 32 p.
- Devesa J. A., 1984. Los bosques de *Quercus*, *Abies* y *Cedrus* en Andalucía Occidental y el NW de Marruecos. *Bol. Inst. Hisp.-Arabe de Cultura* 1: 51-58.
- Devesa, J. A., 1984. Los bosques de *Quercus*, *Abies* y *Cedrus* en Andalucía Occidental y el NW de Marruecos. *Bol. Inst. Hisp.-Arabe de Cultura* 1: 51-58.

- DGF, 2021. Bilan de la production nationale de liège.1p.
- DGF,2014. Direction générale des forêts Situation des forêts algériennes vis-à-vis les incendies et les feux de forêts, Alger 62
- Dubois C.1990. Comportement du liège face à l'incendie, Mémoire E.N.I.T.E.F. Banyuls-sur-Mer, Laboratoire Arago (Université Paris VI), 97p.
- EFFIS, 2021. Current Statistics Portal. 15p.
- Emberger L., 1939 : Aperçu général sur la végétation du Maroc .Soc.Sci .Nat. Maroc, 40 (157). Neroff. Geobol. Lost. Ribel, 14 Heft, Zurich, Suisse.
- Emberger L.,(1942).Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographique.Bull.Soc.Hist.Nat.Toulouse.77, pp.97-124.
- Fortes M. A., Rosa M.E. & Pereira H., 2004. A Cortiça. IST Press. Lisboa. 259 p.
- Fortes M.A; 2004 : A cortiça, revista mensal editada pelo Insituto de Produtos-Portugal.
- François Pimont, Jean-Luc Dupuy, Eric Rigolot, Yvon Duché,2012, Les effets du passage d'un feu dans un peuplement arboré : synthèse des connaissances et applications pour le gestionnaire forestier méditerranéen. RDV techniques n°35 , 14p.
- Frejaville T., Curt T., Carcaillet C.,, 2013. Bark flammability as a fire-response trait for subalpine trees. Front. Plant Sci. 4 (466): 1-8.
- Frihi M.H., 2025. Etude des indices technologiques du liège de quelques subéraies oranaises en relation avec les changements environnementaux. Thèse. Doct. LMD. Département des ressources forestières. Fac. SNV-STU. Univ.Tlemcen . 207p.
- Gil L., 1998, Cortiça – Produção, Tecnologia e Aplicação, Ed INETI, Lisboa.
- Goncalves F., Correia P., Silva S. P., & Almeida-Aguiar C., 2016. Evaluation of antimicrobial properties of cork. FEMS Microbiology Letters, 363(3): fmv231.doi:10.1093/femsle/ fmv231
- Gonzalez Hernandez et al., 2000. Las densidades volumétricas y superficial antes y después del hervido y su aplicación al cálculo de las expansiones en volumen, superficie y alibre del corcho. In: Congreso Mundial do Sobreiro e da Cortiça (ed.). Actas del Congreso Mundial do Sobreiro e da Cortiça, Lisbon, Jul 19–21: 382–388 .
- González Hernández F.; González-Adrados, J. R.; García De Ceca, J. L.; García Arcal, J.; González hernández, M.; 2000. Las densidades volumétricas y superficial antes y después del hervido y su aplicación al cálculo de las expansiones en volumen, superficie y calibre del corcho. World Cork Congress, Lisboa.
- .González-Adrados J.R., González-Hernández F., Garcia De Ceca, J.L., 2000.Variabilidad de los parametros característicos del corcho en plancha con la alturade extracción. IX Congresso forestal Esapagnol, 1-6.
- González-Adrados, J. R.; García De Ceca, J. L.; González-Hernández, F.; 2008. Evaluación de anomalías y clasificación del corcho. En S. Zapata (ed.): Alcornocales e industria corchera: hoy, ayer y mañana. Cork oak woodlands and cork industry: present, past and future. Museu del Suro de Palafrugell. Girona .
- Gosuber, 2020, Miniguía nuevas aplicaciones del corcho. Grupo Operativo GOSUBER , 66p.Pinard M.A., Huffman J., (1997). Fire resistance and bark properties of trees in a seasonally dry forest in eastern Bolivia. J. Trop. Ecol. 13, 727–740.
- Graça J. & H. Pereira. 1993. Formação e desenvolvimento da primeira periderme no sobreiro. Relações com a cortiça amadia. ISA/DEF, Lisboa.
- Graça J., Pereira H. 2004. The periderm development in Quercus suber. IAWA Journal, Vol. 25 (3): 325 – 335.
- ICNF, 2013. Inventário Florestal Nacional, IFN6. Resultados preliminares.
- IML,2021. Institut Méditerranéen du Liège, « Aire de répartition et production de liège ».
- IML,2021. Institut Méditerranéen du Liège, « Aire de répartition et production de liège ».

- IPROCOR,2006. Recomendaciones para la saca del corcho. Folletos informativos sobre el alcornoque y el corcho. Serie Selvicultura del Alcornocal no3. Ed. Instituto delCorcho, la Madera y el Carbón Vegetal. Mérida. Badajoz.
- IPROCOR1999, Manuel didactique du leveur et de l'ouvrier spécialisé dans les travaux d'exploitation du chêne-liège (v 63), Projet Léosuber, Mérida, Junta de Extremadura, Consejería de Educación, Ciencia y Tecnología, 199p.
- Jean-Baptiste de Vilmorin, 2003.Histoires d'arbres, éditions Jean-Paul Gisserot, p. 55.
- Jordán, A., Ruiz, M. A., Gómez I. A. & Limón F.,1998. Principales tipos de suelos asociados al bosque de Quercus sp. y brezal en el parque Natural Los Alcornocales (Cádiz-Málaga). Almoraima , 19: 231-240.
- Jove P.,2015. Catracterització del suro i subproductes de la industria surera.Valoració d'aquests com a biosorbents d'hidrocarburs aromàtics policíclics en aigües d'escorrentia. Universitat de Girona. Tesi doctoral.
- Keeley J.E. & Pausas J.G. 2022. Evolutionary ecology of fire. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 53: 203-225
- Lamey A., 1893. Le chêne-liège : sa culture et son exploitation, Paris, Berger-Levrault éditeur, 289 p.
- Lebriton A.S., 2020, Feux de forêt les prévenir et s'en protéger. Dossier de presse,34p.
- M'hirit O. et Maghnouj M., 1994.Stratégie de conservation des ressources forestières au Maroc. Les ressources phytogénétiques et développement durable, p 123-138. Actes éditions. Rabat, Maroc.
- Madrigal J, Hernando C, Guijarro M, Díez C, Marino E, De Castro AJ (2009) Evaluation of forest fuel flammability and combustion properties with an adapted mass loss calorimeter device. *J Fire Sci* 27:323-342.
- Madrigal J., Souto-García J., Calama R., Guijarro M., Picos J., Hernando C., 2019. Resistance of *Pinus pinea* L. bark to fire. *Int. J. Wildland Fire* 28 (5), 342–353.
- Messaoudène M., Metna, B., 2010. Etude de la qualité du liège des subéraies orientales de Tizi-Ouzou.. *Integrated Protection in Oak Forests. IOBC/WPRS Bull.* Vol.57,pp.29-36.
- Montero G & Cañellas I., 1999: Manual de reforestación del alcornoque (*Quercus suber* L.). Mapa-INIA,103p.
- Montero G., Cañellas I., 2003. Selvicultura de los Alcornocales en España. *Silva*
- Natividade J.V.(1956). Subericulture. Ecole Nationale des Eaux et Forêts. Nancy, 302.
- Nguyen T; Zavarin E.; Barrall II, E. M.,1981, Thermal analysis of lignocellulosic materials. Part I. Unmodified materials. *J. Macromol. Sci.-Rev. Macromol. Chem. C* 20: 1-65.
- Odhiambo p., B., Meincken, M., Seifert, T., (2014). The protective role of bark against fire damage: a comparative study on selected introduced and indigenous tree species in the Western Cape, South Africa. *Trees* 28 (2), 555–565 .
- Oliveira G et Costa A., 2012. How resilient is *Quercus suber* L. to cork harvesting? A review and identification of knowledge gaps. *For. Ecol. Manage.* (270) : 257-272.
- Olivella M.A., Sen, A., Pereira, H., Villaescusa, I., and Fiol, N., 2011a, Sorptionperformance of *Quercus cerris* with polycyclic aromatic hydrocarbons and toxicity testing. *Bioresources*, 3 : 3363–3375.
- Pintor A.M.A., Ferreira C.I.A., Pereira J.C., Correia P., Silva S.P., Vilar V.J.P., Botelho C.M.S., Boaventura R.A.R., 2012. Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: a review. *Water Research*, 46: 3152–3166.
- Pausas et Moreira, 2012. Tanned or Burned: The Role of Fire in Shaping PhysicalSeed Dormancy. *PLoS ONE* 7(12): e51523. doi:10.1371/journal.pone.0051523
- Pausas J., 1997. Resprouting of *Quercus suber* in NE Spain after fire. *Journal of Vegetation Science* 8, 703–706.

- Pausas J.G., Pereira J.S, Aronson, J., (2009). The tree. In: Aronson J, Pereira JS, Pausas JG, editors. Cork oak woodlands on the edge: ecology, adaptive management, and restoration. Washington DC: Island Press. 11–23.
- Pausas, J.G. 2004. La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo. In: Vallejo, R. (ed.). Avances en el estudio de la gestión del monte mediterráneo. pp. 47-64.
- Pereira H., 2015. “Rationale of cork” *Forest Resources* 10(3), 6207-6229.
- Pereira H., 2007. Cork: biology, processing and uses. Amsterdam: Elsevier Publishing. 336 p.
- Pereira H., 1992. The thermochemical degradation of cork. *Wood Sci. Technol.* 26:259-269.
- Pereira H., 1988. Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Science and Technology*, 22, 211 – 218.
- Pereira H., 1982. Studies on the chemical composition of virgin and reproduction cork of *Quercus suber* L. *Anais do-instituto superior de Agronomia (Lisboa)*. Vol. XL : 17-25.
- Pereira, H.; Rosa, M. E.; Fortes, M. A. 1987: The cellular structure of cork from *Quercus suber* L. *IAWA Bull.n.s.* 8:213-218
- Pimont F., Jean-luc Dupuy J.L. Rigolot E., 2012. Les effets du passage d’un feu dans un peuplement arboré : synthèse des connaissances et applications pour le gestionnaire forestier méditerranéen. *Rendez-vous techniques* n°25, 2-15.
- Pinard M.A., Huffman J., 1997. Fire resistance and bark properties of trees in a seasonally dry forest in eastern Bolivia. *J. Trop. Ecol.* 13, 727–740.
- Quezel P., 2000. Réflexions sur l’évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen. *Ibis Press, Paris*, 117 p.
- Quezel P., 1976. Les forêts du pourtour méditerranéen : Ecologie, conservation et aménagement. UNESCO. Note technique du MAB, 2 : 9-33.
- Rivas-Martinez S., 1981. Les étages bioclimatiques de la Péninsule Ibérique, *Anal.Gard. Bot. Madrid.* 37 (2). PP : 251-268.
- Roger D. Launius et Dennis R. Jenkins, 2001. Coming Home: Reentry and Recovery from Space (NASA SP-2011-593, NASA. Liege 24, 2024. Propriétés acoustiques : La microstructure du liège. 10p.
- Rosa M. E.; Fortes M. A. ; 1988. Thermogravimetric analysis of cork. *J. Mat. Sci. Letters* 7:1064-1065.
- Rosa M.E., Pereira H. and Fortes A.M., 1990. Effects of hot water treatment on the
- Rosa, M. E., Pereira, H., and Fortes, M. A., (1990). “Effects of water treatment on the structure and properties of cork,” *Wood Fiber Sci.* 22(2), 149-164.
- Rovira J., 2018. Guía de recomendaciones y medidas de adaptación al cambio climático en la gestión de *Quercus suber*. Centre de la Propietat Forestal-Barcelona, 137p.
- Rundel PW, 1973. The relationship between basal fire scars and crown damage in Giant Sequoia. *Ecology* 54: 210–213
- Saccardy L., 1937. Notes sur le chêne liège et le liège en Algérie. *Bull. de la Science de Recherche Forestières du Nord de l’Afrique*, 2 : 271-360.
- Sampaio, J. S. 1985. Comércio Externo da Cortiça e as Actividades a Montante. Lisboa: Instituto dos Produtos Florestais, Lisboa,.
- Santiago Beltran R., Benito Lopez J., Sánchez-Gonzalez, M., Gonzalez-Adrados, J.R., 2004. Guía de calidad del corcho [Guide on cork quality]. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Madrid.
- Santos C.O., 2000. O Livro da Cortiça. Edição do Autor, 126p.
- Saoudi I., 2016. Contribution à l’étude du comportement de chêne liège après incendie dans la forêt de Zariéffet. *Memoire master. Dept des Ressources Forestières. Fac SNV-SU. Tlemcen.-Algérie.* 96p.
- Seltzer P., 1946. Le climat de l’Algérie. La Typo-Litho, Alger, 249p.
- Silva S.P.; Sabino M.A.; Fernandes E.M.; Correlo V.M.; Boesel L.F.; Reis R.L, Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews* : 50 (6).

- structure and compressive properties of cork, Wood and Fiber Sciences. 22:149-164.
- Taferka S., 2008 : Libérer notre liège des réseaux mafieux. Jour. « Le jour d'Algérie »,2p.
- Tempere, S.; Cuzange, E.; Malak, J.; Bougeant, J.C.; De Revel, G.; Sicard, G., 2011.The Training Level of Experts Influences their Detection Thresholds for Key Wine Compounds. Chemosens. Percept., 4, 99–115.
- Tinthoin R. ,1948. Les aspects phy 65 nais.L. Fouquet,Oran,639 p.
- U 'beda X., Pereira P., Martin D.À 65 emperature effects on Total Carbon, Total Nitrogen, C/N and release of water soluble phosphorous on litter from two Quercus suber trees located in different plots of Iberian Peninsula. Second International Meeting of Fire Effects on Soil Properties. Marmaris, Turkey.
- UNAC,2013, Guia de Comercialização de Cortiça no Campo. Lisboa,34p.
- Vaz M.F. and Fortes M.A., 1998. Friction properties of cork. Journal of Materials
- Winter, T.C., 1995. Recent advances in understanding the interaction of groundwater and surface water. Rev. Geophys. 30, 985–994.
- Zhan Z.; Zhang Z.; Zhou D. , 2011. Flammability characterization of grassland species of Songhua Jiang-Nen Jian Plain (China) using thermal analysis. Fire safety Journal, Amsterdam, v. 46, n.5, p. 283-288.

ANNEXE

Pro	Arbres	Topo	Epaisseur	Circonférence	Haut ecor	Hauteur	ASPECT
TA	1	Bas fond	30,42	90	2	14	BSOF
TA	2	Bas fond	34,02	62	1,4	12	SBTV
TA	3	Bas fond	34,72	70	1,35	13	TJOLS; T; JS
TA	4	Bas fond	24,53	132	1,55	11	TJOLS; T; JS
TA	5	Bas fond	27	75	1,3	10	BEV
TA	6	Bas fond	23,53	71	1,7	9	LOF
TA	7	Bas fond	44,64	113	1,35	12	TJOLS; T; JS
TA	8	Bas fond	22,53	119	1,7	11	LOF
TA	9	Bas fond	28,53	88	1,6	13	LOF
TA	10	Bas fond	30,53	133	2,1	10	BSOF
TA	1	Pente	12	133	1,4	12	TJOLS; T; JS
TA	2	Pente	23,89	73	1,5	11	LOF
TA	3	Pente	27,49	114	1,25	13	BEV
TA	4	Pente	28,19	95	1,2	9	BEV
TA	5	Pente	18	101	1,64	8	TJOLS; T; JS
TA	6	Pente	14	90	1,48	9	TJOLS; T; JS
TA	7	Pente	17	155	1,3	8	LOF
TA	8	Pente	28,44	101	1,3	7	BEV
TA	9	Pente	16	115	2,5	8	LOF
TA	10	Pente	29,44	65	1,5	9	BSOF
TA	1	Crête	22	92	1,3	9	LOF
TA	2	Crête	25,6	102	1,3	8	BEV
TA	3	Crête	26,3	96	1,35	9	BEV
TA	4	Crête	16	89	1,2	7	LOF
TA	5	Crête	12	109	1,65	6	TJOLS; T; JS
TA	6	Crête	15	78	1,9	7	TJOLS; T; JS
TA	7	Crête	13	80	1,6	9	LOF
TA	8	Crête	14	99	1,35	9	LOF
TA	9	Crête	20	87	1,1	12	LOF
TA	10	Crête	22	1,12	1,2	12	LOF