

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

Kecir Mohamed Tahar

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Foresterie (Aménagement et Gestion des Forêts)

Thème

Modélisation prédictive pour le recpeage des arbres post-incendie (cas de la
subéraie de Zariéffet)

Soutenu le 06/06/ 2024 devant le jury composé de :

Président : Mr Kholkhal D.	MCB	Université de Tlemcen
Encadreur : Mr Dehane B.	Prof	Université de Tlemcen
Examineur : Mr Medjahdi B.	Prof	Université de Tlemcen

Année universitaire 2023/2024

ملخص: النمذجة التنبؤية لقطع الأشجار بعد الحريق (حالة غابة زاريفت للفلين)

الحريق الذي اندلع في 24 أكتوبر 2022 على جزء من غابة زاريفت للفلين كان موضوع تحليل لحالة أشجاره المتبقية بعد عام و5 أشهر. تم أخذ نموذجين في الاعتبار في الميدان: 70 شجرة متبقية بتيجان مملوءة و90 شجرة أخرى ذات تيجان فارغة. في إطار التفسير العلمي للنظام الغابي بعد الحريق، اقترحنا نموذجين رياضيين تنبؤيين عن طريق الانحدار الخطي المتعدد من أجل تحديد مستقبل الأشجار المتبقية وفقا لبعض المتغيرات التفسيرية النموذجية لبلوط الفلين في حالة الإنتاج (الارتفاع، محيط الجذع، سمك الفلين وحالة الضرر على الجذع والتوصيل الكهربائي للقاعدة). أظهرت النتائج أنه بالنسبة للأشجار ذوي التيجان الممتلئة، أخذ النموذج المعتمد في الاعتبار ثلاثة متغيرات توضيحية، وهي التوصيل الكهربائي وحالة الضرر على الجذع وارتفاع الشجرة $Y = 56.01 - 6.58H - 6.11ET + 1.93CE$ من بين المتغيرات التفسيرية، يظل المتغير التوصيل الكهربائي الأكثر تأثيرا. وفيما يتعلق بالأشجار ذات التيجان الفارغة، سلط النموذج الرياضي الضوء على أربعة متغيرات توضيحية، وهي حالة الضرر على الجذع، سمك الفلين، ارتفاع الشجرة والتوصيل الكهربائي. $Y = -78.37 - 9.49H + 9.19ET + 6.77EL - 1.14CE$. ومن بين المتغيرات التفسيرية، تظل متغيرات سمك الفلين و التوصيل الكهربائي الأكثر تأثيرا. لا ينبغي أن يعتمد قرار تقطيع الأشجار المحروقة أو الحفاظ عليها على الظهور الشكلي للأوراق بعد الحريق فقط. من الأنسب تحفص أعضاء الشجرة الأخرى بعناية تامة.

الكلمات المفتاحية: غابة زاريفت، النار، التاج، النموذج الرياضي، التقطيع.

Résumé : Modélisation prédictive pour le recépage des arbres post-incendie (cas de la subéraie Zariéffet)

L'incendie qui s'est déclenché le 24 Octobre 2022 sur une partie de la subéraie de Zariéffet a fait l'objet d'une analyse de l'état de ses arbres résiduels après une année et 5 mois. Deux configurations ont été prises en compte sur le terrain: 70 arbres rescapés aux cimes remplies et 90 autres aux couronnes altérées. Dans le cadre de la gestion scientifique de la subéraie incendiée, nous avons proposé deux modèles mathématiques prédictifs par régression linéaire multiple afin de trancher sur l'avenir des sujets résiduels en fonction de certaines variables explicatives typiques au chêne liège en pleine production (Hauteur, circonférence, épaisseur du liège, état des dommages sur le tronc et la conductivité électrique du liber). Les résultats ont montré que pour les sujets aux cimes remplies, le modèle validé a pris en considération trois variables explicatives à savoir la conductivité électrique (CE), l'état des dommages sur le tronc (ET) et la hauteur de l'arbre (H) : Y (Cime remplie) = $56,01 - 6,58H - 6,11ET + 1,93CE$. Parmi les variables explicatives, la variable CE demeure la plus influente. En ce qui concerne les arbres aux cimes altérées, le modèle mathématique a mis en lumière quatre variables explicatives, l'état des dommages sur le tronc (ED), l'épaisseur du liège (EL), la conductivité électrique (EC) et la hauteur de l'arbre (H) : Y (Cime altérée) = $-78,37 - 9,49H + 9,19ET + 6,77EL - 1,14CE$. Parmi les variables explicatives, les variables ET et EL demeurent les plus influentes. La décision de receper ou conserver les arbres incendiés ne doit pas se confier uniquement à l'apparition en masse des rejets pos-incendie. Il serait plus approprié de contourner minutieusement les autres organes de l'arbre.

Mots clé : Zariéffet, incendie, cime, modèle mathématique, recepage.

Abstract : Predictive modeling for post-fire tree coppicing (case of the Zariéffet cork grove)

The fire which broke out on October 24, 2022 on part of the Zariéffet cork grove was the subject of an analysis of the state of its residual trees after one year and 5 months. Two configurations were taken into account in the field: 70 rescued trees with filled crowns and 90 others with altered houppiers. As part of the scientific management of the burned cork grove, we proposed two predictive mathematical models by multiple linear regression in order to decide on the future of the residual subjects according to certain explanatory variables typical of cork oak in full production (height, circumference, thickness of the cork, state of damage on the trunk and the electrical conductivity of the bast). The results showed that for subjects with filled crowns, the validated model took into consideration three explanatory variables, namely electrical conductivity (CE), the state of damage on the trunk (ET) and the height of the tree (H): Y (Filled crown) = $56.01 - 6.58H - 6.11ET + 1.93CE$. Among the explanatory variables, the CE variable remains the most influential. Concerning trees with altered crowns, the mathematical model highlighted four explanatory variables, the state of damage on the trunk (ED), the thickness of the cork (EL), the electrical conductivity (CE) and the height of the tree (H): Y (altered crown) = $-78.37 - 9.49H + 9.19ET + 6.77EL - 1.14CE$. Among the explanatory variables, the ET and EL variables remain the most influential. The decision to coppice or preserve burned trees should not be based solely on the appearance of post-fire rejects. It would be more appropriate to carefully bypass the other organs of the tree.

Key words: Zariéffet, fire, crown, mathematical model, coppicing.

REMERCIEMENTS

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

*Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur, Professeur **Dehane Belkheir**, pour son soutien indéfectible, son écoute bienveillante et sa disponibilité inébranlable tout au long de l'accomplissement de ce travail. Sa précieuse inspiration, son assistance inestimable et le temps précieux qu'il a gracieusement investi dans ce projet méritent toute ma reconnaissance.*

*Je remercie également **Mr. Kholkhal Djamel**, Maître de Conférences « B » à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant mon jury de mémoire de master.*

*Je tiens également à remercier profondément **Mr. Medjahdi Boumediene**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir généreusement accepté de consacrer son temps à l'examen de ce travail.*

A tous, Merci.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

_À mes très chers parents, pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours. Que Dieu vous protège.

_À mes sœurs, que Dieu vous garde. Je vous aime et vous souhaite une vie remplie de succès et d'accomplissements.

_À tout ma famille.

_À tous mes amis, particulièrement à Salah, Abdelkrim, Abdelbasset, Nedjemo ainsi qu'à tous mes collègues de la promotion Master Foresterie.

KECIR Mohamed Tahar

Liste des figures

Figure	Page
Figure 1. Aire de répartition du chêne liège dans le monde	3
Figure 2. Aspects botaniques du chêne liège	4
Figure 3. Sol de chêne liège à base de grès durcit	5
Figure 4. Triangle du feu	6
Figure 5. Rôle de la topographie et du vent dans la propagation de l'incendie	6
Figure 6. Les quatre modes de propagation d'un feu	7
Figure 7. Modes de propagation et type de feu en forêt	8
Figure 8. Quelques statistiques des feux de forêts dans certains pays méditerranéens	8
Figure 9. Chronologie des incendies de forêts en Algérie de 1877 à 2020	9
Figure 10. Causes des feux de forêts méditerranéennes	10
Figure 11. Taux de régénération post incendie selon l'épaisseur du liège	11
Figure 12. Carte de situation de la forêt domaniale de Zariéffet	13
Figure 13. Carte géologique de la forêt de Zariéffet	14
Figure 14. Carte hydrographique du massif forestier Hafir-Zariéffet	15
Figure 15. Variations annuelles de la pluviométrie pour la période	16
Figure 16. Variations saisonnières des précipitations	17
Figure 17. Variations annuelles des températures	17
Figure 18. Écart à la température moyenne annuelle	18
Figure 19. Variabilité de l'indice de sécheresse estivale pour la période	19
Figure 20. Diagrammes Ombrothermiques pour la période ancienne et nouvelle	20
Figure 21 : Climagramme d'Emberger du climat de la zone d'étude	20
Figure 22. La récolte du liège à Hafir pendant de la campagne de l'année 2019	22
Figure 23. Fluctuation périodique et annuelle de la production du liège à Zariéffet	22
Figure 24. Occurrence des feux dans la subéraie de Zariéffet	23
Figure 25. Séquence de flammes photographiée durant l'incendie du 24 Octobre 2022	25
Figure 26. Vue d'ensemble de la zone brûlée par l'incendie de 2022	26
Figure 27. Les catégories d'arbres résiduels issues du feu de 2022 (a : cime altérée ; b : cime remplie)	27
Figure 28. Prise de mesures différente sur le tronc flambé (a: Jaugeur d'épaisseur; b: conductivité électrique).	28
Figure 29. Technique numérique de la mesure de la hauteur totale de l'arbre échantillon	28
Figure 30. Dénivelée cumulée moyenne h/L	29
Figure 31. Modèle graphique pour caractériser les liens de causalité entre les variables explicatives et la variable dépendante	31
Figure 32. Représentation cartographique de la zone incendiée ainsi que les arbres échantillon	36
Figure 33. Distribution des variables explicatives (hauteur et diamètre) selon leurs classes respectives	37
Figure 34. Distribution des variables explicatives (épaisseur et hauteur d'écorçage) selon leurs classes respectives	37
Figure 35. Distribution des variables explicatives (état des dommages conductivité électrique) selon leurs classes respectives	38
Figure 36. Les profils de dénivelée suivi par l'incendie	39
Figure 37. Profil altimétrique de la dénivelée cumulée par rapport au cinq itinéraires	41

Figure 38. Analyse canonique de correspondance (ACC) entre topographie et l'aspect des cimes	42
Figure 39. Schéma explicatif de la propagation de l'incendie du 22 octobre à Zariéffet	44
Figure 40. Courbes de régression linéaire simple des valeurs explicatives en fonction de l'état de la cime altérée	45
Figure 41. Courbes de régression linéaire simple des valeurs explicatives en fonction de l'état de la cime remplie	46
Figure 42. Influence normalisée des variables explicatives (cime altérée)	49
Figure 43. Influence normalisée des variables explicatives (cime remplie)	49
Figure 44. Modèle de prédiction pour le recépage ou la conservation des sujets à cimes altérées après incendie	52
Figure 45. Modèle de prédiction pour le recépage ou la conservation des sujets à cimes remplies après incendie	52

Liste des Tableaux

Tableau	Page
Tableau 1. Situation géographique de la forêt selon les coordonnées Lambert	13
Tableau 2. Caractéristiques de la station de référence et périodes d'observation	15
Tableau 3. Indice de continentalité	18
Tableau 4. Classification du relief en fonction de la dénivelée cumulée moyenne	30
Tableau 5. Les variables explicatives prises en considération et leurs classes respectives	34
Tableau 6. Mesures topographiques des itinéraires entrepris	40
Tableau 7. Statistiques de la régression des sujets à cime altérée	46
Tableau 8. Statistiques de la régression des sujets à cime remplie	47
Tableau 9. Analyse de variance Anova ^a des cimes altérées	47
Tableau 10. Analyse de variance Anova ^a des cimes remplies	47
Tableau 11. Paramètres du modèle (cime altérée)	48
Tableau 12. Paramètres du modèle (cime remplie)	48
Tableau 13. Statistique de multi-colinéarité (cime altérée)	50
Tableau 14. Statistique de multi-colinéarité (cime remplie)	50
Tableau 15. Paramètres statistiques des coefficients non standardisés et standardisés (cime altérée)	51
Tableau 16. Paramètres statistiques des coefficients non standardisés et standardisés (cime remplie)	51

Liste des abréviations

- ACC : Analyse Canonique de Correspondance.
- APCOR : Association Portugaise du liège.
- C° : Degré Celsius.
- C.O.I.T : Conservation d'Oran Inspection de Tlemcen.
- C.V : Coefficient de variation.
- C. F. W.T. : Conservation des forêts de la wilaya de Tlemcen
- CEE ; Communauté Économique Européenne
- D.G.F : Direction Générale des Forêts.
- EEA : European Environment Agency.
- EUFORGEN : : European Forest Genetic.
- IML : Institut Méditerranéen du Liège.
- Ha : Hectare.
- MTPL : Ministère des Travaux publics.
- PNT : Parc National de Tlemcen.
- qx : Quintaux

Sommaire	
Introduction générale.....	1
Chapitre I Le chêne liège et les incendies	
I.1- Généralités sur le chêne liège et le liège.....	3
I.1.1- Répartition spatiale.....	3
I.1.2- Origine et systématique.....	3
I.1.3- Caractères botaniques.....	3
I.1.4- Caractères écologiques.....	4
I.1.4.1- Exigences climatiques.....	4
I.1.4.2- Exigence Édaphiques.....	5
I.2- Le chêne liège face à l'incendie.....	5
I.2.1- Pyrologie forestière.....	5
I.2.2- Statistiques des incendies en forêts.....	8
I.2.3- Les causes d'incendies.....	9
I.2.4- Impact du feu sur le chêne liège et le liège.....	10
Chapitre II Étude du Milieu	
II.1- Présentation de la zone d'étude.....	13
II.1.1- Situation géographique.....	13
II.1.2- Géologie et Pédologie.....	14
II.1.3- Hydrologie.....	14
II.2- Analyse climatique.....	15
II.2.1- Données climatiques.....	16
II.2.1.1- Variabilité annuelle des précipitations.....	16
II.2.1.2- Variabilité saisonnière des précipitations.....	16
II.2.1.3- Variabilité annuelle des températures.....	17
II.2.2- Synthèse climatique.....	18
II.2.2.1- Amplitude thermique extrême moyenne ou indice de continentalité.....	18
II.2.2.2- Indice de sécheresse estivale (Is).....	19
II.2.2.3- Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausson.....	19
II.2.2.4- Quotient pluviothermique et climagramme d'Emberger.....	20
II.3- Végétation.....	21
II.4- La production du liège.....	21
II.5- Les incendies.....	22
Chapitre III Matériels et méthodes	
III.1- Problématique.....	25
III.2- Choix de la zone d'étude.....	25

III.3- Échantillonnage et collecte des données.....	26
III.4- Analyse des facteurs influençant le comportement du feu.....	29
III.4.1- La dénivelé moyenne cumulée (DCM).....	29
III.5- Modélisation mathématique.....	30
III.5.1- La régression linéaire multiple.....	30
III.5.2- Modélisation graphique.....	31
III.5.3- Démarche statistique.....	31
III.5.4- Problématique du modèle.....	33
III.6- Protocole expérimental réalisé sur le terrain.....	34
III.7- Analyse statistique.....	34
Chapitre IV Résultat et discussion	
IV.1- Cartographie de la zone incendiée.....	36
IV.2- Caractérisation des arbres échantillons.....	36
IV.2.1- Les variables de morphologie.....	36
IV.2.3- Les variables d'exploitation.....	37
IV.2.4- Les variables d'état physiologique.....	38
IV.3- Analyse des facteurs de topographie influençant le comportement du feu.....	39
IV.3.1- Les variations longitudinales du relief suivi par l'incendie.....	39
IV.3.2- La dénivelée cumulée moyenne du relief.....	40
IV.3.3- Les variations altitudinales du relief suivi par l'incendie.....	40
IV.3.4- Interprétation statistique.....	42
IV.4- Modélisation mathématique.....	44
IV.4.1- Estimation des coefficients de regression.....	44
IV.4.2- La qualité d'ajustement.....	46
IV.4.3- La significativité globale de la liaison.....	47
IV.4.4- La signification de l'apport marginal de chaque variable.....	48
IV.4.5-Tester la colinéarité entre les variables indépendantes.....	50
IV.4.6- Interprétation et choix du modèle.....	50
IV.4.7- Validation finale du modèle.....	51
IV.4.8- Discussion des deux modèles.....	53
Conclusion générale et perspectives.....	57
Références bibliographiques.....	59

Introduction générale

Les forêts de chênes-lièges (*Quercus suber* L.) sont définies comme l'ensemble des habitats allant des formations boisées ouvertes ressemblant à une savane aux forêts denses (Catry et al., 2012). Selon la nomenclature des types de forêts européennes (EEA, 2007), ces écosystèmes sont inclus dans la classe « forêt de feuillus sempervirents » et dans le type « forêt méditerranéenne de chênes sempervirents ». Ce type de forêt est dominé par les espèces de chênes sclérophylles à feuilles persistantes *Q. suber*, *Q. ilex*, et *Q. coccifera*, constituant la principale formation forestière naturelle de la ceinture végétale méso-méditerranéenne (AEE, 2007).

La caractéristique principale différenciant le chêne liège des autres quercus est son écorce externe formée essentiellement de matière non ligneuse qui est le liège. Cette couche isolante pouvant atteindre jusqu'à 30 cm d'épaisseur, constituée de couches continues de cellules mortes très subérifiées, source de son usage domestique et industriel (Natividade 1956 ; Pausas et al. 2009). L'extraction périodique de cette couche à des fins économiques rend le chêne liège très vulnérable aux incendies de forêt (Pereira, 2007).

Les écosystèmes forestiers à chênes-lièges couvrent près de 2,5 millions d'hectares dans le bassin méditerranéen occidental. On les trouve dans le sud de l'Europe et en Afrique du Nord, de la péninsule ibérique et du Maroc jusqu'à la bordure occidentale de la péninsule italienne dans une forme variée d'adaptation aux conditions écologiques (APCOR, 2009, Aronson et al., 2009). Les chênes-lièges présentent une grande plasticité écologique. Cette espèce est bien adaptée au climat de type méditerranéen, avec des hivers doux et humides et des étés secs et chauds, présent dans les régions plus continentales jusqu'aux zones côtières sous influence méditerranéenne et atlantique.

Les écosystèmes du chêne-liège jouent un rôle écologique, économique et social très important dans plusieurs pays méditerranéens (Pereira et Fonseca 2003 ; Bugalho et al. 2011). Actuellement, le liège est le deuxième produit forestier non ligneux commercialisable le plus important de la Méditerranée occidentale, et les exportations du marché mondial du liège représentent près de 2 milliards de dollars américains par an (Mendes and Graça, 2009 ; APCOR, 2009).

En raison de leur caractère unique, ces écosystèmes sont reconnus comme habitats de haute valeur de conservation, répertoriés dans la directive Européenne « Habitats » : Habitat 6310 – Dehesa à feuilles persistantes *Quercus* spp. et Habitat 9330 – Forêts de *Quercus suber* (CEE, 1992).

La coïncidence temporelle entre l'extraction périodique du liège à des fins économiques et les changements globaux actuels rend le chêne liège très vulnérable à la sécheresse persistance et par conséquent aux incendies de forêt (Pereira, 2007).

La résistance du combustible forestier au feu a été largement étudiée (Moreno and Oechel, 1991 ; Lloret López-Soria, 1993 ; Vesk, 2004). Le chêne liège adopte la même stratégie de résilience que les autres quercus : la régénération post incendie se fait à partir de la souche lorsque les tiges ou les couronnes sont gravement endommagées (Bertrand, 2007). Cependant, le chêne-liège est le seul arbre méditerranéen ayant la capacité de repousser à partir de bourgeons épïcormiques (c'est-à-dire des bourgeons situés sous l'écorce) en hauteur sur l'arbre, une caractéristique partagée avec de nombreuses espèces d'eucalyptus et le pin des Canaries (*Pinus canariensis*) (Pausas et al., 2009).

La réponse physiologique du chêne liège après un incendie se fait rapidement après trois mois, et elle est observée visuellement par l'aspect de sa cime (Silva et Catry , 2006). Cette durée de regeneration de la cime est généralement fonction du niveau de dégâts au niveau du tronc (gravité du feu). À mesure que les dommages ne sont pas cicatrisés, l'arbre dépérit, puis entre dans la case de la mortalité différée (Moreira et al.,2009). Un modèle conceptuel des réponses des arbres végétatifs a été proposé par plusieurs auteurs (Pausas,1997 ; Moreira et al., 2009 ; Catry et al., 2010).

En effet, après un incendie de forêt, un fort impact économique négatif est attendu. Face à son constat amer, le gestionnaire forestier, se trouve obliger de définir les objectifs de gestion et de planifier les actions de restauration en conséquence, soit opérer par recepage généralisé, ou agir cas par cas, selon la gravité des dommages et les paramètres dendrométriques des arbres rescapés.

C'est dans ce cadre que s'insère l'objectif principale du travail, comment agir scientifiquement dans la prise de décision de receper ou conserver les sujets résiduels touchés par la perturbation du feu.

Ce travail est scindé en quatre chapitres :

- Le premier dresse une petite synthèse sur le *Quercus suber* et les incendies en subéraie.
- Le deuxième évoque le milieu physique de la zone d'étude.
- Le troisième explique les méthodes et les techniques employées pour le déroulement du travail sur terrain et au labo.
- En fin le quatrième met en exergue l'ensemble des résultats obtenu ainsi que leur discussion.

Chapitre I
Le chêne liège et les incendies

I.1-Généralités sur le chêne liège et le liège

I.1.1-Répartition spatiale

Les écosystèmes du chêne-liège de *Quercus suber* L. s'étendent des maquis ouverts aux forêts denses et couvrent près de 2,5 millions d'hectares dans le bassin méditerranéen occidental (Pausas et al., 2009). On les trouve dans le sud de l'Europe et dans le nord de l'Afrique, de la péninsule ibérique et du Maroc jusqu'à la bordure occidentale de la péninsule italienne (Catry et al., 2012), se produisant dans une large gamme de conditions écologiques (APCOR, 2009) (Fig.1).

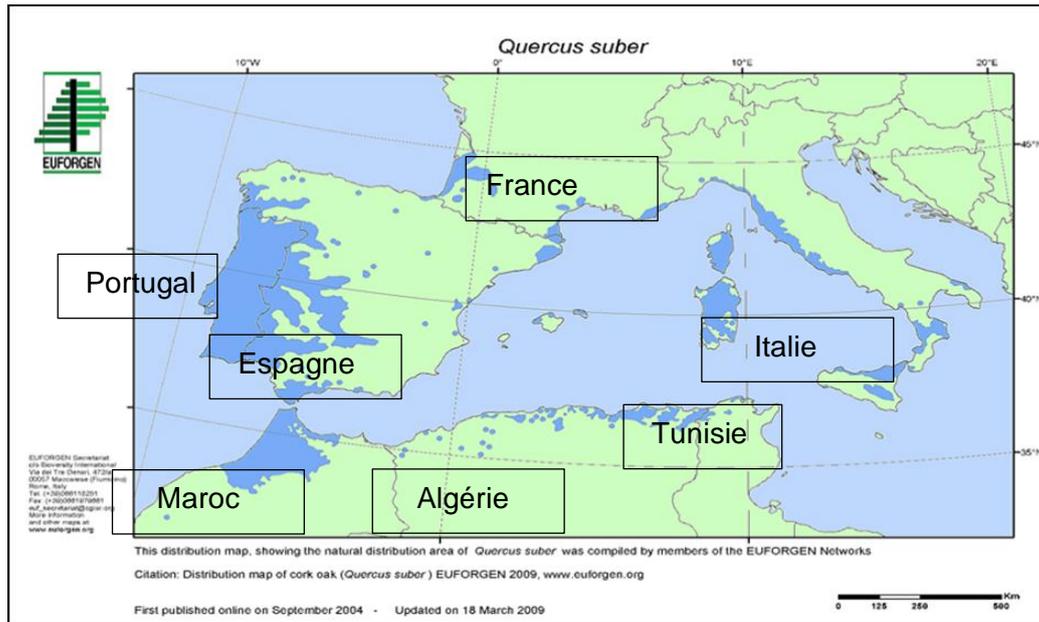


Figure 1. Aire de répartition du chêne liège dans le monde (EUFORGEN, 2009)

En Algérie, le chêne-liège se localise dans le Tell et occupe une superficie potentielle de 400 000 ha, englobant à la fois les subéraies pures et mélangées et les maquis, avec une superficie productive estimée à environ 220 000 hectares (D.G.F., 2004)

L'aire du chêne liège en Algérie est en adéquation avec les fortes précipitations et un état hygrométrique élevé (De Beaucorps, 1956). Il prospère sur une bande littorale de 1200km dont la largeur ne dépasse guère 100 km de la mer (Chiheb et Aouadi, 1998).

Les principales subéraies sont situées essentiellement en zones humides et sub-humides du Nord-Est de l'Algérie formant un block continu > 150 000 ha jusqu'à la frontière Tunisienne, où elles s'étendent de la mer jusqu'à 1200 voire 1500 m d'altitude (Zeraia, 1982). Le reste est disséminé sous forme d'îlots de moindre importance dans les parties centre et ouest du pays. La subéraie se présente donc sous trois principaux faciès : l'occidental montagnard, l'oriental littoral et littoral montagnard (Ben Mechri, 1994).

I.1.2-Origin et systématique

Quercus suber (L) décrit par LINNE en 1753 est rattaché au sous-genre *Cerris* qui regroupe les chênes à cupule chevelue (Bouchafra et Fraval, 1991). Malgré son développement en milieu

anthropisé et difficile, le chêne liège a su s'adapter jusqu'à nos jours (possède les principales caractéristiques des végétaux inféodés au milieu sec) (Bertrand,2007). Le chêne liège appartient à la classification suivante :

- Règne : *Eucaryotae*
- Sous-règne : *Plantae*
- Phylum : *Spermaphyta*
- Sous-phylum : *Angiospermae*
- Classe : *Magnolita*
- Ordre : *Fagales*
- Famille : *Fagaceae*
- Genre : *Quercus*
- Espèce : *suber L.*
- Nom latin : *Quercus suber*

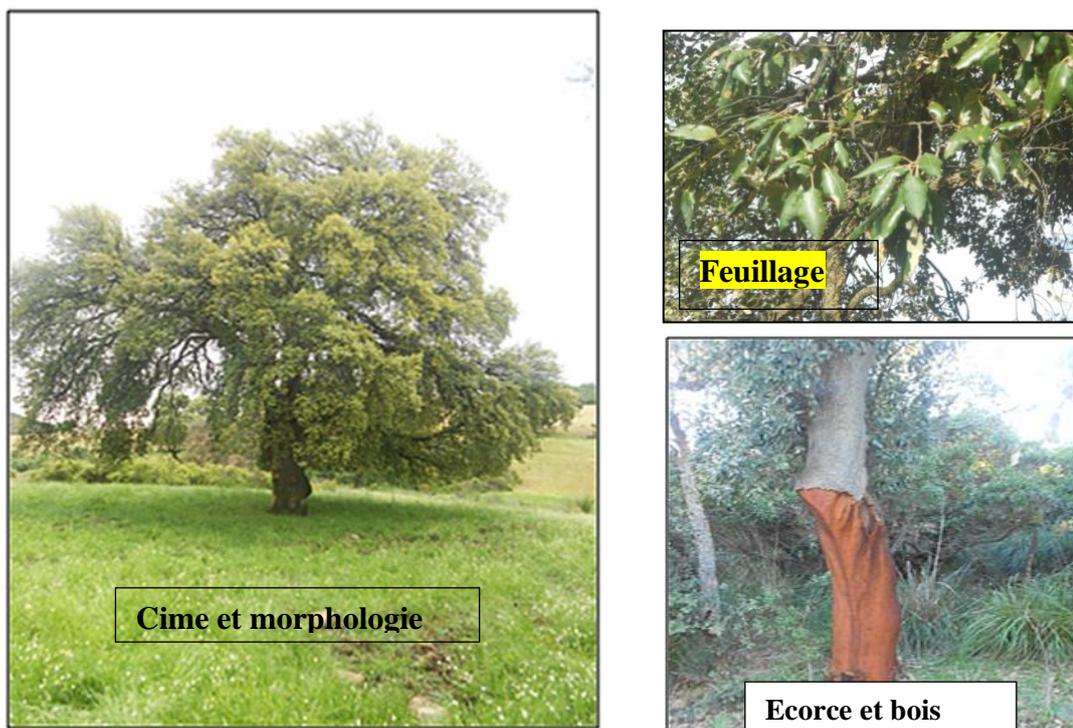
1.1.3-Caractères botaniques

Les caractères botaniques de l'essence présentent une variabilité accrue à cause du climat, de la géographie, de la continentalité et de l'hybridation naturelle. En effet, le genre *Quercus* compte un grand nombre d'espèces, soit environ 550 d'après Warburg et Warburg (1933) et 450 selon Belahbib et *al.* (2005). Les principaux aspects botaniques se résumèrent comme suit :

- ❖ La **morphologie** de chêne liège diffère constamment dans un seul peuplement, des sujets basses de 4m de hauteur aux élancés de 10 à 15 m, rarement 22 mètres (Fig.4).
- ❖ Le **tronc** est court et le houppier est étalé dans les peuplements clairs ou long et élancé dans les peuplements denses (Nardini et *al.*, 1999).
- ❖ La **circonférence** atteint en général 70 cm entre 30 et 40 ans selon les conditions de végétation (Amandier, 2002). En revanche, dans les vieux peuplements elle dépasse jusqu'à 5m (Foucard, 1994).
- ❖ L'**écorce** est épaisse et crevassé sur les sujets à croissance rapide, peu inflammable et isolante, ne brûle que très superficiellement et protège les tissus conducteurs de la sève en même temps que l'assise génératrice du liège (Dehane, 2006).
- ❖ Les **feuilles** sont très polymorphes, coriaces et arrondies, plus ou moins dentées ; elles sont d'un vert brillant au-dessus et pubescentes sur la face inférieure. Elles sont renouvelées au printemps. Leur taille varie de 3 à 6cm en longueur et de 2 à 4cm en largeur, le pétiole peut atteindre 2cm (Aime, 1976) (Fig.2).
- ❖ La **cime** est largement étalée chez les sujets isolés dépassant 500m² chez certains vieux arbres âgés de 150 et 200 ans. En peuplements serrés, l'action des vents peut fortement modifier sa forme typique (Saccardy, 1973).
- ❖ Le **bois** est un excellent bois de chauffage il est lourd, compact, difficile à travailler et se crevasse profondément en séchant (Lamey, 1893).
- ❖ Les **fleurs** mâles pendant en chatons à l'extrémité des rameaux de l'année (Fraval, 1991). Les fleurs femelles sont souvent solitaires ou groupées par trois, s'insérant à l'aisselle du rameau de l'année. La floraison principale se déroule au printemps. Les

fleurs fécondées donnent naissance à des glands qui se forment et mûrissent l'année de la floraison, entre octobre et janvier (Maire, 1961).

- ❖ Les **glands** sont de taille variable, allongées à pointe courte et velue. L'arbre fructifie à partir de 15 à 20 ans ; la fructification est variable suivant les années entre 2 ans et 3 ans. Elle se poursuit parfois jusqu'à un âge avancé, au-delà de 100ans la période de fructification s'étend d'octobre à janvier (Boavida et *al.*,1999 ; Messaoudene,2000).
- ❖ L'**enracinement** du chêne liège est pivotant, il est constitué d'une grosse racine principale qui sert de support à l'arbre même dans les sols les plus rocheux. Il permet l'approvisionnement en eau et en éléments minéraux, peut s'emmêler avec les racines des arbres voisins (échanges de substances nutritives) et s'associer avec le mycélium de certains champignons qui favorisent la capture des minéraux (Molinas, 1991).
- ❖ La **longévité** de l'arbre peut atteindre jusqu'à 250 à 300 ans, mais les levées successives, les éventuels incendies et les conditions stationnelles, diminuent fortement cette longévité. En Algérie et en Maroc, les vieux arbres de 220 à 250 ans ne sont pas rares et la longévité moyenne est en général de l'ordre de 150 ans (Boudy, 1950 ; Vignes, 1990).



I.1.4-Caractères écologiques

I.1.4.1-Exigences climatiques

Le chêne liège est une essence forestière de plein soleil, craignant fortement l'ombre au stade adulte (Natividade, 1956), Il pousse sous des climats semi arides et sub-humides avec des précipitations annuelles moyennes de 600 à 1 000 mm, mais peut atteindre 2 000 mm, 500 mm

étant le minimum habituellement considéré pour un développement équilibré des arbres (Pereira, 2007).

La température annuelle moyenne optimale se situe entre 13 et 16 °C, bien que l'espèce peut également être présente dans des environnements où la température peut atteindre 19 °C. Il craint les fortes gelées persistantes et a besoin d'une période de sécheresse en été pour prospérer, cette saison doit être accompagnée d'une humidité atmosphérique d'au moins 60% (Veuillon, 1998).

1.1.4.2-Exigence Edaphiques

Le chêne liège est tolérant à une variété de sols à l'exception des sols calcaires et trop argileux. Il peut pousser sur des sols pauvres et peu profonds, avec une faible teneur en azote et en matières organiques, avec des pH comprises entre 4,8 et 7,0. Cependant, ces préférences se rencontrent dans les sols siliceux et sableux, préférant les sols profonds, bien aérés et drainés, étant très sensible au tassement et à l'hydromorphie (Bernal, 1999) (Fig.3).



Figure 3. Sol de chêne liège à base de grés durcit (Kecir, 2024)

I.2- Le chêne liège face à l'incendie

1.2.1- Pyrologie forestière

Un incendie de forêt est une énergie calorifique qui éclos suite à une ignition de flammes par la réaction de trois éléments : le combustible forestier (le végétal), le carburant (l'oxygène) et la source de chaleur (cigarette par exemple) (Rutten et *al.*, 2003) (Fig.4).

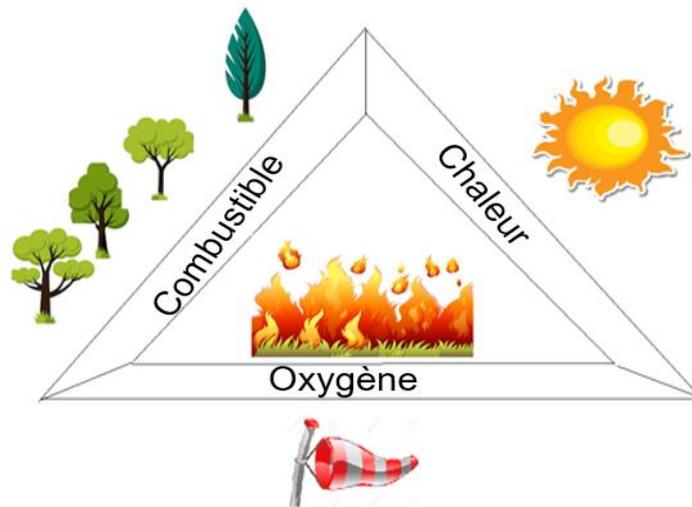


Figure 4. Triangle du feu (Schématisé par Kecir en 2024)

Le phénomène dit pyrolyse consiste en un dégagement de gaz résultant de la décomposition des combustibles sous l'effet de la chaleur.

Une fois le feu déclenché dans une forêt, il devient incontrôlable dans le temps et dans l'espace. La propagation du feu est alors influencée par plusieurs paramètres qui s'interagissent d'une manière simultanée. Il s'agit en fait des facteurs suivants (Trabaud (1971) (Fig.5) :

- La topographie
- Le vent
- Le combustible
- La nature du combustible
- La structure de la végétation
- La taille du combustible
- La teneur en eau.

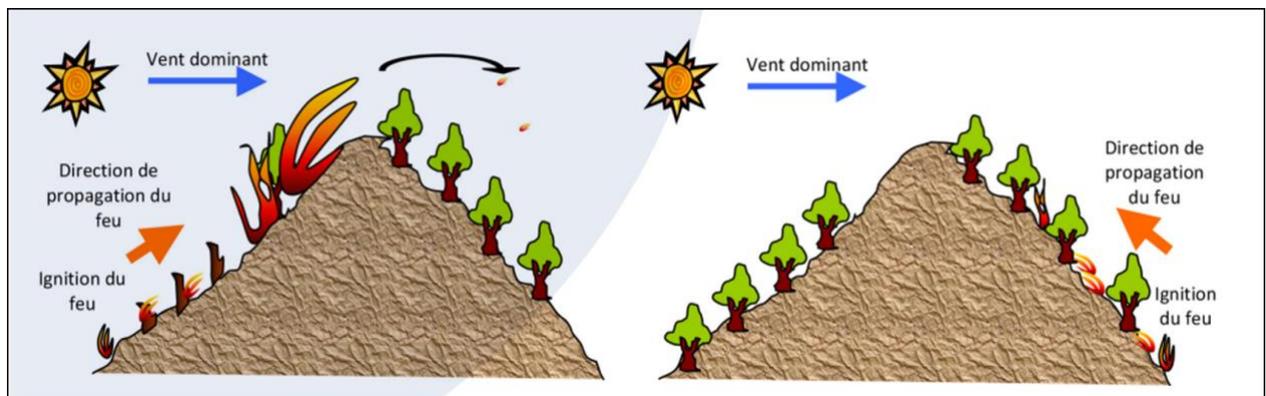


Figure 5. Rôle de la topographie et du vent dans la propagation de l'incendie (Plana et *al.*, 2016)

La figure 5 explique clairement l'influence de la pente du terrain sur le comportement du feu par l'accentuation ou au contraire le ralentissement de la propagation. En amont ; en allant vers les montées, sur un versant à forte pente, dans le sens du vent, le feu accélère sa propagation. En aval, vers les descentes, il ralentit ; mais il peut s'embraser sur l'autre versant par des sautes provoquées par le vent.

En forêt, le mode de transfert de la chaleur ou la propagation du feu se fait selon quatre façons (Fig.6) :

- Par conduction : Elle correspond à une transmission de la chaleur au sein du même matériau.
- Par rayonnement thermique : La chaleur est déplacée Par énergie rayonnante se déplaçant dans l'air.
- Par Convection : L'énergie est créée par la masse d'air chaud qui monte en haut.
- Par Projection : L'énergie est déplacée vers un autre corps par des flammèches et des sautes de feu.

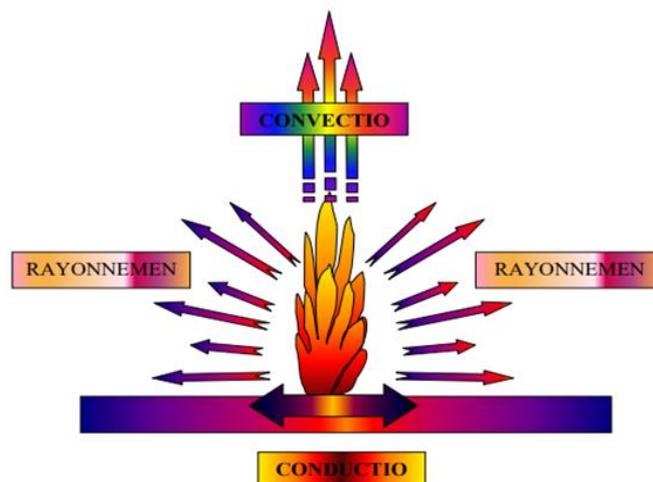


Figure 6. Les quatre modes de propagation d'un feu (BSP 731, 2015)

Ces quatre modes de propagation sont à l'origine des trois types d'incendie connus en forêt (Otsuka, 2003) :

- Feu de surface : c'est un feu qui brûle dans la couche de combustible composée de la litière supérieure du sol, comme les feuilles mortes, les aiguilles et la végétation annuelle.
- Feu de cime : quand le feu de surface prend de l'ampleur par des flammes dépassant les 2 m de hauteur, il se déclare le feu de cime dans les couronnes des arbres. Il peut être isolé et l'arbre brûle en chandelle ou en continu sous forme de mur de flammes.
- Feu de profondeur : c'est un feu qui brûle la matière organique en profondeur et il dépend de l'épaisseur de l'humus et de son ancienneté. Ce type de feu est généralement décrit comme une énergie couvant ou rampant difficile à éteindre (Fig.7).

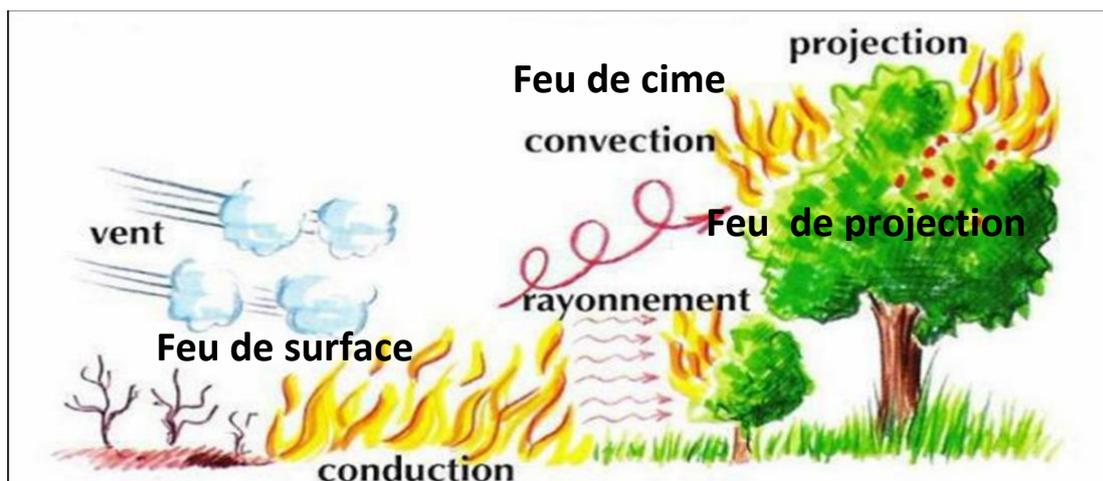


Figure 7. Modes de propagation et type de feu en forêt (SDIS 70, 2021)

I.2.2- Statistiques des incendies en forêts

Chaque année, les incendies de forêts effacent environ 10 millions d’hectares dans le monde (Rigolot et al., 2020). La végétation méditerranéenne est très combustible surtout en période estivale. Alexandrian *et al.* (1999) signalent qu’aujourd’hui, les superficies brûlées totales dans l’ensemble du bassin méditerranéen atteignent environs 600 000 hectares par an. Ce chiffre alarmant reflète l’état actuel de dégradation du couvert végétal qui ne cesse de régresser devant ce phénomène récurrent (Fig.8).

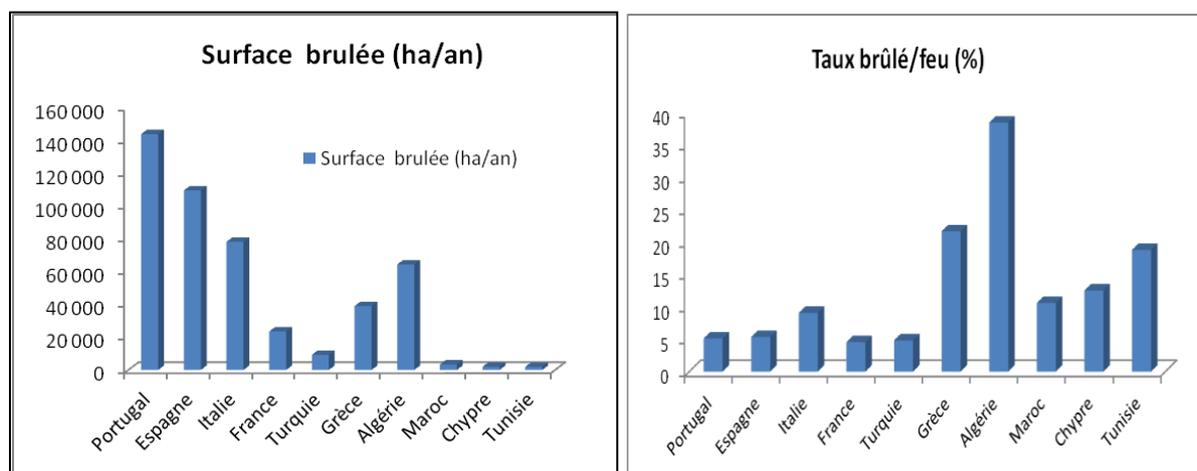


Figure 8. Quelques statistiques des feux de forêts dans certains pays méditerranéens (Dimitrakopoulos et Mitsopoulos, 2006).

Au cours de la période (1995-2004), les feux de forêts dans le bassin méditerranéen ont été estimés à 50 000 foyers en moyenne par année et les superficies incendiées représentent une moyenne annuelle allant de 700 000 à 1 millions d’hectares par rapport aux décennies passées, le problème s’est aggravé durant les années 70 et plus encore durant les années 80 tant du point

de vue du nombre d'incendies que de la superficie dévastée (Dimitrakopoulos et Mitsopoulos, 2006). Contrairement aux autres pays du sud de l'Europe, le nombre d'incendies et les superficies brûlées ont nettement augmenté au Portugal durant les vingt dernières années (Silva et Catry, 2006).

En Algérie, la situation est plus alarmante : de 1877 et 2020, les archives font état de plus de 5 millions d'hectares d'espèces forestières détruites par les incendies. L'analyse des 60 dernières années permet d'avoir une analyse plus contextualité de la situation actuelle ; le nombre de feux pour la période 1962-2020 est de 66 673 feux au total (Fig.9). Les feux ont parcouru une superficie forestière totale de 2 028 000 ha. Ce qui correspond à une moyenne annuelle de 1961 feux et 34 372 ha de surface parcourue par le feu.

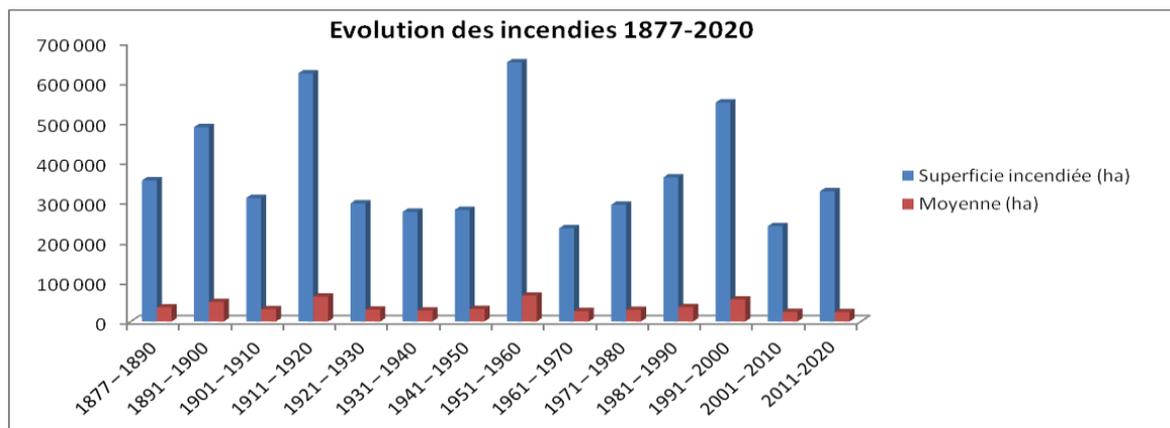


Figure 9. Chronologie des incendies de forêts en Algérie de 1877 à 2020 (Meddour et al., 2014 ; Meddour, 2015, DGF., 2020)

Le nombre des incendies varie suivant les années, entre un minimum de 300 feux en 1972 et un maximum de 5110 en 2012. Par ailleurs La surface moyenne brûlée par feu varie entre 3 ha en 2018 et plus de 118 ha en 1994 (année qui a connu de grands feux), alors que la moyenne se situe à 18 ha/feu (Kabouya, 2020.). L'année 2021 fut une année dévastatrice pour le patrimoine forestier national : pas moins de 89000 ha furent calcinés par les feux de forêts (DGF, 2021).

I.2.3-Les causes d'incendies

D'après l'étude de Sahar et Bouisset (2013), une investigation réalisée dans une région fortement exposée aux incendies en Algérie a mis en lumière que les raisons involontaires (notamment la négligence) sont imputables à deux facteurs majeurs :

- ❖ Les reprises de feu résultent d'une mauvaise évaluation de la part des équipes de pompiers, qui quittent les lieux précipitamment sans s'assurer que le feu est complètement éteint (91,49 % des personnes interrogées ont souligné ce point) ;

- ❖ Dans 80,14 % des cas, les incendies de forêt sont attribuables à l'imprudence et à la négligence des agriculteurs qui recourent au feu des chaumes pour chasser les troupeaux étrangers de leurs terrains.

Pour les incendies criminels intentionnels (volontaires), les raisons sont attribuées à :

- ❖ La première cause mentionnée est le défrichement et les changements dans l'utilisation des terres, avec un pourcentage de 77,30 %, devançant ainsi la pyromanie qui est citée à 67,38 %.
- ❖ La récolte de miel sauvage représente 62,41 %, tandis que les pratiques nuisibles telles que les dépôts sauvages et la combustion des déchets sont également préoccupantes.

La figure 10 résume les causes de déclenchement des incendies de forêt en région méditerranéenne.

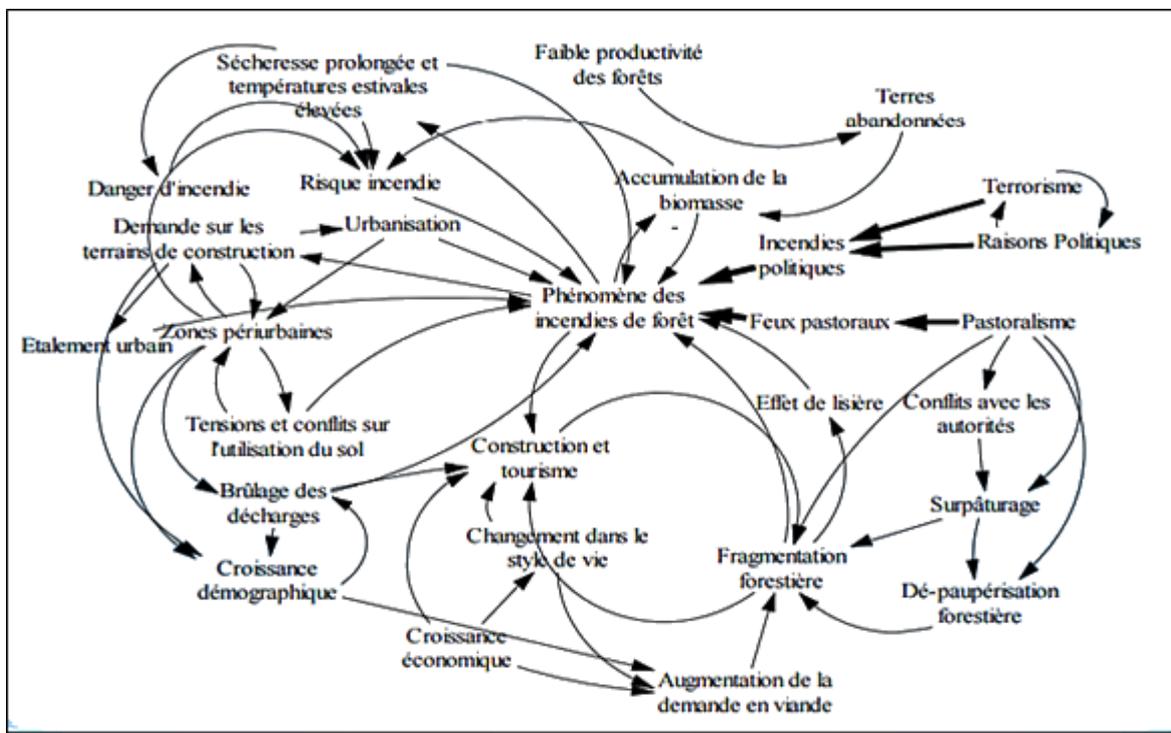


Figure 10. Causes des feux de forêts méditerranéennes (IML, 2006)

I.2.4- Impact du feu sur le chêne liège et le liège

Les conséquences du feu sur le chêne liège vont dépendre de l'intensité de celui-ci. Une échelle d'estimation visuelle du degré de brûlure des chênes-lièges, comportant 4 degrés, fut proposée par Amandier (Amandier, 2004) :

- ✚ premier degré : le feuillage de l'arbre est présent, roussi, avec quelques feuilles encore vertes, le liège n'a pas brûlé sur toute sa hauteur. Après le passage de l'incendie le houppier va se régénérer rapidement ;

- ✚ deuxième degré : le feuillage a disparu, mais beaucoup de rameaux fins sont encore présents. Le liège est noir sur presque toute sa surface. Les rameaux fins sont peu atteints;
- ✚ troisième degré : l'apex est totalement détruit. Le liège a fortement calciné au pied, et sur toute la hauteur du tronc. Des cavités apparentes ont pu permettre une combustion interne de l'arbre. Les arbres souffrent d'un stress important.
- ✚ quatrième degré : la violence du feu traversé l'épaisseur du liège et a provoqué son éclatement, voire la combustion totale du liège fin (moins de 1 cm).

Le chêne liège est classé parmi les pyrophytes passifs, c'est-à-dire qui se régénère après feu (Dehane et al., 2017). Cette remarquable protection est due à son liège très isolant, qui jouera un rôle de barrière entre les flammes et les tissus vivants de l'arbre, dans le tronc (juste sous l'écorce) et les plus grosses branches. Les vaisseaux conducteurs et les bourgeons dormants sous l'écorce seront ainsi à l'abri de la chaleur. Une écorce de 3cm d'épaisseur est susceptible de protéger l'arbre contre un incendie de forte intensité et une régénération aux alentours de 80% pour un diamètre du tronc de 20cm (Catry et al., 2006) (Fig.11).

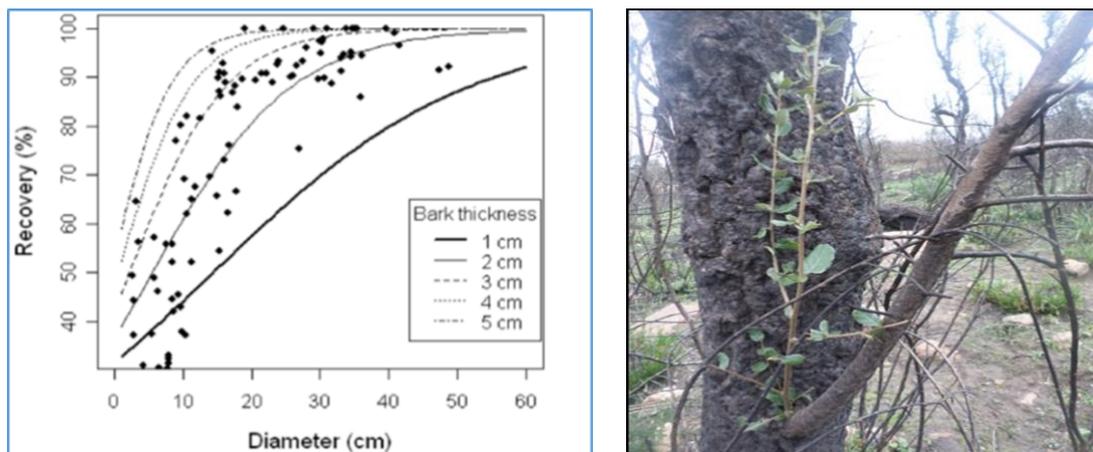


Figure 11. Taux de régénération post incendie selon l'épaisseur du liège (Catry et al., 2006)

Un autre constat, les zones de la mère du liège mortes ou endommagées ne pourront plus produire du liège et, si elles sont étendues sur plus de 100 cm², l'arbre ne pourra pas les refermer facilement. Si la surface endommagée est très grande sur le tronc dépassant les 40% de la circonférence, il faut programmer un recépage pour favoriser une nouvelle zone d'exploitation sur la base d'un ou plusieurs drageons (Cardillo et Bernal, 2003).

D'un point de vue sylvicole et biodiversité, les répercussions sont plus délicates à observer (Prodon et al., 1989 ; Veille, 2004)

- ✚ Le feu soumis la suberaie à une réorganisation des peuplements en supprimant toutes les jeunes classes d'âges.
- ✚ Les jeunes sujets aux diamètres réduits sont beaucoup plus sensibles au feu.

- ✚ Les sujets d'avenir avait moins de 20 ans a disparu totalement dans la majeure partie des suberaies.
- ✚ Certaines espèces mêlées au chêne liège comme le pin maritime, le châtaignier et le pin d'Alep s'effaceront facilement et la forêt va se transformer en suberaie pure.
- ✚ La biodiversité à tendance à se raréfier dans les suberaies dont la fréquence des feux est inférieure à 15 ans. Ce sont les mammifères à déplacement lent qui disparaissent plus que les oiseaux.

La survie du chêne-liège suite à un incendie est estimée à 70%, grâce à la protection que son écorce lui procure et sa grande capacité de repousse. Ce pourcentage augmente lorsque la couche de liège atteint une épaisseur supérieure à 20 mm, suffisante pour apporter à l'arbre une protection adéquate contre le feu (Dubois, 1990).

Mais le liège est un matériau naturel qui peut s'embraser comme n'importe quel produit soumis à une énergie calorifique intense. En effet, le liège carbonise à des températures proches de 200°C (Ryan and Reinhardt, 1988). Selon Abric (1974), les dégâts sur le liège sont variables :

- ✚ Les cellules de la mère, situées sous le liège, meurent lorsqu'elles sont en face à une température supérieure à 55-60°C. Les dégâts dépendront donc de l'intensité de la chaleur dégagée par l'incendie, ainsi que de cette barrière que constitue le liège
- ✚ Le liège subit une triple dégradation du fait de l'incendie : la suberaie incendiée ne fournira pas de liège « bouchonnable » durant toute une rotation.
- ✚ La qualité du liège se déprécie sur une période de 12 ans, période nécessaire maximale pour former un liège de 27 mm.
- ✚ Le liège tiré de la suberaie incendiée est un matériau flambé estimé à moins 15 % de la valeur du liège « blanc ».
- ✚ Lors de la récolte, la perte cumulée peut être atteindre les 50 % de la valeur du liège « blanc » sur pied.

Chapitre II

Etude du Milieu

II.1. Présentation de la zone d'étude

II.1.1. Situation géographique

La forêt domaniale de Zariéffet fait partie intégrante d'un ensemble étatique de protection à savoir le Parc National de Tlemcen (PNT). Ce dernier se situe à l'extrême Ouest de l'Algérie, dans la Wilaya de Tlemcen. Sa superficie est de 8225,04 ha et il a été créé par décret, le 12 mai 1993. Il s'étend sur sept communes : Tlemcen, Mansourah, Sabra, Terny, Ain Fezza, Beni Mester et Ain Ghoraba et se limite par les coordonnées Lambert Nord ($x = 137,4$; $y = 183,7$), Sud ($x = 120,9$; $y = 172,5$), Ouest ($x = 118,2$; $y = 174$) et Est ($x = 144,2$; $y = 180,7$) (PNT, 2015).

La subéraie de Zariéffet est aussi sous la direction des services de forêts (Conservation des Forêts de la Wilaya de Tlemcen (CFWT,1996). Elle est soumise au régime des forêts en 1883 (C.O.I.T., 1900). Elle s'inscrit entre les coordonnées Lambert suivantes (Tab.1).

Tableau1. Situation géographique de la forêt selon les coordonnées Lambert

	Cordonnées Lambert		Distance de la mer	Carte d'Etat major	Nature de la suberaie
	X (km)	Y (km)			
Zariéffet	X1 :123,3 X2 :129,8	Y1 : 177 Y2 : 180,5	50 km	Terni feuille n°300	de montagne

La superficie potentielle de la subéraie de Zariéffet dépasse 990 ha et se trouve à une altitude comprise entre 1000 et 1217m. Administrativement, elle est limitée (PNT,2015) :

- au nord par les communes de Mansourah et Beni Mester,
- à l'est par : Djebel Moudjet et la localité de Aïn Douz,
- à l'ouest par : Ai El Mardjene et la forêt domaniale de Hafir,
- au sud par : Dar Dis et la commune de Terny (Fig.12).

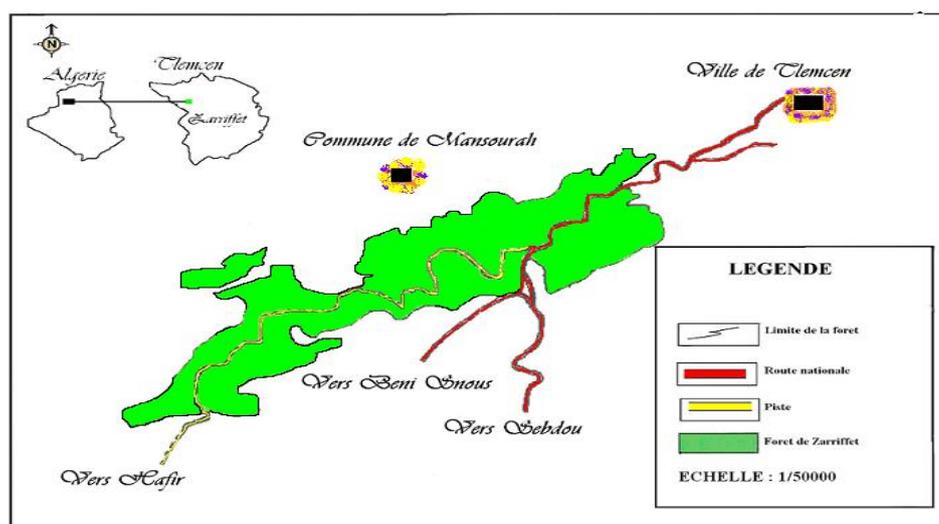
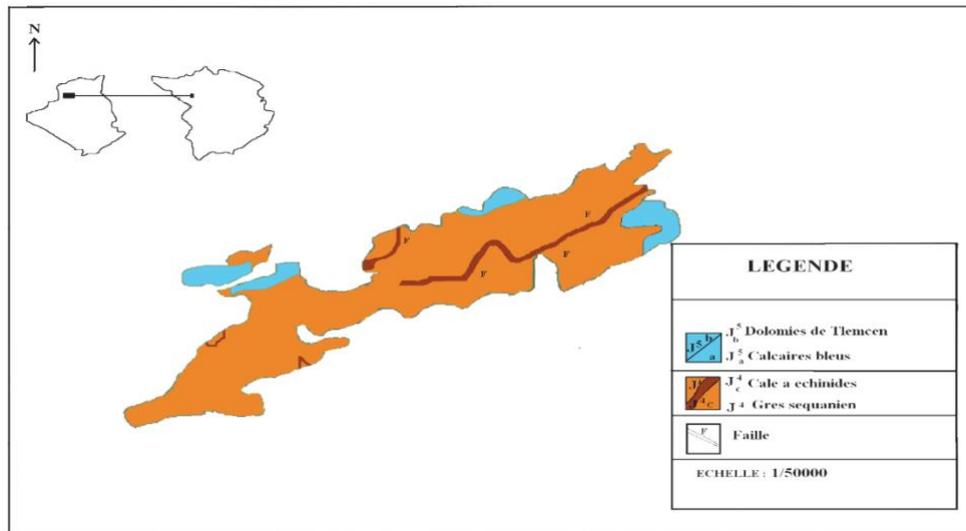


Figure 12. Carte de situation de la forêt domaniale de Zariéffet (Dehane, 2006)

II.1.2 - Géologie et Pédologie

La région sur laquelle porte notre étude se localise dans la partie occidentale de l'Ouest algérien, faisant partie d'un secteur montagneux appelé « Monts de Tlemcen », particulièrement dans sa partie Sud-Ouest.

La forêt de Zarieffet repose sur des assises géologiques qui sont formées essentiellement sur un puissant massif du jurassique supérieur à plissement tertiaire (ELMI, 1970 ; BENEST, 1985). La roche mère est composée principalement du Grés séquanien et du Calcaire de Zarieffet, les dolomies du Kimméridgien et du Portlandien et des affleurements éparses (Fig.13)



Les études pédologiques de la forêt dévoilent que les sols sont en général moins profonds de type brun forestier (Gaouar,1980). Les principaux sols associés au chêne liège sont (PNT, 2010):

- les sols bruns fersiallitiques, lessivés ou non. Ces sols sont soumis aux phénomènes d'érosion surtout au niveau des zones exposées aux précipitations et dont les pentes ont une forte déclivité.
- les sols bruns fersiallitiques à tendance podzolique traduisant la perméabilité de la roche mère (grès séquanien).
- Les rendzines sous chênaies vertes dégradées des Monts de Tlemcen, sur substrat calcaro-marneux.
- Les sols peu évolués d'érosion se rencontrent donc partout où le phénomène de décapage est plus rapide que la pédogénèse.

II.1.3 - Hydrologie

La forêt de Zarieffet repose sur un relief très accidenté avec des pentes variantes entre 3 et plus de 50%. Le réseau hydrographique est moins important, comportant trois oueds qui

traversent la forêt (Fig.14). Ils sont généralement secs en été et à écoulement temporaire en hiver à cause de la sécheresse. Nous notons encore l'existence de 6 sources dont 2 situées en forêt (Aïn Baghdad et Aïn Dar Ghelem) (Dehane,2012). Leur débit est respectivement moyen de 10 à 20 litres. L'existence de ces sources joue un rôle non négligeable dans l'alimentation des peuplements de chêne-liège en humidité et par voie de conséquence sur le rendement du liège, car elles contribuent à atténuer les excès de températures et de sécheresse.

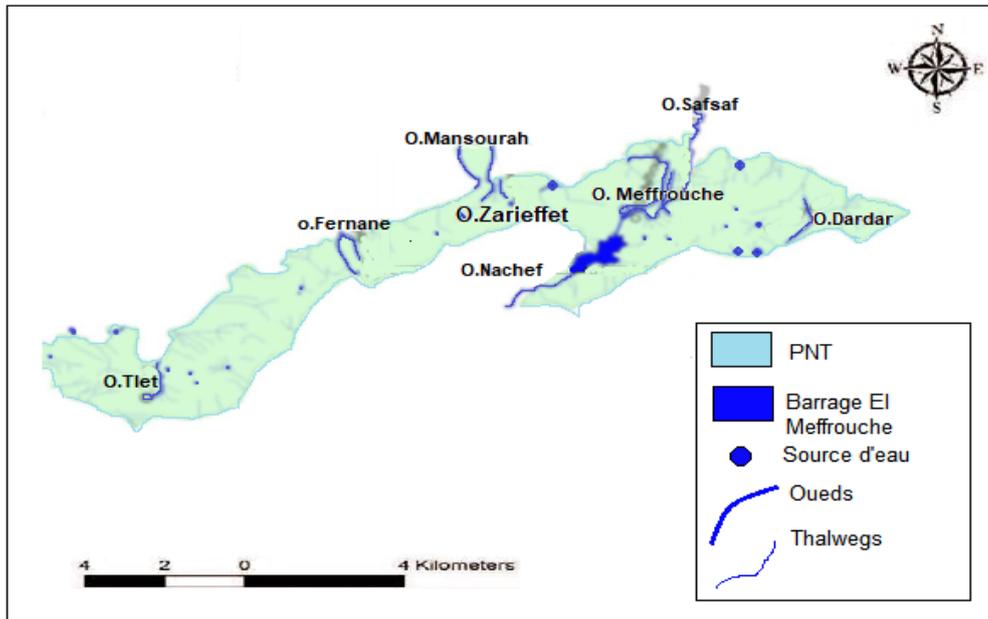


Figure 14. Carte hydrographique du massif forestier Hafir-Zarieffet (PNT, 2010)

II.2-Analyse climatique

Les écosystèmes forestiers sont des milieux fragiles et vulnérables aux changements climatiques où des variations minimales de température et d'humidité peuvent affecter leur équilibre naturel. Hoff (2007) établit un lien étroit entre biologie et climat, ce qui suggère une caractérisation climatique précise et locale permettant une meilleure connaissance des phénomènes influençant l'évolution de chaque écosystème.

Dans la zone d'étude, la seule station météorologique fonctionnelle relève du barrage El Meffrouche. Les caractéristiques de cette station et la période d'observation sont indiquées dans le tableau suivant :

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

Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Situation	Distance à la forêt	Période
Meffrouche	1°16'W	34°51'N	1100	Barrage	2 km	1992- 2021

Une superposition des données climatiques actuelles à celle qui régnaient il y a plus de 60 ans, nous donne une idée globale de la variabilité interannuelle et infrarégionale du climat.

Pour ce faire, nous avons collecté des données anciennes émanant principalement de Seltzer (1946) et des données relativement récentes de la station de référence par le biais des services hydrauliques de la wilaya. Ces données s'étalent sur deux périodes assez longues l'une ancienne de 25 ans (1914 -1938) et l'autre récente de 30 ans (1992-2021).

II.2.1-Données climatiques

II.2.1.1- Variabilité annuelle des précipitations

Rameau et al. (2008) identifient le climat méditerranéen comme très contrasté, soumis à des variations infrarégionales très marquées de point de vue du cumul de précipitations annuelles (entre 100 et 2000 mm). De plus, l'existence d'un fort déficit pluviométrique pendant la saison chaude résulte en une double gouvernance de la biologie locale tant par la température que par les précipitations.

La répartition annuelle de la pluviométrie enregistrée dans la zone d'étude durant la seconde période de référence est représentée dans la figure 15.

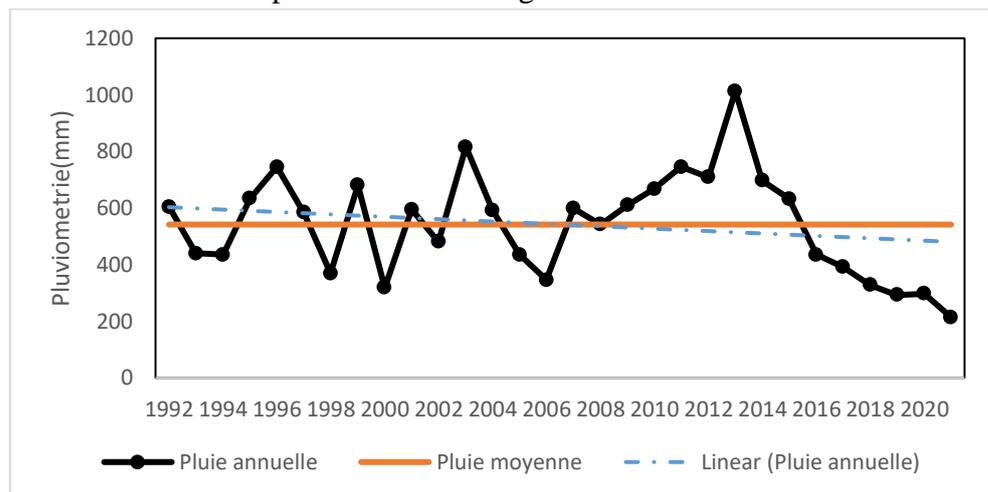


Figure 15. Variations annuelles de la pluviométrie pour la période 1992-2021

La figure 15 met en évidence une variation marquée des fluctuations annuelles par rapport à la moyenne (541,89mm), pour la période 1992-2021. Ces fluctuations totalisent 13 événements négatifs et 17 positifs. La situation demeure très critique à partir de l'année 2016, avec une succession de six années typiquement déficitaires d'une moyenne de l'ordre de 214,93mm par rapport à la moyenne annuelle de 30 années. Statiquement parlant, il s'agit d'une régression linéaire négative. L'examen de la courbe élucide clairement la variabilité annuelle des chutes de pluies entre 1992 et 2021 (c.v = 33,66%).

II.2.1.2- Variabilité saisonnière des précipitations

Au cours de la période 1992-2021, la distribution saisonnière des pluies diffère d'une année à une autre. La figure 16 classe l'hiver comme la saison humide (203,40mm) suivi de l'automne

(189,44mm), et du printemps (120,69mm). La saison sèche se démarque avec 28,35mm seulement.

Il s'agit d'un climat de type HAPE qui connaît une regression des pluies saisonnières hivernales, qui passent de 230,19mm (1992-2001) à 190,65mm (2002-2011) vers 188,61mm (2012-2021).

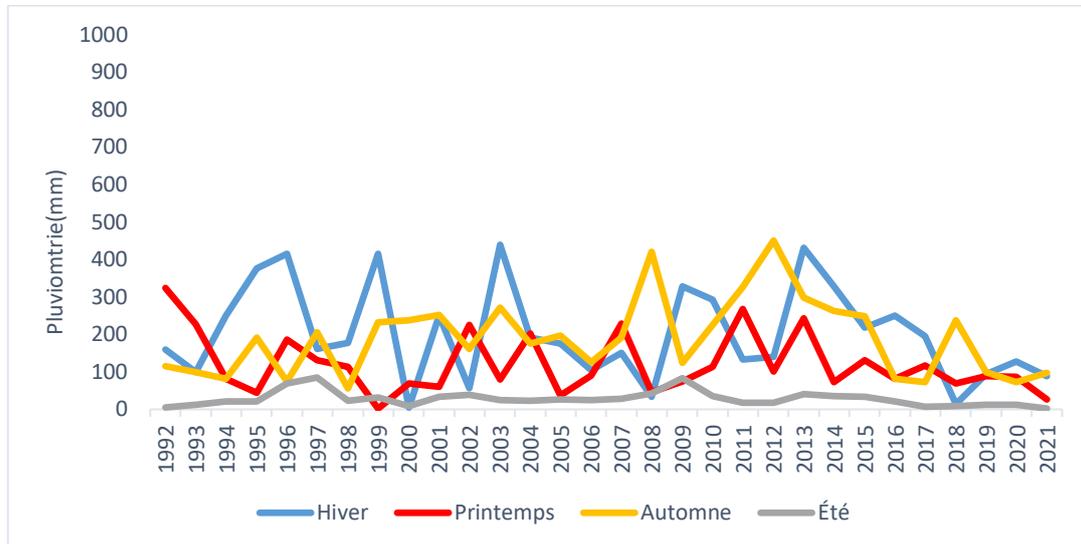


Figure16. Variations saisonnières des précipitations (1992-2021)

II.2.1.3- Variabilité annuelle des températures

La figure 17 met en exergue des variations annuelles de températures durant la période 1992-2021 avec des tendances linéaires à la progression. Les moyennes annuelles varient de 11,35°C (température minimale) à 24,68°C (température maximale) et 18,01°C (température moyenne).

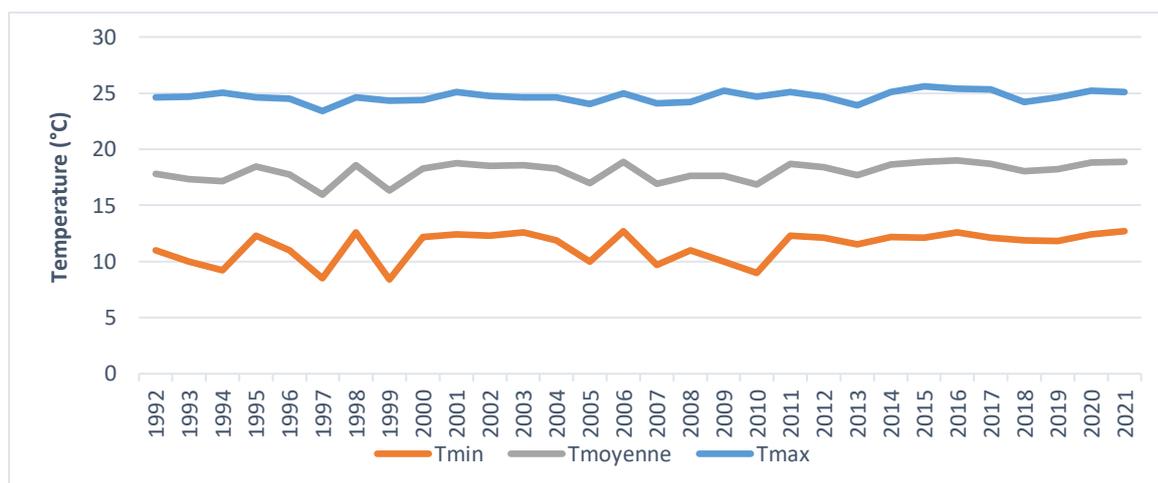


Figure17. Variations annuelles des températures (Tmax, Tmin, Tmoyenne) (période 1992-2021)

Les températures moyennes annuelles ont augmenté de manière significative depuis l'année 2000, avec une normale sur 30 ans calculée sur la période [1992-2021] on observe un écart à la normale minimal de - 1.55°C en 1997 et maximal de + 1.5°C en 2016 (Fig.18).

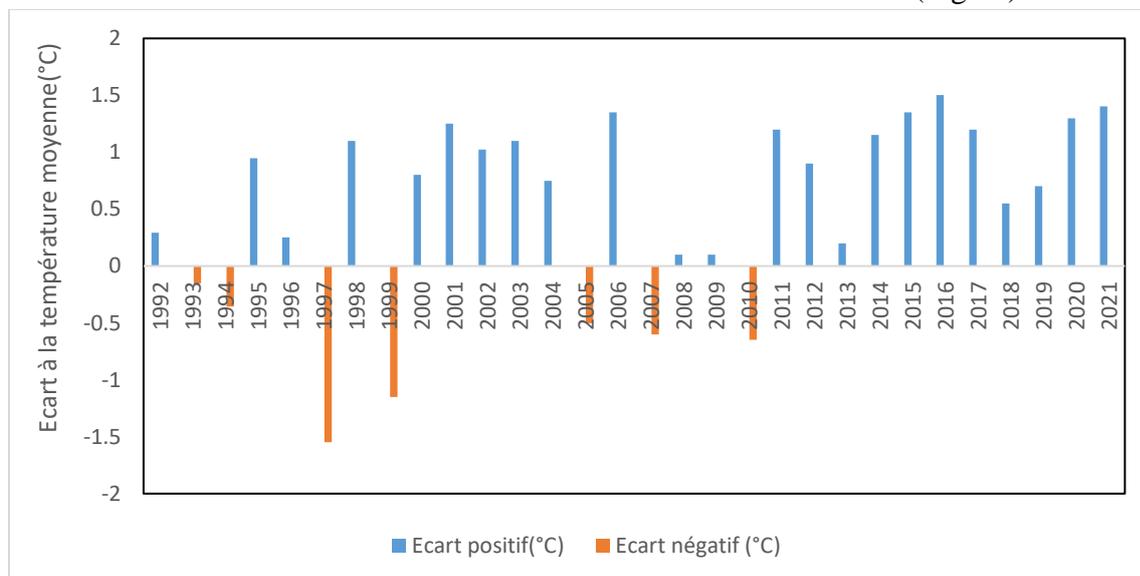


Figure 18. Ecart à la température moyenne annuelle (période 1992-2021)

II.2.2 -Synthèse climatique

La synthèse des données climatiques permet de classer le climat étudié afin de mieux se rendre compte sur la répartition et le comportement des différentes associations végétales et animales, et leur adaptation au climat local. Cette synthèse fait appel à plusieurs indices, dont nous retenons particulièrement :

II.2.2.1- Amplitude thermique extrême moyenne ou indice de continentalité

L'amplitude thermique extrême ($M - m$) est un paramètre climatique très important car il permet de définir à partir d'un indice appelé « indice de continentalité » si la zone est sous influence maritime ou continentale. Il permet aussi, à travers ses valeurs, de caractériser le mode de croissance de certaines essences, telle que le chêne liège (Tab.3).

Tableau 3. Indice de continentalité

Forêts	Période	M (°C)	m (°C)	M- m(°C)	Type de climat
Zarieffet	1914-1938	32,9	1,9	31	Semi-Continental
	1992-2021	34,1	2,1	32,5	

En se référant à la classification de Debrach (1953), il s'identifie que la zone d'étude bénéficie d'un climat de type Semi-Continental caractérisant la brutalité des contrastes thermiques, et la présence marquée des gelées hivernales et printanières.

II.2.2.2- Indice de sécheresse estivale (Is)

L'intensité et l'importance de la saison sèche en climat méditerranéen ont amené Emberger (1942) à proposer un nouvel indice nommé indice xérothermique.

$$I_s = P/M$$

P : Total des moyennes des précipitations estivales en (mm).

M : Moyenne des maxima thermiques de la période estivale (°C).

L'auteur signale que cet indice ne dépasse pas « 7 » pour le climat méditerranéen. Pour différencier le climat méditerranéen des climats océaniques, Daget (1977), limite cet indice à « 5 ». Les variations de l'indice de sécheresse pour la période de référence sont consignées dans la figure 19.

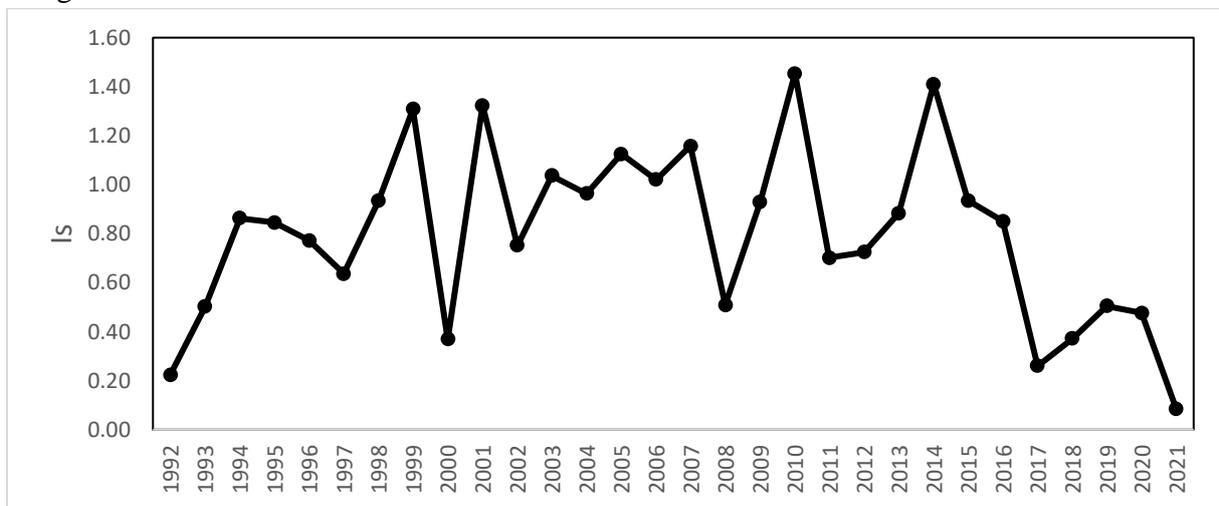


Figure 19. Variabilité de l'indice de sécheresse estivale pour la période 1992-2021

La figure 19 nous apprend que les indices de sécheresse estivale varient annuellement mais sans dépasser le seuil de 5 et par conséquent inférieurs à 2. La moyenne enregistrée est de l'ordre de 0,80.

En Oranie (Ouest- algérien), une étude conduite en 1969 par Alcaraz signale l'existence d'espèces végétales s'adaptant à un indice inférieur à 2 ; ce même auteur indique que cet indice peut être inférieur à 1. Ce chiffre suppose une sécheresse de la région dépassant largement la saison estivale habituelle de trois mois. En effet depuis l'année 2016, l'aridité devient très apparente et la sécheresse estivale très accentuée.

II.2.2.3- Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen

Bagnouls et Gaussen, 1953 ont élaboré un classement climatique satisfaisant aux nécessités de l'écologie végétale. Pour cela, ils ont imaginé de confronter des courbes de pluies (courbes ombriques) et températures (courbe thermiques).

A partir du graphique, l'indice xérothermique (nombre de jours biologiquement secs) est établi, en déterminant la période pendant laquelle la courbe ombrique ne dépasse pas la courbe thermique (Fig.20).

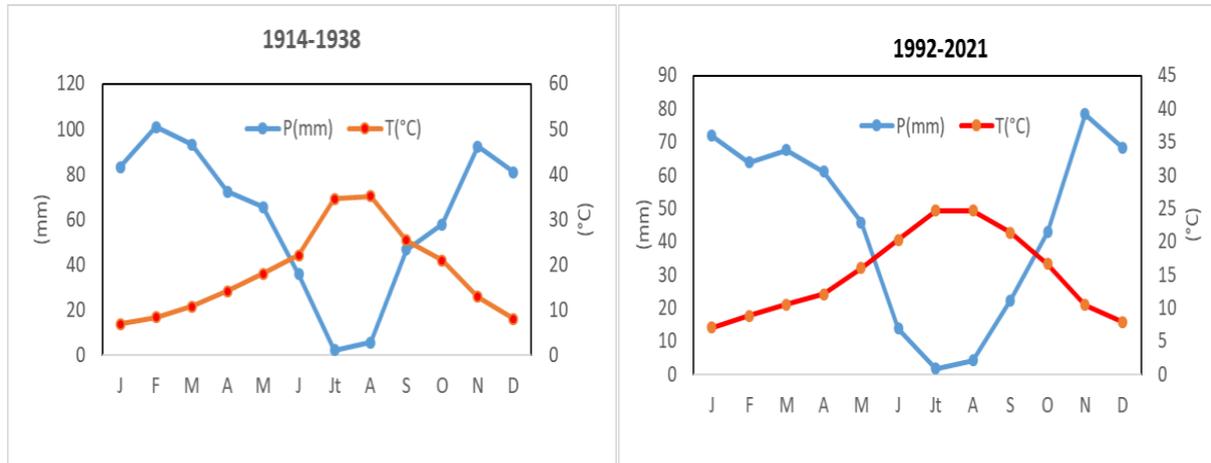


Figure 20. Diagrammes Ombrothermiques pour la période ancienne et nouvelle

La comparaison des deux courbes met en évidence une élongation de la saison sèche estivale (juin, juillet et aout) qui passe de trois mois durant l'ancienne période à 5 mois en période actuelle (juin, juillet, aout, septembre et octobre).

II.2.2.4- Quotient pluviothermique et climagramme d'Emberger

Il permet de classer les bioclimats selon les valeurs de Q tel que $Q_2 = 2000 P / M^2 \cdot m^2$ (Fig.21)

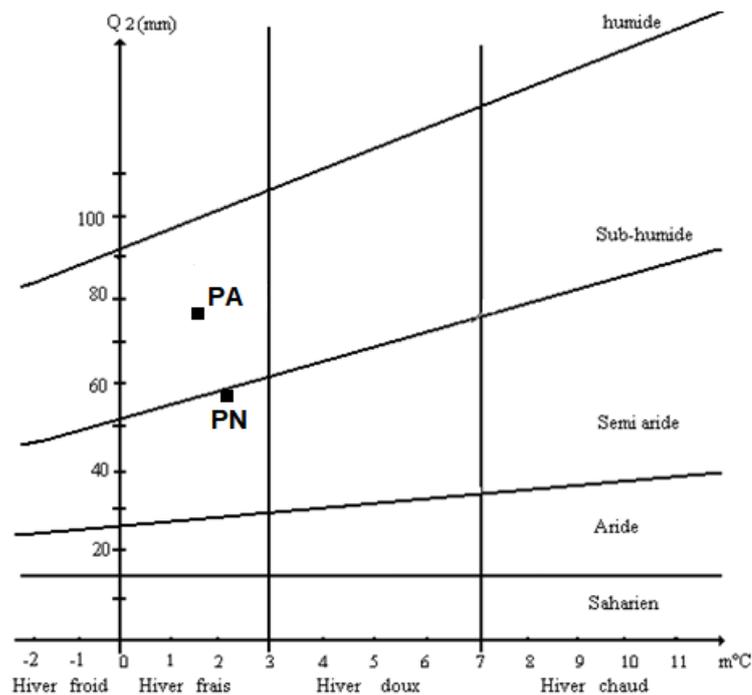


Figure 21 : Climagramme d'Emberger du climat de la zone d'étude

Avec un quotient pluvio-thermique Q moyen de 78,96 (ancienne période) et 56,21 (nouvelle période), le climat moyen de Zarieffet change brutalement d'un climat subhumide vers un climat semi-aride supérieur.

II.3-Végétation

La subéraie de Zarieffet est passée au fil des années d'une entité verdoyante à un état de dégradation qui s'est amplifié suite à plusieurs contraintes d'ordre naturelle (sécheresse prolongée et dépérissement) et d'ordre anthropozoïque (incendies répétés et surpâturage). Dans la forêt domaniale de Zarieffet, la situation forestière est préoccupante, composée essentiellement de maquis haut et bas interféré par des communautés buissonnâtes à base de calycotome épineux et de cistes (Dehane, 2012).

La forêt de Zarieffet abritait initialement une superficie totale d'environ 990 ha dont près de la moitié (453 ha) était occupée par les essences principales (chêne-vert et chêne-liège) et le reste par des broussailles d'essences secondaires (246 ha) et les vides (291 ha) (A.E.F.C.O., 1914). Elle comporte les cantons suivants : Zarieffet (535 ha), Fernana (58 ha), Guendouza (63 ha), et Aïn Merdjen (306 ha) (C.F.W.T., 1996).

La régénération naturelle par semis est faible à inexistante, en raison de divers facteurs (absence de glands, sécheresse, abondance du maquis, incendie, etc.) (Chorana,2021). Actuellement la forêt constitue un matorral clair riche en espèces épineuses et en arbustes de plus de 2 m de haut, recouvrant entre 25 et 50 % du sol. Elle bénéficie depuis 2002 d'un vaste programme de réhabilitation sur 500 ha (C. F.W.T., 2008).

Le sous-bois est très riche en plantes dont certaines sont caractéristiques d'une humidité élevée et d'autre de la présence du maquis, symbole de dégradation. Ce dernier est souvent peu développé mais rarement absent. Dans les stations dégradées par les incendies, il est en revanche très abondant. Parmi les plantes les plus fréquentes, signalons : le lierre (*Hedera helix*), le chèvrefeuille (*Lonicera implexa*), la salsepareille (*Smilax aspera*), la ronce à feuille d'orme (*Rubus ulmifolius*), le daphne ou laurier des bois ou garou (*Daphne gnidium*), l'arbousier (*Arbutus unedo*), le petit houx (*Ruscus aculeatus*), la bruyère arborescente (*Erica arborea*), le romarin (*Rosmarinus officinalis*) et la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*).

Dans les zones dégradées, plus chaudes, on trouve plus d'essences secondaires telles que le chêne kermes (*Quercus coccifera*) et le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*), mais aussi les Cistes (*Cistus ladaniferus*, *C. salviaefolius*, *C. monspeliensis*), le diss (*Ampelodesmos mauritanicus*) et le doum (*Chamaerops humilis*). *Phillyrea angustifolia*, *Calycotome intermedia*, *Olea europea*, *Cistus ladaniferus*, *Cystisus triflorus*, *Cistus salvifolius*, *Lavandula stoechas* et *Asphodelus microcarpus* (PNT, 2015).

II.4-La production du liège

Depuis jadis, le liège des monts de Tlemcen est considéré comme le meilleur produit non ligneux de l'Algérie et de la méditerranée (Lamey,1893 ; Saccardy,1937) (Fig.22).



Figure 22. La récolte du liège à Hafir pendant de la campagne de l'année 2019 (Chorana,2021)

Dans la subéraie de Zariéffet, on a extrait de 1897 et 1996, un volume total de liège de reproduction de l'ordre de 28300 qx (Dehane, 2006). Les meilleures productions sont archivées durant la période de la seconde guerre mondiale et la guerre de la libération nationale : 1954 qx en 1948 et 993 qx en 1952. Le reste de la production (2767 qx) est reparti entre le liège mâle (2020 qx), le liège de rebut (747qx) et le liège flambé (48 qx) (Dehane, 2012).

Après l'indépendance les opérations de levée n'ont commencé régulièrement qu'à partir de 1972 jusqu'à 1984 soit une production de 1320 qx. C'est à partir de 1991 jusqu'à 2007 que la production a pris un rythme régulier enregistrant un total liège de l'ordre de 10586 qx dont 8026 qx de liège femelle (C. F. W.T., 2007). Les incendies qu'a vécu la forêt en 1996 et 2007 ont influé négativement sur la production du liège ne dépassant guère 518 qx (C.W.F.T., 2008) (Fig.23).

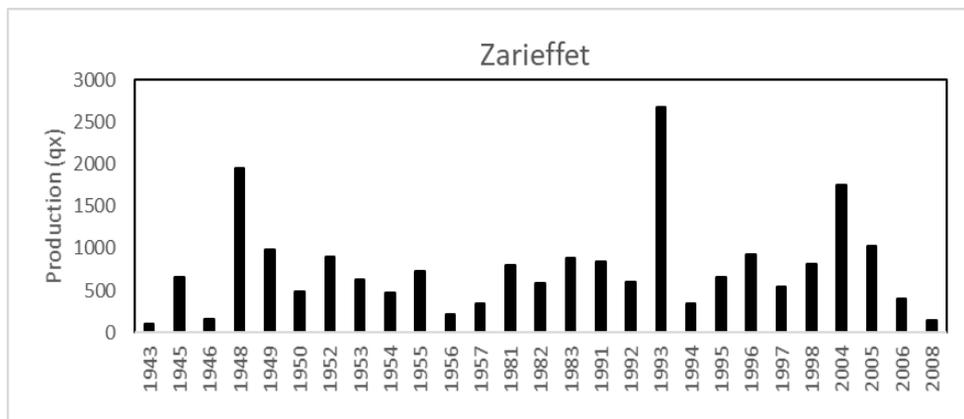


Figure 23. Fluctuation périodique et annuelle de la production du liège à Zariéffet (Dehane,2012)

II.5-Les incendies

Un climat générateur de sécheresse et une forte anthropisation affectent copieusement la survie des peuplements de chêne liège et les rendent vulnérables aux incendies. Quezel et Barbero (1990), révèlent que les perturbations d'origine anthropique sont pour une très large part responsables de l'état actuel des structures des végétations au Maghreb.

Dans un cadre purement écologique que forestier, Barbero et *al.*(1990) estiment que les perturbations issues de la xéricité du climat sont nombreuses et correspondent à des niveaux de plus en plus sévères allant de la matorralisation jusqu'à la désertification et désertisation passant par la steppisation et la thérophytisation. Schaffhauser (2009), met l'accent sur le fait que les feux répétés conduisent à des peuplements de chênes liège clairs qui favorisent le développement du maquis, augmentant ainsi le risque d'incendies futurs

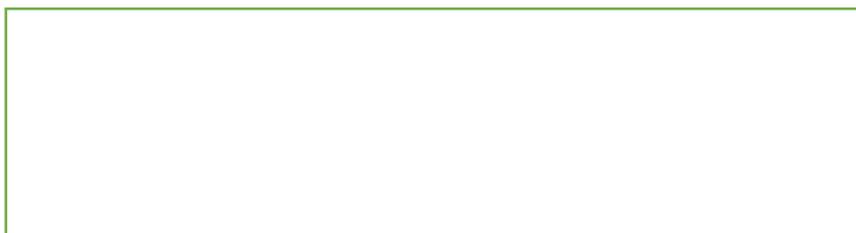
A Zariéffet, l'historique des incendies était toujours étroitement lié à la ferveur de l'homme pour le défrichage et la vengeance, au marasme de la colonisation et aux soulèvements populaires. Les données des incendies recueillies auprès des services forestiers de la wilaya sont illustrées sous forme de graphe (Fig.24).



Figure 24. Occurrence des feux dans la subéraie de Zariéffet (1882-2023) (Dehane,2024)

D'après la figure 24, la subéraie de Zariéffet accuse jusqu'à 27 occurrences de feu sur le même site au cours de la période allant de 1882-2023, soit une durée 131 ans, décimant au total 3567 ha. Les zones les plus fréquemment incendiées sont toujours superposées à la chaussée. Cette constatation argumente le type social dans le déterminisme des feux. Ce phénomène est retenu comme l'une des principales causes d'incendies dans le bassin méditerranéen au cours du 20^{ème} siècle (Pausas, 1997 ; Diaz-Delgado et al., 2004).

Comme témoigne la figure 24, on enregistre 7 principaux sauts de plus de > 100 ha de surfaces incendiées au cours du temps de 133 ans (1882-2015) :



A Zariéffet, on estime l'intervalle moyen de récurrence entre les 7 sauts à 20,5 ans (± 1) durant la période allant de 1882 à 2015. Cet intervalle (22) entre dans la norme pour les écosystèmes méditerranéens (10 à 60 ans) selon Thonicke et *al.*, (2001).

Schaffhauser (2009), instaure un seuil critique pour les subéraies (4 feux en 50 ans), dans le cas de la forêt de Zariéffet, il s'agit bien de 5 grands feux en 49 ans (de 1966 à 2015). Le même auteur, étaye qu'une fréquence moyenne d'incendie (1 feu tous les 25 à 50 ans) permet une bonne résilience de l'écosystème, mais à un niveau faible de potentialités restant en limite de rupture. Le stock de matière organique est limité aux premiers cm du sol. Avec 2 feux tous les 50 ans, la végétation est souvent un maquis haut dominé par la bruyère arborescente.

Tous ces constatations demeurent une réalité dans la subéraie de Zariéffet. Le chêne liège est une espèce emblématique en Algérie ayant un attrait touristique de par le paysage qu'il procure, malgré que la subériculture est en fort recul à cause des incendies. La préservation de cette espèce et de son habitat reste une question d'ordre morale, un engagement de paix de la société envers ce patrimoine forestier très cher.

Chapitre III

Matériels et méthodes

III.1-Problématique

Le chêne liège *Quercus suber* L. est une espèce forestière très connue par sa résistance au feu grâce à la protection offerte par le tissu subéreux de la base de l'arbre à sa cime. Selon l'intensité de l'incendie, la propagation de la chaleur thermique des flammes dans l'arbre est conditionnée par certains paramètres du milieu physique à l'instar des facteurs climatiques, de la topographie, et de la végétation avoisinante. La coïncidence temporelle de l'incendie avec la phénologie de l'essence est aussi évoquée (feu précoce ou tardif). Il en est de même pour l'adéquation du feu avec la période d'exploitation du liège (au début du cycle ou à sa fin). Les paramètres de morphologie (circonférence, hauteur du fût, facteur d'élongation, épaisseur de l'écorce) semblent aussi statuer sur le degré de la perturbation et la stratégie de résilience post-incendie. La juxtaposition de tous ces paramètres n'est permise sur le terrain que grâce à la régénération observée au niveau des cimes des arbres résiduels. Il s'agit en effet de déceler les cimes vigoureuses de celles altérées après feu. Ces deux types de régénérations sont les seuls garants permettent au gestionnaire de prédire rapidement quelle sorte d'aménagement doit être allouée à la subéraie incendiée : soit laisser la nature suivre son cours par la cicatrisation naturelle des arbres perturbés, ou opter dès le début par un recepage et favoriser une nouvelle régénération par souche, et éviter la mort différée des arbres. C'est dans cette optique que s'insère l'objectif du travail : proposer un modèle mathématique pour décider sur l'avenir des arbres rescapés avec cimes altérées ou remplies.

III.2-Choix de la zone d'étude

La subéraie de Zariéffet bien connue pour la production de liège de qualité, demeure aussi très réputée pour le nombre d'incendies qui la caractérise depuis des années. Les archives forestières font état de sept incendies majeurs >100ha qui ont ravagé la forêt : 1892, 1903, 1964, 1983, 1994, 2005, 2015 (Saoudi, 2016). En dépit de ce constat alarmant, notre choix s'est porté sur cette entité naturelle, très fragilisée par la perturbation du feu.

Notre prospection sur le terrain a concerné les limites tracées par l'incendie déclenché au mois d'Octobre de l'année 2022 (Fig.25)



Figure 25. Séquence de flammes photographiée durant l'incendie du 24 Octobre 2022 (Cliché Dehane,2022)

III.3-Echantillonnage et collecte des données

L'incendie qui s'est amorcé en 2022, s'est propagé sur une partie de la subéraie de Zariéffet. Afin de cerner la problématique du travail, nous avons opté pour un échantillonnage en plein, c'est-à-dire nous avons prospecté toute la zone embrasée afin d'intercepter le maximum d'arbres-échantillons résiduels affectés par le feu. Cette démarche nous a permis de cartographier la région d'intérêt par le logiciel QGIS 2.18.28. Pour une meilleure représentativité des paramètres pris en considération, nous nous sommes intéressés uniquement aux sujets exploités c'est-à-dire produisant le liège de reproduction et non le liège mâle non exploité (Fig.26).

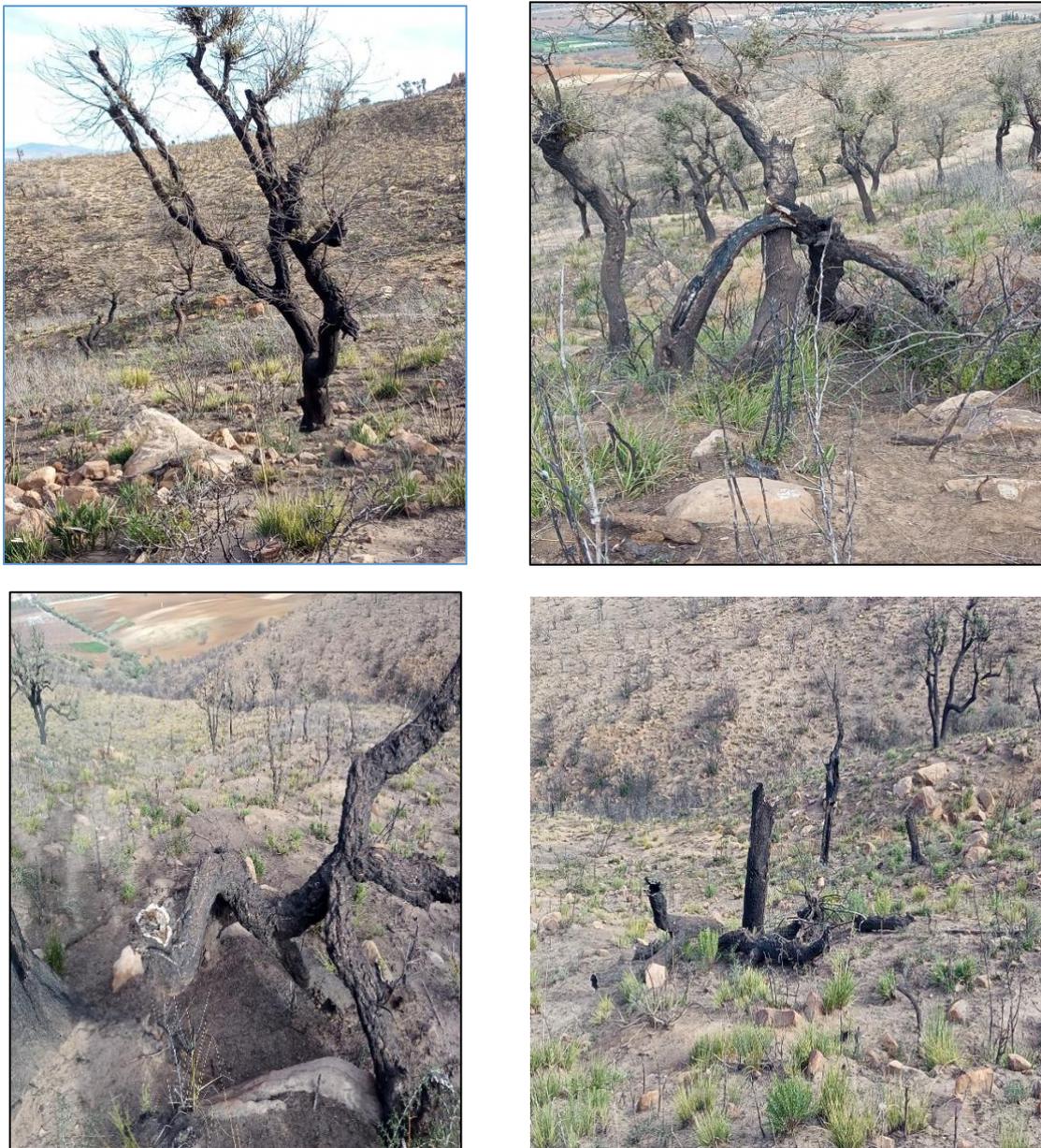


Figure 26. Vue d'ensemble de la zone brûlée par l'incendie de 2022 (Kecir, 2024)

L'échantillonnage a été abordé une année et 5 mois après le dernier feu ; en opérant par itinéraires et non par placettes selon les trois niveaux du terrain (bas-fond, pente et crête), à cause des grands vides créés par l'incendie.

Sur chaque arbre échantillon géoréférencé par le GPS, nous avons enregistré la hauteur totale, le diamètre sur écorce à hauteur de poitrine, la hauteur de l'écorçage, l'intensité des dégâts sur le tronc. L'évaluation des dommages et de leur intensité se sont basés sur l'état du fût et de la cime des arbres. Sur la base de ces paramètres, les arbres ont été classés deux catégories (Fig.27):

-Arbre vivant avec cime remplie : C'est un arbre issu d'un feu léger et rapide où se sont embrasés les combustibles les plus fins, comme les brindilles et les petites branches très proches du sol. Le feuillage est partiellement consumé et produit des cendres très foncées ou noires. Les sols ne sont pas affectés, les racines non plus et aucune déshydratation ne se produit. Les broussailles et les combustibles légers très lignifiés sont présents, et seules les feuilles des branches inférieures peuvent paraître sèches ou roussies à cause du stress hydrique provoqué par l'incendie. Pour cette catégorie, nous avons identifié 70 arbres.

-Arbre encore vivant avec cime altérée: C'est un arbre présentant des dégâts irréversibles dont la durée de survie est inconnue : Ces arbres subsistent généralement après un incendie abondant les pentes modérées. Le feuillage est consumé presque entièrement, produisant des cendres de couleur foncée ou noire. Les sols commencent à être affectés, une hydrophobie apparaît sur la couche superficielle jusqu'à 2 cm et ils prennent une couleur rougeâtre. Les racines ne sont pas affectées au-delà de leur couche la plus superficielle. Les arbres sont noircis et sans feuilles, mais ils ne sont pas totalement carbonisés, permettant une nouvelle regeneration aereienne et par souche. Pour cette catégorie, nous avons intercepté 90 arbres.

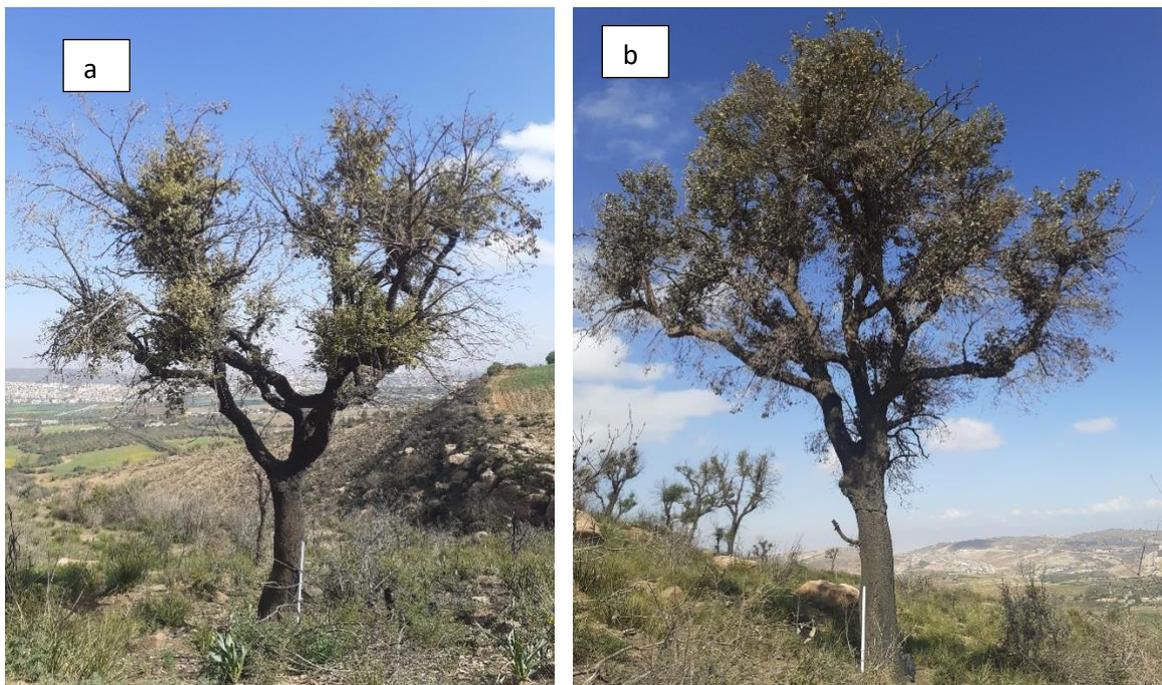


Figure 27. Les catégories d'arbres résiduels issues du feu de 2022 (a : cime altérée ; b : cime remplie) (Kecir, 2024)

Pour chacune de ces deux configurations, nous avons préparé une fiche imprimable sur laquelle nous avons enregistré l'épaisseur du liège sondé avec un jaugeur manuel, en changeant constamment l'exposition. Le diamètre du tronc a été mesuré à 1,30m du sol tandis que la

hauteur d'écorticage par un metre en acier. La conductivité électrique synonyme de la vitalité du liber (la mère du liège) a été mesurée par un conductivimetre, model Preciva (Fig.28).

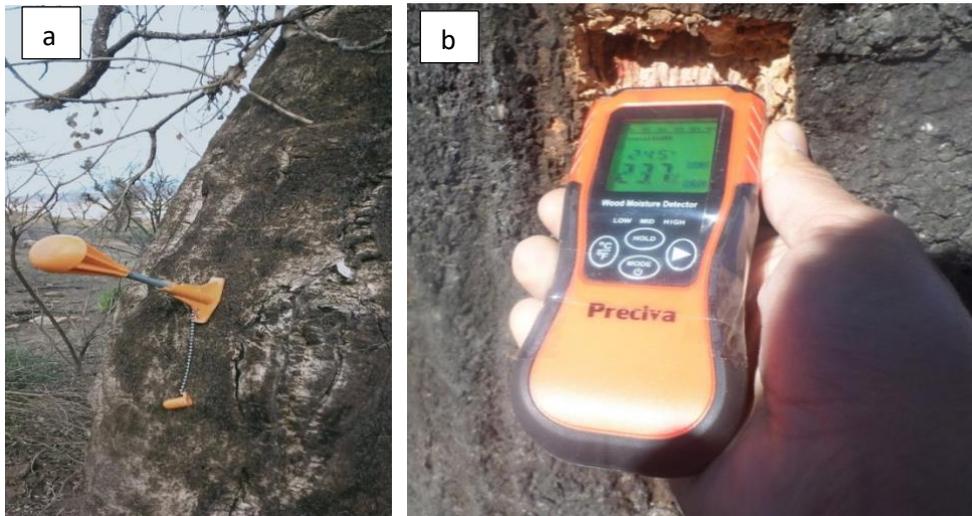


Figure 28. Prise de mesures différente sur le tronc flambé (a: Jaugeur d'épaisseur; b: conductivité électrique) (Kecir, 2024)

La hauteur totale des arbres a été mesurée par image numérique par le logiciel ImageJ. (Fig.29).

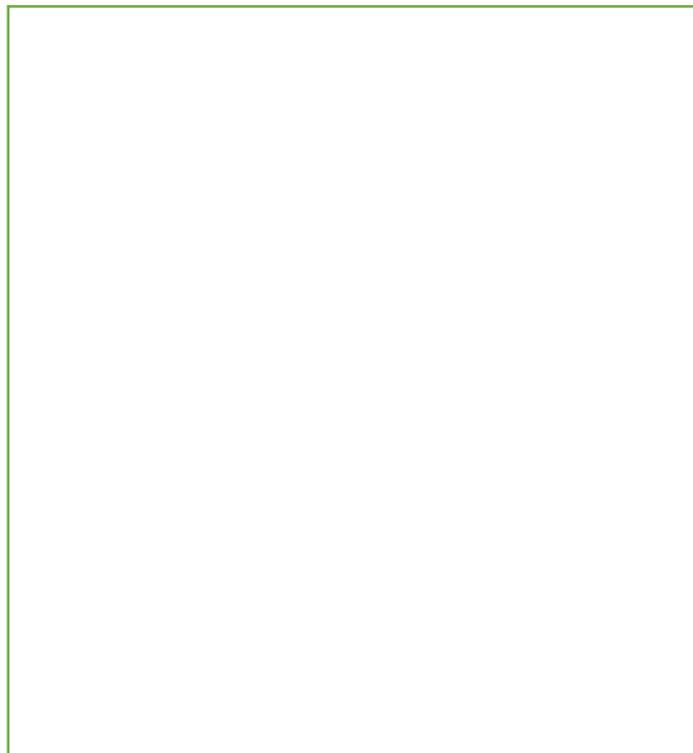


Figure 29. Technique numérique de la mesure de la hauteur totale de l'arbre échantillon (Kecir, 2024)

Les mesures comptabilisées sur le terrain ont été affectées à leurs caractéristiques respectives : de morphologie (hauteur, diamètre des arbres), d'exploitation (épaisseur du liège et hauteur d'écorçage) et d'état physiologique (les dommages sur le tronc et la conductivité de la mère du liège).

III.4- Analyse des facteurs influençant le comportement du feu

Tous les incendies qui se propagent librement subissent des contraintes physiques influençant leur comportement : celui-ci dépend de tous les facteurs qui régissent l'environnement du feu. Une fois le feu allumé, son expansion spatiale sera influencée par trois facteurs : le type de combustible, la météorologie et la topographie.

Pour expliquer une partie de ces trois facteurs, on s'est intéressé de plus près à l'impact des reliefs sur la propagation et l'intensité du feu sur les arbres échantillons, il s'agit en effet des facteurs de topographie des itinéraires entrepris :

- Le profil de dénivelée suivi par l'incendie.
- L'altitude du terrain.
- La dénivelé moyenne cumulée.
- La distance à la route.

Les profils de dénivelée ont été réalisés par Google earth et GPS Visualiser. Les altitudes du terrain ont été matérialisé sur le terrain par le GPS Garmin eTrex 20 par rapport à chaque arbre échantillon géolocalisé.

III.4.1- La dénivelé moyenne cumulée (DCM)

La dénivelé moyenne cumulée est définie par la somme en valeur absolue des dénivelées successives rencontrées le long de l'itinéraire « hi » (Fig.30).

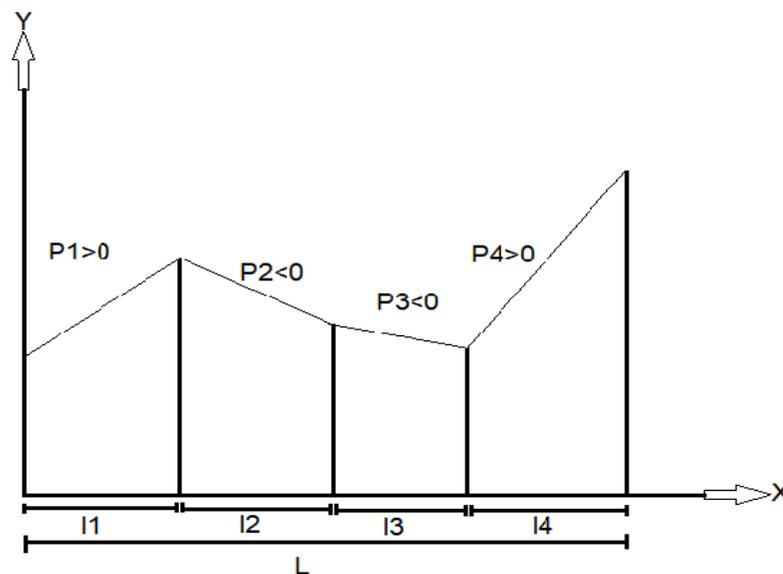


Figure 30. Dénivelée cumulée moyenne h/L

Avec h : dénivelée totale= $\sum h_i = \sum p_i \cdot l_i$

Le rapport de la dénivelée cumulée totale « h » à la longueur totale de l'itinéraire « L » permet de mesurer la variation longitudinale du relief « h/L ».

$$DCM = \frac{\sum \text{Dénivelée successives}}{\text{La longueur totale de l'itinéraire}} = \frac{h}{L}$$

Avec L : longueur totale de l'itinéraire= $\sum l_i$

Les valeurs seuils présentées dans le tableau ci-dessous sont déterminées par l'analyse de plusieurs itinéraires en Algérie (MTPL, 1977).

Tableau 4. Classification du relief en fonction de la dénivelée cumulée moyenne

Classification	Dénivelée cumulée moyenne
Plat	$h/L \leq 1,5\%$
Vallonnée	$1,5\% < h/L \leq 4\%$
Montagneuse	$h/L > 4\%$

Terrain plat : P=0 ; un terrain vallonné : succession de collines et de petites vallées

III.5-Modélisation mathématique

Afin de donner une certaine représentation statistique aux mesures effectuées sur le terrain, le modèle de régression linéaire multiple demeure l'outil statistique le plus habituellement mis en œuvre pour l'étude de données multidimensionnelles.

III.5.1-La régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est une méthode de régression mathématique généralisée de la régression linéaire simple. Elle vise à analyser les données quantitatives dont l'objet est d'étudier la causalité entre une variable particulière appelée variable expliquée ou dépendante (notée Y), et de k autres variables explicatives ou indépendantes (notées x_1, x_2, \dots, x_k).

Le principe de la régression linéaire est de modéliser une variable dépendante quantitative Y, au travers d'une combinaison linéaire de p variables explicatives quantitatives, x_1, x_2, \dots, x_n . L'équation linéaire du modèle s'écrit pour une observation i :

Où



- y_i est la variable à expliquer
- x_i est la variable explicative
- $\beta_1 x_i$ chaque variable indépendante (x) est multipliée par son propre coefficient bêta (β) qui sous sa forme non standardisée correspond à sa contribution relative dans le modèle.
- β_0 est la constante
- ε est l'erreur aléatoire

III.5.2-Modélisation graphique

Pour une meilleure compréhension des hypothèses à formuler, nous avons réalisé un modèle graphique reliant les variables explicatives issues du terrain et leur causalité à la variable dépendante ou à expliquer (Fig31) :

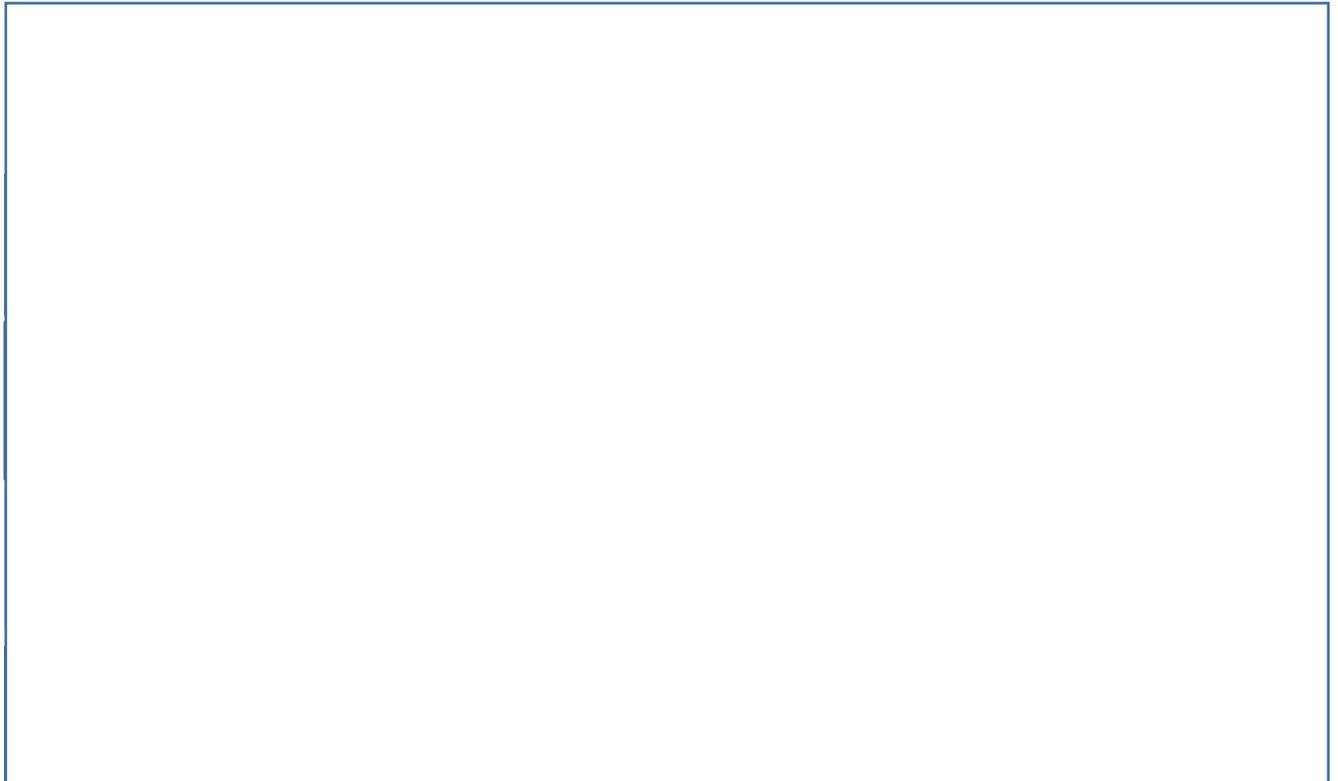
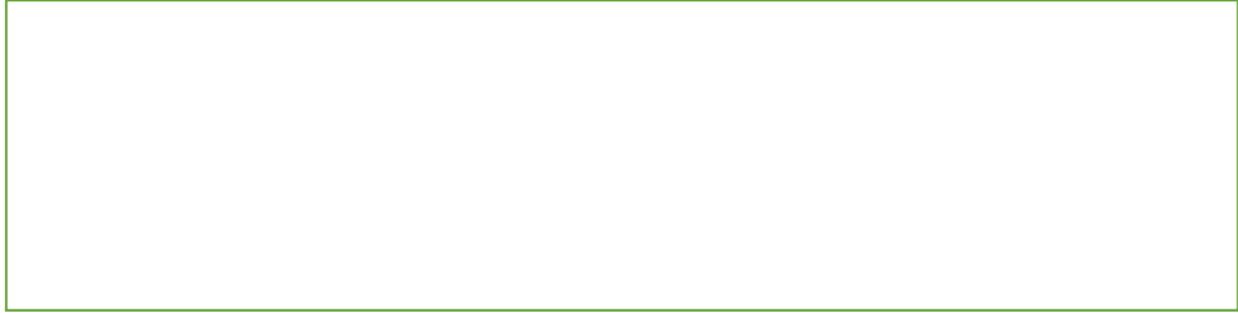


Figure 31. Modèle graphique pour caractériser les liens de causalité entre les variables explicatives et la variable dépendante

III.5.3-Démarche statistique

La démarche statistique à suivre pour analyser la régression linéaire multiple est la suivante :



- **Estimation des coefficients**

Le critère pour estimer les coefficients de régression, dans le contexte d'une régression linéaire multiple, est toujours le même que celui dans le cas d'une régression linéaire simple : la méthode des moindres carrés ordinaire (MCO).

En minimisant la somme des carrés des erreurs (résidus) entre la variable expliquée y et la somme $Z_i = b_0 + b_1X_{i1} + \dots + b_kX_{ik}$, On obtient des estimations des moindres carrés b_0, b_1, \dots, b_k .

- **La qualité d'ajustement**

Elle se définit par le calcul du coefficient de détermination (R^2) ou pourcentage de variance expliquée par la régression :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Propriétés : $0 \leq R^2 \leq 1$, permet de juger la

qualité de la régression :

-Idéal $R^2 = 1$

-Mauvaise régression : $R^2 = 0$

- **La significativité globale de la liaison**

$$\text{Modèle : } Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \dots + \beta_jX_j + \dots + \beta_kX_k + \varepsilon$$

La significativité du modèle est validée par les tests suivants :

-Test d'hypothèse de Fisher :

-H0 : $\beta_1 = \dots = \beta_k = 0$ (Y = $\beta_0 + \varepsilon$ ne dépend pas des x)

-H1 : Au moins un $\beta_j \neq 0$ (Y dépend d'au moins un x)

-Statistique utilisée :

$$SCE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \frac{SCE/P}{SCr/n-p-1} \rightarrow F(p, n-p-1)$$

$$SC1 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

F loi de Fisher à (p, n-p-1) degré de liberté :

Valeur f ayant la probabilité 0,05 d'être dépassée.

• **La significativité de l'apport marginal de chaque variable**

$$\text{Modèle : } Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_j X_j + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

La significativité de l'apport marginal est validée par les tests suivants :

-Test de Student :

H0 : $\beta_1 = 0$ (On peut supprimer x_j)

H1 : $\beta_1 \neq 0$ (Il faut conserver x_j)

-Statistique utilisée :

$$t_j = \beta_j / s_j$$

Rejet de H0 si $|t_j| \geq t_{1-\alpha/2} (n-k-1)$

• **Test de la colinéarité entre les variables indépendantes**

Il est nécessaire de tester la colinéarité, car la multi-colinéarité entre variable explicatives biaise les estimations de R^2 :

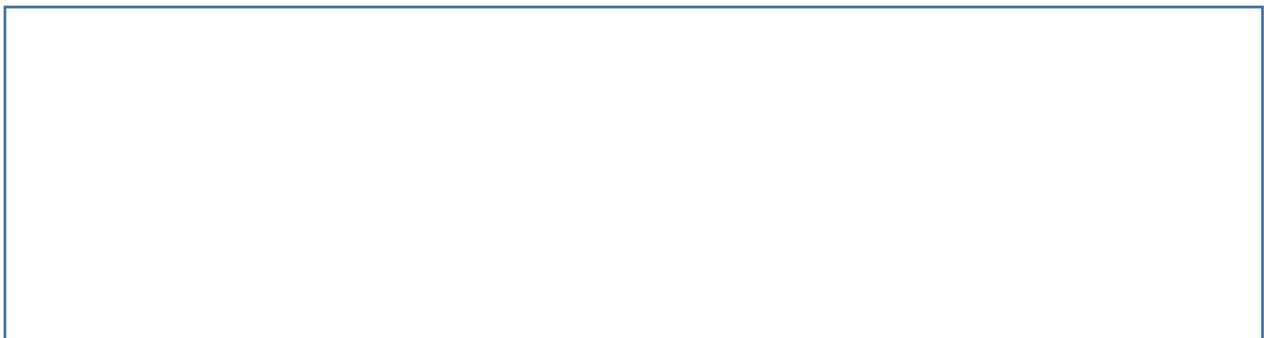
-Il faut étudier la tolérance : pourcentage de la variable explicative non expliquée par les autres variables.

-Tolérance (X_j) = $1 - R^2$ (elle doit être proche de 1, et en tout cas $> 0,3$) il faut aussi étudier le VIF (Variance inflation factor) : $VIF = 1 / \text{Tolérance}$.

-Degré d'augmentation de l'erreur lié à la multi-colinéarité (le VIF doit être inférieur à 4).

III.4.4-Problématique du modèle

La question qui se pose : quelles sont les variables qui affectent négativement les cimes après feu et fortifient la décision du recépage, il s'agit des hypothèses probables du modèle mathématique tirées de la littérature :



III.5-Protocol expérimental réalisé sur le terrain

Les différentes mesures effectuées sur les arbres rescapés ont été hiérarchisées selon quatre

Tableau5. Les variables explicatives prises en considération et leurs classes respectives (Dehane,2024)

Variables	Descriptif
Catégorie	
Hauteur (m)	
Diamètre (cm)	
Épaisseur du liège (EP)	
Hauteur d'écorage (HE)	
Domage sur le tronc (DT)	
Conductivité électrique (CE)	

III .6. Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel XLSTAT et SPSS.21 selon la méthode entrée. Les paramètres statistiques calculés sont :

- Statistiques descriptives (moyenne, écart type, min, max, intervalle de confiance).

- Statistiques de la régression (coefficient de détermination R^2 et R^2 ajusté, moyenne des carrés des erreurs (MCE) puis sa racine carrée, coefficient de corrélation de Pearson, test z des comparaisons des moyennes).
- Analyse de variance selon, le modèle III
- Paramètres du modèle proposé (validation des variables significatives).
- La relation entre les facteurs de topographie et l'aspect des cimes a été interprété par une analyse canonique de correspondance (ACC) par le logiciel XLSTAT.

Chapitre IV
Résultats et discussion

IV.1. Cartographie de la zone incendiée

Les limites géographiques de l'incendie sont illustrées dans la figure 31 par le biai du logiciel QGIS 2.18.28 (Fig. 32).



Figure 32. Représentation cartographique de la zone incendiée ainsi que les arbres échantillon (Dehane, 2024)

Selon la figure 32, l'incendie faisant l'objet du présent travail s'est propagé sur 92 ha de chêne liège. Il a particulièrement atteint la partie Est de la subéraie de Zariéffet.

Cette partie de la forêt se caractérise par des altitudes extrêmes variant entre 948-1053 m et des pentes oscillant entre 13 et 25%. L'exposition dominante est orientée vers le Nord-Est.

IV.2. Caractérisation des arbres échantillons

Les différentes mesures réalisées sur les arbres résiduels sont ordonnées selon leur variables explicatives :

IV.2.1. Les variables de morphologie

La morphologie des arbres rescapés de l'incendie de 2022 s'articule sur le diamètre sur écorce et la hauteur totale (Fig.33).

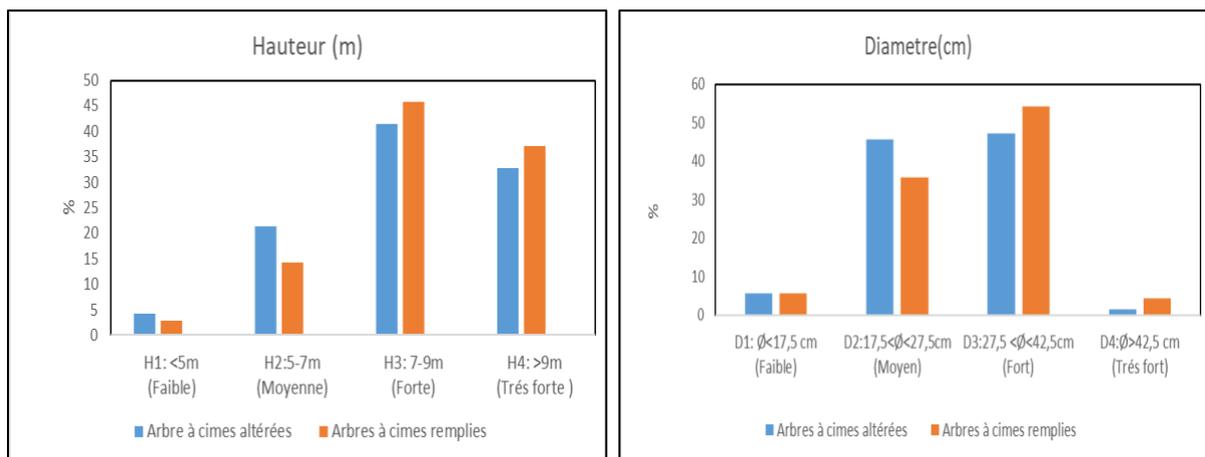


Figure 33. Distribution des variables explicatives (hauteur et diamètre) selon leurs classes respectives

La figure 33 mis en évidence une proportion importante des sujets résiduels dont la hauteur est incluse dans la classe H3(7-9m), soit un pourcentage de 41% (arbres à cimes altérées) contre 46% (arbres à cimes remplies). Les arbres dont la morphologie est basse H1<5m sont minimes et ne représentent que 4 et 3% respectivement pour les deux configurations. La différence entre les moyennes est significative (Test z (valeur observée)=-2,368; p-value (bilatérale)= 0,018).

En ce qui concerne les diamètres rescapés, les deux classes D2 et D3 dominent simultanément avec 46%-36% et 47%-54%. La différence entre les moyennes est égale à 0. Test z (valeur observée)= -1,181 ; p-value (bilatérale)=0,237).

IV.2.3. Les variables d'exploitation

Les mesures des variables d'exploitation du liège englobent l'épaisseur et la hauteur d'écorçage (Fig.34).

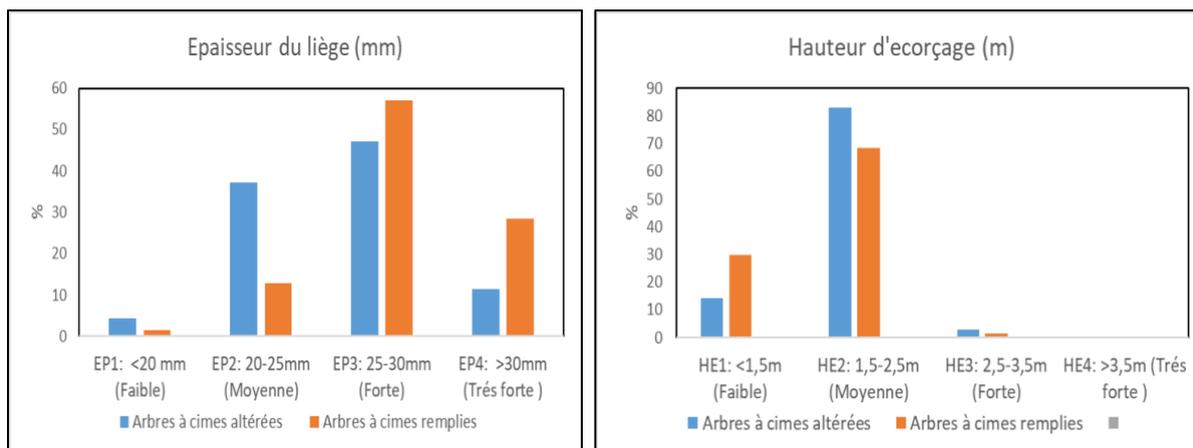


Figure 34. Distribution des variables explicatives (épaisseur et hauteur d'écorçage) selon leurs classes respectives

Les fréquences illustrées dans la figure 34 indiquent une dominance du liège à épaisseur faible (EP1) et moyenne (EP2) de l'ordre de 4 et 37% (arbres à cimes altérées) contre 57 et 29%

d'épaisseur forte(EP3) et très forte(EP4) (arbres à cimes remplies). Le test z indique une différence significative entre les deux configuration (z (valeur observée= -3,262 ;p-value (bilatérale= 0,001).

Les hauteurs d'écorçage enregistrent une grande représentativité dans la classe HE2, soit un taux de 83 et 69% pour les deux configurations. Le test z indique une différence non significative (z (valeur observée=1,641; p-value (bilatérale= 0,101).

IV.2.4. Les variables d'état physiologique

L'état physiologique post-incendie caractérise les dommages perpétrés sur le tronc et la conductivité électrique de la mère du liège (Fig.35).

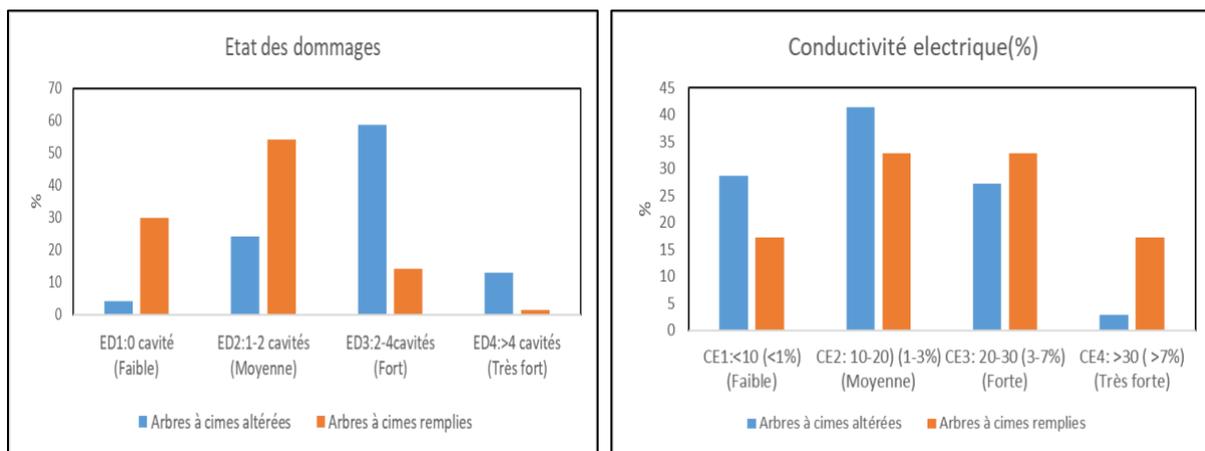


Figure 35. Distribution des variables explicatives (état des dommages et conductivité électrique) selon leurs classes respectives

La figure 35 montre éloquentement que les arbres à cime altérées détiennent les fortes proportions de blessures sur le tronc, particulièrement dans la classe ED3 (59%). Par contre, les sujets aux cimes remplies prennent le dessus dans la classe ED2 (54%). Les dommages à forte gravité de la classe ED4 enregistrent 13% (arbres à cime altérées) contre les blessures à faible gravité (ED1= 30%) (arbres à cime remplies). Le test z indique une différence significative entre les deux configurations (z (valeur observée=8,100;p-value (bilatérale <0,0001).

La conductivité électrique faible et moyenne s'agence aux classes CE1(29%) et CE2 (41%) (arbres à cime altérées) que celle forte et très forte des classes CE3(33%) et CE4(17%) (arbres à cime remplies). Le test z mentionne une différence significative entre les deux configurations (z (valeur observée=-2,932; p-value (bilatérale =0,003).

IV.3-Analyse des facteurs de topographie influençant le comportement du feu

L'impact des reliefs sur la propagation du feu et sur son intensité par rapport aux arbres résiduels ont été mis en évidence selon les itinéraires entrepris dans la zone d'étude.

IV.3.1. Les variations longitudinales du relief suivi par l'incendie

Afin de matérialiser le passage de l'incendie de l'année 2022, nous avons opté par le traçage des profils de dénivelée selon les données recueillies du terrain à savoir les coordonnées géographiques des arbres résiduels, l'altitude et la distance parcourue entre chaque arbre échantillon (Fig.36).

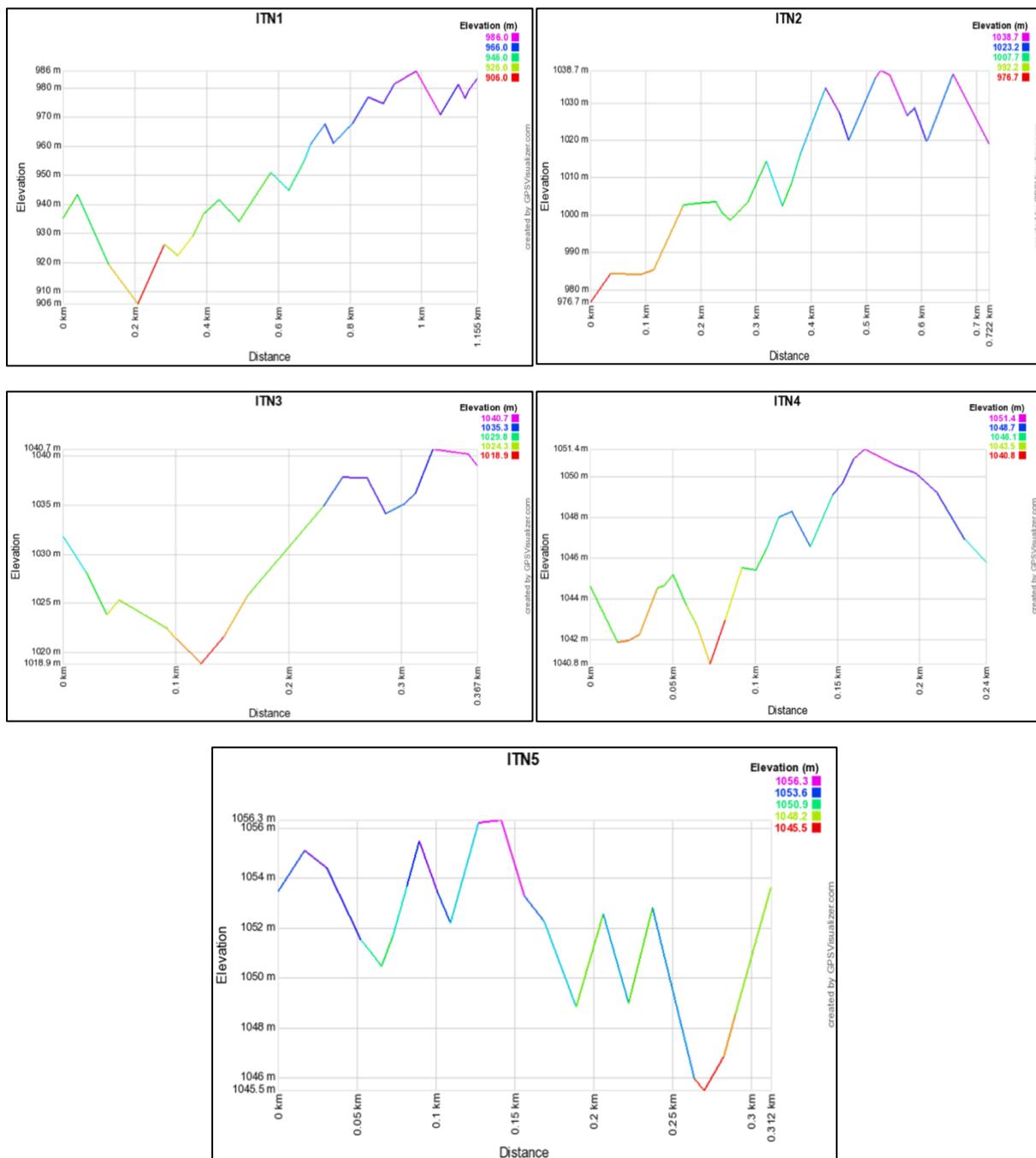


Figure 36. Les profils de dénivelée suivis par l'incendie

Le tableau exhibe les principaux paramètres de topographie mesurés sur le terrain (Tab.6).

Tableau 6. Mesures topographiques des itinéraires entrepris

	Durée du trajet (Heure)	Distance (m)	Gain d'élévation moyen (m)	Perte d'élévation moyenne (m)	Pente moyenne (%)	Altitude moyenne (m)
Itineraire1	6	1155	140	-92	17,8; -18,15	948
Itineraire2	5,5	722	122	-76,6	23,4; -20,6	1023
Itineraire3	4	367	42,3	-35,5	13,6; -14,5	1030
Itineraire4	3,5	240	25	-23,1	13; -16,1	1046
Itineraire5	2,7	312	30,4	-29,6	25; -15,3	1051

L'échantillonnage que nous avons adopté dans la zone d'étude a suivi avec fidélité le passage percé par l'incendie selon la topographie du terrain. Les résultats du tableau 6 affichent une différence marquée entre les 5 trajets.

IV.3.2. La dénivelée cumulée moyenne du relief

En effet, à travers l'itinéraire n°1, synonyme de bas-fonds et point de départ de l'incendie (948m), la distance parcourue était la plus longue avec 1155m, justifiée par une montée très escarpée de 140m, et une pente moyenne raide de l'ordre de 17,5% ; suivi d'une descente de 92m avec une pente de -18,15%.

Il en est de même pour l'itinéraire n°2, d'une distance de 722m, la montée était très abrupte aux alentours de 1023m d'altitude, validée par une pente rude de 23,4% et un gain d'élévation de 122m. En revanche, la perte d'élévation de 76,6 m accusait une pente de -20,6%.

En abordant le troisième itinéraire long de 367m, l'accessibilité en escaladant le terrain manifestait un certain adoucissement avec un gain et une perte d'élévation de 42,3 et 35,5m ; reliés respectivement à une pente de 13,6% et -14,5%. D'ailleurs, cette situation a été aussi constatée sur les itinéraires n°4 et n°5. Pour des parcours 240 et 312m, l'élévation en gravissant le relief s'apaisait significativement vers 25 et 30,4m et descendait vers -23,1 et -29,6m.

En conséquence, la dénivelée cumulée moyenne exprimée par la valeur absolue de tous les dénivelées positives et négatives le long de l'itinéraire entretenu totalisaient 4,15%. Cette dénivelée caractérise un relief montagneux.

IV.3.3. Les variations altitudinales du relief suivi par l'incendie

La dénivelée cumulée se calcule aussi par l'addition de toutes les différences d'altitudes franchies en s'élevant et en descendant. Cette donnée est une bonne indication du mode de propagation de l'incendie et son intensité (Fig.37).

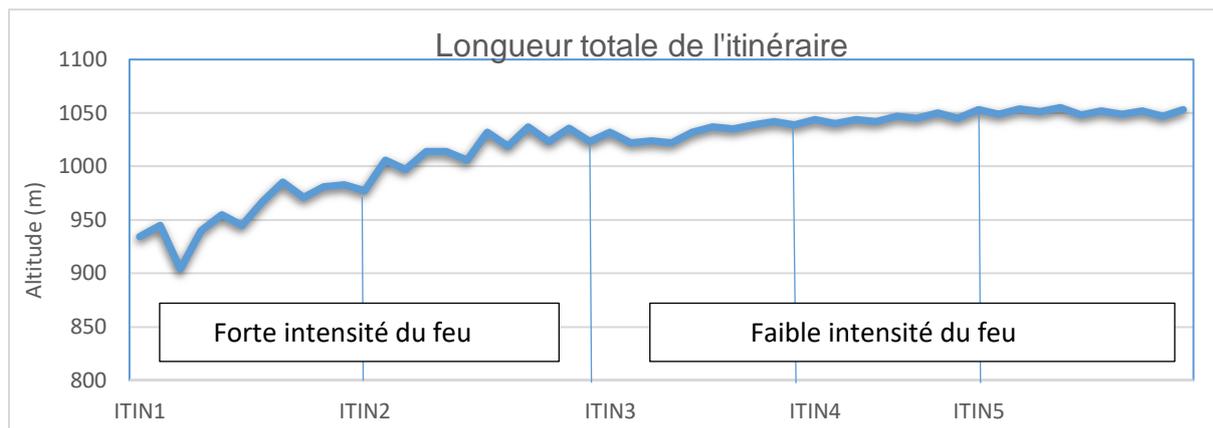


Figure 37. Profil altimétrique de la dénivelée cumulée par rapport aux cinq itinéraires (Dehane, 2024)

On se focalisant sur le profil de la dénivelée cumulée on s'aperçoit une répartition équitable entre les sections des montées avec 21 dénivelées positives et celles des descentes avec aussi 21 dénivelés négatives :

- **Itinéraire 1**

Le profil de l'itinéraire 1 comptabilise 4 dénivelées positives de 114m et 3 négatives de -65m soit un feu ascendant sur 49m.

- **Itinéraire 2**

Le profil de l'itinéraire 2 enregistre 5 dénivelées positives de 103 m et 5 négatives de -57m soit un feu ascendant de 46m.

- **Itinéraire 3**

Le profil de l'itinéraire 3 détient 4 dénivelées positives de 24 m et 4 négatives de -17m soit un feu ascendant sur 7m.

- **Itinéraire 4**

Le profil de l'itinéraire 4 renferme 3 dénivelées positives de 14 m et 4 négatives de -13m soit un feu ascendant sur 1m.

- **Itinéraire 5**

Le profil de l'itinéraire 5 recèle 5 dénivelées positives de 22 m et 5 négatives de -22 m soit un feu de sol sur 0m.

Les valeurs des dénivelées cumulées positives et négatives indiquent éloquemment la difficulté du parcours, l'escalade totale s'est déroulée sur 277 m et la descente sur -174 m au total. La dénivelée globale s'est effectuée donc sur une montée de 103m. Ces résultats montrent que le feu qui s'est déclenché le 24 octobre 2022 est un feu ascendant.

La superposition des dénivelées positives et négatives des cinq tronçons (dénivelée globale de 103m) au passage de l'incendie indique la vitesse de propagation et le temps mis dans l'embrasement des arbres. Il s'agit donc d'une forte intensité du feu entre l'itinéraire 1 et 3.

C'est-à-dire le feu est parti du sol pour se transformer rapidement en un feu de cime sous l'emprise de la pente.

Par contre, en arrivant aux itinéraires 4 et 5 la propagation de l'incendie s'est ralentie. La dénivelée globale de 1m et de 0m se raccorde plutôt à un feu de moyenne à faible intensité (Feu de sol).

IV.3.4. Interprétation statistique

La relation entre les facteurs de topographie et l'aspect des cimes a été interprétée par une analyse canonique de correspondance (ACC) en incorporant les modalités suivantes (Fig. 38) :

1. Etat de la cime (Cime) (cime1: faiblement altérée; Cime 2: moyennement altérée ; Cime 3: fortement altérée ; Cime 4: très fortement altérée)
2. L'altitude (Altitude)
3. Distance à la route (Dist-route)
4. La dénivelée cumulée moyenne (Dénivelée)
5. Itinéraire (Itn1, Itn2, Itn3, Itn4 et Itn5)

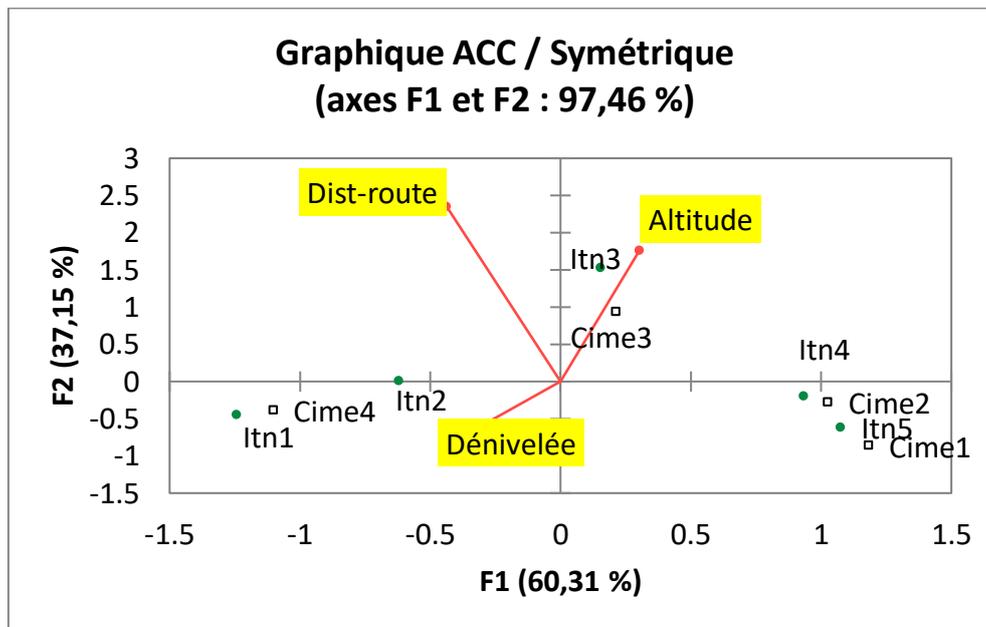


Figure 38. Analyse canonique de correspondance (ACC) entre topographie et l'aspect des cimes

La figure 39 met en exergue une discordance totale entre le feu de 2022 et la distance à la route nationale (R22) que ce soit sur le plan factoriel F1 et F2. Ceci s'oppose à ce qui a été rapporté jusqu'à maintenant sur l'historique des incendies dans cette subéraie, dans la majorité des cas imputé à la route nationale.

Le paramètre gradient altitudinal du terrain (Altitude) semble corrélé aux itinéraires 3 et 4 dans sa partie élevée. D'ailleurs, cette observation s'aligne aux états de cimes 1 et 2 (faiblement altérée et moyennement altérée). A l'opposé, les itinéraires 1 et 2 se rattachant plus aux altitudes basses confirmant le départ du feu des bas-fonds et non de la crête (la route nationale).

Le plan factoriel met aussi en avant une forte réciprocity entre la dénivelée et la forte concentration des arbres résiduels à cimes 3 et 4 (Fortement altérée et très fortement altérée) soit un taux de 71%. Ce constat corrobore ce qui a été avancé auparavant, la propagation de l'incendie s'est déclenchée des bas-fonds et elle était fortement contrariée par le relief très accidenté du terrain dans sa partie basse que haute. En effet, le feu a émis une forte chaleur thermique en se propageant du sol vers les cimes dans les itinéraires 1,2 et 3, puis son intensité s'est réduite à partir de l'itinéraire 4 et 5, en se répandant plus sur le sous-bois et le sol sans atteindre les troncs et les cimes et les autres peuplements au-dessus de la route.

Tous les incendies qui se propagent en forêt endurent les contraintes physiques environnementales influençant leur comportement. Une fois le feu déclenché, sa propagation sera influencée par trois facteurs : le type de combustible, la météorologie et la topographie.

La topographie joue un rôle très important sur le comportement du feu par l'accélération ou au contraire le ralentissement de la propagation du feu. Dans les cas les plus fréquents, dans les montées, sur un versant à forte pente, dans le sens du vent, le feu accélère sa diffusion thermique. Alors par contre dans les descentes, il ralentit, mais il peut se propager sur l'autre versant par des sautes provoquées par le vent (Plana et al., 2016). Des études expérimentales sur le comportement du feu ont montré que la vitesse de propagation double sur une pente de 10 à 15 % et quadruple sur une pente de 20 % (Sara et al., 2006).

Dans le cas de notre travail, le feu est parti des bas-fonds en suivant un mouvement ascendant (Mr Dehane présent le jour de l'incendie). Durant les premières heures de cette journée (10h à 13h), le vent soufflait dans le sens de la pente. Ces moments étaient très marqués dans les trois premiers tronçons.

Un feu ascendant brûle d'autant plus rapidement que la pente est forte, car l'efficacité des transferts thermiques par rayonnement et par convection sont à leur optimum. En effet, en montée, l'angle entre le feu et son combustible se trouve réduit, c'est le contraire en descente ou en terrain plat (Trabaud, 1987). En montant la pente, les combustibles reçoivent plus de chaleur parce qu'ils sont sur le trajet de l'air chaud ascendant, en chauffant l'air.

Point de vue pyrologique, la transmission du rayonnement dépend du facteur de forme entre la surface formée par le front de flamme à l'échelle macroscopique. Il en résulte que le combustible en aval d'une pente reçoit plus de chaleur que celui qui se trouve en amont de la pente.

Par la suite dans la même journée vers 15 h de l'après-midi, le vent est devenu imprévisible, car sa vitesse et sa direction ont pris un sens latéral vers la direction de l'Est, ce qui a changé la forme du feu et le mouvement de convection et de rayonnement. En effet, dans l'après-midi, le feu s'est ralenti dans les hauteurs depuis la chaussée ; mais il s'est propagé avec une nouvelle intensité sur l'autre versant adjacent composé de pin d'Alep par des sautes de flammes provoquées par le vent latéral (Fig. 39).

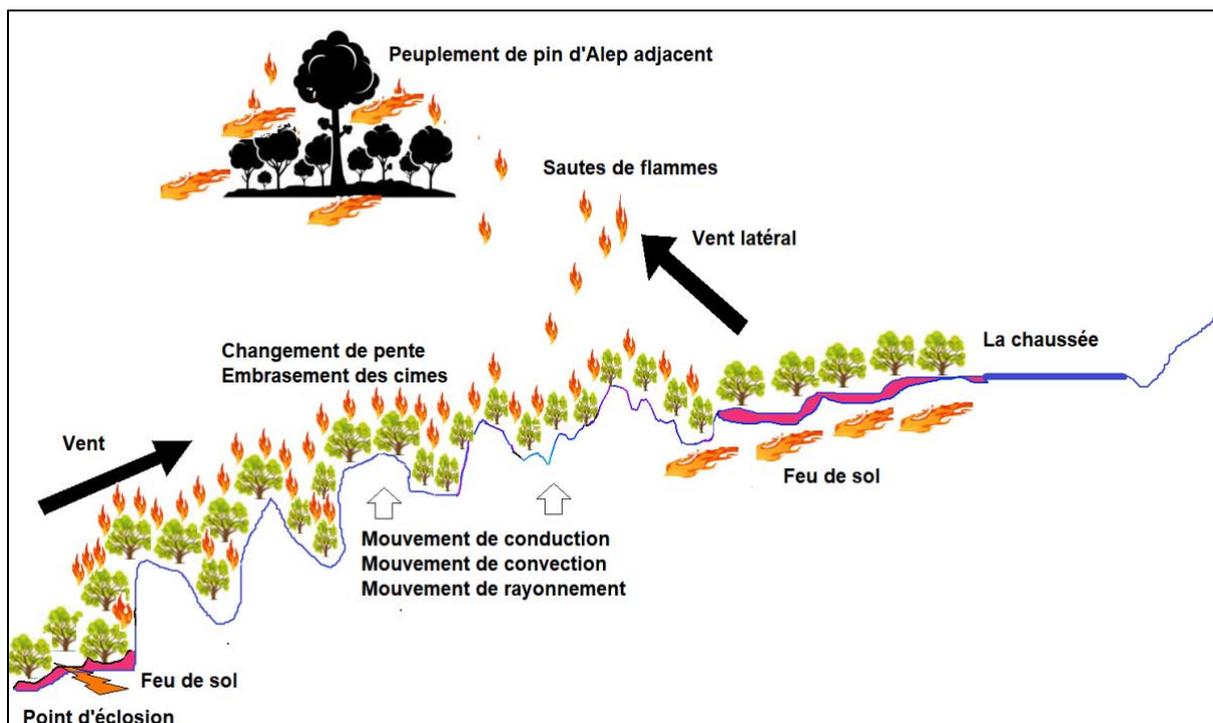


Figure 39. Schéma explicatif de la propagation de l'incendie du 22 octobre à Zariéffet (Shématisé par Dehane, 2024)

L'action du paramètre vent est d'une importance capitale sur la vitesse de la propagation du feu. Celle-ci varie entre 1cm/s et 167cm/s, vitesse maximale enregistrée pour un feu (Trabaud, 1979).

Sous le vent de l'incendie, des foyers secondaires éloignés peuvent naitre par des mouvements de projection (Sautes de feu). Des parties incandescentes sont portées bien au-delà des fronts de feu. Les plus grandes distances enregistrées dépassent les 6 km (Naveh, 1994).

IV.4-Modélisation mathématique

IV.4.1-Estimation des coefficients de regression

Afin de comparer individuellement les variables explicatives à la variable expliquée, les mesures brutes tirées des arbres-échantillons ont été linéarisées à l'aide du modèle linéaire simple. Le calcul des coefficients de regression linéaire ainsi que leurs courbes respectives sont renseignés dans la figure 40 et 41.

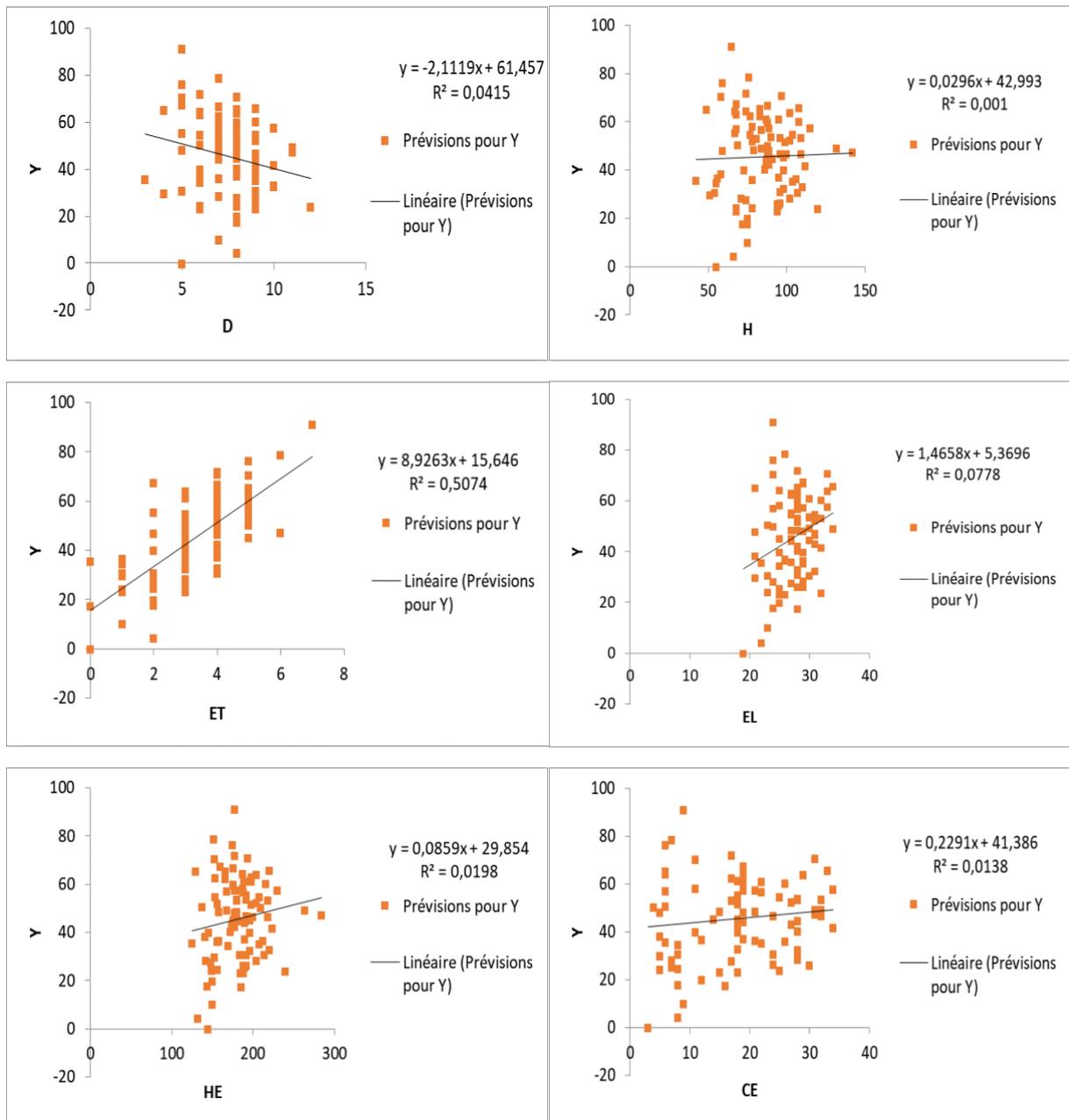
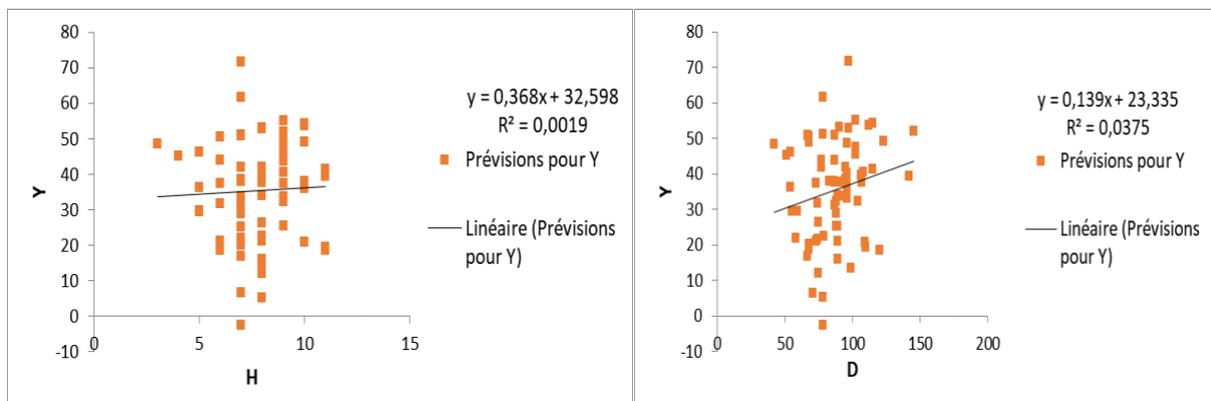


Figure 40. Courbes de regression linéaire simple des valeurs explicatives en fonction de l'état de la cime altérée



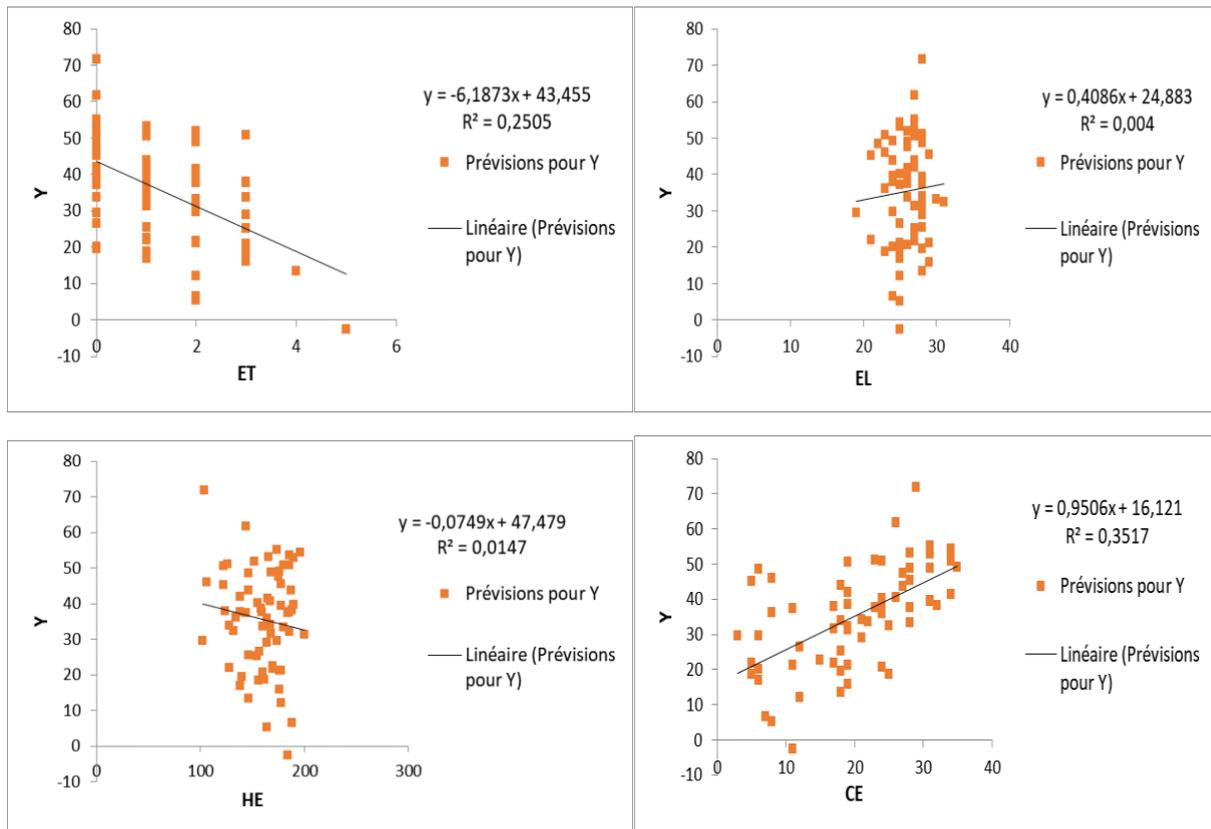


Figure 41. Courbes de regression linéaire simple des valeurs explicatives en fonction de l'état de la cime remplie

Les courbes de regression mettent en évidence l'ajustement d'un modèle de type $y = a x + b$ par la méthode des moindres carrés.

Pour les sujets à cimes altérées, les résultats indiquent un bon ajustement par rapport au modèle linéaire simple uniquement pour les variables ET (état du tronc, $r=0,71$), et EL (épaisseur du liège, $r= 0,27$).

Pour les arbres à cimes remplies, l'ajustement par la méthode des moindres carrés révèle un bon ajustement par rapport au modèle linéaire simple uniquement pour les variables ET (état du tronc, $r=0,50$) et la conductivité électrique, $r=0,59$).

IV.4.2-La qualité d'ajustement

La première sortie du modèle se définit par le calcul du coefficient de détermination (R^2) ou pourcentage de variance expliquée par la régression (Tab.7 et 8).

Tableau 7. Statistiques de la régression des sujets à cime altérée

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	0,660 ^a	0,436	0,394	20,33170

a : Valeurs prédites : (constantes), CE, ET, HE, H, D, EL

Variable dépendante : Cime

Tableau 8. Statistiques de la régression des sujets à cime remplie

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	0,702 ^a	0,493	0,445	14,58385

Valeurs prédites : (constantes), CE, ET, HE, H, D, EL

Variable dépendante : Cime

Respectivement pour les deux configurations (état de cime), les deux tableaux mettent en exergue un apport d'information globale de 44% et 49% de la part des variables explicatives par rapport à la variable dépendante y. Le coefficient de corrélation entre les variables explicatives de y est de l'ordre de 0,66 (cime altérée) et 0,70(cime remplie). La qualité de la régression est très bonne dans les deux cas.

IV.4.3-La significativité globale de la liaison

La deuxième sortie du modèle montre que la signification de ce dernier est inférieure à 0,05. L'absence de liaison entre les variables peut être rejetée. Globalement, en comparant la signification associée (0,000) au seuil de signification, on admet aussi que la régression est très significative pour les cimes altérées (F= 10,65 ; p<0,000) et remplie (F= 10,22 ; p<0,000) c'est-à-dire au moins un $\beta_j \neq 0$ (Y dépend d'au moins un x) (Tab.9 et 10).

Tableau 9. Analyse de variance Anova^a des cimes altérées

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
1 Régression	26432,126	6	4405,354	10,657	0,000 ^b
Résidu	34310,374	83	413,378		
Total	60742,500	89			

a. Variable dépendante : CIME

b. Valeurs prédites : (constantes), CE, ET, HE, H, EL, D

Tableau 10. Analyse de variance Anova^a des cimes remplies

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
1 Régression	14101,728	6	2350,288	10,229	0,000 ^b
Résidu	14475,772	63	229,774		
Total	28577,500	69			

a. Variable dépendante : Cime

b. Valeurs prédites : (constantes), CE, ET, HE, EL, H, D

IV.4.4-La signification de l'apport marginal de chaque variable

La troisième sortie du modèle concerne les coefficients. Sur la base des paramètres des deux modèles du tableau 11 et 12, les variables suivantes apportent de l'information significative pour expliquer la variabilité de la variable dépendante Cime : H,ET,EL CE (cime altérée) et H,ET,CE (cime remplie) .

Tableau 11. Paramètres du modèle (cime altérée)

	Source	β	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Codes de signification des p-valeurs
$\beta 0$	Constante	-78,749	34,777	-2,264	0,026	-147,918	-9,579	*
$\beta 1$	H	-9,468	3,226	-2,935	0,004	-15,884	-3,052	**
$\beta 2$	D	-0,009	0,434	-0,022	0,983	-0,872	0,853	°
$\beta 3$	ET	9,190	1,699	5,410	<0,0001	5,811	12,569	***
$\beta 4$	EL	6,766	1,722	3,929	0,000	3,341	10,190	***
$\beta 5$	HE	0,006	0,151	0,043	0,966	-0,294	0,307	°
$\beta 6$	CE	-1,144	0,564	-2,028	0,046	-2,267	-0,022	*

Codes de signification : 0 < *** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < . < 0.1 < ° < 1

Tableau 12. Paramètres du modèle (cime remplie)

	Source	β	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)	Codes de signification des p-valeurs
$\beta 0$	Constante	105,535	27,318	3,863	0,000	50,945	160,125	**
$\beta 1$	H	-5,409	1,972	-2,743	0,008	-9,349	-1,469	**
$\beta 2$	D	-0,078	0,176	-0,444	0,658	-0,429	0,273	°
$\beta 3$	ET	-5,548	1,614	-3,438	0,001	-8,774	-2,323	***
$\beta 4$	EL	-1,257	0,956	-1,315	0,193	-3,168	0,653	°
$\beta 5$	HE	-0,157	0 ,090	-1,739	0,087	-0,338	0,023	°
$\beta 6$	CE	2,179	0,340	6,415	<0,000	1,500	2,858	***

Codes de signification : 0 < *** < 0.001 < ** < 0.01 < * < 0.05 < . < 0.1 < ° < 1

Pour les sujets à cimes altérées, à travers le test de student on remarque que chaque variable (β) \neq 0 ce qui signifie la conservation des x_j et de l'hypothèse. On déduit le même raisonnement puisque t absolu |t| est supérieure à t tabulé, c'est-à-dire les x_j sont significatives.

La lecture des coefficients non standardisés (β) montre aussi que les variables explicatives β_2 , et β_5 ne sont pas significatives (< 0.1 < ° < 1).

- Equation du modèle (Cime altérée) se valide comme suit :

$$\text{Cime Altérée} = -78,74-9,46H-0,009D+9,19ET+6,76EL+0,006HE-1,14CE$$

Dans ce modèle les variables ET et El sont la plus influente (Fig.42).

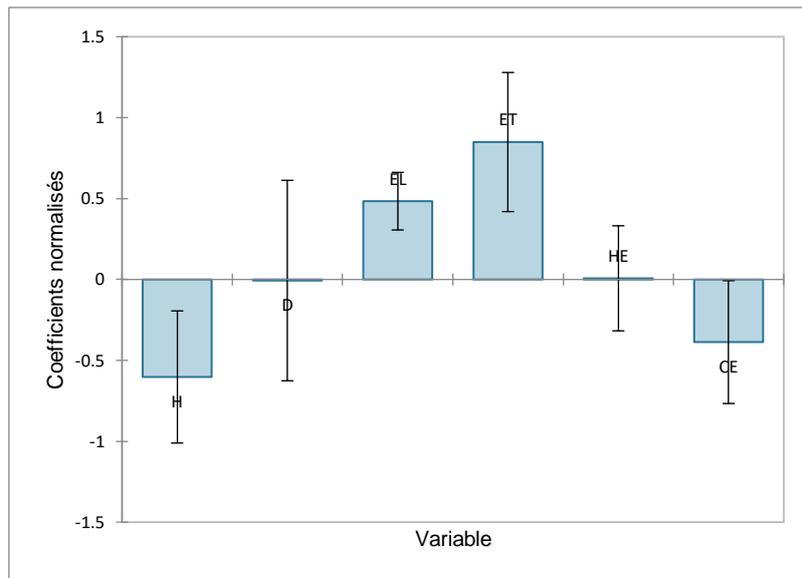


Figure 42. Influence normalisée des variables explicatives (cime altérée)

Le même raisonnement statistique s'observe pour les sujets à cimes remplies, t absolu $|t|$ est supérieure à t tabulé, c'est-à-dire les x_j sont significatives. La lecture des coefficients non standardisés (β) révèle que les variables explicatives β_2 , β_4 et β_5 ne sont pas significatives ($0.1 < p < 1$).

- Equation du modèle (Cime remplie) :

$$\text{Cime remplie} = 105,535 - 5,409H - 0,078D - 5,548ET - 1,257EL - 0,157HE + 2,179CE$$

Dans ce modèle la variable CE est la plus influente (Fig.43).

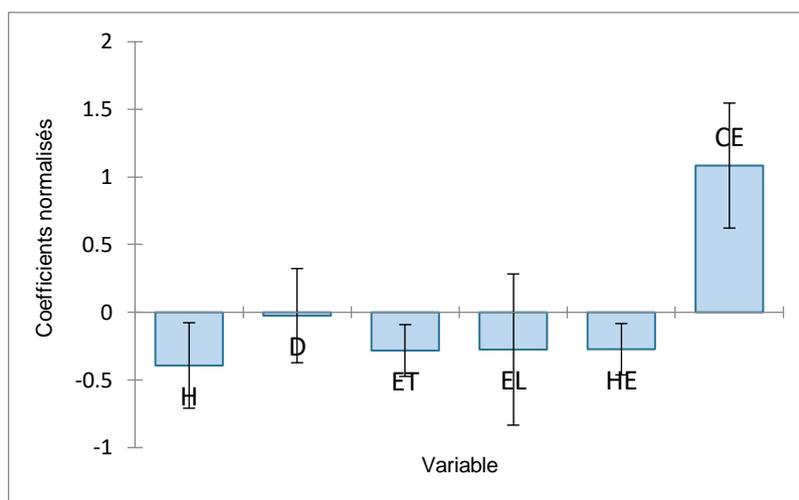


Figure 43. Influence normalisée des variables explicatives (cime remplie)

IV.4.5-Tester la colinéarité entre les variables indépendantes

Les statistiques de la multi-colinéarité montrent que la tolérance entre les variables est proche du 1 et en tout cas >0,3 c'est-à-dire 0,49. D'ailleurs le VIF des six variables est inférieur à 4. Cela veut dire qu'il n'y a pas de problèmes de colinéarité entre les variables (Tab. 13 et 14).

Tableau 13. Statistique de multi-colinéarité (cime altérée)

	R ²	Tolérance	VIF
D	0,0415	0,9585	1,0433
H	0,001	0,999	1,0010
ET	0,507	0,493	2,0284
EL	0,077	0,923	1,0834
HE	0,019	0,981	1,0194
CE	0,013	0,987	1,0132

Tableau 14. Statistique de multi-colinéarité (cime remplie)

	R ²	Tolérance	VIF
D	0,019	0,981	1,019
H	0,037	0,963	1,038
ET	0,250	0,75	1,333
EL	0,004	0,996	1,004
HE	0,014	0,986	1,014
CE	0,351	0,649	1,541

IV.4.6-Interprétation et choix du modèle

On se focalisant sur les deux modèles obtenus, on remarque que les hypothèses D(p=0,983) et HE (p=0,966) ne sont pas intégrées dans l'explication de Y (cime altérée). De ce fait les Hypotheses H2 et H5 ne sont pas validées et doivent être supprimées de l'équation.

$$\text{Cime altérée} = -78,74 - 9,46H - 0,009D + 9,19ET + 6,76EL + 0,006HE - 1,14CE$$

Le même constat se précise, pour les sujets à cime remplie, les hypothèses D(p=0,658), EL(p=0,193) et HE (p=0,087) ne sont pas intégrées dans l'explication de Y. De ce fait les hypothèses H2, H4 et H5 ne sont pas validées et doivent être aussi ratifiée de l'équation.

$$\text{Cime remplie} = 105,535 - 5,409H - 0,078D - 5,548ET - 1,257EL - 0,157HE + 2,179CE$$

- Décision statistique :

On doit refaire la régression pour les deux modèles

IV.4.7-Validation finale du modèle

Les statistiques des coefficients de la nouvelle regression sont illustrées dans les tableaux 15 et 16.

-Pour les sujets à cime altérée, la suppression des deux variables D et HE a engendré les paramètres du modèle suivant (Tab.15) :

Tableau 15. Paramètres statistiques des coefficients non standardisés et standardisés (cime altérée)

Modèle	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.	Statistiques de colinéarité	
	A	Erreur standard	Bêta			Tolérance	VIF
1 (Constante)	-78,375	32,355		-2,422	0,018		
H	-9,496	1,863	-0,605	-5,096	0,000	0,472	2,118
ET	9,195	1,604	0,484	5,731	0,000	0,932	1,073
EL	6,774	1,615	0,850	4,193	0,000	0,162	6,187
CE	-1,146	0,554	-0,388	-2,070	0,041	0,190	5,274

La nouvelle équation du modèle final est comme suit :

$$Y (\text{Cime altérée}) = -78,37 - 9,49H + 9,19ET + 6,77EL - 1,14CE$$

Parmi les variables explicatives, les variables ET et EL demeurent les plus influentes.

-En ce qui concerne les sujets à cime remplie, l'élimination des hypothèses H2, H4 et H5 a engendré une nouvelle regression, illustrée dans le tableau.

Tableau 16. Paramètres statistiques des coefficients non standardisés et standardisés (cime remplie)

Modèle	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.	Statistiques de colinéarité	
	A	Erreur standard	Bêta			Tolérance	VIF
1 (Constante)	56,008	9,292		6,027	0,000		
H	-6,582	1,598	-0,552	-4,118	0,000	0,458	2,184
ET	-6,113	1,606	-0,347	-3,807	0,000	0,989	1,012
CE	1,926	0,305	0,844	6,317	0,000	0,461	2,169

La nouvelle équation de la droite de regression et du modèle final est la suivante :

$$Y (\text{Cime remplie}) = 56,01 - 6,58H - 6,11ET + 1,93CE$$

Parmi les variables explicatives, la variables CE reste la plus influente

Les deux modèles conceptuels validés pour les deux configurations de cimes sont illustrés dans les figures 44 et 45.

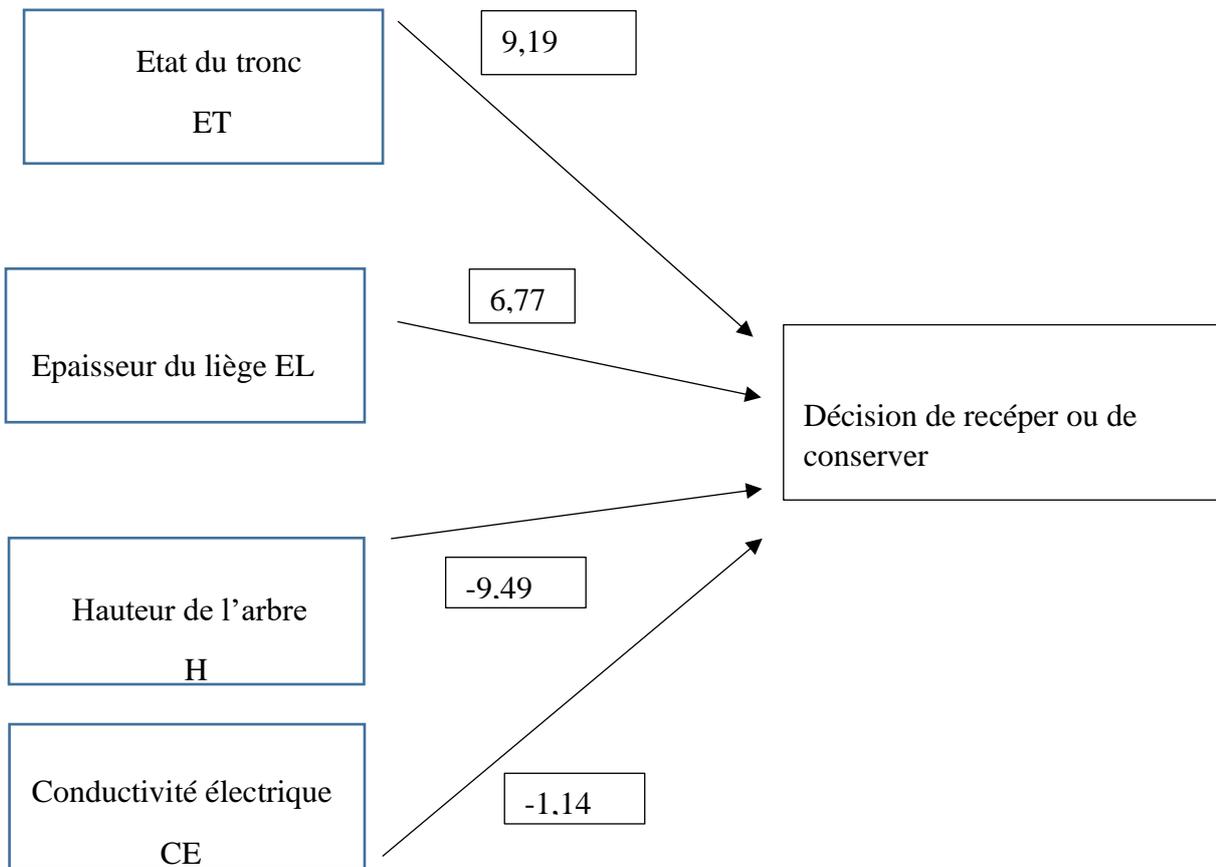


Figure 44. Modèle de prédiction pour le recépage ou la conservation des sujets à cimes altérées après incendie

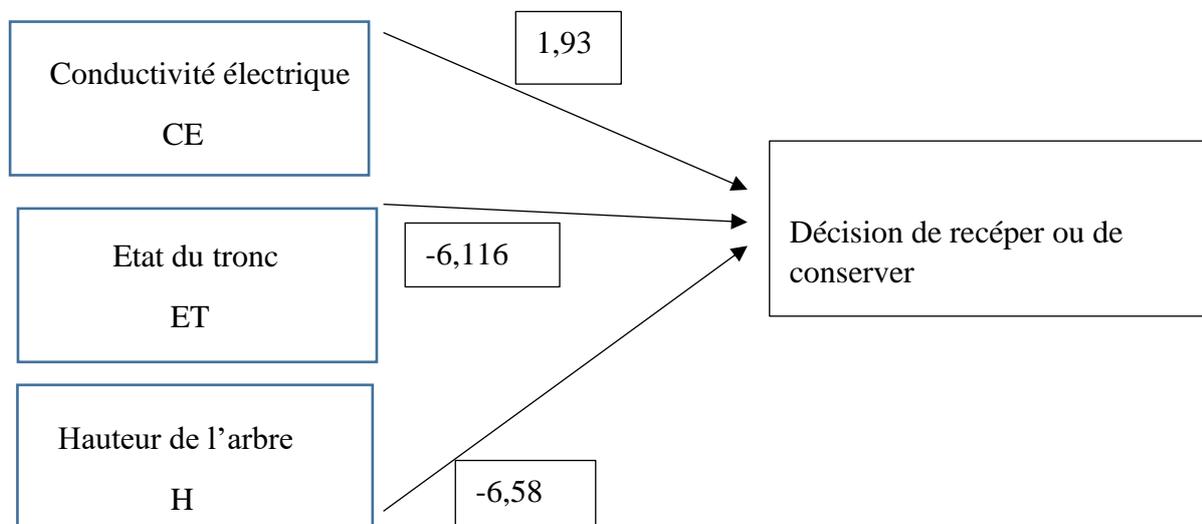


Figure 45. Modèle de prédiction pour le recépage ou la conservation des sujets à cimes remplies après incendie

IV.4. 8- Discussion des deux modèles

Le recépage ou la conservation des arbres résiduels (après incendie) détenant encore une cime verte remplie ou altérée avec peu de feuillage est une décision très difficile et à risque. Le gestionnaire forestier se trouve devant une obligation de choisir entre deux possibilités, soit de couper l'arbre et partir à nouveau par un rejet de souche, soit de laisser l'arbre se résilier naturellement et faire face aux aléas de l'environnement. Dans les deux cas de figure c'est la durabilité de la subéraie qui est recherchée.

Les deux modèles réalisés sont une simple proposition offrant au forestier une possibilité d'agir d'une manière scientifique pour l'aménagement de la subéraie incendiée.

▪ Arbre à cime remplie

En effet, pour les sujets non affectés totalement par le feu, le premier jugement basé uniquement sur l'aspect garni des cimes peut s'avérer totalement erroné. En d'autres mots, il faut contourner minutieusement les autres organes de l'arbre.

Le modèle validé a pris en considération trois variables explicatives à savoir la conductivité électrique (EC), l'état des dommages sur le tronc (ET) et la hauteur de l'arbre (H).

-Le poids du premier coefficient (CE= 1,93) est plus important que les deux autres. La conductivité électrique du tronc est en réalité une indication physiologique de la vivacité de la mère de liège et des tissus conducteurs (Bernal Chacón et Cardillo Amo, 2005).

Une mauvaise conductivité électrique de la mère du liège (cambium + liber + phelloderme + phellogène) induit une montée et une descente défectueuse de la sève.

Dans ce sens, Bertrand (2007) met l'accent sur l'impact désastreux du feu sur les tissus cambiaux, ce qui empêche les chênes-lièges ayant survécu de développer une physiologie comparable aux arbres ayant subi moins de perturbations. D'ailleurs, Iwsa et Kabo (1997), associent la faible conductivité électrique durant la période végétative qui suit l'incendie à une mauvaise alimentation hydrique et minérale, conduisant inévitablement au dépérissement et à la mort de l'arbre.

A travers ce constat, il s'avère primordiale pour les services forestiers de mesurer périodiquement la conductivité électrique de ces sujets résiduels et ne pas se confier aux apparences des cimes vertes. Dans notre opinion, une conductivité électrique faible qui perdure deux années après l'incendie conduit irréversiblement l'arbre vers la mortalité différée puis totale. Par conséquent, la nécessité de recéper demeure obligatoire pour un nouveau départ.

- La deuxième variable explicative qui semble aussi influencer sur le recépage ou la conservation des sujets rescapés d'incendie est sans doute l'état des dommages du tronc ou les blessures infligées au fût.

En effet, dans le modèle validé, la variable ET (-6,116) explique une partie de la variabilité de la variable dépendante Cime.

Il est admis que le gradient thermique du feu auquel est soumis le tronc provoque d'énormes dommages ou crevasses sur le fût. Selon Amandier (2004), ces blessures produisent un liège plus ou moins discontinu dont le pouvoir protecteur s'amenuise ou se perd quelquefois totalement.

Miller (2000), relie les arbres blessés par le feu à une forte vulnérabilité parce que l'écorce est habituellement absente ou beaucoup plus mince près des blessures, ce qui rend le tronc plus sensible à la sécheresse et plus précaire aux autres agents externes.

Les blessures sont également susceptibles de réduire la vigueur des arbres, à la fois en raison des ressources énergétiques nécessaires à la cicatrisation et parce que le liber actif tué réduit le taux d'absorption d'eau (Rundel, 1973). De plus, les changements induits par le stress du feu réduisent la capacité des arbres à se défendre contre les attaques d'insectes ou de champignons (Wargo, 1996).

Globalement pour cette deuxième variable, on peut affirmer qu'il est plus judicieux de recevoir l'arbre endommagé et ne pas se confier uniquement à l'apparence de la cime verte.

▪ **Arbre à cime altérée**

En ce qui concerne les sujets à cime altérée, synonyme d'une forte exposition à la chaleur thermique des flammes (caractéristique typique des pyrophytes actifs comme le chêne liège), le constat semble le même, c'est-à-dire ne pas se confier uniquement à l'apparition en masse des rejets aériens post-incendie. Il serait plus approprié d'examiner les autres compartiments de l'arbre.

Le modèle mathématique mis en lumière tient en compte quatre variables explicatives à savoir l'état des dommages sur le tronc (ET), l'épaisseur du liège (EL), la conductivité électrique (EC) et la hauteur de l'arbre (H).

-La significativité statistique de la première variable explicative (ET= 9,19) est plus marquée que les trois autres.

En terme de pyrologie forestière, les dommages perpétrés par le feu sur le tronc ne sont en réalité qu'une conséquence des cumules des blessures issues de la mauvaise exploitation du liège. Ces caries deviennent des voies d'acheminement des flammes vers l'assise cambiale. Catry et al. (2006), estiment que l'exploitation du liège augmentait considérablement la vulnérabilité des arbres au feu, avec une mortalité jusqu'à 40 % plus élevée sur les arbres exploités. Pour Natividade (1956), l'écorçage constitue une blessure volontaire est en même temps un facteur de stress majeur pour les arbres et a été associé à la perte de vigueur.

Les réactions de régénération du chêne-liège après l'incendie sont généralement fonction du niveau de dommages (gravité du feu). Un modèle conceptuel des réponses végétatives des arbres a été proposé par Moreira et al. (2009) : à de faibles niveaux de dommages, un arbre devrait réapparaître des bourgeons aériens de la couronne ; à des niveaux de dommages croissants, l'individu réapparaîtra des rejets à la fois de la couronne et de la base (de la souche), ou mourra quelques mois ou années après.

Dans ce sens, Catry et *al.* (2012), mentionnent que la présence de blessures est un meilleur prédicteur de la mortalité des arbres, suggérant que les blessures aux tiges sont probablement l'un des principaux facteurs diminuant la résistance des arbres durant et après feu.

En dépit de ces récits clarifiant le poids de l'état du tronc post incendie, on peut affirmer que le recepage immédiat de ces sujets s'impose comme une solution vitale pour une deuxième vie plus vigoureuse.

- La deuxième variable explicative du modèle relève de l'épaisseur du liège (EL= 6,77).

Plusieurs recherches ont montré que l'épaisseur du liège est l'un des principaux facteurs de réponse du chêne-liège après feu (Moreira et *al.*, 2007, 2009 ; Pausas, 1997). La vulnérabilité de l'arbre au feu diminue considérablement avec l'augmentation de l'épaisseur de l'écorce jusqu'à ce que l'écorce atteigne environ 4 cm. Les chênes-lièges avec une écorce de plus de 3-4 cm d'épaisseur sont bien protégés contre les dommages causés par la chaleur, ayant une très faible probabilité de mourir ou de souffrir de la mortalité des tiges. Cela peut s'expliquer par l'isolation thermique élevée fournie par le liège, en raison de sa forte proportion d'air et de sa faible densité (Pereira, 2007). Cette isolation naturelle offre au cambium vasculaire une protection contre le stress du feu. Ce dernier (le cambium), après le passage de la perturbation du feu est en réalité programmé génétiquement pour produire de nouveaux amas de cellules qui vont se transformer en bourgeons épécormiques ("sous l'écorce") capables de produire des rejets aériens, remplaçant les anciens consumés par le feu (Amandier, 2004).

Par contre, les sujets produisant un liège mince (<2cm) auront du mal à protéger le cambium au moment de l'incendie, même face à une température basse de 60°C (Bernal Chacón et Cardillo Amo, 2005). Cela a pour conséquence, une mauvaise circulation de la sève brute de la souche vers la cime, impliquant une léthargie du cambium vasculaire et une incapacité de produire des rejets en quantité suffisante (Dehane et *al.*, 2015). Selon Dubois (1990), une épaisseur de liège de 1,3 cm assure dans 50 % des cas la survie du cambium.

A la lumière de ces affirmations, on peut déduire que conserver des sujets rescapés avec cimes altérées colportant un liège mince est une perte du capital arbre. La meilleure gestion serait de receper et de repartir à nouveau.

- La troisième variable du modèle et la hauteur de l'arbre (H=-9,49).

Face aux incendies, la morphologie du chêne liège est largement discutée comme étant une barrière naturelle contre la propagation des flammes de la base vers la cime. Pausas et *al.* (2009), mettent en évidence l'âge de l'arbre, ils constatent que certains jeunes arbres à morphologie basse peuvent mourir du feu parce que l'écorce est encore trop mince pour fournir une protection contre la chaleur thermique pour les bourgeons dormants dans la tige.

Bertrand (2007), stipule que les chênes-lièges subissant des perturbations par le feu sont moins élancés que les arbres non perturbés jusqu'à ce que la circonférence atteigne environ 150 cm et la hauteur 11 m. Par conséquent, les arbres ayant survécu aux incendies sont essentiellement de gros diamètre (> 1m) et de hauteur dépassant les 12m. En effet, le feu brûle les branches

(surtout les extrémités) pouvant aboutir à ce qu'elles se cassent, diminuant ainsi la taille de l'arbre et de son houppier (Dubois, 1990). Le contraire se produit plus les sujets à morphologie basse (<7m), les flammes atteindront à la fois la totalité du tronc et la cime.

-Par conséquent, les valeurs négatives de l'état du tronc (ET), de l'épaisseur du liège (EL) et de la hauteur de l'arbre auront une conséquence irréversible sur la conductivité électrique (CE=-1,14). Selon Whelan (1995), l'aspect altéré des cimes post-incendie est une indication de la mauvaise mobilisation des réserves dans la souche et les branches particulièrement les réserves en carbohydrate, responsables de la stimulation et la germination des bourgeons dormants sous l'écorce calcinée.

Globalement, nous pouvons attester que si l'incendie occasionne une forte proportion de sujets chétifs à cimes fortement altérées, englobant un liège mince entaché de blessures et de cavités, la gestion idéale serait de ne pas miser sur ces peuplements défectueux, mais plutôt aller vers un recépage l'année qui suit le feu.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

L'incendie de forêt qui s'est déclenché subitement le 24 Octobre 2022 montre éloquemment que la subéraie de Zariéffet a dépassé le seuil de tolérance en matière de résistance au feu. Cette entité connue jadis par son aspect très verdoyant et son liège de qualité se classe actuellement parmi les régions les plus touchées et sensibles du bassin méditerranéen. Cette vulnérabilité accrue aux incendies doit cette caractéristique à sa topographie, ses vents violents, ses conditions climatiques, et au caractère sociale de la route nationale qui la traverse. Tous ces paramètres contribuent à la propagation des incendies.

Malgré sa résistance, sa capacité de régénération et sa faible mortalité face aux incendies du fait de l'isolation thermique du cambium accordé par les propriétés du liège, nous jugeons la situation du chêne-liège et de la subéraie préoccupante voire critique. L'augmentation de la fréquence des feux semble devenue plus favorable à l'expansion du maquis que plutôt à la résistance des arbres de l'essence principale (vis-à-vis du feu) qui diminue, induisant la mortalité de la tige principale.

Deux configurations post-incendie se présentent pour le chêne liège rescapé, des sujets très perturbés aux cimes fortement altérées et autres moins touchés, aux couronnes remplies et vertes.

Les chênes-lièges les moins touchés sont capables de garder leurs houppiers verdoyants, mais lorsque les tissus du cambium sont trop endommagés, les transferts de sève ne peuvent plus se faire entre les racines et le feuillage, et l'arbre dépérit plus ou moins rapidement.

Les sujets dont les cimes ont été totalement consumées par le feu adoptent une stratégie de régénération dans le houppier ou par la souche. Ces arbres sont fragilisés par les feux et meurent soit de leurs dommages soit d'attaques de ravageurs, de conditions climatiques non favorables ou encore de compétitions inter- et/ou intra-spécifiques.

Face à cette situation, le gestionnaire forestier doit agir rapidement et prendre des dispositions à la faveur de la pérennité de la subéraie et de l'écosystème forestier en générale.

Dans le cadre de la gestion scientifique de la subéraie incendiée, nous avons proposé deux modèles mathématiques prédictifs pour trancher sur l'avenir des sujets résiduels en fonction de certaines variables explicatives typiques au chêne liège en plein production.

Les résultats obtenus ont montré que pour les individus rescapés aux cimes vertes et remplies, la meilleure gestion scientifique serait de bien analyser l'état des dommages sur le tronc et sa relation avec la conductivité électrique des assises cambiales par des instruments appropriés au lieu de l'approche visuelle basée sur l'aspect externe de la cime. En cas d'une conductivité électrique défailante superposée à une proportion importante de dommages sur le tronc, la meilleure décision serait de receper la tige principale et partir de la régénération par souche, et inversement dans le cas contraire conserver l'arbre pour une meilleure résilience.

Paradoxalement, pour les sujets résiduels aux cimes altérées, avec une architecture dégradée, le constat semble plus clair. La régénération sporadique par rejets aériens n'est en réalité qu'une réponse temporaire du cambium vasculaire permise par la levée du blocage de la sève au niveau

de la souche vivante. Après, la situation va virer vers un dépérissement chronique puis vers la mortalité différée, très amplifiés par les facteurs défavorables du milieu physique.

Le modèle proposé pour cette configuration serait de couper tous les sujets colportant un liège mince déprécié par des blessures au niveau du tronc et se pencher plus sur les sujets chétifs.

Pour une meilleure gestion de la subéraie incendiée nous proposons les recommandations suivantes :

1. Agir directement après l'incendie, le feu en soi même est une opération de nettoyage à grande envergure permettant de situer l'ordre des priorités d'une manière claire et nouvelle.
2. Faire un bilan de la capacité de survie des peuplements, dans le cas échéant analyser l'état arbre par arbre :
 - Les sujets résiduels dont la partie basse de la cime est seulement flambée → Bonnes chances de survie si le tronc est exempt de blessures avec une bonne conductivité électrique; sinon, à recéper pour bénéficier des capacités de l'arbre à rejeter de souche.
 - Les sujets résiduels dont la cime a été ouverte par le feu (50% de perte de feuillage) → Survie possible grâce à la production de rejets aériens. Dans le cas contraire, le recepage s'impose, analyser l'état du tronc et la conductivité électrique.
 - Arbres résiduels fortement carbonisés et calciné, sans rejets aériens l'année qui suit le feu → Faibles chances de reprises : recéper.
 - Liège fortement carbonisé, blessures létales rongant complètement le bois, conductivité électrique faible voir absente → Recéper pour bénéficier des capacités de l'arbre à rejeter de souche.

Références bibliographiques

- A.E.F.C.O.(1914). Fascicule de gestion de la forêt domaniale de M'Sila de 1861 à 1950.Cantonnement d'Oran.
- Abric, E.F.(1974) .Evolution de l'industrie du liège en Provence . *Revue Forestière Française*, 7(6) : 453 – 461.
- Aime S.(1976). Contribution à l'étude écologique du chêne liège .Etude de quelques limites. Thèse Doct.de spécialité, Université de Nice.France, 180 p.
- Alcaraz C.,(1969). Etude géobotanique du pin d'Alep dans le tell Oranais. These Doct. 3^{ème} cycle. Fac. Sc. Montpellier. 183 p.
- Alexandrian D., Esnault F & Calabri G. (1999). Feux de forêt dans la région méditerranéenne. *Unasylva*, 50 (197) : 35 - 41.
- Amandier L. (2002). Le comportement du Chêne-liège après l'incendie : conséquences sur la régénération naturelle des suberaies. VIVexpo 2002 : Le chêne-liège face au feu. France.13p
- APCOR.(2009). APCOR yearbook 2009. Associação Portuguesa de Cortiça, <http://www.realcork.org/userfiles/File/Publicacoes/AnuarioAPCOR2009.pdf> . Accessed 10 April 2021
- Aronson J., Pereira J.S., & Pugas J.G. (2009). Cork Oak Woodland on the edge. Islandpress. Washington. Covelo. London, 350p
- Bagnouls F. & Gausson H. (1953). Saison sèche et indice xérothermique. *Bull.Soc.Hist.Nat. Toulouse*.88 (3-4):193-239.
- Belahbib N.,Ouassou O., Dahmani J., Douira A.(2005). Contribution à l'étude de l'introggression génétique entre *Quercus suber* et *Q.rotundifolia* (Lamk.) Trabut au Maroc par l'utilisation des marqueurs mocosatellites.Bulletin de l'Institut Scientifique. *Section Sciences de la Vie*, 26(27) : 31-34.
- Ben Mecheri S. (1994). Etude bioécologique des insectes phillophages et des mangeurs des glands de trois chênaies: Subéraies afarécaie et zeenaie de la forêt de Tamentout. Mém. Magister en Biologie Univ. Annaba. 92p.
- Benest M. (1971). Importance des mouvements de coulissage et de rotation dans la mise en place de la partie occidentale de la dépression de Sebdou (Monts de Tlemcen, Algérie). *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, 62 (1-2) : 21-38.
- Benest M. (1985). Evolution de la plate forme de l'Ouest Algerien et du Nord-Est Marocain au cours du Jurassique superieur et au début du Crétacé : Stratigraphie,milieus de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse Doc.Es.Sci., Univ.Lyon. Fasc.1 et 2, ,585p.
- Bernal C. (1999). Guia de las plantas del alcornocal. Dpto. Recursos Naturales Renovables, Instituto CMC, Junta de Extremadura. Artes Gráfi cas Boysu, s.l., Mérida.
- 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.
- Boavida L.C. & Varela M.C.(1999). Sexual reproduction in the cork oa (*Quercus suber* L.).I. The programic phase. *Sexual Plant Reproduction* 11,347-353.
- Bouchafra et Fraval A. (1991). Présentation du chêne-liège et de la subéraie. In. Villemant et Fraval, 1991, La faune du chêne-liège. Actes éditions,1-26.
- BSP 731 (2015), Prévention – prévision. Generalites 4 combustion et incendie,9p.
- C.F.W.T. (1914). Fascicule de gestion de la forêt domaniale de Zariéffet.4p.
- C.F.W.T.(1996). Répartition des forêts domaniales de la circonscription par district et par commune. Circonscription de Tlemcen, 4 p.

- C.F.W.T., (2007). Bilan exploitation du liège dans la forêt de Zariéffet. Circonscription de Tlemcen. 1p.
- Carlos Bernal Chacón C., Enrique Cardillo Amo E.(2005). Efectos del fuego y selvicultura de su restauración. Tipificación de los alcornoques incendiado. Departamento Recursos Naturales Renovables (IPROCOR), 111p.
- Catry F.X., Moreira F , Cardillo E. , and Juli G. Pausas J.G. (2012) . Post-Fire Management of Cork Oak Forests. In book: Post-fire management and restoration of European forests. *Managing Forest Ecosystems* :195-222.
- Catry FX, Rego F, Moreira F, Fernandes PM, Pausas J.G.(2010) Post-fire tree mortality in mixed forests of central Portugal. *For Ecol Manag* 206:1184–1192.
- Climatiques, 1–15.
- Daget P.H.(1977). Les bioclimats méditerranéen: caractères généraux, modes de caractérisation *vegetacio*, 34 (1),1-20.
- De Beaucorps G., (1956). Le sol. Ses caractères intrinsèques. *Ann.Rec.For.Maroc*. Tome 4, Fascicule 2, 29-46.
- Debrach J. (1953). Note sur le climat du Maroc occidental. *Maroc médical* 32(342): 1122-1134.
- 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.
- 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. Hernando C., Guijarro M. and Madrigal J., (2017). Flammability of some companion species in cork oak (*Quercus suber* L.) forests . *Annals of Forest Science*. DOI 10.1007/s13595-017-0659 .
- Dehane B. (2024). Article sous presse.
- DGF., (2020). Direction générale des forêts., Rapport annuel sur les incendies des forêts, Algerie.
- Diaz-Delgado R., Lloret F., Pons X. (2004). Spatial pattern of fire occurrence in Catalonia, NE, Spain. *Landscape Ecology* 19,731-745.
- Dimitrakopoulos A.P. and Mitsopoulos I.D.(2006).Report of fires in the mediterranean region.Fire Management working papers, Global forest Ressources Assesment 2005, FM / 8/EFAO, Rome, Italy, 43 p.
- Dubois C.(1990). Comportement du chêne-liège après incendie. Mémoire E.N.I.T.E.F. Banyuls-sur-Mer. Laboratoire Arago (Université Paris VI).
- EEA . (2007) European forest types. Categories and types for sustainable forest management reporting and policy. European Environment Agency (EEA) technical report no 9/2006, 2nd edn, Copenhagen
- EEC. (1992). Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. *Off J Eur Commun L206*, 7–50
- Elmi S.(1970).Rôles des accidents décrochants de direction SSW-NNE dans la structure des monts de Tlemcen (ouest Algérien).*Bull.Soc. Hist.nat.Afr.Nord*,Univ.Alger.61:3-8.
- Emberger L. (1942). Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographique.*Bull.Soc.Hist.Nat.Toulouse*.77, 97-124.

- EUFORGEN. (2009). Technical guidelines for genetic conservation and use <https://www.euforgen.org/species/quercus-suber/>
- Gaouar A. (1980). Hypothèses et réflexions sur la dégradation des écosystèmes forestiers dans la région de Tlemcen. *Forêt méd.*, 2(2), 131-145.
- Haltenhoff, H., 1997. Silvicultura Preventiva. Manual Técnico N°18. Corporación Nacional Forestal. Santiago. Chile. 29p
- Hoff C. (2007). Les Écosystèmes Forestiers Méditerranéens Face Aux Changements
- IML., 2006- Evolution des suberaies après incendies. Institut méditerranéenne du liège.VIVES.
- Kabouya I.L. (2020). Enjeux des feux de forêt en Algérie. Directrice de la Protection de la Faune et de la Flore (DGF). Communication orale dans le séminaire Forest-fires in Algeria, Challenge and Protection.
- Lamey A. (1893). Chêne liège : sa culture et son exploitation. Levrault et C^{ie}, Nancy :186-209.
- Lloret, F. and López-Soria, L. (1993). Resprouting of *Erica multiflora* after experimental fire treatments. – J. Veg. Sci. 4: 367–374.
- Lucas G. (1952).Bordure nord des Hautes Plaines dans l'Algérie occidentale. *19^e Congr. Géol. Inter.* Alger, Mon. rég. Ser.,139 p.
- Maire, R.(1961).Flore de l'Afrique du nord. Vol. 7. Paul Lechevalier, Paris, 329 p.
- Meddour S.O. (2015). Diagnostic sur les incendies de forêts. Projet TCP/ALG/3501.Assistance Technique en matière de gestion de feux de forêts, (Algérie).
- Meddour-Sahar, O. & Bouisset C.(2014). Les grands incendies de forêt en Algérie: Problèmes humains et politiques publiques dans la gestion des risques. Méditerranée. *Revue géographique des pays méditerranéens / Journal of Mediterranean geography*, 121, Article 121. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6827>
- Mendes AMSC and Graça JAR. (2009). Cork bottle stoppers and other cork products. In: Aronson J, Pereira JS, Pausas JG (eds) *Cork oak woodlands on the edge: conservation, adaptive management, and restoration*. Island Press, Washington, DC
- Moreiera F., Rego F., Ferreira P.G. (2001). Temporal (1958-1995) pattern of change in a cultural landscape of northwestern Portugal : implications for fire occurrence. *Landscape Ecology* 16: 557-567.
- Moreira F, Catry F, Duarte I, Acácio V, Silva J. (2009). A conceptual model of sprouting responses in relation to fire damage: an example with cork oak (*Quercus suber* L.) trees in Southern Portugal. *Plant Ecol* 201:77–85
- Moreno, J. M. and Oechel, W. C. 1991. Fire intensity and herbivory effects on postfire resprouting of *Adenostoma fasciculatum* in southern California chaparral. – *Oecologia* 85: 429–433
- MTPL, (1977). Ministère des travaux publics, étude générale techniques et économiques des aménagements routiers : B40- Niveaux de service et normes, direction des études générales et de la réglementation technique, Algérie.
- Nardini A. and M.T. Tyree. (1999). Root and shoot hydraulic conductance of seven *Quercus* species. *Ann.For.Sci.* 56:371-377.
- Natividade J.V.(1956). Subericulture. Ecole Nationale des Eaux et Forêts. Nancy, 302p.

- Pausas J.G.(1997). Resprouting of *Quercus suber* in Spain after fire. *Journal of Vegetation Science* 8: 703–706.
- Pausas JG, Pereira JS, 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
- Pereira H. (2007). *Cork: biology, production and uses*. Elsevier Publishing.
- Pereira P. and Fonseca M ; (2003). Nature vs. nurture: the making of the montado ecosystem. *Conserv Ecol* 7(3):7 [online] URL: <http://www.consecol.org/vol7/iss3/art7/>
- Plana E.; Font M.; Serra M.; Chauvin S.; Gladiné J. (2016). *Les incendies en forêt, guide pour les journalistes et les médias*. Projet eFIRECOM.,Edition CTFC. 36p.
- PNT, 2015- Parc National de Tlemcen . brochure. 4p.
- PNT. (2010). *Plan de gestion (2006-2010) rapport de ministère de l’Agriculture et du Développement rural, Parc National de Tlemcen*.
- Prodon R., Fons R. & Athias-Binche F. (1989). Impact écologique des incendies sur la faune des suberaies. *SCIENTIA gerundensis*, 15,185-188.
- Rameau, J-C, D Mansion, G Dumé, and C Gauberville. (2008). “Flore Forestière Française, Région Méditerranéenne.” Institut Pour Le Développement Forestier ; Ministère de L’agriculture et de La Pêche. <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=P282nNjQq50C&oi=fnd&pg=PA7&dq=classification+des+bioclimats+mediterraneens&ots=T1yUtouU3u&sig=-d1eoaygYmk0aDIFEZQFB1Yr#w#v=onepage&q=classification+des+bioclimats+mediterraneens&f=false>.
- Rundel PW (1973) The relationship between basal fire scars and crown damage in Giant Sequoia. *Ecology* 54: 210–213.
- Ryan K.C., Reinhardt E.D., (1988). Predicting postfire mortality of seven western conifers. *Canadian Journal of Forest Research*, 18: 1291–1297.
- Saccardy L., 1937 : Notes sur le liège et le liège en Algérie. *Bull.Stat.Rech.for.Afr. nord*. Tome II (2), .271-374.
- 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.
- SDIS 70 ,2021- Formation Equipier SPV, 62p.
- Seltzer P. (1946). *Le climat de l’Algérie*. La Typo-Litho, Alger,249p.
- Shaffhauser A. (2009). Impact de la répétition des incendies sur la végétation, in *Info DFCI* no 63, Cemagref. Aix-en-Provence.
- RigoloT E., Dupuy J.L., Pimont F., et Ruffault J. (2020). Les incendies de forêt catastrophiques. *Responsabilité & Environnement, Annales des Mines*, 98 :29-35. DOI: 10.3917/re1.098.0029
- Thonicke K., Venevsky S. et Sitch S. (2001). The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a dynamic global vegetation model. *Global Ecology and Biogeography* 10, 661-677.
- Veille J.F.(2004). Régénération et sylviculture des suberaies incendiées. *Forêt Méditerranéenne*, 27(4): 357-362
- Vesk P. A. (2004). Sprouting by semi-arid plants: testing a dichotomy and predictive traits. *Oikos*, 107: 72–89.
- Warburg O. & Warburg E. (1933). Oaks in cultivation in the British Isles. *Jour.Royal Hort.,Soc*,13(1):176-189.
- Zeraia L.(1982). Le chêne liège :phytosociologie, édaphique, phénologie, régénération et productivité. Extrait du travail de la recherche forestière en Algérie, 152 p.