

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

Université d'Abou Bekr Belkaid –Tlemcen-
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

Thèse en vue d'obtention du diplôme de Doctorat en Foresterie

Thème

**Etude des indices technologiques du liège de quelques
subéraies oranaises en relation avec les changements
environnementaux**

Présentée par : **Mr. FRIHI MUSTAPHA EL HABIB**

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Nom et prénom	Qualité	Grade	Etablissement
Mr. BENMAHIOUL Benamer	Président	Pr	Université de Tlemcen
Mr. DEHANE Belkheir	Directeur de thèse	Pr	Université de Tlemcen
Mr. BENABDALLAH M.Ali	Examineur	Pr	Université de Tlemcen
Mr. AMARA Mohamed	Examineur	MCA	Université Ain Temouchent
Mr. NOURI Tayeb	Examineur	MCA	Centre univ. El Bayadh

Soutenu le : 25 / 06 /2025

Année 2024-2025

Résumé:

Les changements environnementaux actuels sont défavorables pour la croissance et la répartition de la plupart des espèces forestières même réputées de résistance et d'adaptation. Les scénarios climatiques dans la région méditerranéenne prévoient une hausse des températures et des conditions de sécheresse plus fréquentes et plus extrêmes. Le chêne-liège est une espèce méditerranéenne largement distribuée en Algérie, où le liège est extrait de manière durable et principalement utilisé comme matière première dans de nombreux usages. La production nationale est en plein déclin à cause d'une multitude de facteurs allant de la gestion forestière à l'accentuation de l'aridité. Pour étayer cette causalité changements environnementaux-paramètres technologiques du liège, nous avons basé cette thèse sur trois sous-régions de l'Ouest Algérien (Zariffet (Tlemcen), Tagdempt (Tiaret) et Ami-Moussa (Relizane) présentant un modèle pratique de l'effet néfaste des perturbations environnementales à l'échelle écosystème. Il était de question à travers un échantillonnage exhaustif sur 600 sujets producteur de liège de reproduction d'analyser deux phénomènes majeurs qui ébranlent le devenir des sous-régions au niveau local et régional à savoir le déficit foliaire quantifié par les indices de dépérissement et les variations pluvio-thermiques inhabituelles intégrant plusieurs indices climatiques. L'analyse de l'évolution interannuelle de l'état sanitaire a mis en évidence une tendance vers la dégradation sanitaire progressive que plutôt la stabilité ou l'amélioration, soit un dépérissement assez grave ($ID_{ZA}=1.84$; $ID_{AM}=1.8$; $ID_{TA}=1.82$). Le modèle mathématique appliqué pour expliquer le déclin sanitaire du chêne liège dans la zone d'étude ($Defoliation=2.45-0.319CE+0.381DT-0.278CM$) a validé trois variables explicatives: les divers dommages perpétrés sur le tronc(DT), la conductivité électrique du liber (CE) et l'alimentation minérale des feuilles(CM). La superposition des paramètres technologiques du liège aux classes de déficit foliaire a mis en lumière une variabilité des mesures moyennes une fois la défoliation s'amplifie vers la classe C3: le gonflement volumétrique ($C1=14.71\%$; $C3=12.58\%$), l'aspect médiocre du liège($C1=3.75\%$; $C3=6.25\%$), le calibre ($C1=26.95mm$; $C2=24.57mm$); la densité volumétrique ($C1=214.60kg/m^3$; $C3=243.21kg/m^3$), la porosité ($C1=4.28\%$; $C3=7.23\%$), la force de compression ($C1=13.94MPa$; $C3=15.98MPa$), l'indice de qualité($C1=9.73$; $C3=7$). L'analyse dendro-climatologique reliant accroissements annuels du liège aux précipitations (mensuelles et annuelles) et aux indices climatiques a révélé que les largeurs des cerne et leurs indices des accroissements étaient faibles, allant de 2,03 mm(ZA), 2,43 mm(TA) et 2,06 mm (AM). Les séries chronologiques de treize années ont été comparées aux données de précipitations de 2009 à 2021. La largeur des cerne et les indices des accroissements ont attesté une forte corrélation avec les précipitations annuelles (décembre à janvier) et les pluies printanières (mai à juin). L'activité phellogène reste également fortement influencée par les températures maximales du mois de mars. Dans le contexte du changement climatique global, le bilan hydrique de la zone d'étude est insuffisant. La sécheresse sévère dans la région s'est manifestée par des corrélations positives avec l'indice de De Martonne. Cela semble également valable pour les deux indices de sécheresse (indice de Gaussien et indice xéothermique). L'extension de la saison sèche au-delà de 6 mois affecte l'activité du chêne-liège. L'analyse multi-variée (ACM) a défini 14 variables susceptibles d'expliquer l'impact des indices environnementaux sur les indices technologiques du liège. Dans un cadre d'une gestion durable forestière, le devenir de ces trois sous-régions doit se diriger vers une gestion de crise en forêt, ou plutôt vers la notion de gestion des risques environnementaux.

Mots-clé : Chêne liège, indices technologiques, changements environnementaux, Oranie, climat, dépérissement.

Abstract : Study of technological indices of cork from some cork oak forests in Oranie in relation to environmental changes

Current environmental changes are unfavorable for the growth and distribution of most forest species, even those known for their resistance and adaptation. Climate scenarios in the Mediterranean region predict higher temperatures and more frequent and more extreme drought conditions. Cork oak is a Mediterranean species widely distributed in Algeria, where cork is sustainably extracted and mainly used as a raw material for many purposes. National production is in sharp decline due to a multitude of causes ranging from forest management to increasing aridity. To support this causality between environmental changes and technological parameters of cork, we based this thesis on three cork forests in western Algeria (Zariffet (Tlemcen), Tagdempt (Tiaret) et Ami-Moussa (Relizane) presenting a practical model of the harmful effect of environmental disturbances at the ecosystem scale. It was a question, through an exhaustive sampling of 600 subjects producing cork reproduction, of analyzing two major phenomena that shake the future of cork oak forests at the local and regional level, namely the leaf deficit quantified by the decline indices and the unusual pluvio-thermal variations integrating several climatic indices. The analysis of the interannual evolution of the health status highlighted a trend towards progressive health degradation rather than stability or improvement, i.e. a fairly serious dieback ($ID_{ZA} = 1.84$; $ID_{AM} = 1.8$; $ID_{TA} = 1.82$). The mathematical model applied to explain the health decline of cork oak in the study area ($Defoliation=2.45-0.319CE+0.381DT-0.278CM$) validated three explanatory variables: the various damages perpetrated on the trunk (DT), the electrical conductivity of the bast (CE) and the mineral supply of the leaves (CM). The superposition of the technological parameters of cork to the classes of foliar deficit highlighted a variation in the average measurements once the defoliation increases towards class C3: the volumetric swelling ($C1=14.71\%$; $C3=12.58\%$), the poor appearance of the cork ($C1=3.75\%$; $C3=6.25\%$), the caliber ($C1=26.95mm$; $C2=24.57mm$); volumetric density ($C1=214.60kg/m^3$; $C3=243.21kg/m^3$), porosity ($C1=4.28\%$; $C3=7.23\%$), compressive strength ($C1=13.94MPa$; $C3=15.98MPa$), quality index ($C1=9.73$; $C3=7$). The dendro-climatological analysis relating annual cork increments to precipitation (monthly and annual) and climatic indices revealed that the ring widths and their increment indices were low, ranging from 2.03 mm (ZA), 2.43 mm (TA) and 2.06 mm (AM). Thirteen-year time series were compared with precipitation data from 2009 to 2021. Ring width and increment indices revealed a strong correlation with annual precipitation (December to January) and spring rains (May to June). Phellogen activity also remains strongly influenced by maximum temperatures in March. In the context of global climate change, the water balance of the study area is insufficient. Severe drought in the region was manifested by positive correlations with the De Martonne index. This also appears to be valid for the two drought indices (Gaussian index and xerothermic index). The extension of the dry season beyond 6 months affects cork oak activity. Multivariate analysis represented (MAC) defined 14 variables likely to explain the impact of environmental indices on cork technological indices. Within the framework of sustainable forest management, the future of these three cork oak forests must move towards forest crisis management, or rather towards the notion of environmental risk management.

Keywords : Cork oak, technological indices, environmental changes, Oranie, climate, decline

ملخص: دراسة المؤشرات التكنولوجية للفلين لبعض غابات بلوط الفلين القطاع الوهراني فيما يتعلق بالتغيرات البيئية

إن التغيرات البيئية الحالية غير مواتية لنمو وتوزيع معظم أنواع الغابات، حتى تلك المعروفة بمقاومتها وتكيفها. تتنبأ السيناريوهات المناخية في منطقة البحر الأبيض المتوسط بارتفاع درجات الحرارة وظروف الجفاف الشديدة والمتكررة. بلوط الفلين هو أحد الأنواع المتوسطية المنتشرة على نطاق واسع في الجزائر، حيث يتم استخراج الفلين بشكل مستدام ويستخدم بشكل أساسي كمادة خام في العديد من الاستخدامات. الإنتاج الوطني أخذ في الانخفاض بسبب العديد من الأسباب التي تتراوح بين التسبب الغير ملائم للغابات وزيادة حدة الجفاف. لشرح وتفكيك العلاقة السببية للتغيرات البيئية - الخصائص التكنولوجية للفلين، ارتكزنا في هذه الأطروحة حول ثلاث غابات للفلين في الشمال الغربي للجزائر (زاريفت ZA، تاقدمت TA وعمي موسى AM) والتي تقدم نموذجاً عملياً للتأثير الضار للاضطرابات البيئية على نطاق النظام البيئي. للجواب على هذه التساؤلات، قمنا بأخذ عينات شاملة من 600 شجرة منتجة للفلين التكاثري، وذلك من أجل تحليل ظاهريين رئيسيين تميزان مستقبل غابات الفلين على المستوى المحلي والإقليمي، وهما نقص الأوراق الذي تم قياسه بواسطة مؤشرات الذبول المميت والتغيرات غير العادية في هطول الأمطار من خلال دمج العديد من المؤشرات المناخية. أفاد تحليل التطور السنوي للحالة الصحية للتدور الصحي التدريجي بدلاً من الاستقرار أو التحسن، أي انخفاض خطير في مؤشر الذبول المميت ($ID_{TA}=1.82$; $ID_{AM}=1.8$; $ID_{ZA}=1.84$). النموذج الرياضي المطبق لتفسير التدور الصحي لشجرة بلوط الفلين في منطقة الدراسة (مؤشر الذبول المميت = $CE+0.381DT-0.278CM$) أثبت صحة ثلاثة متغيرات تفسيرية: الأضرار المختلفة التي حدثت على الجذع (DT)، التوصيل الكهربائي للحاء (CE) والإمدادات المعدنية للأوراق (CM). سلط تراكم الخصائص التكنولوجية للفلين على فئات عجز الأوراق على تباين في متوسط القياسات بمجرد زيادة تساقط الأوراق نحو الفئة C3: الانتفاخ الحجمي ($C1=14.71\%$; $C3=12.58\%$)، المظهر السيئ للفلين ($C1=3.75\%$; $C3=6.25\%$)، السمك ($C1=26.95$ ملم، $C3=24.57$ ملم)، الكثافة الحجمية ($C1=214.60$ كجم/م³; $C3=243.21$ كجم/م³)، المسامية ($C1=4.28\%$; $C3=7.23\%$)، قوة الضغط ($C1=13.94$ ميجا باسكال؛ $C3=15.98$ ميجا باسكال)، مؤشر الجودة ($C1=9.73$; $C3=7$). كشف تحليل الدندر والمناخ الذي يربط زيادات الفلين السنوية بهطول الأمطار (الشهري والسنوي) والمؤشرات المناخية أن عرض الحلقات ومؤشرات زيادتها كانت منخفضة، حيث تراوحت بين 2.03 ملم (ZA)، 2.43 ملم (TA) و 2.06 ملم (AM) وتمت مقارنة السلاسل الزمنية التي منتهت ثلاثة عشر عامًا ببيانات هطول الأمطار من عام 2009 إلى عام 2021. وكشفت مؤشرات عرض الحلقة والزيادة عن وجود علاقة قوية مع هطول الأمطار السنوي (من ديسمبر إلى يناير) وأمطار الربيع (من مايو إلى يونيو). يظل نشاط الفيلوجين أيضاً متأثراً بشدة بدرجات الحرارة القصوى في شهر مارس. في سياق تغير المناخ العالمي، فإن التوازن المائي في منطقة الدراسة غير كافٍ. وقد تجلى الجفاف الشديد في المنطقة من خلال الارتباطات الإيجابية مع مؤشر دي مارتون. ويبدو أن هذا ينطبق أيضاً على مؤشري الجفاف (مؤشر جاسون ومؤشر الحرارة الجافة). يؤثر امتداد موسم الجفاف إلى ما بعد 6 أشهر على نشاط بلوط الفلين. وقد حدد التحليل متعدد المتغيرات (ACM) 14 متغيراً من المحتمل أن تفسر تأثير المؤشرات البيئية على المؤشرات التكنولوجية للفلين. وفي إطار الإدارة المستدامة للغابات، فإن مستقبل غابات الفلين الثلاثة محل الدراسة يجب أن يتجه نحو إدارة الأزمات في الغابة، أو بالأحرى نحو مفهوم إدارة المخاطر البيئية.

الكلمات المفتاحية: بلوط الفلين، المؤشرات التكنولوجية، التغيرات البيئية، القطاع الوهراني، المناخ، الذبول المميت

ملخص: دراسة المؤشرات التكنولوجية للفلين لبعض غابات بلوط الفلين القطاع الوهراني فيما يتعلق بالتغيرات البيئية

إن التغيرات البيئية الحالية غير مواتية لنمو وتوزيع معظم أنواع الغابات، حتى تلك المعروفة بمقاومتها وتكيفها. تتنبأ السيناريوهات المناخية في منطقة البحر الأبيض المتوسط بارتفاع درجات الحرارة وظروف الجفاف الشديدة والمتكررة. بلوط الفلين هو أحد الأنواع المتوسطة المنتشرة على نطاق واسع في الجزائر، حيث يتم استخراج الفلين بشكل مستدام ويستخدم بشكل أساسي كمادة خام في العديد من الاستخدامات. الإنتاج الوطني أخذ في الانخفاض بسبب العديد من الأسباب التي تتراوح بين التسيير الغير ملائم للغابات وزيادة حدة الجفاف. لشرح و تفكيك العلاقة السببية للتغيرات البيئية - الخصائص التكنولوجية للفلين، إرتكزنا في هذه الأطروحة حول ثلاث غابات للفلين في الشمال الغربي للجزائر (زاريفت (ZA) ، تاقدمت (TA) وعمي موسى (AM) والتي تقدم نموذجًا عمليًا للتأثير الضار للاضطرابات البيئية على نطاق النظام البيئي. للجواب على هذه التساؤلات، قمنا بأخذ عينات شاملة من 600 شجرة منتجة للفلين التكاثري، وذلك من أجل تحليل ظاهرتين رئيسيتين تهزان مستقبل غابات الفلين على المستوى المحلي والإقليمي، وهما نقص الأوراق الذي تم قياسه بواسطة مؤشرات الذبول المميت والتغيرات غير العادية في هطول الأمطار من خلال دمج العديد من المؤشرات المناخية. أفاد تحليل التطور السنوي للحالة الصحية إلى التدهور الصحي التدريجي بدلاً من الاستقرار أو التحسن، أي انخفاض خطير في مؤشر الذبول المميت ($ID_{ZA}=1.84$ ؛ $ID_{AM}=1.8$ ؛ $ID_{TA}=1.82$). النموذج الرياضي المطبق لتفسير التدهور الصحي لشجرة بلوط الفلين في منطقة الدراسة (مؤشر الذبول المميت = $CE+0,381DT-0,278CM0,319-2,45$) أثبت صحة ثلاثة متغيرات تفسيرية: الأضرار المختلفة التي حدثت على الجذع (DT) ، التوصيل الكهربائي للحاء (CE) والإمدادات المعدنية للأوراق (CM). سلط تراكم الخصائص التكنولوجية للفلين على فئات عجز الأوراق على تباين في متوسط القياسات بمجرد زيادة تساقط الأوراق نحو الفئة C3 : (الإنتفاخ الحجمي ($C1=14.71\%$ ؛ $C3=12.58\%$) ، المظهر السيئ للفلين ($C1=3.75\%$ ؛ $C3=6.25\%$) ، السمك ($C1=26.95$ ملم، $C3=24.57$ ملم)؛ الكثافة الحجمية ($C1=214.60$ كجم/م³؛ $C3=243.21$ كجم/م³)، المسامية ($C1=4.28\%$ ؛ $C3=7.23\%$) ، قوة الضغط ($C1=13.94$ ميغا باسكال؛ $C3=15.98$ ميغا باسكال) ، مؤشر الجودة ($C1=9.73$ ؛ $C3=7$) . كشف تحليل الدندر والمناخي الذي يربط زيادات الفلين السنوية بهطول الأمطار (الشهري والسنوي) والمؤشرات المناخية أن عرض الحلقات ومؤشرات زيادتها كانت منخفضة، حيث تراوحت بين 2.03 ملم (ZA) ، 2.43 ملم (TA) و 2.06 ملم (AM) وتمت مقارنة السلاسل الزمنية التي مدتها ثلاثة عشر عامًا ببيانات هطول الأمطار من عام 2009 إلى عام 2021. وكشفت مؤشرات عرض الحلقة والزيادة عن وجود علاقة قوية مع هطول الأمطار السنوي (من ديسمبر إلى يناير) وأمطار الربيع (من مايو إلى يونيو). يظل نشاط الفيلوجين أيضًا متأثرًا بشدة بدرجات الحرارة القصوى في شهر مارس. في سياق تغير المناخ العالمي، فإن التوازن المائي في منطقة الدراسة غير كاف. وقد تجلى الجفاف الشديد في المنطقة من خلال الارتباطات الإيجابية مع مؤشر دي مارتون. ويبدو أن هذا ينطبق أيضًا على مؤشري الجفاف (مؤشر جاوسن ومؤشر الحرارة الجافة). يؤثر امتداد موسم الجفاف إلى ما بعد 6 أشهر على نشاط بلوط الفلين. وقد حدد التحليل متعدد المتغيرات (ACM) 14 متغيرًا من المحتمل أن تفسر تأثير المؤشرات البيئية على المؤشرات التكنولوجية للفلين. وفي إطار الإدارة المستدامة للغابات، فإن مستقبل غابات الفلين الثلاثة محل الدراسة يجب أن يتجه نحو إدارة الأزمات في الغابة، أو بالأحرى نحو مفهوم إدارة المخاطر البيئية.

الكلمات المفتاحية: بلوط الفلين، المؤشرات التكنولوجية، التغيرات البيئية، القطاع الوهراني ، المناخ، الذبول المميت.

Résumé:

Les changements environnementaux actuels sont défavorables pour la croissance et la répartition de la plupart des espèces forestières même réputées de résistance et d'adaptation. Les scénarios climatiques dans la région méditerranéenne prévoient une hausse des températures et des conditions de sécheresse plus fréquentes et plus extrêmes. Le chêne-liège est une espèce méditerranéenne largement distribuée en Algérie, où le liège est extrait de manière durable et principalement utilisé comme matière première dans de nombreux usages. La production nationale est en plein déclin à cause d'une multitude de facteurs allant de la gestion forestière à l'accentuation de l'aridité. Pour étayer cette causalité changements environnementaux-paramètres technologiques du liège, nous avons accédé à cette thèse sur trois subéraies de l'Ouest Algérien (Zarieffet(W.Tlemcen), Tagdempt(W.Tiaret) et Ami-Moussa(W.Relizane) présentant un modèle pratique de l'effet néfaste des perturbations environnementales à l'échelle écosystème. Il était de question à travers un échantillonnage exhaustif sur 600 sujets producteurs de liège de reproduction d'analyser deux phénomènes majeurs qui ébranlent le devenir des subéraies au niveau local et régionale à savoir le déficit foliaire quantifié par les indices de dépérissement et les variations pluvio-thermiques inhabituelles intégrant plusieurs indices climatiques. L'analyse de l'évolution interannuelle de l'état sanitaire a mis en évidence une tendance vers la dégradation sanitaire progressive que plutôt la stabilité ou l'amélioration, soit un dépérissement assez grave ($ID_{ZA}=1,84$; $ID_{AM}=1,8$; $ID_{TA}=1,82$). Le modèle mathématique appliqué pour expliquer le déclin sanitaire du chêne-liège dans la zone d'étude ($Dépérissement=2,45-0,319CE+0,381DT-0,278CM$) a validé trois variables explicatives: les divers dommages perpétrés sur le tronc(DT), la conductivité électrique du liber (CE) et l'alimentation minérale des feuilles(CM). La superposition des paramètres technologiques du liège aux classes de déficit foliaire a mis en lumière une variabilité des mesures moyennes une fois la défoliation s'amplifie vers la classe C3: le gonflement volumétrique ($C1=14,71\%$; $C3=12,58\%$), l'aspect du liège($C1=3,75\%$; $C3=6,25\%$), le calibre ($C1=26,95\text{mm}$; $C3=24,57\text{mm}$); la densité volumétrique ($C1=214,60\text{kg/m}^3$; $C3=243,21\text{kg/m}^3$), la porosité ($C1=4,28\%$; $C3=7,23\%$), la force de compression ($C1=13,94\text{ MPa}$; $C3=15,98\text{ MPa}$), l'indice de qualité($C1=9,73$; $C3=7$). L'analyse dendro-climatologique reliant accroissements annuels du liège aux précipitations (mensuelles et annuelles) et aux indices climatiques a révélé que les largeurs des cernes et leurs indices des accroissements étaient faibles, allant de 2,03 mm(ZA; 2,43 mm(TA) à 2,06 mm (AM). Les séries chronologiques de treize années ont été comparées aux données de précipitations de 2009 à 2021. La largeur des cernes et les indices des accroissements ont attesté une forte corrélation avec les précipitations annuelles (décembre à janvier) et les pluies printanières (mai à juin). L'activité du phellogène reste également fortement influencée par les températures maximales du mois de mars. Dans le contexte du changement climatique global, le bilan hydrique de la zone d'étude est insuffisant. La sécheresse sévère dans la région s'est manifestée par des corrélations positives avec l'indice de De Martonne. Cela semble également valable pour les deux indices de sécheresse (indice de Gaussen et indice xérothermique). L'extension de la saison sèche au-delà de 6 mois affecte l'activité du chêne-liège. L'analyse multi-variée (ACM) a défini 14 variables susceptibles d'expliquer l'impact des indices environnementaux sur les indices technologiques du liège. Dans un cadre d'une gestion durable forestière, le devenir de ces trois subéraies doit se diriger vers une gestion de crise en forêt, ou plutôt vers la notion de gestion des risques environnementaux.

Mots-clé : Chêne liège, indices technologiques, changements environnementaux, Oranie, climat, dépérissement.

Abstract : Study of technological indices of cork from some cork oak forests in Oranie in relation to environmental changes

Current environmental changes are unfavorable for the growth and distribution of most forest species, even those known for their resistance and adaptation. Climate scenarios in the Mediterranean region predict higher temperatures and more frequent and more extreme drought conditions. Cork oak is a Mediterranean species widely distributed in Algeria, where cork is sustainably extracted and mainly used as a raw material for many purposes. National production is in sharp decline due to a multitude of causes ranging from forest management to increasing aridity. To support this causality between environmental changes and technological parameters of cork, we based this thesis on three cork forests in western Algeria (Zarieffet, Tagdempt and Ami-Moussa) presenting a practical model of the harmful effect of environmental disturbances at the ecosystem scale. It was a question, through an exhaustive sampling of 600 subjects producing cork reproduction, of analyzing two major phenomena that shake the future of cork oak forests at the local and regional level, namely the leaf deficit quantified by the decline indices and the unusual pluvio-thermal variations integrating several climatic indices. The analysis of the interannual evolution of the health status highlighted a trend towards progressive health degradation rather than stability or improvement, i.e. a fairly serious dieback ($ID_{ZA} = 1.84$; $ID_{AM} = 1.8$; $ID_{TA} = 1.82$). The mathematical model applied to explain the health decline of cork oak in the study area ($Defoliation = 2.45 - 0.319CE + 0.381DT - 0.278CM$) validated three explanatory variables: the various damages perpetrated on the trunk (DT), the electrical conductivity of the bast (CE) and the mineral supply of the leaves (CM). The superposition of the technological parameters of cork to the classes of foliar deficit highlighted a variation in the average measurements once the defoliation increases towards class C3: the volumetric swelling ($C1 = 14.71\%$; $C3 = 12.58\%$), the poor appearance of the cork ($C1 = 3.75\%$; $C3 = 6.25\%$), the caliber ($C1 = 26.95\text{mm}$; $C2 = 24.57\text{mm}$); volumetric density ($C1 = 214.60\text{kg/m}^3$; $C3 = 243.21\text{kg/m}^3$), porosity ($C1 = 4.28\%$; $C3 = 7.23\%$), compressive strength ($C1 = 13.94\text{ MPa}$; $C3 = 15.98\text{ MPa}$), quality index ($C1 = 9.73$; $C3 = 7$). The dendro-climatological analysis relating annual cork increments to precipitation (monthly and annual) and climatic indices revealed that the ring widths and their increment indices were low, ranging from 2.03 mm (ZA), 2.43 mm (TA) and 2.06 mm (AM). Thirteen-year time series were compared with precipitation data from 2009 to 2021. Ring width and increment indices revealed a strong correlation with annual precipitation (December to January) and spring rains (May to June). Phellogen activity also remains strongly influenced by maximum temperatures in March. In the context of global climate change, the water balance of the study area is insufficient. Severe drought in the region was manifested by positive correlations with the De Martonne index. This also appears to be valid for the two drought indices (Gaussian index and xerothermic index). The extension of the dry season beyond 6 months affects cork oak activity. Multivariate analysis represented (MAC) defined 14 variables likely to explain the impact of environmental indices on cork technological indices. Within the framework of sustainable forest management, the future of these three cork oak forests must move towards forest crisis management, or rather towards the notion of environmental risk management.

Keywords : Cork oak, technological indices, environmental changes, Oranie, climate, decline.

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Figure	Page
Figure 1: Certains aspects botaniques du chêne liège	6
Figure 2: Carte de l'aire de répartition de <i>Quercus suber</i> dans le bassin méditerranéen occidental	7
Figure 3: Types de subéraies à l'échelle méditerranéenne et nationale	8
Figure 4: Levée traditionnelle du liège	9
Figure 5: Coupe transversale d'un tronc de chêne liège	10
Figure 6: Cellule de parenchyme et sa disposition dans les coupes tangentiels, transversales et radiales	11
Figure 7: Aspect des canaux lenticulaires dans les directions transversale, radiale et tangentielle	12
Figure 8: Mécanisme de régénération du liège dans l'arbre	13
Figure 9: Fluctuation annuelle de la production du liège en Algérie	15
Figure 10: A gauche (Agglomérats de liège.) ; au milieu (Liège expansé MD façade)	19
Figure 11: Le dépérissement du chêne liège résulte de multiples inter-actions	22
Figure 12: Aire de répartition du chêne liège en Algérie	23
Figure 13 : Situation administrative et géographique de la subéraie de Zariéffet	24
Figure 14: Situation administrative et géographique de la subéraie de Tagdempt	24
Figure 15: Situation administrative et géographique de la subéraie d'Ami-Moussa	25
Figure 16: Les principaux éléments morpho-structuraux de la chaîne du Maghreb	25
Figure 17: Cartes des pentes des trois subéraies	27
Figure 18: Cartes des expositions des trois subéraies	28
Figure 19: Variations annuelles des précipitations dans la zone d'étude	31
Figure 20: Répartition saisonnière des pluies dans la subéraie de Zariéffet	31
Figure 21: Répartition saisonnière des pluies dans la subéraie de Tagdempt	32
Figure 22: Répartition saisonnière des pluies dans la subéraie d'Ami-Moussa	32
Figure 23 : Fluctuation des températures moyennes annuelles à Zariéffet	33
Figure 24: Fluctuation des températures moyennes annuelles à Ami-Moussa	33
Figure 25 : Fluctuation des températures moyennes annuelles à Tagdempt	33
Figure 26: Diagrammes ombrothermiques des trois subéraies	35
Figure 27: Position des trois subéraies dans le climagramme d'Emberger	36
Figure 28: Cannons de liège récoltés en 2021 et stockés dans la subéraie d'Ami-Moussa	38
Figure 29 : Méthode d'échantillonnage appliquée dans les trois forêts	40
Figure 30: Schéma organisationnel des travaux explicatifs de la thèse	41
Figure 31: Les trois classes de déficit foliaire rencontrées dans les trois subéraies	43
Figure 32: Feuilles de chêne liège extraites de la cime puis séchées dans une chambre climatique	44
Figure 33: Type de dommages aperçus sur les arbres échantillons	45
Figure 34: Modèle graphique pour caractériser les liens de causalité entre les variables explicatives et la variable dépendante le type de dépérissement	47
Figure 35: Répartition spatiale des arbres sélectionnés dans le plan d'échantillonnage	51
Figure 36: Vue d'ensemble des trois subéraies	53
Figure 37: Plan d'échantillonnage dans les trois subéraies	55
Figure 38: Distribution des fréquences pour les variables : calibre du liège, circonférence et hauteur	57
Figure 39: Tendances de l'évolution annuelle de la défoliation des arbres-échantillons (%)	59
Figure 40: Fluctuation annuelle des fréquences relatives des classes de défoliation	60
Figure 41: Variations annuelles des indices de dépérissement selon les classes de défoliation	61
Figure 42: Distribution des variables explicatives (facteur d'élancement et intensité du déliègeage) selon leurs classes de défoliation respectives	62
Figure 43: Distribution des variables explicatives dommages sur le tronc et la conductivité électrique du liber	63
Figure 44: Composition minérale des feuilles selon les trois subéraies	64
Figure 45: Variation de la composition minérale selon les classes de défoliation	65
Figure 46. Modèle de prédiction pour statuer sur le dépérissement du chêne liège selon l'état de défoliation	68
Figure 47 : Dommages occasionnés par la mauvaise manipulation de la hache	70

Figure 48: Instrument de mesure de la conductivité électrique du chêne liège	71
Figure 49: Diagramme à point pour les composés analysés selon le déficit foliaire et la provenance	72
Figure 50: Corrélation entre la teneur en potassium (K) et la conductivité électrique (CE)	73
Figure 51: Variation de la conductivité électrique et du potassium selon les classes de défoliation	74
Figure 52: Technique de sondage du chêne liège par le coveless CQ05	77
Figure 53: Protocole expérimental sur terrain relative à la technologie du liège	77
Figure 54: Protocole expérimental au laboratoire relative à la technologie du liège	78
Figure 55 : Préparation des échantillons pour l'opération d'identification des défauts de liège	79
Figure 56: Mesure des épaisseurs du liège par le pied de ligne et par Imagej	81
Figure 57: Calcul du coefficient de porosité par analyse d'image scannée	83
Figure 58 : Compression perpendiculaire aux anneaux de croissance	84
Figure 59: Plan d'observation microscopique pour les mesures biométriques	86
Figure 60 : Variation du gonflement linéaire selon les trois sections et par rapport au calibre	89
Figure 61: Variation du gonflement volumétrique selon les trois provenances (N=240)	90
Figure 62 : Seuils des gonflements volumétriques selon le déficit foliaire dans chaque provenance	91
Figure 63: Fréquence relative des classes d'aspect du liège selon la provenance	92
Figure 64: Distribution relative des classes d'aspect selon le déficit foliaire dans chaque provenance	93
Figure 65: Distribution absolue des classes de calibre selon le déficit foliaire dans chaque provenance	95
Figure 66: Distribution absolue des classes de densité selon le déficit foliaire dans chaque provenance	97
Figure 67 : Oscillation de la porosité selon les classes de défoliation et la provenance	98
Figure 68 : Variabilité de la résistance mécanique selon le déficit foliaire et la provenance	100
Figure 69: Fréquence absolue des indices de qualité selon le déficit foliaire et la provenance	102
Figure 70: Forme géométrique des cellules de liège des trois provenances avant bouillage	104
Figure 71: Forme géométrique des cellules de liège des trois provenances après bouillage	104
Figure 72 : Liège terreux produit par un sujet perturbé de la classe C3	106
Figure 73: Distribution des fréquences absolues des anomalies selon les le classes du déficit foliaire	107
Figure 74 : Exemples de défauts mineurs (a : état du dos, b : état de la mie, c : épaisseur de la croute)	108
Figure 75 : Liège présentant des tissus lignifiés et sclérenchymateux	108
Figure 76 : Anomalies majeurs associés au liège terreux, plaques terreuses et doublé (C3)	109
Figure 77 : Anomalie du liège parsemé par des galeries d'insectes sur un sujet C3	109
Figure 78 : Variation dimensionnelle des calibres de liège dans le même peuplement	110
Figure 79: Variable biométriques mesurées dans les trois sections radiale, transversale et tangentielle	112
Figure 80: Variation de la souplesse du liège selon sa densité volumétrique	114
Figure 81: Impact de la structure anatomique du liège sur la nature de la densité (a : liège de printemps aux parois minces ; b : liège d'automne aux parois épaisses)	115
Figure 82: Corrélation entre la densité volumétrique et les épaisseurs des parois cellulaires	116
Figure 83: Forme du canal lenticulaire selon la perturbation environnementale	118
Figure 84: Fréquence absolue de porosité selon la classe de déficit foliaire	118
Figure 85: Exemples d'échantillons aux coefficients de porosité variant selon le déficit foliaire	119
Figure 86: Compression mécanique du liège sous son aspect anatomique	121
Figure 87 : Relation entre la compression mécanique et les épaisseurs des parois cellulaires	121
Figure 88: Classification arborescente des indices de qualité selon la méthode CHAID	122
Figure 89: Classification par arbre des indices de qualité selon le déficit foliaire	123
Figure 90: Risque pathogène associé au dépérissement du chêne liège	126
Figure 91: Méthode numérique des mesures des accroissements annuels du liège	129
Figure 92: Variation inter-annuelle des précipitation pour la période 1992-2021	134
Figure 93: Indice de Déficit Pluviométrique (IDP %) durant la période 1992-2021.	135
Figure 94: Indice de précipitations standardisé (SPI) durant la période 1992-2021	135
Figure 95: Indice de Pluviosité (IP) durant la période 1992-2021	136
Figure 96: Indice de sécheresse (IS) durant la période 1992-2021	137
Figure 97: Indice de sévérité (ISV) durant la période 1992-2021	138

Figure 98: Variations interannuelles des températures minimales et maximales enregistrées dans les trois sites durant la période d'étude (2000-2021)	138
Figure 99: Anomalies des moyennes annuelles de températures maximales enregistrées dans les trois sites durant la période d'étude (2000-2021).	139
Figure 100: Anomalies des moyennes annuelles de températures minimales enregistrées dans les trois sites durant la période d'étude (2000-2021)	140
Figure 101: Tendances de progression et de régression des températures maximales	140
Figure 102: Tendances de progression et de régression des températures minimales	141
Figure 103: Courbe de croissance du liège des trois provenances, avec dix années de croissance complète	142
Figure 104 : Indices d'accroissements du liège pour les trois sites	143
Figure 105: Relation entre indices d'accroissements et accroissement annuel	144
Figure 106 : Bilan annuelle des précipitations dans les trois subéraies	144
Figure 107: Exemples de courbes de largeur des cernes du liège (AC) et les indices de croissance (IAC) en fonction des précipitations accumulées	146
Figure 108: Relation entre indice d'accroissement (IAC)et précipitation annuelle. Scatterplots pour la période Janvier-Décembre	147
Figure109: Courbes de largeurs d'anneaux de liège (AC) et indices de croissance (IAC) par rapport aux précipitations printanière accumulées de mars à Mai	148
Figure 110: Relation entre indice d'accroissement (IAC)et précipitation printanière. Scatterplots pour la période Mars-Mai	149
Figure 111: Réponse des indices de croissance du liège à la température (T) basée sur les coefficients de corrélation de Pearson (r) à Zariéffet (ZA), Tagdempt (TA) et Ami-Moussa (AM). Symboles	149
Figure 112: Coefficients de corrélation entre les indices de croissance (GI) et la température moyenne mensuelle de mars	150
Figure 113:Variation annuelle de l'indice des accroissements selon l'aridité de De Martonne et les indices hydrothermiques	151
Figure 114: Fluctuation annuelle de l'indice de croissance (IAC) comparée à la variation des indices de Gaussen et xérothermique.	152
Figure 115: Relation entre les anomalies des températures maximales et les IAC	153
Figure 116: Relation entre les anomalies des températures minimales et les IAC	154
Figure 117: Corrélacion entre les indices d'accroissements du liège et les indices climatiques(ZA)	156
Figure 118: Corrélacion entre les indices d'accroissements du liège et les indices climatiques(TA)	157
Figure 119: Corrélacion entre les indices d'accroissements du liège et les indices climatiques(AM)	157
Figure 120: Schéma synthétisant l'analyse de la crise du chêne liège dans la zone d'étude	166
Figure 121: Matrice de criticité (Probabilité x Gravité)	167
Figure 122: Criticité de risque du dépérissement du chêne liège dans la zone d'étude	170
Figure 123 : Récapitulatif des principaux termes liés à la notion de risque	171
Figure 124: Aspect de deux peuplements de chêne liège sans gestion (P1 et P2) et avec gestion (P1'et P2')	173
Figure 125: Répartition des défauts du liège selon les indices de qualité et le sous-bois	174
Figure 126: Systèmes d'observation avancée pour le suivi du risque environnemental	174
Figure 127: Gestion du risque environnemental en subéraie	176
Figure 128: Représentation dans le plan factoriel F1 x F2 (graphe symétrique) des paramètres d'indices environnementaux sur les indices technologiques du liège	179
Figure 129: % d'inertie cumulé des indices environnementaux sur les indices technologiques du liège	180
Figure 130: Synthèse climatique entre l'indice de déficit thermo-pluviométrique(Itp) et l'indice de sévérité (ISV)	181
Figure 131: Arbres-échantillons envahis par le chêne zeen(Ami-Moussa)	182
Figure 132: Arbres-échantillons supportant mal l'ombre (Ami-Moussa)	182
Figure 133: Qualité d'exploitation du liège à Tagdempt	183
Figure 134: Arbres dépérissants infectés par des agents pathogènes (Tagdempt)	183
Figure 135: Liège classé Rebut, aux indices technologiques faibles, s'exploitant en morceaux (IDV-1, et IQ1)	184

Liste des Tableaux

Tableau	Page
Tableau 1: Caractéristiques dimensionnelles des cellules de liège	11
Tableau 2: Productivité des subéraies par pays subericoles (kg/ha)	13
Tableau 3: Classe calibre selon la Norme Espagnole UNE 56-915-88	16
Tableau 4: Les classes d'aspect du liège CMC	17
Tableau 5: Configuration commerciale des classes de qualité (Calibre/Aspect)	17
Tableau 6: Principaux défauts rencontrés sur le du liège	18
Tableau 7: Cordonnées géographiques des trois subéraies	23
Tableau 8: Aspects géologique de la zone d'étude	26
Tableau 9: Structures pédologiques de la zone d'étude	26
Tableau 10: Classes de pentes et le pourcentage occupé dans chaque subéraie	27
Tableau 11 : Caractéristiques des stations de référence	29
Tableau 12: Indice de continentalité pour les trois forêts	34
Tableau 13: Etage de végétation du chêne liège pour les quatre forêts	34
Tableau 14: Les variables explicatives prises en considération et leurs classes respectives	49
Tableau 15: Caractérisation situationnelle et topographique des trois sites	51
Tableau 16 : Caractéristiques sylvicoles des trois sites	52
Tableau 17: Données topographiques relatives à chaque itinéraire	54
Tableau 18: Statistique descriptive des mesures dendrométriques et d'exploitation	55
Tableau 19: Variation inter-groupes et intra-sujets pour les trois subéraies	56
Tableau 20: Variations des teneurs en composés minéraux par classe de défoliation	63
Tableau 21: Récapitulatif des modèles ^b	65
Tableau 22: Analyse de variance Anova ^a des classes de défoliation	66
Tableau 23: Coefficients ^a du modèle globale pour les trois subéraies	66
Tableau 24: Statistique de multi-colinéarité (cime altérée)	67
Tableau 25: Paramètres statistiques des coefficients non standardisés et standardisés (Classe de défoliation pour les trois subéraies)	67
Tableau 26: Corrélations de Pearson entre les variables indépendantes explicatives du dépérissement	74
Tableau 27: Classes d'aspect du liège de reproduction	79
Tableau 28: Classes des calibres du liège en lignes et en mm	82
Tableau 29: Homogénéisation des classes des calibres du liège	82
Tableau 30: Classes de densité du liège	82
Tableau 31 : Classification utilisée pour estimer les indices de qualité	85
Tableau 32: Formules mathématiques relatives au protocole expérimentale de la technologie du liège en planche	87
Tableau 33: Humidité d'équilibre du liège des trois provenances	88
Tableau 34: Statistique descriptive du gonflement linéaire	88
Tableau 35: Analyse de variance du gonflement linéaire	90
Tableau 36: Statistique descriptive du gonflement volumétrique	91
Tableau 37: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante: GfV	92
Tableau 38: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante aspect du liège	94
Tableau 39: Statistiques descriptives de la variable dépendante calibre du liège	94
Tableau 40: Tests des effets inter-sujets de la Variable dépendante calibre du liège	95
Tableau 41: Statistiques descriptives de la variable dépendante densité volumétrique du liège	96
Tableau 42: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante densité volumétrique du liège	97
Tableau 43: Statistiques descriptives de la variable dépendante porosité du liège	98
Tableau 44: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante porosité du liège	99
Tableau 45 : Statistique de la variable dépendante compression mécanique du liège	99
Tableau 46: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante compression mécanique du liège	100
Tableau 47: Description statistique de la variable dépendante indice de qualité (IQ)	101

Tableau 48: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante compression mécanique du liège	102
Tableau 49 : Moyenne \pm intervalle de confiance de la caractérisation biométrique du plan tangentiel, dans une région d'intérêt de 150 μ m ² par degré de perturbation	111
Tableau 50: Moyenne \pm intervalle de confiance de la caractérisation biométrique dans le plan transversal, mesurée dans 25 cellules, par degré de perturbation	112
Tableau 51: Moyenne de la caractérisation biométrique dans le plan transversale et radiale, mesurée dans 25 cellules, par degré de perturbation	112
Tableau 52: Analyse de variance entre les variables biométriques et la perturbation environnemental	113
Tableau 53: Moyenne \pm intervalle de confiance de l'épaisseur des parois cellulaires du liège, par type de perturbation (25 cellules/ section transversale)	115
Tableau 54: Paramètres de la porosité selon les classes de déficit foliaire	119
Tableau 55: Matrice de corrélation entre les paramètres technologiques du liège et le déficit foliaire	124
Tableau 56: Synthèse des résultats de l'analyse descriptive des variables continues	133
Tableau 57: Fréquences des années pluviométriques en fonction de l'indice de précipitation	136
Tableau 58: Accroissements moyens annuels, dans un cycle de croissance de 15 ans (13 années de croissance complète). Moyenne pour chaque provenance et l'écart type	141
Tableau 59 : Récapitulatif des modèlesb	143
Tableau 60: Corrélation de Pearson, coefficients (r) entre les accroissements (AC), les indices annuels des accroissements du liège (IAC) et les précipitations mensuelles moyennes accumulées pour certaines périodes de l'année	145
Tableau 61: Corrélation de Pearson, coefficients (r) entre la largeur des cernes annuels (AC), les indices des accroissements (IAC) et les indices climatiques	151
Tableau 62: Moyennes arithmétiques des indices climatiques analogues aux indices des accroissements	154
Tableau 63: Statistique descriptive des variables indices climatiques-indices d'accroissements	154
Tableau 64: Matrice de corrélation entre les IAC et les indicateurs climatiques(ZA)	158
Tableau 65: Matrice de corrélation entre les IAC et les indicateurs climatiques(TA)	158
Tableau 66 : Matrice de corrélation entre les IAC et les indicateurs climatiques(AM)	158
Tableau 67: Les variables et les modalités retenues pour l'ACM	168
Tableau 68: Différents aléas associés à la crise environnemental en suberaie	169
Tableau 69 : Moyenne de chaque variable mesurée selon l'état du sous-bois	173
Tableau 70: Valeurs propres et pourcentages d'inertie	179

Listes des abréviations

- A.E.F.C.O: Fascicule de gestion du cantonnement d'Oran
- ACM: Analyse des Correspondances Multiples
- ANOVA: Analyse de variance
- APCOR: Association Portugaise du liège
- AUC: Aire sous la courbe
- BNEDER: Bureau National d'Études pour le Développement Rural
- C.O.I.T.: Cantonement d'Oran, Inspection de Tlemcen
- CEF: Système de classification utilisant le filtrage morphologique et l'extraction de contours
- CV : Coefficient de variation
- CWFT: Conservation des Forêts de la Wilaya de Tlemcen
- ddl: Degré de liberté
- DGF : Direction Générale des Forêts
- FAO : Organisation des nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
- GIEC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
- ha : Hectare
- HF: Température du feu
- Hotspot : Point chaud de biodiversité
- IPROCOR: Institut du liège, du bois et du carbone végétal
- ISO: Organisation internationale de normalisation
- kW m⁻² : Kilowatt par metre carré
- KW: Test de Krskall Walis
- M€: Million d'Euros
- MJ/kg: Metre joule par kilogramme
- Mg. Ha⁻¹ : Megagramme par hectare
- µm: micrometre
- P : Pluviométrie
- p : Seuil de signification
- PNT : Parc National de Tlemcen
- PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
- qx : Quintaux
- SIG : Système d'information Geographique
- T : Température
- t/ha : tonne/hectare
- UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature
- Σ : La somme ou le total
- % m.s : Pourcentage de la matière seche

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I

Synthèse bibliographique sur le chêne liège et les changements environnementaux

I.1-Le chêne liège.....	5
I.1.1- Description botanique	5
I.1.2-Répartition géographique et superficies.....	7
I.1.3-Exigences édaphiques	7
I.1.4-Exigences écologiques et climatiques	8
I.1.5-Structures forestières	8
I.2-Le liège.....	9
I.2.1-Structure du liège	10
I.2.2-Canaux ou pores lenticulaires	12
I.2.3-Types de liège.....	12
I.2.4-Production subéricole.....	13
I.2.5-Les propriétés du liège.....	14
I.2.6-Economie du liège.....	16
I.2.7- La technologie du liège.....	18
I.2.8-Usage du liège.....	20
I.3-Le chêne liège face aux changements environnementaux.....	20
I.4-Mécanisme du dépérissement des arbres forestiers.....	21

Chapitre II

Milieu d'étude

II.1-Présentation du milieu d'étude.....	23
II.2-Géologie et relief	25
II.3-Hydrographie.....	29
II.4-Le climat	29
II.4.1-Choix des stations météorologiques.....	29
II.4.2-Les précipitations.....	30
II.4.3-Répartition saisonnière des pluies.....	31
II.4.4-Les températures.....	32
II.4.5-Amplitude thermique.....	34
II.4.6-Etage de végétation	34
II.4.7-Diagramme omrothermique de Bagnouls et Gausson.....	35
II.4.8-Climagramme d'Emberger	35
II.5-Description foresiète.....	36
II.6-Porduction du liège.....	37
II.7-Les incendies.....	38

Chapitre III

Caractérisation analytique du risque environnemental en suberaie

III.1-Introduction	39
III.2-Type d'échantillonnage et contraintes	40
III.3-Matériels et méthodes.....	42
III.3.1-Type de mesures	42
III.3.1.1-Les paramètres forestiers.....	42
III.3.1.2-Les paramètres de l'état sanitaire des arbres.....	42
III.3.1.2.1-Visualisation de l'architecture de l'arbre (l'état du feuillage).....	42
III.3.1.2.2-Evolution annuelle de la défoliation.....	43
III.3.2-L'explication analytique du déficit foliaire ou du dépérissement.....	43
III.3.2.1-L'état de la cime	44
III.3.2.2-L'état du tronc.....	45
III.3.2.3-Approche statistique	45
III.3.2.3.1-La régression linéaire multiple.....	46
III.3.2.3.2-Problématique du modèle.....	46
III.3.2.3.3-Modélisation graphique	47
III.3.2.3.4-Démarche statistique	47
III.3.2.3.4.1-Estimation des coefficients	47
III.3.2.3.4.2-La qualité d'ajustement.....	48
III.3.2.3.4.3-La significativité globale de la liaison.....	48
III.3.2.3.4.4-La significativité de l'apport marginal de chaque variable.....	48
III.3.2.3.4.5-Test de la colinéarité entre les variables indépendantes.....	49
III.3.2.3.4.6-Protocole expérimental réalisé sur le terrain.....	49
III.4-Résultats.....	51
III.4.1-Situation du plan d'échantillonnage.....	51
III.4.2-Caractéristiques topographiques des trois sites.....	51
III.4.3-Caractéristiques sylvicoles des trois sites.....	51
III.4.4-Caractéristiques des arbres échantillons.....	55
III.4.5-Etude de l'état sanitaire des arbres-échantillons.....	57
III.4.5.1-Evolution annuelle de la défoliation.....	57
III.4.5.2-Indice de dépérissement.....	60
III.4.5.3-Explication du déficit foliaire selon les variables continues indépendantes....	61
III.4.5.3.1-Caractérisation des arbres échantillons.....	61
III.4.5.3.1.1-Les variables de morphologie et d'exploitation.....	61
III.4.5.3.1.2-Les variables de l'état du tronc.....	62
III.4.5.3.1.3-La variable de l'état de la cime.....	63
III.4.5.4-Application de la régression linéaire multiple.....	65
III.4.5.4.1-La qualité d'ajustement.....	65
III.4.5.4.2-La significativité globale de la liaison.....	66
III.4.5.4.3-La signification de l'apport marginal de chaque variable.....	66
III.4.5.4.4-Test de la colinéarité entre les variables indépendantes.....	67
III.4.5.4.5-Interprétation et choix du modèle.....	67
III.4.5.4.6-Validation finale du modèle.....	67
III.5-Discussion.....	68
III.6-Conclusion.....	75

Chapitre IV

Impact du risque environnemental sur la technologie du liège

IV.1-Introduction.....	76
IV.2-Matériels et méthodes.....	76
IV.2.1-Les paramètres de la technologie du liège.....	77
IV.2.1.1-Echantillonnage et façonnage.....	77
IV.2.1.2- Le bouillage du liège	78
IV.2.1.3- L'aspect du liège.....	79
IV.2.1.4- La croissance du liège.....	81
IV.2.1.5- La densité volumétrique du liège.....	82
IV.2.1.6- La porosité du liège.....	82
IV.2.1.7- La compression du liège	84
IV.2.1.8- Les indices de qualité.....	85
IV.2.1.9- Analyse microscopique	86
IV.2.1.10-Synthèse des mesures de la technologie du liège.....	86
IV.2.2-Analyse statistique.....	87
IV.3-Résultats.....	88
IV.3-1-Humidité du liège	88
IV.3-2-Etude du gonflement industriel du liège.....	88
IV.3-2.1-Gonflement linéaire.....	88
IV.3-2.2-Gonflement volumétrique.....	90
IV.3.3-Aspect du liège	92
IV.3.4-Croissance du liège.....	94
IV.3.5-Densité volumétrique.....	95
IV.3.6-Porosité.....	97
IV.3.7-Analyse mécanique.....	99
IV.3.8-Indice de qualité.....	101
IV.4-Discussion des mesures technologiques du liège.....	102
IV.4.1-Le bouillage industriel du liège	103
IV.4.2- Les paramètres de la qualité visuelle.....	105
IV.4.2.1-L'apparence externe du liège.....	105
IV.4.2.2-L'épaisseur marchande du liège	109
IV.4.3- Les paramètres de qualité physique.....	113
IV.4.3.1-La dureté du liège.....	113
IV.4.3.2-Le taux de porosité.....	116
IV.4.3.3-La résistance mécanique.....	120
IV.4.4- Les paramètres mercatiques du liège.....	122
IV.5-Conclusion.....	127

Chapitre V

La croissance du liège face aux variations climatiques

V.1-Introduction.....	128
V.2-Matériels et méthodes.....	129
V.2.1-Echantillonnage et mesures.....	129

V.2.2-Analyse climatologique.....	130
V.2.2.1-Les précipitations.....	130
V.2.2.2-Les températures.....	131
V.2.3-Analyse dendro-climatologique.....	132
V.3- Traitement statistique.....	132
V.4-Résultats.....	133
V.4.1- Caractéristiques des arbres-échantillons.....	133
V.4.2-Analyse climatique de la zone d'étude.....	134
V.4.2.1- Variations inter-annuelles des précipitations..... ;;	134
V.4.2.2-Indices de déficit pluviométrique, IDP(%).....	134
V.4.2.3. Indice standardisé de précipitations (ISP).....	135
V.4.2.4-Indice de pluviosité (IP).....	136
V.4.2.5-Indice de sécheresse (IS).....	136
V.4.2.6-Indice de sévérité (ISV).....	137
V.4.2.7-Les températures.....	138
V.4.2.8-Anomalies des températures.....	139
V.4.3-Influence des précipitations et des températures sur la croissance annuelle	141
V.4.3.1-Etude de la croissance annuelle du liège dans le cycle de production.....	141
V.4.3.2-Caractérisation climatique des trois provenances analogue au cycle de croissance.....	144
V.4.3.2.1-Influence des précipitations	145
V.4.3.2.2-Influence des températures.....	149
V.4.3.2.3-Effet des précipitations et des températures.....	150
V.4.3.3-Impact des indices climatiques sur les indices d'accroissements.....	154
V.5-Discussion.....	159
V.6-Conclusion.....	163

Chapitre VI

Analyse globale du risque environnemental en suberaie

VI.1-Introduction.....	164
VI.2-Matériels et méthodes.....	165
VI.2.1-Méthode d'analyse du risque en forêt.....	165
VI.2.2-Analyse et compréhension d'une crise environnementale en subéraie.....	166
VI.2.3-Analyse multivariée entre les indices technologiques du liège et les paramètres environnementaux.....	167
VI.3-Résultats et discussion.....	169
VI.3.1- L'identification et l'évaluation des aléas.....	169
VI.3.2- Analyse des aléas.....	170
VI.3.3-Actions face aux aléas ou la la gestion du risque environnemental.....	171
VI.3.4-Exemple pratique de la gestion du risque environnemental.....	172
VI.3.5-Suivi et surveillance des aléas.....	175
VI.3.6- Mesures d'adaptation et de résilience envers les aléas.....	176
VI.3.7-Relation entre indices technologiques du liège et indices environnementaux....	178
VI.4-Conclusion.....	184
Conclusion générale et perspectives.....	186
Références bibliographiques.....	189

Annexe

Production scientifique

Communications nationales et internationales

-1^{er}Séminaire National en Sciences Agronomiques (Webinaire): Recherches à Vision Economique en Sciences Agronomiques RAVESA-AGROWEB1, Les 15 et 16 Juin, 2021, Université de M'Sila.

Titre de la communication : Impact du stress abiotique sur la croissance et la production du chêne liège en semi aride (Wilaya de Tiaret)

https://docs.google.com/presentation/d/1rXyevZrcF9riux8M_i_467Wwdhle9QWT/edit#slide=id.p1

-1^{er} Web Conférence National sur la Gestion des Ecosystèmes Naturels face aux Changements Globaux Tlemcen, le 11 novembre 2021

Titre de la communication: Impact de la pluviométrie sur les accroissements annuels du liège deux subéraies de l'Ouest Algérien

<https://docs.google.com/presentation/d/1rTNh6lQK3ZYz7cabJVOKwSnZwTYBYxNU/edit#slide=id.p1>

- Séminaire National Patrimoine Forestier Algérien : Enjeux et Préservation Mostaganem, le 07 Décembre 2021

Titre de la communication : Etude des facteurs réglant la croissance et la qualité du liège post-incendie dans la subéraie de Zarieffet (Wilaya de Tlemcen)

https://docs.google.com/presentation/d/1_tARnMsQ2o4mV_b9fq13VOLb4XWzmYDF/edit#slide=id.p1

-Séminaire national Valorisation des Bio-Ressources Végétales en Algérie (VBRV Khenchela 7.6. 2022)

Titre de la communication: Valorisation technologique du liège en région Nord-Ouest d'Algérie

https://docs.google.com/presentation/d/1bBK_kyQRTffoMC4ek5OTrF8CnmcrdOif/edit#slide=id.p1

-1^{er} Séminaire national sur la Restauration des Forêts et des Terres boisées, Tlemcen le 26-27 octobre 2022

Titre de la communication: Étude de l'effet l'embroussaillement sur la densité basale du liège de quelques subéraies du nord-ouest

https://docs.google.com/presentation/d/1e9_uIQ8Rv8h6VPJqFY3Qmy1eJDeKI1J/edit#slide=id.p1

- Journée d'Etude sur la Promotion de l'Economie Forestière tenu le 22 décembre 2022 Tlemcen

Titre de la communication: Étude de la variabilité de la qualité du liège de quelques subéraies du nord-ouest algérien

<https://docs.google.com/presentation/d/1W9EtIpg8qTeI31FJYJZAdmmbqU4NZAp/edit#slide=id.p1>

-1^{er} Colloque « Améliorer les Connaissances de la Conservation des Espèces Menacés pour une Meilleure Gestion Durable » Tiaret le 22 novembre 2023

Titre de la communication: Impact de la mauvaise exploitation du liège sur les arbres productifs cas de la subéraie de Hafir (W. Tlemcen)

<https://docs.google.com/presentation/d/1abCVmU8Qe6y8B8TcuV-uquDsaPxf16z0/edit#slide=id.p1>

-1st workshop smart forest management Crapast-Djelfa.

Titre de la communication: Study of the relationship growth index-rainfall parameters of western Algeria cork.

<https://docs.google.com/presentation/d/1vTyckCc-GZQaKN5PD0DA2h0ZL2-IMeXi/edit#slide=id.p1>

-First International Conference on: Forests of the Mediterranean Region: State of play and prospects Khenchela 15-16 March 2022

Titre de la communication: Etude de la qualité du liège du nord ouest algérien

<https://docs.google.com/presentation/d/1wvnerTfCClufe9HytwzQD6bzIPoqZwq8/edit#slide=id.p1>

-1st International Seminar of Agri-Food and Industrial Biotechnology Djilali Bounaâma University of Khemis Miliana. (June 26-27th, 2024).

Titre de la communication: Le liège aux services de l'industrie biotechnologique

<https://docs.google.com/presentation/d/1FsvLv6AyqJ1u4K30yLbn4uJbK9W802r/edit#slide=id.p1>

- XV^e Colloque International de l'Agriculture "AGROSYM 10-13 octobre 2024, Bosnie-Herzégovine.

Titre de la communication: Study of the quality of cork of Northwest Algeria

https://docs.google.com/presentation/d/1AeJI7z9gUsvFkBwLCTI_pBnqRNa6Fp3t/edit#slide=id.p1

Publication Nationale

-Frihi M.H. and Dehane B., 2023. Influence of precipitation on cork annual growth (Northwest Algeria). *Agriculture and Forestry Journal*, 7(1):42-49.

<https://journals.univ-tlemcen.dz/AFJ/index.php/AFJ>

Publications internationales

- Frihi M.H. and Dehane B., 2024. The annual growth of cork in the face of climate variations (Northwest of Algeria) ». *International Journal of Environmental Studies*.

<https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2322887>

- Frihi M.H. and Dehane B., 2024. Study of the quality of cork of Northwest Algeria. *Proceedings of the IX International Agricultural Symposium "Agrosym, 1444-1450*.

Introduction générale

Introduction générale

Le chêne liège, *Quercus sube* L., est une essence forestière endémique du domaine méditerranéo-atlantique (Pausas et al., 2009). L'adaptation de l'espèce aux aléas environnementaux remonte à des millions d'années, dont la plus évoquée est la période des glaciations interférée des séquences xéothermiques intermédiaires (Varela, 2008).

Cependant, ces dernières décennies cette ressource naturelle est en nette régression suite à des successions d'épisodes de déficit foliaire induites par les changements environnementaux actuel notamment l'accentuation du déficit hydrique amplifiant l'incidence des ravageurs et des maladies (Brasier, 1992 ; David et al., 1992 ; Gentilesca et al., 2017 ; Touhami et al., 2020). Ce phénomène est devenu un thème environnemental majeur depuis les années 1980 sous l'appellation « Dépérissement forestier » (Bénézit, 1991; Landmann, 1991). Les premiers constats de cette manifestation remontent aux années 1960 (Becker Lévy, 1982 ; Delatour, 1983), cependant, cet évènement naturel n'a été clairement reconnu scientifiquement que dans les années 1990 et semble s'accélérer à nouveau dès les années 2000 dépendant fortement des changements globaux, suite au changement brutal de l'occupation du sol par les sociétés rurales méditerranéennes (Aloui, 2001 ; Ruiu et al., 2002; Kim et al., 2017).

Dans la région nord-ouest d'Algérie, la dégradation sanitaire des suberaies a été décrite comme une conséquence des fluctuations climatiques de courte période, comme les années de sécheresse, la mauvaise gestion des peuplements productifs, l'accentuation de l'embroussaillage et de l'enrésinement (Bouhraoua, 2003; Dehane, 2012). Selon Vennetier (2012), ce fléau est devenu un sérieux problème écologique et socio-économique.

Les causes du dépérissement du chêne liège sont multiples et interactives. Elles sont très mal connues. Cette question a fait l'objet de divers projets de recherche ponctuels et de court terme, qui n'ont pas produit les résultats escomptés en matière de connaissance des causes de mortalité anormale (Sousa et al., 2007). La définition la plus claire présente les dépérissements des forêts comme des phénomènes causés par un ensemble de facteurs interagissant et se succédant de manière particulière et conduisant à une détérioration générale (notamment de l'apparence et de la croissance des arbres) et à une détérioration progressive aboutissant souvent à la mort de l'arbre (Manion, 1981).

La subéraie est un écosystème complexe et structuré, elle partage de multiples points communs liés au climat, au sol et à la composition floristique, mais elle partage également de nombreux problèmes de santé tels que les insectes ravageurs, les maladies, d'autres facteurs biotiques (tels que les espèces ligneuses envahissantes ou le pâturage) et abiotiques (tels les mauvaises pratiques de levées du liège, les incendies, la pollution ou d'autres catastrophes) (Plan Bleu, 2009). L'impact négative de ces facteurs apparaît directement sur l'architecture de la cime qui devienne squelettique à cause de la chute prématurée des feuilles. Ce constat a fait l'objet de plusieurs études et recherches scientifiques et ouvert la porte à plusieurs méthodes d'estimation du dépérissement dont les plus connues sont les méthodes ARCHI et DEPEFEU (Sbrescia, 2016).

La méthode ARCHI repose sur une analyse architecturale du houppier de l'arbre qui décrit son état physiologique mais ne renseigne ni sur les causes du dépérissement qu'elles soient biotiques ou abiotiques, ni sur les raisons des comportements individuels des arbres. La méthode DEPEFEU repose sur le déficit foliaire, principal indicateur retenu pour caractériser l'état sanitaire des arbres par rapport à un arbre de référence qui croit localement dans des conditions normales (DSF, 2010).

Le chêne liège est largement inscrit dans les programmes de reboisement forestier en vertu de sa grande valeur économique, grâce à sa particularité physiologique qui le distingue des autres ligneux, il a une écorce subéreuse appelée communément liège ayant des qualités technologiques de légèreté, de souplesse et d'élasticité (Dehane et Chorana, 2021).

La technologie du liège est une spécialité des sciences forestières largement répandue au Portugal et en Espagne en vertu des répercussions économiques qu'elle procure. Actuellement, le Portugal et l'Espagne sont les plus grands producteurs de liège au monde, représentant respectivement 58,3% et 19,8% des exportations totales, suivis des pays d'Afrique du Nord (2% seulement) (ITC, 2023).

En utilisant seulement 20% de matière première, le liège génère plus de 80% de revenus par la production de bouchons uniquement, qui constitue en même temps la colonne vertébrale de l'économie forestière à base de chêne-liège (Varela, 2000).

Le liège est un matériau naturel à structure cellulaire doté d'un ensemble intéressant de propriétés, à savoir une faible densité, une très faible perméabilité aux liquides, une grande compressibilité avec une récupération dimensionnelle, une faible conductivité, une stabilité chimique et une durabilité (Pereira, 2007).

Le liège est utilisé dans diverses applications, y compris les dispositifs flottants, produits d'étanchéité et matériaux d'isolation, d'absorption d'énergie et de surfaçage, et en médecine (Silva et al., 2005).

Ce large épouvantail d'application du liège doit ses propriétés aux paramètres technologiques permises lors de sa transformation industrielle. L'une des caractéristiques les plus importantes du liège est son épaisseur résultant de la croissance annuelle du liège coïncidant avec l'activité du phellogène entre les mois de mars et de novembre de l'année végétative (Natividade, 1956). Les accroissements annuels qui en résultent gagnent ou perdent de l'épaisseur au fur et à mesure que les conditions du milieu s'améliorent ou se dégradent (Leite et al., 2019). Le deuxième facteur est son aspect qui englobe deux paramètres quantifiables: la porosité caractérisée par la présence des canaux lenticulaires qui traversent les planches de liège dans la tige de l'arbre selon la direction radiale reliant l'extérieur aux tissus vivants internes et permettant les échanges gazeux. Le deuxième paramètre singularise sa densité volumétrique, l'une des principales caractéristiques structurelles du liège, très associée à la géométrie et à la dimension des cellules, la présence des inclusions ligneuses, la forme des ondulations des parois cellulaires (Fonseca et al., 1994 ; Pereira, 2015).

Les propriétés mécaniques du liège sont aussi importantes en vertu des performances de résistance qu'elles procurent aux produits en liège. Il a été constaté que les propriétés de compression du liège variaient en fonction de ses dimensions cellulaires (Pereira et al., 1992).

L'aspect marchand du liège demeure aussi une condition optimale pour sa commercialisation. Un liège de bonne qualité doit présenter un grain léger, exempt de défauts majeurs tels que les soufflures, la lignification verticale et horizontale, le liège terreux et la tache jaune (Dehane, 2012). Dans le traitement industriel du liège, la matière première est bouillie, ce qui provoque une expansion radiale, transversale et tangentielle, produisant une augmentation de l'épaisseur (Rosa et al., 1990).

Pour évaluer les paramètres technologiques du liège, une panoplie d'instruments est utilisée allant du micromètre gradué au Lintab à bras coulissant pour mesurer les accroissements et les épaisseurs (Chorana, 2021). Les logiciels d'analyse d'images numériques sont aussi évoqués à l'instar de « CEF » et « Olympus D » pour mesurer les défauts et la porosité (Chang, 1997 ; González Adrados et al., 2005), les procédés CalcCor et CorkClass 4.1 pour identifier les défauts du liège (Gracia de Céca, 2008 ; Santiago Beltrán et al., 2020). L'aspect et la qualité du liège sur arbre sont estimés par le Coveleess CQ05 (CYCITEX, 2020). La densité volumétrique des parois cellulaire est quantifiée par la technologie μ CT (Micro-Tomographie par Ordinateur) et par microdensitométrie à rayons X (Dias et al., 2018 ; Poeiras et al., 2021).

Dans les conditions climatiques actuelles qui prévalent dans la plupart des régions du monde et particulièrement en méditerranée, la sécheresse est une des conditions climatiques extrêmes affectant plus de personnes que toute autre forme de catastrophe naturelle (Wilhite, 2000). L'occurrence, depuis les dernières décennies, d'importantes sécheresses occupant de grands

territoires sur tous les continents souligne l'importance de ce phénomène (Beaudin, 2007). Deux grands types de sécheresse sont identifiés : la sécheresse météorologique provoquée par un manque de pluie et la sécheresse édaphique causée par un manque d'eau dans les sols. L'impact de ces deux phénomènes réunis sur une longue période, nuit fortement à la répartition des espèces forestières et sur leurs performances productives (Montenegro, 1987). A titre d'indication, en Espagne, la grave sécheresse de 2012 a eu un impact négatif sur la productivité de nombreuses forêts, entraînant la formation d'anneaux de bois étroits, voire absents (Camarero et al., 2015 ; Zemrani et al., 2023).

Le chêne liège réputé de sa résistance aux différents stress, subi ces dernières décennies une sensibilité accrue aux fluctuations saisonnières et annuelles des précipitations, très inférieures aux normales des pluies supposées tombées et remplir les réserves du sol. L'aspect xérophytique du chêne liège se manifeste par des caractéristiques comme la sclérophylle et la réponse stomatale au déficit hydrique (Tenhunen et al., 1984; Oliveira et al., 1992). Chez *Q. suber*, le cambium de liège (phellogène) est une couche méristématique permanente qui ajoute chaque année une nouvelle couche de liège à l'écorce extérieure (phellem). Le phellogène devient généralement actif en avril et peut rester actif jusqu'à la fin d'octobre (Natividade 1956). Les accroissements du liège produits annuellement sont clairement différenciés entre cernes du printemps de grande taille et ceux réduits de l'été-automne. Ces limites peuvent être datées et soumis à une analyse climatique et dendro-climatique (Fos et Bareno, 1994 ; Caritat et al., 2000 ; Costa et al., 2002 ; Dehane, 2012 ; Dehane et Ghefar, 2017).

Parmi les facteurs qui peuvent entraîner des variations dans les accroissements annuels du liège et son aspect on peut citer les écarts des températures à la moyennes nauuelle, la rareté des précipitations et la durée de la saison sèche, l'assèchement des sols et l'évaporation plus importante de l'eau disponible. Plusieurs auteurs ont indiqué une relation de cause à effet entre les précipitations et la largeur des cernes (Oliveira et al., 1996a, 1996b ; Caritat et al., 1996 ; Costa et al., 2002) et l'activité solaire et la largeur des cernes (Surový et al., 2008), et ont présenté des preuves qu'ils affectent la production du liège (Surový et al., 2009).

Plusieurs indices climatiques ont été proposés pour quantifier la sévérité de la sécheresse qui sont dans la majorité liés à des variables hydro-météorologiques (Diaz, 2019). Parmi les indices de sécheresse les plus populaires on cite: l'indice Palmer (Palmer, 1965), l'indice de l'approvisionnement en eau de surface (Shafer et Dezman, 1982), l'indice standardisé de précipitation (McKee et al., 1993), l'indice de sécheresse effective (Byun et Wilhite, 1999), l'indice de sécheresse des débits (Nalbantis et Tsakiris, 2009), l'indice hydrologique normalisé (Sharma et Panu, 2010), l'indice normalisé de l'évapotranspiration maximale (Vicente-Serrano et al., 2010), l'indice régional de la zone de sécheresse (Fleig et al., 2011) et l'indice agricole de référence de la sécheresse (Woli et al., 2012). Chacun de ces indices a ses propres forces et ses faiblesses. Mishra et Singh (2010) ont fait un examen exhaustif des différents indices de sécheresse résumant leur utilité et leurs limites.

La région nord-ouest de l'Algérie subi catégoriquement l'agressivité des changements globaux, et leurs impacts sont bien visibles aussi bien par la physionomie régressive des peuplements que les performances productives et qualitatives des arbres. Les trois subérais retenues pour cette thèse (Zarieffet, Tagdempt et Ami-Moussa) constituent une référence de l'impact négative des perturbations environnementales sur la vigueur des arbres productifs et les indices technologiques du liège.

L'objectif principale de la thèse est de caractériser les paramètres de la technologie du liège d'une part et de les superposer à la perturbation environnementale qui est le déficit foliaire d'une part et les variations climatiques d'autres part. Il était question de savoir à quel degré de la perturbation les paramètres technologiques enregistrent leurs hauts et leurs basses performances.

Pour ce faire, nous avons structuré la thèse en six chapitres distincts:

- 1- Synthèse bibliographique sur le chêne liège et les changements environnementaux.
- 2- Milieu d'étude.
- 3- Caractérisation analytique du risque environnemental en suberaie.
- 4- Impact du risque environnemental sur la technologie du liège.
- 5- La croissance du liège face aux variations climatiques.
- 6- Analyse globale du risque environnemental en suberaie.

Chapitre I

Synthèse bibliographique sur le chêne liège et les changements environnementaux

I.1-Le chêne liège

I.1.1-Description botanique

Le chêne-liège, *Quercus suber* L., a été décrit botaniquement par Linnaeus en 1753. L'origine de ce mot n'est pas claire. Selon FontQuer (1979), le chêne liège est une déformation de 'al clorte, qui en arabe berbère signifie nu. Les Grecs appelaient le chêne-liège fellós ou felós, ce qui signifie écorce, bien que le mot latin suber puisse aussi provenir du grec « seguir », qui signifie peau rugueuse. Le nom générique quercus vient du celtique « kaer-quez » qui signifie bel arbre.

Le chêne-liège est un arbre appartenant à la famille des Fagacées. Cette famille comprend des espèces présentant des caractéristiques similaires au chêne-liège, telles que le chêne vert, le chêne zéen et le chêne pubescent, le chêne kermès, les châtaigniers, les hêtres, et bien d'autres, qui vivent principalement en Europe, en Asie et en Amérique du Nord, jusqu'à un total de plus de 500 espèces (RedFor,2009). Toutes ces espèces ont commun d'être, en général, des arbres, ou parfois des arbustes, avec des fleurs mâles et femelles séparées, mais au sein du même arbre(Fig.1). Selon la classification APG III (2009) l'essence appartient au

- Règne: Plantae
- Clade: Angiospermes
- Clade: Dicotylédones vraies
- Clade: Noyau des Dicotylédones vraies
- Clade: Rosidées
- Clade: Fabidées
- Ordre: Fagales
- Famille: Fagaceae
- Genre: Quercus
- Espèce: *Quercus suber* L., 1753

-Le chêne liège est un arbre avec un feuillage persistant, pouvant vivre 150 à 200 ans, voire 800 ans et atteindre 20 à 25 m de haut (le plus grand ayant atteint 43 m), ne dépasse généralement pas 12 à 15 m. La circonférence du tronc est de 100 cm en moyenne et peut atteindre 3 à 5m au maximum et 12 m dans les cas extraordinaires) (Santos Pereira,2008 ; RedFor, 2009 ; IML, 2021).

-Les feuilles du chêne-liège sont persistantes, en ce sens qu'elles vivent plus d'une année entière. Elles meurent et tombent généralement au cours de la deuxième la troisième année. De taille variable (de 3 à 5 cm) mais plutôt petites, elles sont fermes, coriaces, glabres et un peu luisantes à la face supérieure, tomenteuses et blanchâtres à la face inférieure. Elles sont portées par un pétiole assez court. Les nervures secondaires, au nombre de cinq à sept de chaque côté forment l'axe d'autant de dents plus ou moins marquées et se prolongent au-delà du limbe en une fine pointe flexible (Saccardy,1937 ; Diaz et al., 1995).

-Le chêne-liège est pollinisé par le vent. Comme chez tous les chênes la floraison est monoïque. Les fleurs jaunâtres s'épanouissent au printemps courant avril-mai, les fleurs mâles, en chatons, et femelles, minuscules, sont séparées sur le même pied. Les chatons mâles, allongés et réunis par bouquets pendants, apparaissent à l'extrémité des pousses de l'année précédente. Les fleurs

femelles naissent à l'aisselle des pousses de l'année sous forme d'une petite cupule écailléeuse (Euforgen, 2003).



Figure1 : Certains aspects botaniques du chêne liège(Dehane, 2012)

Environ 80 à 90 % de la radiation solaire absorbée par le couvert l'est par les feuilles, le reste est absorbé par les autres organes. Considérées comme récepteur de radiation, les caractéristiques pertinentes sont la position, l'orientation, la forme et les dimensions des feuilles, ainsi que leurs propriétés optiques (Ross,1981). L'essentiel de la photosynthèse d'un écosystème forestier à chênes est assuré par les feuilles. Les autres organes verts (tels que, les rameaux annuels ou les branches, parfois aussi les troncs) contribuent dans une moindre mesure à la photosynthèse totale (Bréda et al., 2002).

-Les glands apparaissent avec la fructification à l'âge de quinze ans, elle devient abondante et soutenue vers la trentième année. Ils sont oblongs, enveloppés sur la moitié de leur longueur par les cupules, et sont réunis par deux sur des pédoncules courts et renflés. Ils mûrissent généralement dans l'année même de la floraison. Ils sont de grosseur très variable et leur chute s'échelonne d'octobre à janvier. Les glandées abondantes n'apparaissent que tous les deux ans, parfois même tous les trois ans. Ces glands sont ordinairement amers et ne sont pas comestibles pour l'homme (López de Heredia et al., 2007).

-La cupule est portée par un gros pédoncule très court. Les écailles légèrement saillantes croissent en longueur à partir de la base. Les supérieures se terminent en lanières molles assez allongées, dépassant le bord de la cupule. D'abord apprîmes elles se hérissent par dessiccation (Saccardy,1937).

-L'enracinement du chêne liège est robuste, pivotant chaque fois que la nature du sol le permet et en tout cas constitué par de fortes et longues racines qui fixent l'arbre solidement même dans les sols les plus ingrats. Il rejette vigoureusement de souche jusqu'à un âge avancé pourvu que

les jeunes rejets disposent de beaucoup de lumière. Il drageonne aussi, quoiqu'on l'ait parfois nié, en particulier après un incendie ou sur les tranchées pare-feu (Montoya Oliver, 1988 ; Costa Tenorio et al., 1997).

I.1.2-Répartition géographique et superficies

En raison de ces exigences climatiques et écologiques permises uniquement en méditerranée occidentale et certaines parties de l'atlantiques, le chêne-liège nécessite une température moyenne annuelle de 13 à 18°C, et ne tolérera pas des températures inférieures à -10°C (Beccarisi et al., 2010). C. En conséquence, son aire de répartition naturelle comprend les régions côtières du bassin méditerranéen occidental, notamment l'Algérie, le sud de la France, l'Italie, le Maroc, le Portugal, l'Espagne et la Tunisie, les îles de Corse, de Sardaigne et de Sicile, ainsi que des zones très limitées sur les îles de Majorque et Minorque (Aronson et al., 2009) (Fig.2).

Environ 65,7% de la superficie mondiale de chênes-lièges appartient à l'Union Européenne (Europe du Sud), qui contrôle 87% de la production de matières premières (Cork Quality Council, 2018). Selon l'Institut Méditerranéen du Liège (IML, 2021), la subéraie mondiale totaliserait environ 2 687 000 hectares répartis sur les sept pays connus: Portugal 32,5%, Espagne 22,1% ; Italie 6,7 % ; France 4,4% ; Maroc 18,1% ; Algérie 12,2% et Tunisie 4% .

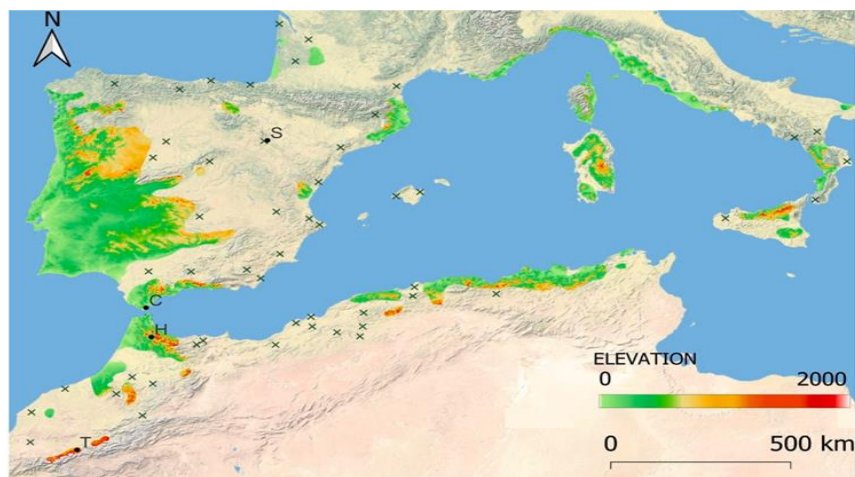


Figure 2: Carte de l'aire de répartition de *Quercus suber* dans le bassin méditerranéen occidental (taches colorées correspondant à différentes altitudes en m au-dessus du niveau de la mer ; les croix indiquent les populations autochtones isolées) (Caramero et al., 2024)

I.1.3-Exigences édaphiques

Le chêne liège réclame vivement les sols siliceux, préférant les sols sableux et meubles. Il ne supporte pas les calcaires, les argiles, les argilo-calcaires, ni les sols à texture très limoneuse et dépourvus de sel marin (Pereira, 2007). Les analyses minérales effectuées par Laiseca (1949), indiquent une moyenne de 2,62% pour la Silice (SiO₂) 0,17% pour le Calcium (CaO) et 1,58% pour le fer. Pour une croissance optimale, c'est une espèce exigeante aussi en fertilité, elle a besoin de sols profonds, et surtout bien drainés. Il ne supporte pas les sols compacts ou gorgés d'eau (Montero et Cañellas, 1999). Selon Saccardy (1938), En Algérie, ses terrains d'élection

sont les grès éocènes (Numidien et Medjanien), territoires forestiers par excellence. Sa végétation est belle aussi sur les terrains azoïques et sur les granits.

I.1.4-Exigences écologiques et climatiques

Le chêne-liège est une essence héliophile, réclamant de la chaleur, de l'humidité. Il supporte mal l'ombre au stade adulte où il végète et finit par mourir. Selon 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 (Jijel) à 2400 mm dans certaines régions du nord-ouest du Portugal et du sud d'Espagne (Dehane, 2012). Pereira (2007) estime que 500 mm étant le minimum habituellement considéré pour un développement équilibré des arbres. 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% (Veillon, 1998). La température moyenne du mois le plus froid ne doit pas descendre en dessous de 4-5 °C (Costa Tenorio et al., 1997).

L'espèce peut vivre entre 0 et 1300 m d'altitude au-dessus du niveau de la mer ((Montero et Cañellas, 1999). Les performances point de vue croissance, production et qualité du liège sont obtenues entre 300 et 600 m d'altitude (Pardos, 1998). En Algérie son extension en altitude est généralement limitée à la côte 1200m, rarement 1300 à 1400m, exceptionnellement 1600m (Teniet-el-Haad, qui est l'une des stations les plus éloignées du littoral) (Lamey, 1893 ; Saccardy, 1937).

I.1.5-Structures forestières

Dans les subéraies méditerranéennes, deux types de structures existent basées principalement sur la densité des arbres à l'hectare mais aussi sur leurs caractéristiques écologiques, productives et forestières: les subéraies de plaine et de montagne qui intègrent les Montados au Portugal et les Dehesas en Espagne (Montero, 1987 ; Montero et Cañellas, 2002).

Selon l'inventaire de la DGF (Abbas, 2013), la subéraie Algérienne occupe une aire écologique globale de 483 800 ha dont 377 792 ha sur le littoral et 106 008 ha en montagne. La plus grande masse se trouve à El Taref avec 96 965 ha, et la plus petite à Mascara avec 300 ha (Fig.3).

Figure 3: Types de subéraies à l'échelle méditerranéenne et nationale

I.2-Le liège

Le liège est l'écorce du chêne-liège *Quercus suber* L qui recouvre le tronc, les branches et les racines de l'arbre; fut le premier tissu végétal dont la structure a été étudiée au microscope par Hooke en 1665 (Pereira, 2007) (Fig.4).



Figure 4: Levée traditionnelle du liège (APCOR,2019)

Le liège étant un tissu mort provenant de deux tissus méristématiques secondaires capables de se reproduire:

- Le cambium vasculaire: Typique à toutes les espèces ligneuses et qui produit du xylème – bois – vers l'intérieur et du phloème vivant – tissu conducteur (le liber) – vers l'extérieur.
- Le phellogène ou cambium corticale: Situé à l'extérieur du phloème vivant (le liber), et qui produit essentiellement le phellem ou liège vers l'extérieur et quelques couches imperceptibles de phelloderme vers l'intérieur. L'ensemble formé par le phelloderme, le phellogène et le phellem, on l'appelle périoderme, ou cortex (Remacha, 2008).

La mère du liège: Elle fait référence à l'ensemble des tissus compris entre les deux méristèmes, cambium-phellogène (liber et phelloderme), et sur cette couche se concentrent les processus vitaux du chêne-liège (Fig.5).

Le phellogène forme un anneau continu sur le tronc, concentrique au cambium. Les premières cellules du phellogènes se forment très tôt et au cours de la quatrième ou cinquième année de la vie du chêne-liège, l'anneau est terminé. Le phellogène ne perd pas ses propriétés méristématiques et ne change pas sa situation, accumulant une croissance annuelle. S'il meurt, il est remplacé par un phellogène traumatique qui possède les mêmes propriétés que le phellogène initial et peut se régénérer autant de fois nécessaires. Ce sont ces caractéristiques qui rendent possible l'utilisation du liège (Fortes et al. , 2004).

Figure 5: Coupe transversale d'un tronc de chêne liège ((Dehane, 2006, Gemeno, 2007)

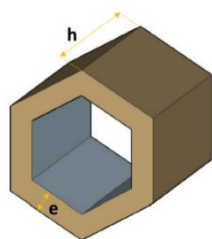
Le phellogène forme un anneau continu sur le tronc, concentrique au cambium. Les premières cellules du phellogènes se forment très tôt et au cours de la quatrième ou cinquième année de la vie du chêne-liège, l'anneau est terminé (Silva et al., 2005). Le phellogène ne perd pas ses propriétés méristématiques et ne change pas sa situation, accumulant une croissance annuelle. S'il meurt, il est remplacé par un phellogène traumatique qui possède les mêmes propriétés que le phellogène initial et peut se régénérer autant de fois nécessaires. Ce sont ces caractéristiques qui rendent possible l'utilisation du liège (Pereira, 2007).

I.2.1-Structure du liège

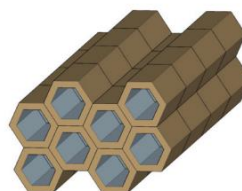
C'est un matériau cellulaire fermé, avec une fraction volumique d'éléments solides d'environ 15%. Le tissu subéreux est très homogène et d'une grande pureté, il est formé fondamentalement de cellules en disposition radiale sans espaces libres entre elles, bien que des cellules typiques de sclérenchyme apparaissent occasionnellement hautement lignifiées (Crang et al., 2019).

La cellule du liège est creuse, est contient un gaz de composition semblable à l'air. La paroi cellulaire est responsable de la plupart des propriétés du liège et elle est composée de trois couches : paroi primaire, paroi secondaire et paroi tertiaire. Ces cellules communiquent par de très petits canaux appelés plasmodesmes, qui contribuent à ce que le volume du liège soit constant (Pereira et al., 1996).

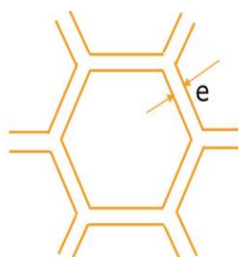
Anatomiquement, les cellules sont pour la plupart façonnées comme un prisme droit hexagonal (Fig.6a), dans la section tangentielle apparaissent de forme polygonale (Fig.6b), avec 5 à 7 faces (principalement 6), et dans les coupes longitudinales (radiales et transversales) sa section est rectangulaire (Fig. 6c).



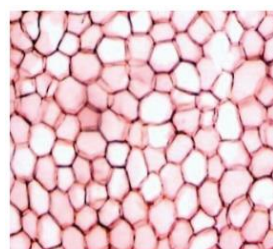
a) Cellule de parenchyme



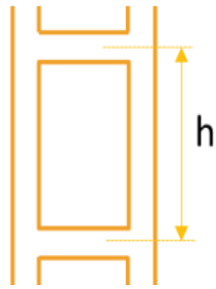
a) Structure en rangées de la cellule du parenchyme



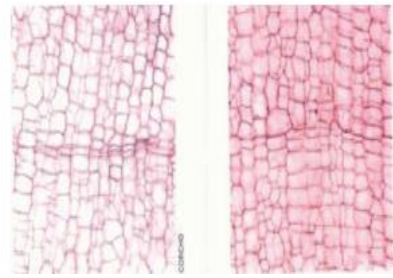
b) Section tangentielle schéma



b) Section tangentielle photomicrographie



c) Coupes transversales et radiales schéma



c) Coupes transversales et radiales photomicrographie

Figure 6 : Cellule de parenchyme et sa disposition dans les coupes tangentielle, transversales et radiales (Gosuber, 2020)

Les dimensions des cellules du liège sont identiques à celles des cellules végétales, typiquement de l'ordre de quelques dizaines de micromètres (μm). Les moyennes des dimensions varient sensiblement selon la saison dans laquelle sont formées (cellules de printemps et de l'été/automne) (Tab.1).

Tableau 1: Caractéristiques dimensionnelles des cellules de liège (Pereira et al.,1987)

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

I.2.2-Canaux ou pores lenticulaires

En plus du phloème, le liège contient des canaux lenticulaires, également appelés pores. L'organisation lenticulaire du chêne-liège dépend principalement de facteurs génétique, mais elle est également liée à des facteurs environnementaux. Elle est formée au moment de la constitution du phellogène et il existe une grande variation dans la forme et la taille des canaux. Sa forme peut être circulaire ou elliptique et son nombre en 100 cm^2 varie entre 300 -1300 dans la section tangentielle et 140-500 dans les sections transversales et radiales. La surface varie entre 0,2 et 8 mm^2 et si la section est supérieure à 8 mm^2 , le liège se déprécie beaucoup (Fortes et al., 2004 ; Pereira, 2007) (Fig.7).

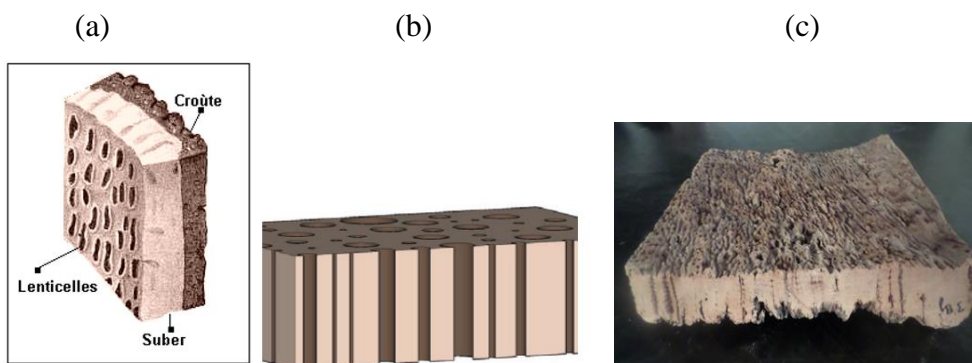


Figure 7: Aspect des canaux lenticulaires dans les directions transversale, radiale et tangentielle (a,c : Dehane, 2012 ; b:Gosuber, 2020)

Parfois, les canaux présentent des changements dans leur forme et leur taille dues aux stress de croissance, tels que le pore en poche (canal qui se déforme intérieurement et ne peut être vu de l'extérieur), ou le pore de l'aiguille (lorsque le canal diminue progressivement sa section). La superficie occupée par les canaux dans une section donnée et exprimée en pourcentage est définie comme coefficient de porosité (Gamero , 1995 ; Del Pozo et Santiago, 2000).

I.2.3-Types de liège

Au cours de l'âge d'exploitation du liège entre 100 et 150 ans, l'arbre produit deux types de liège d'aspect et de qualité différentes :

-Le liège mâle : Le liège que produit l'arbre naturellement est désigné sous le nom de liège mâle, liège vierge ou liège naturel (Fig.8). C'est un ensemble de cellules périphériques qui deviennent méristématiques ne se détachant jamais spontanément. Son épaisseur est toujours plus forte dans la partie basse que vers la couronne, elle peut atteindre 25cm de calibre (Dehane, 2006).

Ce liège est dur, d'une élasticité médiocre, profondément crevassé et impropre à la plupart des usages industriels, notamment la fabrication du bouchon à l'exception de l'aggloméré (Avila et Bernal, 1998). L'opération de dépouillement de ce liège est appelée démasclage ou mise en valeur. Elle a pour but de fournir un autre type de liège dit « femelle ».

-Le liège de reproduction : Après l'opération de mise en valeur, un nouveau liège se forme de qualité plus au moins améliorée, c'est le liège de « première reproduction » ou liège « femelle ». Ce type de liège offre la même structure que celle du liège mâle, mais avec moins de crevasses et plus d'homogénéité. A partir de la troisième récolte, c'est le liège de reproduction, qui est de qualité excellente et le plus convoité pour le tubage des bouchons en liège naturel. Plusieurs levées périodiques sur le même arbre peuvent avoir lieu, fournissant plusieurs récoltes de liège de reproduction, estimées en moyenne entre 6 à 9 récoltes voire 15 au maximum (Lombardini, 2012) (Fig.8).

Figure 8: Mécanisme de régénération du liège dans l'arbre(Dehane, 2012)

I.2.4-Production subéricole

Grace à sa superficie dépassant les 736 000 ha, le Portugal détient la plus grande productivité du liège par unité de surface, soit une moyenne annuelle allant de 220 à 255kg/ha/an (Jové, 2015). Cette suprématie revient à l'intérêt économique accordé à la filière liège au fils des

décennies, elle constitue la colonne vertébrale des exportations vers l'extérieur. Dans le cas de l'Espagne, la production varie entre 129 et 180 kg/ha par an (Tab.2).

Tableau 2: Productivité des subéraies par pays subericoles (kg/ha)

Pays	IPROCOR(2006)	CMA(2006)	APCOR(2007)	Moyenne nationale
Portugal				
Espagne				
France				
Italie				
Algérie				
Maroc				
Tunisie				

Au Maghreb, on obtient des ratios nettement inférieurs, entre 35 et 100 kg/ha par an, très variables selon les zones observées. Le principal facteur de différence de productivité est la détérioration progressive des peuplements productifs au cours des dernières décennies, causée par le manque de régénération des arbres, la pression humaine et animale et les changements environnementaux (Zapata, 2002 ; Carrero,2015).

I.2.5-Les propriétés du liège

Le liège possède une combinaison inhabituelle de propriétés : faible densité, très faible perméabilité aux liquides et aux gaz, faible conductivité, chimiquement stable, haute compressibilité durable avec une bonne récupération. Ces caractéristiques offrent au liège a une grande polyvalence et peut être utilisé à des fins multiples. Les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du liège peuvent être résumées comme suivant :

- Les cellules de liège ont 90 % de leur volume cellulaire occupé par du gaz, leur densité volumétrique est donc faible ($120-200 \text{ kg.m}^{-3}$) faisant du liège un matériau élastique et compressible, avec une structure interne nettement poreuse (Jové, 2015).
- De plus, la présence de subérine, de lignine et de cires dans les parois cellulaires font du liège un matériau imperméable aux liquides. Cependant, son imperméabilité ne signifie pas qu'elle est absolue, puisqu'il permet une diffusion lente des gaz.
- La teneur élevée en gaz, la taille des cellules, le faible pouvoir d'adsorption lui confère une faible transmission de chaleur et constitue donc un bon isolant thermique. La conductivité thermique du liège sans écrasement ni modification est de $0,045 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Silva et al., 2005).
- La faible densité et la porosité élevée rendent la plupart des ondes sonores adsorbées et transformées en énergie thermique, c'est donc un bon isolant thermique. Le liège est un bon isolant et correcteur acoustique puisqu'il absorbe plus de 60% des ondes sonores qui impactent sa surface (Pereira, 2007).
- En raison de sa structure cellulaire, le liège présente une haute résistance au mouvement/glissement ou un coefficient de frottement élevé (0,35-0,76 liège-verre), en raison de l'effet de ventouses provoqué par la surface des cellules (Vaz et Fortes, 1998).
- La déformation et la flexion possibles des parois cellulaires confèrent au liège sa capacité d'amortissement, et c'est une propriété très importante pour certaines applications comme les bouchons, l'industrie automobile ou les semelles de chaussures.

- La forte teneur en air de ses cellules lui permet de peut se comprimer jusqu'à presque la moitié sans perdre en flexibilité, et retrouver sa forme et son volume une fois laissé. Lorsqu'il est pressé, le liège est compressible, élastique et résilient. C'est le seul solide qui, s'il est comprimé d'un côté, n'augmente pas de l'autre (Gosuber, 2020).
- La lignine et les polysaccharides de sa paroi cellulaire lui confèrent rigidité, stabilité et le rendre résistant au passage du temps (Pereira, 2015).
- Le liège s'hydrate en fonction des conditions environnementales, il est hygroscopique. Diverses études ont démontré le potentiel du liège à adsorber les contaminants émergents, c'est un biosorbant (Silva et al., 2005).
- Il est 100% naturel, recyclable et renouvelable car il est une matière d'origine végétale qui peut être extraite sans blesser l'arbre et il se régénère avec le temps. Elle permet un équilibre durable entre la gestion agroforestière et l'action humaine. En ligne avec les tendances actuelles en matière de matériaux naturels et de construction durable, c'est un exemple clair d'économie verte (Gosuber, 2020).

I.2.6-Economie du liège

En Algérie, *Quercus Suber* L, occupe 440 000 ha, dont 230 000 productifs (DGF, 2004). Ces étendues sont localisées dans le Tell oriental à raison de 82%, le Tell central (15%), et au Tell occidental (2%). Les wilayas les plus importantes en production de liège sont El Tarf, Jijel, Skikda, Béjaïa, Tizi Ouzou. Les quantités extraites durant la période 2000-2018 tournaient aux alentours de 80 000 à 100 000 quintaux annuellement soit pas moins de 50% de la production réelle des subéraies algériennes (Arezki, 2018) (Fig.9).

Les premières récoltes de la suberaie algérienne sous la domination coloniale datent de 1847 et font état de 447 quintaux de liège brut, suite aux premières reconnaissances et soumissions des massifs d'El Kala, Skikda et Annaba (Dehane, 2012).

La récolte de liège dans les forêts domaniales, qui n'était en 1890 que de 1 363 quintaux, s'élève dès 1892 à 11 034 qx avec un maximum de 50 000 qx atteint en 1898 (Lamey, 1893 ; Lapie, 1928). La période 1937-1950 fut l'âge d'or du liège en Algérie, la production moyenne normale oscillait autour de 320 000 qx par an, avec un record de 553 919 qx en 1937 et dont 90% environ provenaient du département de Constantine (Dehane et al., 2013).

Figure 9: Fluctuation annuelle de la production du liège en Algérie (DGF, 2021)

Trois ans après l'indépendance, soit en 1965 (année de référence des potentialités moyennes de production de liège en Algérie), le service forestier algérien a repris l'exploitation des massifs de chêne-liège. En raison d'une absence d'exploitation durant la guerre de libération, majorée par un stock important dans les dépôts, la production a atteint un pic jamais égalé de 350 000 qx.

De 1979 à 2021, soit 43 ans d'exploitation continue, la production du liège en Algérie a connu plusieurs périodes funestes qui ont eu les conséquences les plus fâcheuses sur le rendement du liège :

- Vieillessement des peuplements à cause de l'exploitation intense durant la période coloniale.

- Les choix des politiques économiques.
- La détérioration du secteur forestier en générale.
- La conjoncture sécuritaire et inaccessibilité aux peuplements arrivant à l'âge d'exploitation.
- Les coupes illicites de grande envergure, au profit d'individus et de sociétés multinationales.

Actuellement (de 2020 à 2024) la production nationale annuelle ne dépasse pas les 10000 tonnes, avec un espoir d'atteindre 15 000 tonnes.

La récolte du liège et son industrie sont des activités créatrices de richesse. Rien que pour la période de récolte, beaucoup de postes d'emploi sont créés. Entre 1500 à 2000 personnes sont embauchées pour exécuter cette tâche, à travers de vastes chantiers ouverts dans les différentes wilayas au nombre de 22 concernées par cette production.

A l'échelle mondiale, la production annuelle de liège est aux alentours de 201 000 tonnes. Environ 90 % de cette production émane du Portugal, Espagne, Maroc et Algérie. Au niveau commerce du liège, le secteur est clairement dominé par le Portugal, où 736 775 hectares de chênes-lièges produisent 100 000 tonnes de liège (50% de la production mondiale de matières premières), qui représentent un chiffre d'affaires en produits finis en 2018 proche de 1000 M€, dont 72% (644 M€) proviennent de la fabrication de bouchons et 28% pour le secteur de construction et autres (APCOR, 2018).

I.2.7- La technologie du liège

La qualité d'un produit en général fait référence à certaines propriétés que ce dernier doit avoir, pour qu'il ait une certaine valeur économique sur le marché et entre les consommateurs. Dans le cas du liège, les paramètres qui influencent la qualité du liège sont liés à ses deux paramètres technologiques fondamentaux à savoir le calibre et l'aspect (CICYTEX, 2020).

Le calibre défini l'épaisseur de la planche de liège obtenue dans un cycle de production. C'est la mesure qui sépare le dos à la mie du liège. Elle est obtenue selon les accroissements annuels du liège et les facteurs du milieu. Le calibre est dit marchand quand il dépasse les 27mm d'épaisseur sur l'arbre, et il est exprimé en ligne (1 ligne= 2,25mm). Diverses classifications du calibre sont utilisées faisant références à leurs destinations industrielles (Pereira, 2007) (Tab.3).

Tableau 3: Classe calibre selon la Norme Espagnole UNE 56-915-88 (AENOR,1988)

Rangs de calibre en mm					
09/22	22/27	27/32	32/40	40/45	45/54
Très mince					

Contrairement au calibre qui est facilement mesurable, l'aspect du liège est très subjectif car il concerne des éléments perceptibles à l'œil nu et au toucher et autres éléments intrinsèques. Il s'agit de déceler les anomalies et les défauts qui parsèment la planche du liège afin de la classer selon son usage commercial et industriel (Dehane, 2012).

Le commerce et l'industrie du liège définissent différents types de classes d'aspect. Elle distingue sept types d'aspects par ordre décroissant de qualité du premier au sixième et le rebut (aspect très mauvais) (Tab .4).

Tableau 4: Les classes d'aspect du liège CMC (1990)

Rangs d'aspect							
Choix							

La fusion des deux attributs « Calibre- Aspect » ramène aux 9 classes de qualité du liège(Tab.5) :

Tableau 5: Configuration commerciale des classes de qualité (Calibre/Aspect) (IPROCOR, 2006)

Calibre	Classe de qualité commerciale élargie							
	Aspect							
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
11 lignes 24,75mm								
11-13 lignes 29,25-24,75mm								
13-15 lignes 29,25-33,75mm								
15-19 lignes 33,75-42,75mm								
>19 lignes (42,75mm)								

Chaque classe de qualité est validée aussi selon les occurrences relatives des défauts (Tab.6)

Principaux défauts rencontrés sur le liège (Cork quality Council, 2004)

Origine	Defaults	Causes	Propriétés
Génétique	Porosité excessive	Présence des pores à grosses sections	-Porosité>4%(liège très poreux) -Porosité>6% (liège soufflé)
	Densité excessive	Couches annuelles minces et dures	-Densité entre 0,2 à 0,3 -Excès d'élasticité
	Excès	Couches annuelles très minces	-Accroissement annuels > 12mm

Physiologique	d'élasticité		-Retour d'élasticité très faible
	Liège ligneux	Présence de sclérenchymes dans le liber	-Liège lourd et très dure -Moins de flottabilité
	Liège terreux	Présence de canaux brunâtres sur l'épaisseur du liège	-Apparition de crevasses après bouillage -Absence de perméabilité
	Liège clouté	Inclusion d'éléments libériens sous forme de nodules dans la masse du liège	-Mort locale du phellogène -Développement d'une assise péridermique sous-jacente englobant une partie du tissu du liber.
	Liège doublé	-Arrêt du fonctionnement du phellogène -Attaques de la spongieuse	-Présence d'une fine lame de liber mal soudée aux tissus entre les anciennes et nouvelles couches du liège.
Phyto-pathogène	Liège marbré	-Effet du sel de fer sur le tanin -Attaque du champignon (<i>Mellophia ophiospora</i>)	-Présence de lignes ondulées noirâtres à bleuâtres sur le liège. -Altération des membranes de cellules.
	Liège vert	Pénétration d'eau dans les cellules lors du séchage du liège	Rétraction des zones atteintes
	Liège fourmi	Présence des trous de fourmis	Présence des crevasses qui diminuent la qualité du liège.
	Tâche jaune	Présence de champignon au dépôt des stockage	Le tissu subéreux est devenu décoloré, avec une forte odeur de moisissure

I.2.8-Usage du liège

Selon l'annuaire APCOR (2018-2019), le principal produit de l'industrie du liège est le bouchon en liège. Les déchets issus de cette industrie de transformation sont réutilisés à d'autres fins plus rentables. En effet, l'industrie des granulés de liège peut être divisée en deux : granules blancs et granules noirs destinés à des utilisations non alimentaires telles que des panneaux isolants, des revêtements de sol ou de la décoration entre autres (Gil, 1998) (Fig.10).



Figure 10: A gauche (Agglomérats de liège.) ; au milieu (Liège expansé MD façade) : à droite (Dalle de sol en liège naturel) (a et b : Gil, 1998; c: Dehane, 2012).

-En pharmacologie, la poudre de liège est très utilisée dans le traitement des intoxications aux métaux lourds. Diverses études ont démontré le potentiel du liège à adsorber les contaminants émergents tels que les hydrocarbures, les aromatiques polycycliques (Olivella et al., 2011a, 2011b, 2013a), phénanthrène (Olivella et al., 2013b), orange de méthyle (Krika et Benlahbib, 2015), l'ofloxacine (Crespo-Alonso et al., 2013), Biphenrine (Domingues et al., 2005), ibuprofène, carbamazépine et acide clofibrique (Dordio et al., 2011), métaux lourds (Pintor et al., 2012), pesticides (Jové et al., 2017).

-Le liège contient également des stérols, des flavonoïdes et des composés phénoliques. L'activité biologique de ces familles chimiques sont bien connues. Par exemple, les stérols peuvent réduire les problèmes de cholestérol ou influencer la prolifération du cancer. Les flavonoïdes ont été étudiés pour leur chimio-prévention du cancer et aussi pour leur activité antioxydante (Awad, 2003 ; Block et al., 2004 ; Castola et al., 2005).

-En industrie cosmétique, la subérine issue du liège agit également comme antioxydant et combleur de rides et ridules. De plus, elle forme un film tenseur apportant un effet lifting visible immédiat. Cette composé (la subérine) inhibe la croissance des bactéries. C'est un matériau idéal pour les chaussures et les accessoires orthopédiques (Carriço et al., 2018).

-Le liège est réputé d'être hypoallergénique, anallergique, antimicrobien, antistatique, extrêmement hygiénique aux atouts orthopédiques et très recyclable. Il est non toxique, ni en contact avec la peau ou après son introduction accidentelle dans le tractus gastro-intestinal (Goncalves et al., 2016).

-Le liège peut également améliorer la qualité du sommeil. Sa texture douce et moelleuse procure une sensation de confort et de relaxation. C'est un matériau naturellement thermorégulateur (une température corporelle confortable (APCOR, 2019).

-Le liège a été utilisé dans l'industrie de la mode et des textiles depuis des siècles. L'un des produits phares dans ce domaine sont les semelles en liège, aussi bien en liège naturel qu'en agglomérés ou de type sandwich, chaussures, maroquinerie, meubles, tissus d'ameublement, vêtements, tapis pour la pratique du sport, reliure en boîte... (RedFor, 2009).

-Dans la confection des pelouses naturels et synthétiques des stades, il existe actuellement plus de 50 marques commerciales de gazon avec certificats FIFA avec remplissage en granulats de liège. Le remplissage en liège est le deuxième plus compétitif en termes de prix (E-book, 2018).

- Le liège est utilisé dans le domaine des technologies spatiale comme un bouclier thermique, dans le domaine de l'aéronautique, est destiné à protéger le véhicule spatial lors de son entrée dans l'atmosphère d'une planète. Le bouclier thermique à base de liège est chargé d'empêcher la chaleur d'atteindre la structure de la navette pour éviter sa destruction (Roger et al., 2001).
- Le liège est en plus ignifuge, antifongique et résistant aux moisissures. Dans la nature, un hectare de forêt à chêne liège aurait la capacité de captiver à lui seul 14.7 millions de tonnes de CO₂ polluant par an (Santos-Pereira, 2008).

I.3-Le chêne liège face aux changements environnementaux

Le 4^{ème} rapport du Groupement Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) rapporte en 2007 que le changement climatique va affecter directement les écosystèmes entraînant une diminution de la productivité, une augmentation de la fréquence des incendies et une augmentation du dépérissement (Allen, 2009).

Le rapport de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2022) affirme que les années 2015-2022 ont été les huit années les plus chaudes jamais enregistrées. Selon les deux organismes, les températures mondiales devraient atteindre des niveaux records au cours des cinq prochaines années (2023-2027), alimentées par les gaz à effet de serre qui retiennent la chaleur, avec une fourchette d'évolution des températures de 1,1 à 6,4°C à l'horizon 2100 (GIEC, 2007 et 2013 ; OMM, 2022). Ceci entraînerait une réduction des productions du bois, du liège, du fourrage et la dégradation de l'écosystème et les services qu'il fournit.

Selon Jacq (2008), le bassin méditerranéen est une région où les résultats entre les modèles globaux du GIEC sont en accord, à savoir: une diminution des précipitations moyennes sur l'année, une augmentation forte de la température annuelle moyenne, un risque de sécheresse plus important (assèchement des sols), une diminution de la période enneigée et des débits des fleuves méditerranéens.

Du côté du chêne-liège, cela pourrait se traduire par des problèmes de relocalisation de l'espèce étant données les difficultés de sa dissémination naturelle par les glands (c'est un barochore) (Bertrand, 2007). D'ailleurs, les travaux de modélisation confirment un déplacement des aires potentielles de reboisement en chêne-liège vers des altitudes plus élevées. Dans les pires des cas, ces modélisations prévoient un avenir pessimiste sur la répartition future du chêne liège. A titre d'indication, dans le sud-ouest de l'Espagne, » les scénarios climatiques envisagent une déserte de l'espèce des régions climatiquement les plus défavorables où il est pourtant aujourd'hui majoritairement présent, avec en contrepartie l'ouverture de nouveaux territoires subéricoles dans le nord du pays (Infoliège n°12, 2017).

Au Maghreb, la situation semble plus délicate, ainsi que le montrent les travaux de modélisation menés dans le cadre d'un projet de coopération tuniso-allemand ((GIZ, 2011) sur le changement climatique : « Il n'y a pas de possibilité d'évolution et d'extension de la subéraie en Tunisie. Les résultats du même projet affirment que sous l'effet du changement climatique, le chêne liège risque de migrer progressivement en altitude pour occuper des stations plus fraîches qui d'habitude sont colonisées par le chêne zeen (*Quercus faginea*). Dans ces mêmes conditions, les unités à chêne liège occupant les étages les plus thermophiles évolueront vers des formations basses de maquis (GIZ, 2011). La subéraie sera soumise à une recrudescence des feux des forêts et une apparition plus précoce des parasites et autres ravageurs (Pérez-Sierra et al., 2013).

A l'opposé de ces hypothèses, certains experts forestiers estiment que les modèles climatiques utilisés prédisent uniquement l'évolution de la température et de la pluviométrie, mais ils ne peuvent en revanche pas prendre en compte les capacités adaptatives des écosystèmes forestiers : « La suberaie est une forêt très bien adaptée à la chaleur, même à des variations énormes de température et à des épisodes de sécheresse alors qu'il résiste à l'inverse aussi très bien au froid, « le chêne-liège supporte sans problème chaque hiver des températures allant jusqu'à -12°C. » (Infoliège n°12, 2017).

Les différentes études portées sur la relation entre climat et écosystèmes forestiers (Aidoud 2000; Le Houérou 1992; Guiot 1986; Bagnouls and Gausson 1957) montrent l'étroite corrélation entre l'occurrence des pluies, du vent et des températures avec le maintien de l'équilibre écosystémique développé localement. Paradoxalement, les changements climatiques vont avoir un impact sur la physiologie des arbres (Konkin et Hopkins, 2009). D'ailleurs, l'analyse symptomatique montre que le dépérissement forestier est un processus de dégradation qui se manifeste par une réduction progressive de la croissance de l'arbre, ainsi avec une chute prématurée des feuilles, repousses épicromiques et dessèchement des branches. Cela limite progressivement la vigueur de l'arbre, et en quelques mois la cime de l'arbre sèche complètement (Brasier, 1996).

Ce phénomène environnemental est causé par différents facteurs biotiques et abiotiques tels que les sécheresses, les gelées, les ravageurs et les agents pathogènes, dont l'intensité, le type et la fréquence sont très variables même au sein d'un même peuplement (Moricca et al., 2016). Parmi les principaux ravageurs qui affectent le chêne liège, se distinguent les insectes défoliateurs et foreurs de feuilles, du bois et du liège et certains champignons pathogènes (Tiberi et al., 2016 ; Camilo-Alves et al., 2013 ; Linaldeddu et al., 2014) :

- Les principaux défoliateurs sont les lépidoptères (*Lymantria dispar* L. et *Tortrix viridana* L.).
- Les xylophages dommageables sont *Platypus cylindrus* (Fabricius) et *Cerambyx cerdo* L.
- D'autres ravageurs qui détériorent la production de liège sont les nids que certaines espèces de fourmis construit dans le suber à l'égard de *Crematogaster scutellaris* Oliv. et *Lasius bruneus* Latreille.
- Les champignons les plus mortels sont du genre *Diplodia* et *Phytophthora* et deux espèces de chancre (*Diplodia corticola* et *Mediterranean Biscogniauxia*) ainsi que *Phytophthora cinnamomi*, qui affecte les racines dont l'oomycète cause le plus de dégâts en suberaie.

I.4-Mécanisme du dépérissement des arbres forestiers

Une légère déficience en pluie n'affecte pas la santé les arbres. En revanche, la situation se complique lorsque le manque de précipitations se prolonge et que les réserves en eau du sol ne sont qu'à 40 % et moins. A ce stade, les arbres souffrent du stress édaphique, on peut alors évoquer le stress hydrique. Si les sécheresses se répètent ou se prolongent, l'arbre se retrouve "sous-alimenté en carbone organique" car toute l'eau absorbée par les racines s'évapore au niveau des feuilles, il ne peut plus faire de photosynthèse et doit puiser dans ses réserves en profondeurs.

Par ailleurs, quand le besoin en eau de l'arbre est trop élevé par rapport à l'eau disponible dans le sol et que les stomates ne sont pas totalement fermés, des tensions élevées de sève montante provoquent le passage de l'air dans les vaisseaux pleins de sève formant des bulles

d'air dans les vaisseaux de l'arbre et empêchent la conduction de l'eau, créant une embolie qu'on appelle cavitation. La conjonction du manque de réserves, de la sensibilité face aux attaques diverses et du niveau de cavitation peut entraîner le dépérissement de l'arbre (Abdenbi, 2003). Affaibli, il est moins apte à se défendre contre les insectes et les maladies, et arrive au terme de sa mort aussi bien dans la rive sud ou nord de la méditerranée (Fig.11).

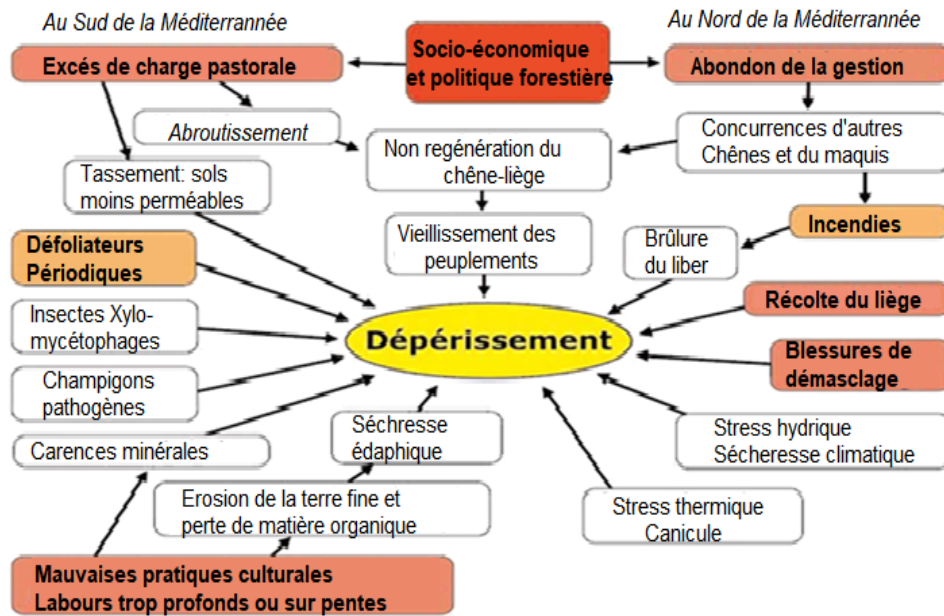


Figure 11: Le dépérissement du chêne liège résulte de multiples inter-actions (Amandier,2006)

Chapitre II

Milieu d'étude

II.1-Présentation du milieu d'étude

Les trois subéraies faisant l'objet de la présente thèse à savoir la forêt de Zariéffet (W.de Tlemcen), d'Ami-Moussa (W. de Relizane) et de Tagdempt (W. Tiaret) font partie intégrante des subéraies de l'Oranie (Fig.12). Dans cette région du nord-ouest algérien, le chêne liège est disséminé dans un certain nombre de forêts domaniales recouvrant à l'origine une superficie variant selon les auteurs et les périodes entre 6000ha (Charlemagne,1894), 8178ha (G.G.A ,1927), 7354ha (Marc,1930), 9000ha (Thintoin,1948), 14000ha (Boudy,1955) et 7000ha (Natividade, 1956). La qualité du liège dans cette région est qualifiée de meilleure (Lamey,1893).

Figure 12: Aire de répartition du chêne liège en Algérie (Dehane, 2006)

Ces entités naturelles s'étendent vers le Nord-Est le long d'une bande côtière discontinue de 600 km et une incursion de 128 km dans le continent. Les données relatives à la localisation géographique et administrative sont mentionnées dans la tableau 7 .

Tableau 7: Cordonnées géographiques des trois subéraies

Nom de la forêt	Cordonnées Lambert		Distance de la mer	Localisation administrative (Baladia)	Nature de la subéraie
	X (km)	Y (km)			
Zariéffet	X1 :123,3 X2 :129,8	Y1 : 177 Y2 : 180,5	50 km	Mansourah Beni Master	de montagne
Ami-Moussa	X1: 347,1 X2: 352,4	Y1:397,2 Y2:397,7	70 km	Ramka	de montagne
Tagdempt	X1: 350,9 X2: 351,9	Y1: 230,6 Y2: 233,2	128 km	Tagdempt	de montagne

- **La forêt de Zariéffet :** Elle occupe une superficie de 960 ha et se trouve à une altitude comprise entre 1000 et 1217m. Juridiquement, la forêt appartient au domaine public de l'état, sous la tutelle de la Conservation des forêts de la wilaya de Tlemcen et le Parc National de Tlemcen. Administrativement, elle est limitée :
- 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 Aï El Mardjene et la forêt domaniale de Hafir,
 - au sud par Dar Dis et la commune de Terny (Fig.13)

Figure 13 : Situation administrative et géographique de la subéraie de Zariéffet(Dehane, 2022)

- **La forêt de Tagdempt :** La zone d'étude « Safalou » relève de la forêt domaniale de Tagdempt située dans le territoire de la commune de Zariéffet, Daira de Mechraa Safa. Celle-ci étant située à 9 km à l'ouest de la ville de Tiaret et reliée par la route wilaya n°

11. La subéraie domaniale de Tagdempt, d'une superficie de 532 ha, s'étend sur les douars Tagdempt et Guertoufa de la commune de Tiaret. Ladite forêt se localise à une altitude 991m (Fig.14).

Figure 14: Situation administrative et géographique de la subéraie de Tagdempt (Dehane, 2022)

- **La forêt d'Ami-moussa :** D'une superficie de 450 ha, la forêt domaniale de Ami Moussa, appelée communément « Djbel Sàadia » se localise dans la partie sud-est du massif de l'Ouarsenis et relève de la circonscription d'Ami-Moussa sur une superficie globale de 1058 ha. Son territoire relève de deux communes: Ouled Ben Abdelkader au nord (Wilaya de Chlef) et Ramka au sud (Wilaya de Relizane). Géographiquement, la forêt de « Djbel Sàadia », culmine à une altitude moyenne 1060 m. Elle est limitée dans sa partie nord-est par le Douar El Labais, et dans sa partie nord-ouest par Ouled Mâamar, au sud par Ouled Chikh et Ouled Tayeb (Fig.15)

Figure 15: Situation administrative et géographique de la subéraie d'Ami-Moussa (Dehane, 2022)

II.2-Géologie et relief

La géologie de la région oranaise a été évoquée par de nombreux auteurs, nous citons en particulier les travaux de Bernard (1923), Lescomplekt, (1983), Dahmani (1984), Blavoux et Collignon (1986). Tous ces auteurs s'alignent sur une seule idée, cette region du Nord Algérien est parsemée par des grandes ensembles morphologiques est s'articule sur deux systèmes structuraux distincts telliens et atlasiques dont on cite les hautes plaines oranaises (la Meseta Oranaise) (Fig.16).

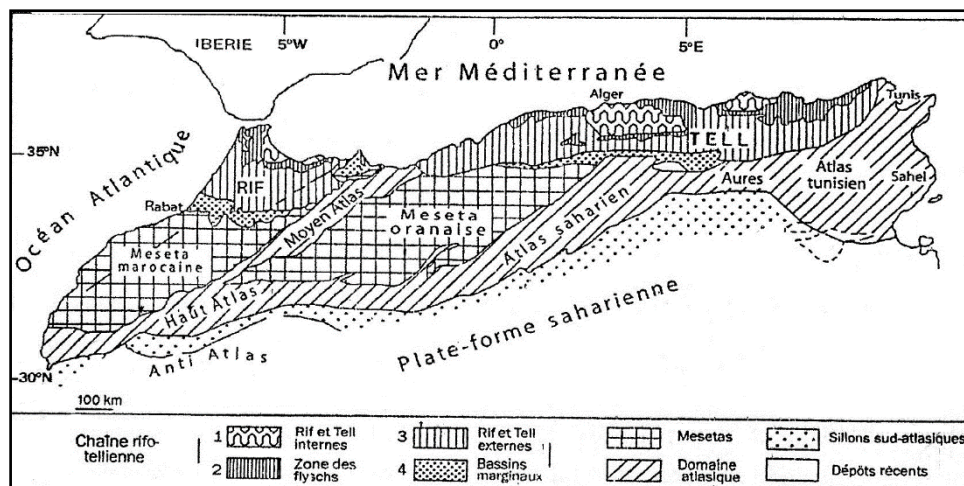


Figure 16: Les principaux éléments morpho-structuraux de la chaîne du Maghreb (Piqué et al., 1998)

La synthèse de ces travaux est illustrée dans le tableau 8.

Tableau 8: Aspects géologique de la zone d'étude

Subéraie	Formation géologique
Zarieffet	La forêt de Zarieffet s'installe sur un puissant massif datant du Jurassique supérieur à plissement Tertiaire. La roche mère est composée principalement des grès séquanais, calcaires de Zarieffet, calcaires à échinides, dolomies du Kimméridgien et du Portlandien et des marnes en affleurements éparses
Ami-Moussa	La géologie de la forêt est un mélange de sédiments crétacés supérieurs dans sa partie Nord-Est. Il s'agit des marnes, des calcaires et des argiles feuilletées. L'oligocène est très présent, il représente une altération de marne calcaire et de gré.
Tagdempt	Une grande partie des peuplements de la forêt de Tagdempt poussent sur une formation géologique des grès interrompue par des argiles sableuse datant de la transition du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur.

Le Tell oranais est particulièrement diversifié du point de vue pédologique (Thintoin, 1948 ; Quezel, 2000). Bien qu'une partie de la région soit occupée au nord par des grès pliocènes assez résistants, au sud par les calcaires dolomitiques durs du Jurassique supérieur. La majorité des sols se sont formés sur les schistes marneux du Crétacé supérieur, des marnes éocènes et mioches, du calcaire tendre et des sables pliocènes ou quaternaires (Aubert et Monjauze, 1946) (Tab.9).

Tableau 9: Structures pédologiques de la zone d'étude

Subéraie	Type de sols et textures
Zarieffet	Les sols bruns fersiallitiques, lessivés ou non. Ces sols sont soumis au 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).
Ami-Moussa	Des sols minéraux bruns qui détiennent environ 296 ha au sud de la forêt. - Les sols peu évolués caractérisés par une faible altération du milieu minéral se scindent en deux sous- classes : lithosol à base de grés, de fertilité naturelle sur 24 ha et d'apport colluvial sur 394 ha, à base d'affleurement rocheux de différentes tailles. - Les sols brunifiés : sur la partie haute de la montagne, composés essentiellement de roches sans carbonate à base de grés Numidien.
Tagdempt	Des sols silico-calcaires moyennement profond sur environ 130 ha. - Des sols argileux profonds sur 80 ha. - Des sols siliceux sur tout le versant avec des rochers de grés sur les mamelons. - Des sols frais profonds et de bonne qualité dans les bas-fonds.

Les reliefs sont généralement variés de formes escarpées et accentuées avec une élévation plus au moins importante, une déclivité des versants et une superficie étendue. La figure 17 regroupe les différentes pentes rencontrées sur le sol des trois subéraies.



Figure 17: Cartes des pentes des trois subéraies

Le tableau 10 illustre les proportions de pentes rencontrées dans la zone d'étude.

Tableau10: Classes de pentes et le pourcentage occupé dans chaque subéraie

Classes	Zarieffet	Ami-Moussa	Tagdempt
0-5%	0%	5%	2%
5-10%	8%	4%	7%
10-20%	15%	45%	30%
20-30%	25%	35%	40%
30-40%	25%	6%	11%
>40%	27%	5%	10%

La classe de pente comprise entre 0 et 5% faisant référence aux vallées est minimale (entre 2 et 5%) se distingue par des pentes modérées, occupe principalement les terres de piémonts et des collines qui correspondent aux zones de contact et de transition entre les reliefs de montagne, les vallées et les bas-fonds. La classe de pente comprise entre 10 et 20% synonyme de début de montagnes se caractérise généralement par un relief accidenté et se localise de façon dispersée à travers l'ensemble du territoire, typiquement à Ami-Moussa (45%) et Tagdmept(30%). La classe de pente comprise entre 20 et 30% se distingue généralement par un relief accidenté, se localise particulièrement à Zarieffet (25%), Ami-Moussa (35%)

et Tagdempt (40%). La classe de pente supérieure à 40% caractérisant un relief très accentué et abrupt s'étend particulièrement à Zariéffet (27%).

L'exposition des versants détermine les versants secs ou frais à partir de son ensoleillement, elle joue un rôle important dans la répartition et les types de végétations.

Les cartes des expositions des trois subéraies manifestent une inclinaison variée soit vers les versants secs ou frais (Fig.18). Dans la suberaie de Zariéffet, l'exposition dominante est vers le Nord soit dans son faciés Ouest (30%) et Est (40%). Ces deux expositions favorisent la remontée aisée de l'humidité maritime pendant les périodes de sécheresse. A Tagdempt, c'est plutôt l'exposition Sud qui s'étend sur 75% de la superficie de la subéraie. Ainsi on remarque un haut penchant pour les expositions Sud-Est et Sud-Ouest que plutôt du Nord moins favorable au bon développement du chêne liège et ce étant donné que les fortes gelées imposées de la saison automnale jusqu'au printemps. Le versant Nord plus réceptif aux courants maritimes ne constitue que 20% de la forêt. A Ami-Moussa, précisément « Djbel Sàadia » deux configurations se présentent: Le versant Sud est assez sec, souffrant d'une sécheresse prolongée de sept mois. Le versant Nord, s'enfonçant dans la wilaya de Chlef et de Tissemsilt, bénéficie des conditions climatiques favorables à cause de la fraîcheur provenant des côtes maritimes de Tenes et plans d'eau entourant la suberaie. La forêt de Djbel Sàadia fait partie du bassin hydrographique Cheliff-Zahrez qui couvre une superficie d'environ 56 227 km² et qui englobe trois wilayas entières (Chlef, Tissemsilt et Relizane).

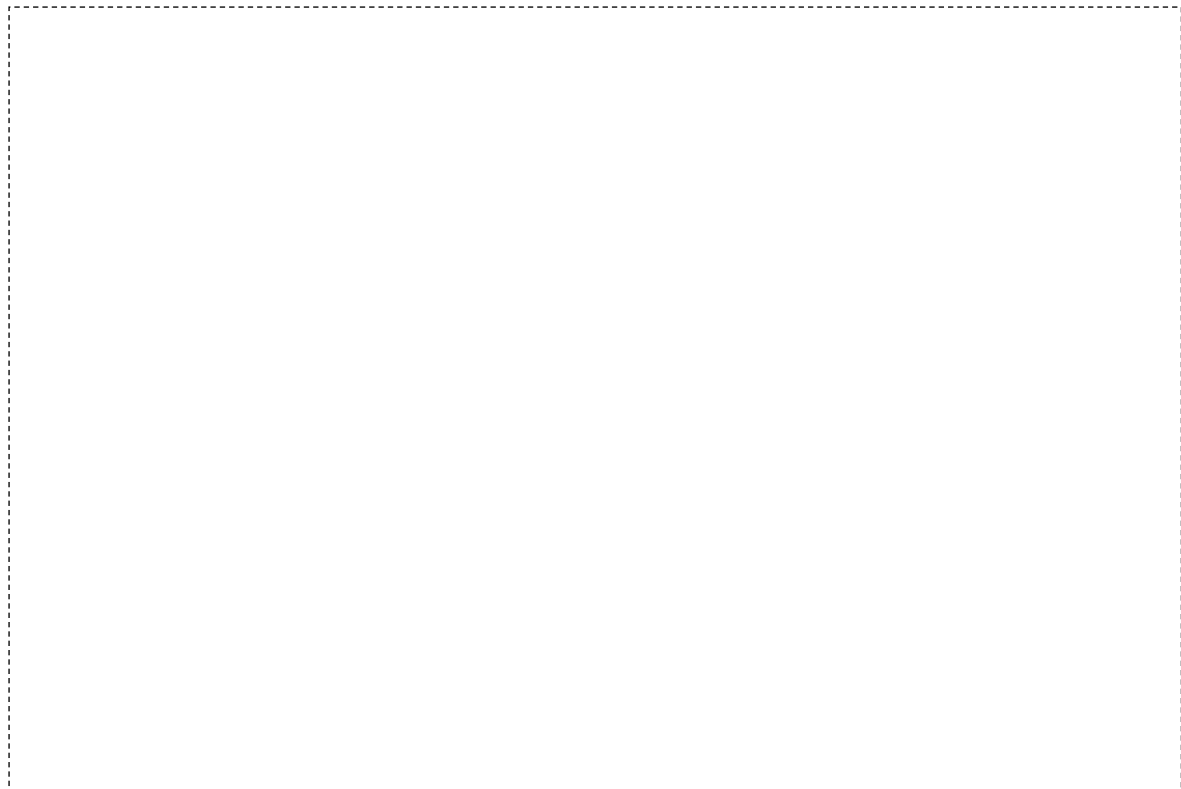


Figure 18 : Cartes des expositions des trois suberaies

II.3-Hydrographie

Dans la zone d'étude le réseau hydrographique est relativement temporaire en hiver et sec en été (CFWT,1996 ; CFWTr,1992 ; CFWR, 2018):

-A Zarieffet, le réseau hydrographique est moins important comportant trois oueds qui traversent la forêt. 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 Ghalem).

- La suberaie de Ami-Moussa fait partie du bassin hydrographique Cheliff-Zahrez. La forêt est traversée par oued Sly qui se déverse dans le barrage de Sidi Yakoub .

- La forêt de Tagdmept est traversée par deux principaux oueds : Oued Mesguida et Oued Safalou.

II.4-Le climat

Le climat méditerranéen est à la transition entre la zone chaude et la zone tempérée et est défini comme "un climat pluvieux et souvent doux en hiver (perturbations d'ouest) et chaud et sec en été (hautes pressions tropicales)" d'après le dictionnaire du climat (Daget 1977; Somot 2005).

La région Nord-Ouest d'Algérie n'est pas une région bien arrosée. Climatologiquement, cette zone est très influencée par sa position géographique et par la circulation atmosphérique générale, particulièrement l'oscillation nord atlantique notamment l'anticyclone des Açores. La majeure partie des pluies qui émanent de ce courant est interceptée par les montagnes de la Péninsule Ibérique et les montagnes du Rif au Maroc. Ce faisant fait que la région Oranaise est plus sèche et xérothermique (Dehane, 2012). La zone d'étude se situe entre les isohyettes 300mm et 600mm.

II.4.1-Choix des stations météorologiques

Etant donné que dans la zone d'étude, les stations météorologiques sont rares et que les variations climatiques sont accusées à cause du relief et des expositions des versants, nous avons choisi des stations météorologiques qui se trouvent à la proximité des zones étudiées, dans un souci de bien cerner les influences climatiques zonales sur les conditions locales. Les caractéristiques de ces stations de référence sont mentionnées dans le tableau 11 suivant :

Tableau 11: Caractéristiques des stations de référence

Forêt	Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Distance à la forêt
Zarieffet	Mefrouche	1°16'W	34°51'N	1100	2 km
Ami-Moussa	Sidi Yakoub	1°16'E	36°01'N	1060	12 km
Tagdempt	Tiaret	1°10'42"E	35°23'14"N	991	12 km

Outre les données climatiques hétérogènes des stations météorologiques, nous avons utilisé des données homo-climatiques pour l'ensemble des trois subéraies, relatives à une seule période

de référence de 1992 à 2021. Ces données ont été recueillies auprès des services hydrauliques de wilaya (barrages) et aussi de certains sites électroniques spécialisés dans la météorologie mondiale à l'instar de TuTiempo.net/climat.

II.4.2-Les précipitations

D'après la définition du climat de Gaussen, un climat typique méditerranéen, la saison sèche est suivie de 9 mois de saison pluvieuse entre septembre et mai. Ce n'est pas le cas dans la zone d'étude. Les trois figures montrent clairement des variations annuelles des précipitations dans la zone d'étude. Durant la période de 30 années (1992-2021) la subéraie de Zariéffet comptabilise deux pics majeurs (816mm en 2003 et 1013mm en 2013) soit un coefficient de variation de 33,66%. A Tagdempt, les deux extrêmes caractérisent l'année 2009 avec 542,54 mm et 662,19mm en 2013 avec une variation de 33,8%. A Ami-Moussa, avec un CV de 25,77%, les deux pics concernent les années 2004 et 2012 avec respectivement 415,36mm et 428,76mm (Fig.19).

Figure 19: Variations annuelles des précipitations dans la zone d'étude

Selon la figure 19, le nombre de jours de pluie comptabilise une moyenne de 120 jours à Zariéffet, 72 jours à Tagdempt et 99 jours à Ami-Moussa. D'ailleurs les jours secs sans pluie sont majoritaires dans les trois subéraies (245(ZA). 293(AM) et 266 (TA). Ces résultats sont une affirmation de l'aridité qui frappe la région.

II.4.3-Répartition saisonnière des pluies

La répartition saisonnière des pluies fluctue d'année en année, avec des maximums de précipitation en hiver et en automne (cases bleues sur le heatmap) (Fig.20,21 et 22).

Figure 20: Répartition saisonnière des pluies dans la subéraie de Zariéffet

Dans la subéraie de Zariéffet la répartition saisonnière des pluies et de type HAPE. Le cumul de trente années accuse un total de 6053mm en hiver; 5587mm en automne; 3608,01mm au Printemps et 856mm en été.

Dans la subéraie de Tagdempt la répartition saisonnière des pluies et de type AHPE. Le cumul de trente années enregistre un total de 3878mm en automne ; 3475mm en hiver; 2533mm au Printemps et 1477mm en été. Ce dernier chiffre indique l'importance des averses en saison estivale.

Figure 21: Répartition saisonnière des pluies dans la subéraie de Tagdempt

Dans la subéraie d'Ami-Moussa la distribution saisonnière des pluies est de type AHPE. Le cumul de trente années enregistre un total de 3907mm en automne ; 3038mm en hiver; 1991mm au Printemps et 604mm en été.

Figure 22: Répartition saisonnière des pluies dans la subéraie d'Ami-Moussa

II.4.4-Les températures

Estienne et al (1970) précisent que la température règle les modalités de la météorisation des roches, elle conditionne l'évaporation physique et physiologique et intervient largement dans le régime des cours d'eau tout en fixant aux êtres vivants des limites plus ou moins strictes de répartition.

Les températures moyennes annuelles ont augmenté de manière significative depuis 1992, avec une normale sur 30 ans calculée sur la période (1992-2021) on observe à Zariéffet un écart à la normale minimale de $-1,63^{\circ}\text{C}$ en 2013 et maximale de $+2,17^{\circ}\text{C}$ en 2016. Sept années consécutives (2015-2021) connaissent une accentuation de la température à la normale de l'ordre de $+1,81^{\circ}\text{C}$ en moyenne (Fig.23).

Figure 23 : Fluctuation des températures moyennes annuelles à Zariéffet

A Ami-Moussa, la température moyenne annuelle enregistre une température record de $+2,01^{\circ}\text{C}$ d'écart à la normale en l'année 1998 et $-2,6^{\circ}\text{C}$ durant l'année 2006. Les deux années 2020 et 2021 demurent les plus chaudes avec un excès de $+1,06^{\circ}\text{C}$ chacune (Fig.24).

Figure 24: Fluctuation des températures moyennes annuelles à Ami-Moussa

A Tagdempt, la température moyenne annuelle affiche un écart à la normale moyenne de $+0,86^{\circ}\text{C}$ en l'année 2021 et $-1,84^{\circ}\text{C}$ durant l'année 1992. Les années 2015-2017 accusent une augmentation légère de la température aux alentours de $0,60^{\circ}\text{C}$ (Fig.25)..

Figure 25 : Fluctuation des températures moyennes annuelles à Tagdempt

Dans les trois suberaies, les mois de l'été sont les plus affectés par l'augmentation de la température, avec 4 mois de canicule à plus de 3°C au-dessus des moyennes mensuelles.

II.4.5-Amplitude thermique

L'amplitude thermique extrême moyenne (M-m) est un facteur climatique définissant l'indice de continentalité d'une région donnée et par conséquent indique si elle est sous

influence maritime ou continentale. En d'autres mots cet indice définit l'agressivité du climat en s'éloignant du niveau de la mer.

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

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

Le tableau 12 situe les indices calculés pour chaque forêt

Tableau 12: Indice de continentalité pour les trois forêts

Forêt	M(°C)	m(°C)	M-m	Type de climat
Zarieffet	31,7	2,5	29,2	Semi – continental
Ami-Moussa	34,66	7	27,66	Semi – continental
Tagdempt	34,90	1,19	33,71	Semi – continental

II.4.6-Etage de végétation

L'altitude est un facteur écologique qui a des effets sur les communautés vivantes, surtout végétales, comparables à ceux induits par la latitude. La classification des étages de végétation est mentionnée dans le tableau 13 et elle correspond aux étages de végétations suivants :

Tableau 13 : Etage de végétation du chêne liège pour les quatre forêts

Forêt	T (°C)	m (°C)	Altitude moyenne(m)	Etage de végétation
Zarieffet	14,00	2,5	1150	Méso-méditerranéen
Ami-Moussa	18,1	7	1062	Thermo-méditerranéen
Tagdempt	15,25	1,19	991	Méso-méditerranéen

II.4.7-Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Dans les trois forêts la sécheresse estivale est plus prononcée, elle dépasse en moyenne 4 mois (Fig.26).

Figure 26: Diagrammes ombrothermiques des trois suberaies

- Pour la subéraie de Zariéffet, la saison sèche commence à partir du mois de Mai et prend fin en Septembre. La quantité tombée n'exède pas en moyenne de 11mm.
- A Tagdempt la sécheresse estivale ne mentionne que 9,47mm de pluie et elle démarre à partir du mois de Mai et accuse entre 5 et 6 mois de disette vers septembre ou Octobre
- La subéraie de Ami-Moussa enregistre 6 mois de sécheresse, depuis le mois de Mai jusqu'à Octobre, en comptabilisant une moyenne périodique de 14,31mm seulement.

II.4.8-Climagramme d'Emberger

Emberger en 1942 a proposé une formule plus simple, valable pour la région méditerranéenne où l'évaporation a une importance particulière. Il admet que cette évaporation croît avec l'amplitude thermique annuelle qu'il exprime par la différence entre la moyenne « M » du mois le plus chaud et la moyenne « m » du mois le plus froid (Ozenda, 1982). Emberger propose d'utiliser pour la région méditerranéenne le quotient pluviométrique défini par l'expression :

$$Q_2 = \frac{2000 P}{M^2 - m^2}$$

Où :

- P : précipitations moyennes annuelles en (mm).
- M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en ($t^{\circ}K = t^{\circ}C + 273,2$).
- m : moyenne des minima du mois le plus froid en ($t^{\circ}K = t^{\circ}C + 273,2$)

Le calcul de ce quotient pluviométrique nous a permis de positionner les trois forêts dans leurs étages correspondants (Fig.27) :

- A travers la figure 27 nous constatons que la forêt de Zariéffet faisant partie jadis d'un bioclimat sub-humide vire actuellement à l'étage semi-aride supérieur avec des quantités annuelles de pluies inférieures à 450mm voire moins. La température minimale est toujours inférieure à 5°C caractérisant un hiver frais.
- A Ami-Moussa, le bioclimat est semi-aride inférieur avec des quantités annuelles de pluies inférieures à 310mm. Cette zone est aussi caractérisée par un hiver doux ou la température inférieure du mois le plus froid est de l'ordre de 7,00°C.
- A Tagdempt, le climat actuel converge la subéraie vers l'étage inférieur du semi-aride supérieur avec des quantités annuelles de pluies inférieures à « 350 mm. Durant la période ancienne cette forêt jouissait d'un climat sub-humide moyen avec une pluviosité qui dépassait les 720 mm.

Figure 27: Position des trois subéraies dans le climagramme d'Emberger

II.5-Description foresiète

Les trois suberaies apparaissent actuellement dans un état de régression graduelle à cause de la sécheresse, des incendies répétés, du surpâturage et l'embroussaillage.

- A Zarieffet, le chêne-liège s'étalait jadis sur une superficie de 960 ha (Boudy, 1955). Actuellement cette superficie ne dépasse pas les 100ha (C.F.W.T., 2008).
- Ami-Moussa, la forêt proprement dite de chêne liège ne représente que 9% du total, le matorral dense et claire domine avec 70%. La suberaie est très concurrencée par le chêne zéen, le chêne vert et le chêne kermes par endroit. Les peuplements de chêne liège sont composés de vieux sujets dépassant les 120 ans, la régénération naturelle est défailante (C.F.W.R., 2018).
- La suberaie de Tagdempt est dans un état de dégradation avancée à cause de l'abandon et de l'évahissement par d'autres essences à l'instar de l'eucalyptus et certaines espèces du sous bois tels que le doum (*Chamaerops humilis*) et le *Calycotome spinosa*.

La végétation est en générale composée du cortège habituel du chêne liège fouillant les sols calcaires et préférant les textures légères à base de grés endurcit. Cette nature siliceuse favorise le développement d'un sous bois abondant et dense au point d'être impénétrable composés des espèces suivantes :

- La bruyère arborescente (*Erica arborea*)
- L'arbousier (*Arbutus unedo*)
- La filaire à feuilles étroites (*Phillyrea angustifolia*)
- La cytise à 3 fleurs (*Cytisus triflorus*).
- Le calycotome épineux (*Calycotum spinosa*).
- L'aubépine (*Crataegus monogyna*).
- Les cistes (*Cistus salviifolius*, *C.monspelienis* et *C. ladaniferus*),
- Les lavandes (*Lavandula dentata* et *L. stoechas*).
- La bruyère à balai (*Erica scoparia*).
- Le romarin (*Rosmarinus officinalis*)
- La violette des bois (*Viola sylvestris*).
- Le daphné garou (*Daphne gnidium*).
- La pâquerette des bois (*Bellis sivestris*).
- La grande Mélisse (*Melica major*).
- Le myrte commun (*Myrtus communis*).
- La ronce à feuilles d'Orme (*Rubus ulmifolius*).
- La centaurée des montagnes (*Centaurea sp.*).
- Le doum (*Chamaerops humilis*).
- Le dis (*Ampelodesma mauritanicus*).
- L'alfa (*Stipa ténacissima*).
- Le genévrier oxycèdre (*Jenepurus oxycedrus*).
- Le lentisque (*Pistacia lentiscus*).
- Le thuya de berberie (*Tetraclinis articulata*).
- Le chêne zéen (*Quercus faginea*).
- Le chêne vert (*Quercus ilex*).
- Le chêne quermes (*Quercus coccifera*).
- Le pin d'Alep (*Pinus halepensis*).
- L'eucalyptus (*Eucalyptus sp.*).
- Le cyprès vert (*Cupressus sempervirens*).

II.6-Production du liège

En se basant sur les fascicules de gestion élaborés par les services forestiers durant la période coloniale et les archives actuels, la production du liège a débuté différemment dans les trois suberaies :

- A Zarieffet, l'exploitation du liège a débuté en 1897 et n'a pris un aspect cyclique qu'à partir des années 1942 à cause des problèmes d'incendies. De 1897 à 1996 on a récolté un total de 28 300 qx (Dehane, 2006). Les pics enregistrés caractérisent les années 1948 (1954 qx) et 1952 (893 qx). Après l'indépendance, les opérations de récolte n'ont commencé régulièrement qu'à partir de 1972 jusqu'en 1984, soit une production de 1320 qx. C'est à partir de 1991 à 2007 que la production a pris un rythme régulier enregistrant une production totale de l'ordre de 10586 qx dont 8026 qx de liège mâle (C.W.F.T., 2007). A cause des incendies, les campagnes de récolte ne s'effectuent plus, la dernière exploitation date de l'année 2008 et n'a permis d'extraire que 518 qx seulement (C.W.F.T., 2008).

- A Ami-Moussa, la situation sécuritaire qu'a traversée la région, les incendies répétés et le surpâturage ont induit au fil des années à d'énormes préjudices à la production du liège. Des cycles entiers ont été abandonnés entre les années 1994 et 2006. Des centaines d'arbres sont mutilés par les coupes illicites du liège. L'opération d'exploitation entreprise durant l'année 2018 fait état de 286,3 qx de liège tout venant. Pour la campagne de 2019, ladite subéraie a produit un poids global de 150 qx (C.F.W.R., 2019).

- A Tagdempt, à cause des incendies très récurrents dans un temps court, la production du liège n'a jamais été entreprise d'une manière régulière et officielle. Les archives de l'époque coloniale enregistraient des récoltes d'une manière durable avec des surfaces génératrices du liège variant de 113,83 m²/arbre à 274,11 m²/arbre (C.F.W.T., 2013) (Fig.28).



Figure 28: Cannons de liège récoltés en 2021 et stockés dans la subéraie d'Ami-Moussa

II.7-Les incendies

La subéraie de Zarieffet 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 (Benhalima, 2024). Le dernier incendie date de 2021 et a ravagé 97 ha. A Zarieffet, 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).

La wilaya de Relizane dispose d'un espace forestier s'étalant sur une superficie de 51 794 ha dont 55% constitués de pin d'Alep, arbre très sensible aux feux, et le reste étant un tapis végétal (maquis). Pour cela, 6 850,5 km de pistes forestières sont ouvertes et sont appuyées par 495 ha de tranchées anti-feu (C.F.W.R., 2018). Les données relatives aux superficies de chêne liège brûlées par le feu sont rares. Le bilan des incendies dans la forêt de Djbel Sàadia fait état d'une accentuation du phénomène à partir de l'année 2005 (5ha) pour atteindre 38 ha en 2012.

Par cause d'imprudences, de malveillance et d'autres causes inconnues essentiellement anthropiques, Tagdempt fut l'objet de plusieurs cas d'incendie depuis 1882 jusqu'à 1950. Par ailleurs, la conservation des forêts de la wilaya de Tiaret a déclaré plusieurs cas d'incendies dont les plus graves, on cite celui de l'année 1992 ayant ravagé une superficie de 800 à 1000ha(C.F.W.T.,2013).

Chapitre III

Caractérisation analytique du risque environnemental en suberaie

III.1-Introduction

Les Changements Environnementaux désignent tous les changements infligés aux écosystèmes forestiers et agricoles. Un changement environnemental est une perturbation de l'environnement, le plus souvent causée par des influences humaines ou des processus écologiques naturels extrêmes tels que les catastrophes naturelles, le réchauffement climatique, les risques sanitaires et épidémiologiques, une infestation d'espèces envahissantes (De Sartre et al., 2016). Lorsque les changements environnementaux deviennent cycliques et récurrents à la suite des actions de l'homme et d'autres phénomènes naturels, leurs conséquences sont très désastreuses sur les écosystèmes forestiers aussi bien sur leur adaptation que sur leur résilience (Delord, 2016).

Malgré la capacité du chêne-liège à faire face à l'aridité, à plus long terme, l'eau demeure un facteur limitant pour la croissance de cette essence au sein d'un écosystème forestier méditerranéen perturbé. La sécheresse dans cette région, est généralement causée par des précipitations annuelles ou saisonnières anormalement faibles, dues au nombre élevé de jours consécutifs sans pluies et aux températures extrêmes (Buttel Frederick et al., 1990). Cette situation critique stimule de manière décisive le stress physiologique des arbres, et elle est susceptible de diminuer leur rendement en liège, avec des conséquences économiques immédiates sur la gestion forestière. En plus, de ces risques environnementaux, les subéras perturbées sont devenues des milieux clos pour l'anthropisation et le compactage des sols, empêchant l'infiltration des eaux de pluie et favorisant plus l'érosion et la stérilité des horizons sous-jacentes (Magali Reghezza-Zitt, 2023).

Le chêne liège est une essence très rentable à cause de la récolte périodique du liège. Cette matière non ligneuse est transformée industriellement en une panoplie de matériaux à usage varié dépendant de ses caractéristiques technologiques (Pereira, 2007).

Cette récolte n'est permise que durant la saison estivale de juin à septembre, et coïncidant avec la montée et la descente de la sève en dépit des épisodes extrêmes de sécheresse et les faibles réserves de l'eau dans le sol. Dans l'état actuel du réchauffement climatique intense, la balance hydrique annuelle est très déficitaire ne permettant pas à l'arbre de compenser ces pertes (par transpiration) par l'élongation de ses racines à la recherche de la nappe phréatique et de l'humidité enfouie dans les interstices du sol. Le liège produit par ces arbres est de faible épaisseur et de qualité mauvaise. Conjointement, l'extraction du liège se fait actuellement dans cet environnement traumatisé, les troncs sont dénudés de leur liège sur des surfaces d'écorçage démesurées par la manipulation inhabile de la hache qui perpétue d'énormes blessures sur la mère du liège, exposant le liber aux aléas du milieu extérieur, notamment le gel, les incendies et les agents pathogènes (insectes et champignons) (Leite et al., 2020).

Les symptômes de ce stress environnemental combiné apparaît directement sur l'état sanitaire des arbres par un déficit foliaire et des branches sèches, dans les cas extrêmes la totalité du houppier disparaît et le sujet frôle la mortalité totale évoquée sous le terme de dépérissement (Vayreda, 2018 ; Camarero et al., 2024). Tous ces symptômes sont visibles dans la zone d'étude: une sécheresse tenace, une fertilité du sol manquante, des sujets déficients, et une gestion forestière défailante.

C'est dans ce schéma que ce chapitre tente de caractériser le premier risque environnemental à savoir le déperissement par une méthode analytique incorporant plusieurs variables continues mesurables.

III.2-Type d'échantillonnage et contraintes

Dans la zone d'étude le chêne liège en production périodique est très disséminé avec une faible densité à l'hectare (< 10 arbres/ha). Le recours à l'échantillonnage par placettes circulaires a été fortement révoqué à cause de la non adéquation des conditions suivantes :

- Au moins deux tiers du couvert forestier est formé par des chênes lièges de reproduction.
- Au moins cinq chênes lièges productifs sont présents dans un rayon de 15 m.
- Absence d'intervention récente qui aurait pu influencer l'état sanitaire des arbres (coupes, débroussaillage, incendie).
- Un cycle homogène > 10 ans pour l'exploitation du liège.
- Une accessibilité facile aux arbres producteurs.

Nous avons donc opté pour un échantillonnage par itinéraire. Ce choix est plus justifié aussi par le nombre moyen restreint d'arbres porteurs de liège de reproduction (entre 5 et 7 arbres/ha) et le sous-bois dense impénétrable. Ce type d'échantillonnage est largement utilisé au Portugal et en Espagne (CICYTEX, 2020).

Ces itinéraires prennent l'aspect de lignes en zig-zag géoréférencées, sur lesquelles les arbres-échantillons sont marqués à distance régulière de 50m dans les trois niveaux du terrain (bas fond, pente et crête) (Fig.29).



Figure 29 : Méthode d'échantillonnage appliquée dans les trois forêts

Dans chaque peuplement abordé et selon les possibilités d'accessibilité, la longueur de l'itinéraire relevait essentiellement de la multiplicité des arbres en production rencontrés. L'itinéraire est abordé selon son point de départ et d'arrivée, géo-localisé sur l'écran d'un GPS numérique (Modèle Garmin) puis matérialisé sur une carte topographique numérisée à l'aide du logiciel surfer 15.

Une fois l'itinéraire est entrepris par sa partie basse ou haute, on repère aléatoirement le premier arbre de départ et on déclenche la mesure de distance de l'itinéraire par l'application « itinéraire » sur le GPS. Puis on entame le deuxième arbre et les arbres qui suivent jusqu'à la fin de l'itinéraire justifiée par l'absence des arbres producteurs ou la présence d'un obstacle naturel : falaise, affleurements rocheux, dépression ou sous-bois très dense et impénétrable.

Au total nous avons diagnostiqué 600 arbres échantillons à raison de 200 sujets par subéraie. Ces chiffres sont très conditionnés par le mode de végétation hétérogène dans les trois subéraies: des arbres de différents âges et diamètres, soumis à des récoltes de liège distinctes, avec des cycles de production variés.

De ce fait, après une analyse minutieuse de l'âge du liège à la fin de l'échantillonnage, on a eu à faire à un premier obstacle composé de trois lots différents:

- 240 arbres-échantillons colportant un liège âgé de 10 ans.
- 270 arbres –échantillons détenant un liège âgé de 15 ans.
- 90 sujets déferlant entre un liège âgé de 6 ans et 8 ans.

La deuxième contrainte réside dans le fait qu'il était quasiment impossible d'employer le troisième lot pour toute analyse et comparaison avec des âges minimes et assez variés.

La troisième contrainte nous a imposé d'utiliser uniquement les deux premiers lots séparément pour expliquer la thématique de la présente thèse. En conséquence, on était contrarié d'adopter le schéma organisationnel réglé par l'organigramme des travaux suivants (Fig.30) :

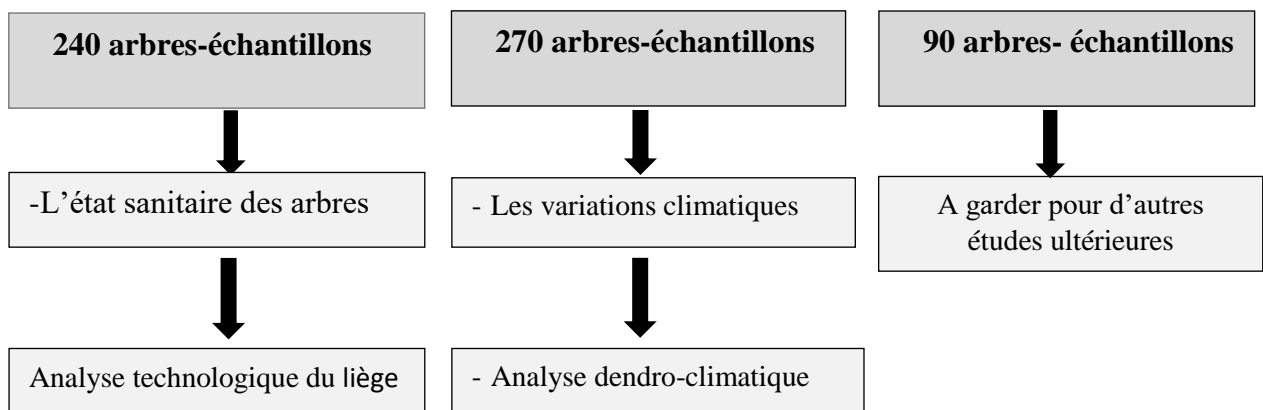


Figure 30: Schéma organisationnel des travaux explicatifs de la thèse

Selon l'organigramme adopté, nous avons suivi l'ordre des travaux suivants :

- Le premier volet est consacré à l'étude de la première perturbation environnementale associée à l'état sanitaire des arbres. Un liège âgé de 10 années est optimal pour analyser les paramètres technologiques du liège selon la vigueur des arbres.

- Le deuxième volet prend en compte la deuxième perturbation environnementale liée aux variations climatiques. Un cycle de 15 années est l'idéale pour étudier l'impact du climat dans les subéraies de montagne selon une approche dendro-climatologique typique au chêne liège.

III.3-Matériels et méthodes

III.3.1-Type de mesures

Dans chaque itinéraire esquissé et pour chaque arbre localisé, les mesures effectuées étaient de plusieurs ordres:

III.3.1.1-Les paramètres forestiers

- Topographie: Localisation, altitude, exposition, pente et distance de l'itinéraire relevées par le GPS.
- Dendrométrie: La circonférence moyenne du tronc à 1,30 m du sol mesurée avec un ruban mètre, la hauteur de l'arbre à l'aide du Blume-leiss.
- Exploitation: L'épaisseur du liège (mm) a été mesurée à l'aide du coveless CQ05. Par ailleurs, on a quantifié la hauteur d'écorçage par un mètre en acier et le coefficient d'écorçage, obtenu en divisant la hauteur d'écorçage de par la circonférence du tronc.
- La plupart des arbres diagnostiqués ont été déliégés au moins deux fois.

III.3.1.2-Les paramètres de l'état sanitaire des arbres

L'état sanitaire des arbres-échantillons a été noté sur des grilles d'observation selon la méthode d'appréciation visuelle argumentée par une explication analytique (Dehane,2012). Le but était est de déceler la vraie nature de la défoliation en intégrant les critères symptomatologiques qui ont contribué de manière décisive à cet état de déficit foliaire ou déperissement.

III.3.1.2.1-Visualisation de l'architecture de l'arbre (l'état du feuillage)

C'est une évaluation à vue d'œil de l'architecture de l'arbre, c'est-à-dire du degré de défoliation de la cime. Ce paramètre décrit d'une manière instantanée les symptômes manifestes de l'état sanitaire actuelle de l'arbre.

Une note allant de 1 à 3 est attribuée à chaque arbre selon son pourcentage de déficit foliaire par rapport à l'arbre de référence qui est à 0% de déficit. Les classes de notation ont été standardisés afin de minimiser l'erreur et rendre l'opération de notation plus simple à exécuter :

- C1: défoliation absente ou légère, perte de feuillage inférieure à 20% (arbre non perturbé);
- C2: défoliation importante, 20 à 60% de feuilles perdues (arbre peu perturbé);
- C3: défoliation grave, plus de 60% de feuilles perdues (arbre perturbé) (Fig.31).



C1: Arbre non perturbé()
(sain : défoliation légère)

C2 : Arbre modérément perturbé
(affaibli :défoliation partielle)

C3:Arbre perturbé
(déperissant : défoliation très grave)

Figure 31: Les trois classes de déficit foliaire rencontrées dans les trois subéraies

III.3.1.2.2-Evolution annuelle de la défoliation

Pour une meilleur appréhension du phénomène du déficit foliaire du chêne liège dans la zone d'étude, nous avons entamé un suivi annuel de l'état sanitaire des arbres échantillons durant quatre années, de 2021 à 2024. Ce suivi a pour objectif principale de déceler une quelconque amélioration, stabilité ou dégradation de l'état sanitaire. Par ailleurs, il était question de comptabiliser l'évolution annuelle des classes de notation de la défoliation par un indice de déficit foliaire adéquat. Ainsi la transition d'un état sanitaire à un autre au cours d'une période de suivi ne peut être calculé que par l'indice de dépérissement.

L'indice de dépérissement (ID) est calculé selon la formule de Sechi et al (2005):

$$ID = \frac{\sum (C \times F)}{N}$$

Où C = valeur de la classe de notation du déficit foliaire (1 à 3), F = fréquence absolue de la même classe et N = nombre total de sujets examinées.

Quatre niveaux de dépérissement sont distingués en fonction des moyennes obtenues :

ID <1,60 (non dépérisant ou sain)

1,60<ID<2,0 (en début de dépérissement)

2,0<ID<2,60 (en dépérissement assez grave)

ID >2,60 (en dépérissement grave ou fortement dépérisant)

III.3.2-L'explication analytique du déficit foliaire ou du dépérissement

C'est une méthode de calcul qui vise à décrire le dépérissement d'une manière objective et rationnelle en contournant les différents compartiments de l'arbre, et en associant à l'état de la cime l'état du tronc.

III.3.2.1-L'état de la cime

En effet, l'état de la cime consiste à additionner à l'état de défoliation visuelle, le contenu en minéraux des feuilles présent dans chaque classe de déficit foliaire identifiée. Dans la réalité du terrain, la masse foliaire produite ou perdue par l'arbre n'est que la conséquence de son taux de nutrition positif ou négatif. Pour étayer cette hypothèse nous avons réalisé une analyse minérale des feuilles uniquement pour le diagnostic de l'année 2021 vu la complexité et les exigences logistiques et péculaires de ces analyses. Nous avons adopté le mode opératoire suivant :

- L'opération de prélèvement des feuilles durant la première année de suivi (2021) a été opérée en dehors de la période de stress estivale c'est-à-dire à la fin du mois d'octobre.
- Selon l'exposition et l'accessibilité offertes, le matériel végétal récolté est formé de 20 feuilles/arbre entière extraites en rameaux de la canopée dans sa partie médiane au moyen d'un sécateur dont les manches ont été allongé à 2m par deux tubes métalliques perforés rendant son maniabilité très légère.
- Les prélèvements des feuilles de chaque classe de déficit foliaire et de chaque subéraie ont été mêlés en un seul lot destiné aux analyses minérales. Selon Livrelli (1993), cette stratégie donne des résultats préférables à ceux obtenus par des analyses séparées des lots de feuilles de chacun des arbres de chaque forêt.
- Les feuilles ont été amenées au laboratoire d'analyse minérale des végétaux dans des sachets en plastique, lavées pendant une minute à l'eau déminéralisée pour éliminer toute poussière, séchées à nouveau dans une chambre climatique à 60 °C pendant 48 heures, puis soumises à un broyage (Fig. 32).



Figure 32 : Feuilles de chêne liège extraites de la cime puis séchées dans une chambre climatique

III.3.2.2-L'état du tronc

L'analyse analytique se focalise aussi sur la présence ou non des dommages perpétués particulièrement lors des opérations d'exploitation, Il s'agit de quantifier l'état de mère du liège desséchée, les cavités à l'intérieur du tronc, les trous d'insectes et la présence du chancre carboné dans le tronc (Fig.33).



Figure 33 : Type de dommages aperçus sur les arbres échantillons

III.3.2.3-Approche statistique

L'explication analytique du phénomène de dépérissement en incorporant plusieurs variables mesurables exige l'application d'un modèle mathématique fiable qui va statuer sur les facteurs éligibles par une modélisation de la relation qui associe les variables indépendantes explicatives à la seule variable dépendante expliquée (dépérissement).

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 (Lewis et Taylor, 1967).

III.3.2.3.1-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) (Laffly, 2006).

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.3.2.3.2-Problématique du modèle

La bibliographie est unanime, les dépérissements des arbres sont définis comme des phénomènes causés par un ensemble de facteurs interagissant et se succédant d'une façon particulière, et qui entraînent une détérioration générale et graduelle, se terminant souvent par la mort de l'arbre (Nageleisen 1993 ; Landmann, 1998).

La question posée dès le départ: quelles sont les variables qui affectent effectivement la santé des arbres et conduisent à leur déficit foliaire? Théoriquement, il s'agit de suivre intimement les hypothèses probables du modèle mathématique tirées de la littérature, et liées à la problématique exposée (Natividade, 1956 ; Blanchard et al., 1983 ; Martin-Prével et al., 1984; Oliveira et al., 1996 ; Cardillo et al., 2021) :

H1: Plus l'arbre est concurrencé, plus sa forme est penchée, plus il est dépérissant.

H2: Plus l'arbre a une nutrition minérale faible, plus il est dépérissant.

H3: Plus l'arbre a un état du tronc endommagé par l'écorçage, plus il est dépérissant.

H4: Plus l'arbre a un tronc rongé par les insectes, plus il est dépérissant.

H5: Plus l'arbre a une surface de déliegeage élevée, plus il est dépérissant.

H6: Plus l'arbre a une montée en sève faible, plus il est dépérissant.

H7 : Plus l'arbre est attaqué par les champignons pathogènes, plus il est dépérissant.

III.3.2.3.3-Modélisation graphique

Pour une meilleure compréhension des hypothèses formulées pour expliquer le phénomène du déficit foliaire dans la zone d'étude, nous avons réalisé un modèle graphique reliant les variables explicatives issues du terrain typique au chêne liège en production et leur causalité à la variable dépendante ou à expliquer (le dépérissement) (Fig. 34) :

Le modèle graphique

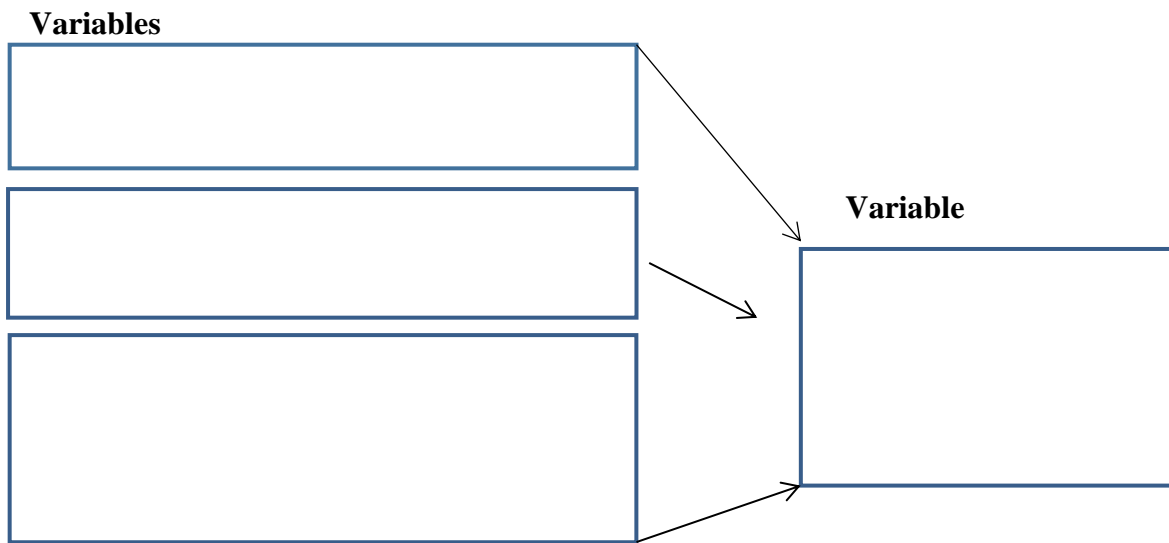


Figure 34: Modèle graphique pour caractériser les liens de causalité entre les variables explicatives et la variable dépendante le type de dépérissement

III.3.2.3.4-Démarche statistique

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

- 1- Estimation des coefficients de régression $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$.
- 2- Mesurer la qualité du modèle, le R^2 (coefficient de détermination).
- 3- Evaluer la significativité globale de la liaison (Anova)
- 4- Vérifier est ce que l'apport marginal de chaque variable x_j à l'explication de y est significatif (Test de student).
- 5- Tester la colinéarité entre les variables indépendantes.
- 6- Choix du modèle optimal et discussions des résultats avec la littérature.

III.3.2.3.4.1-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 $Z_i = b_0 + b_1 x_{i1} + \dots + b_k x_{ik}$, On obtient des estimations des moindres carrés b^0, b^1, \dots, b^k .

III.3.2.3.4.2-La qualité d'ajustement

Elle se définit par le calcul du coefficient de détermination (R^2) ou pourcentage de variance expliqué 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 : $R^2 = 0$

III.3.2.3.4.3-La significativité globale de la liaison

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

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 :

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

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

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

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

III.3.2.3.4.4-La significativité de l'apport marginal de chaque variable

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 : $\beta_j = 0$ (On peut supprimer x_j)

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

-Statistique utilisée :

$$t_j = \beta_j / s_j$$

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

III.3.2.3.4.5-Test de la colinéarité entre les variables indépendantes

Il est nécessaire de tester la colinéarité, car la multi-colinéarité entre variables 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.3.2.3.4.6-Protocol expérimental réalisé sur le terrain

Pour expliquer les classes de déficit foliaire constatées lors du diagnostic, différentes mesures ont été effectuées sur les arbres échantillonnés puis hiérarchisées selon quatre degrés de gravité: 1(Faible); 2(Moyen); 3(Fort) et 4 (Très fort). La grille établie dans ce sens tend à uniformiser les différentes mesures. Le tableau 14 illustre les variables prises en compte ainsi que leurs classes de mesures respectives.

Tableau14: Les variables explicatives prises en considération et leurs classes respectives

Variables	Descriptif	Classes
Facteur d'élanement ou de stabilité (FE)	Le rapport entre la hauteur totale de l'arbre et son diamètre mesuré à 1,30 m (exprimés tous deux en mètre) permet d'évaluer sa stabilité de croissance. Avec un H/D compris entre 80 et 100, l'arbre devient rabougri induisant un risque de flexion de la cime et du tronc et un manque de photosynthèse (Freynet, 2020).	
Intensité du déliègeage (ID)	Le quotient entre la surface de déliègeage et la surface tarière d'un arbre ($ID=SD/3,14*d^2/4$). C'est un véritable indicateur de la pression de l'écorçage que supporte l'arbre, c'est à dire le nombre de mètres carrés de liège extrait et agencé à la taille de l'arbre. Les valeurs ID moyennes admissibles sont obtenues avec des intensités d'extraction du liège comprises entre 34 et 36 sans dépasser 45 à 50 (Montero González, 1987).	
Composition minérale des feuilles (CM)	Les teneurs en éléments nutritifs des feuilles (N, P, K, Ca, Mg) analysées chimiquement est exprimées en mg/g de matière sèche (%) (Orgeas et al., 2002). Tous les contenus en minéraux mesurés ont été codifiés puis filtrés en utilisant des formules imbriquées dans Excel.	
Dommages sur le tronc (DT)	Ces dommages regroupent l'ensemble des blessures occasionnés par la mauvaise manipulation de la hache, l'arrachage forcé du liège, les cavités à la mère desséchées, les trous d'insectes et le chancre carbonateux (I.M.L., 2005). Tous ces dommages codifiés ont été filtrés en utilisant des formules imbriquées dans Excel.	

Conductivité électrique du tronc (CE)	La conductivité électrique du liber a été opérée par le conductivimetre (model Prociva). Dans le cas des défoliations, la mesure de la conductivité électrique du cambium a été largement utilisée par les pathologistes forestiers et a montré ses possibilités pour estimer l'état physiologique des arbres (Davis et al., 1980; Gagnon et al., 1987; MacDougall et al., 1987).	
---------------------------------------	---	--

L'indice d'instabilité de l'arbre (IST) se calcule selon la formule suivante (STB, 2010):

$IST = \text{Hauteur} / \text{Diametre} * \text{Fréquence relative des dommages}$

L'indice d'instabilité de l'arbre (IST) est classé comme suit :

III.4-Résultats

III.4.1-Situation du plan d'échantillonnage

La figure 35 illustre la localisation géographique de la zone d'étude selon la position géographique et topographique des arbres échantillonnés.

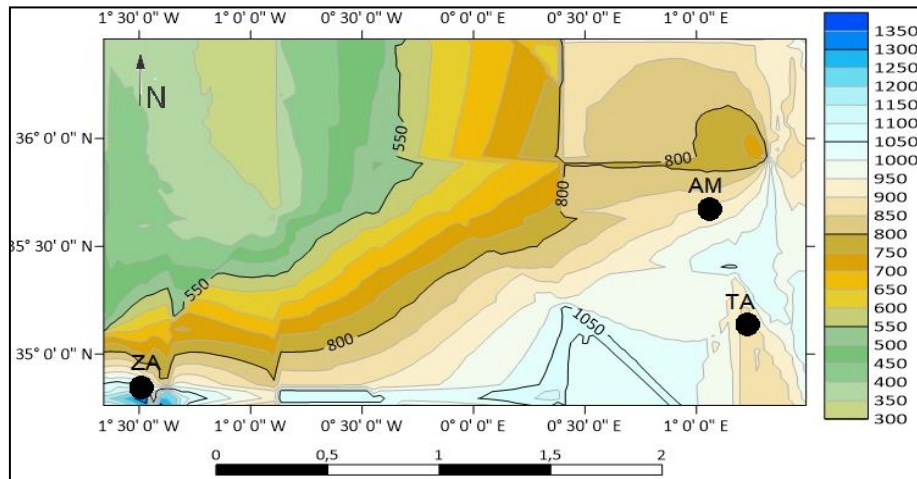


Figure 35: Répartition spatiale des arbres sélectionnés dans le plan d'échantillonnage

La figure 35 identifie clairement les trois subéraies étudiées sous forme d'îlots bien dispersés dans l'Atlas Tellien en Oranie. A travers notre prospection, nous avons constaté que ces taches discontinues portent encore les traces d'arbres reliques bicentenaires témoignant d'une activité forestière bien développée.

III.4.2-Caractéristiques topographiques des trois sites

Les trois subéraies Zariéffet (W. de Tlemcen), Tagdempt(W.de Tiaret) et Ami-Moussa (W. de Relizane) font partie des subéraies de montagne du Nord-Ouest Algérien, Ces trois entités se présentent sous forme de forêt claire à dense par endroit, présentent un accès très difficile surtout à Ami-Moussa (Tab.15).

Tableau 15 : Caractérisation stationnelle et topographique des trois sites

Forêt ou site	ZA	TA	AM
Latitude			
Centre			
Sud-Ouest			
Nord-Est			
Longitude			
Centre			
Sud-Ouest			
Nord-Est			
Altitude(m)			
Min			
Max			
Pente du terrain (%)			

Amant (min-max) Aval (min-max)			
Topographie Crête(%) Pente(%) Bas fond(%)			
Superficie globale (ha)			
Superficie prospectée (ha)			

La caractérisation de la zone d'échantillonnage présentée dans le tableau 15 met en exergue un relief montagneux très accidenté. L'altitude oscille entre 671m (Ami-Moussa) et 1210 m (Zarieffet). La pente varie de 49,3%(Tagdempt) à -54% (Zarieffet). Vu le grand vide entre les arbres échantillons, la présence du sous-bois et des obstacles naturels, les superficies de prospection étaient longues variant entre 160,6ha (ZA) ; 94ha(TA) et 109 ha (AM).

III.4.3-Caractéristiques sylvicoles des trois sites

Les résultats des principales caractéristiques sylvicoles sont renseignés sur le tableau 16.

Tableau 16 : Caractéristiques sylvicoles des trois sites

Site	ZA	AM	TA
Texture di sol			
Densité des arbres/ha			
Origine du peuplement			
Fréquentation humaine			
Gestion sylvo-pastorale			
Structure des peuplements			
Régime et traitement			
Nature du peuplement			
Régénération par semis			
Sous bois			
Qualité d'exploitation			
Essences concurrentes			
Travaux sylvicoles			
Aménagement			
Fréquence des incendies			

Il ressort du tableau 16, que la plupart des peuplements de notre zone d'étude sont naturels. L'aspect est en général irrégulier et se présente sous une forme jardinée qui est la conséquence de l'écologie, de l'action de l'homme et des incendies.

La majorité de ces entités sont mélangées, soit avec le pin d'Alep (cas des provenances de Ami-Moussa et Tagdempt) soit avec le chêne zéen (Zarieffet, Ami-Moussa et Tagdempt) ou le chêne vert (Zarieffet).

Ce sont des peuplements âgés traités en futaie adulte, l'âge de ces arbres est accusé de vieillissement avec des pieds excédant 100 ans et jusqu'à plus de 150 ans.

La densité (chêne liège non mis en valeur et de reproduction) diffère d'un peuplement à un autre ; elle est assez morcelée et demeure très faible à cause des incendies et de la sécheresse (50 à 65 arbres/ha).

Les travaux sylvicoles et les aménagements forestiers sont absents nonobstant quelques travaux d'assainissement du liège flambé et du bois carbonisé.

La régénération naturelle est partout très faible à cause de la rareté de la glandée et du tassement du sol par les troupeaux d'élevage.

Ces trois subéraies se présentent sous forme de maquis haut et dense à cause de l'abondance et la grande résilience de certaines espèces concurrentes, ce qui favorise l'expansion démesurée d'autres espèces à l'égard du pin d'Alep, du chêne zéen et de l'arbousier (Fig.36).

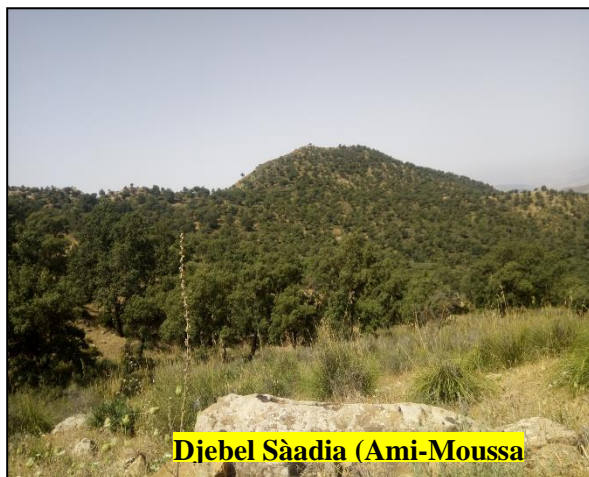


Figure 36 : Vue d'ensemble des trois subéraies

Les 600 sujets ont été repérés à travers huit itinéraires distincts point de vue caractéristiques topographiques, s'étendant sur 363,6 ha selon un parcours sinueux de 100,21km (Tab. 17 et Fig.37).

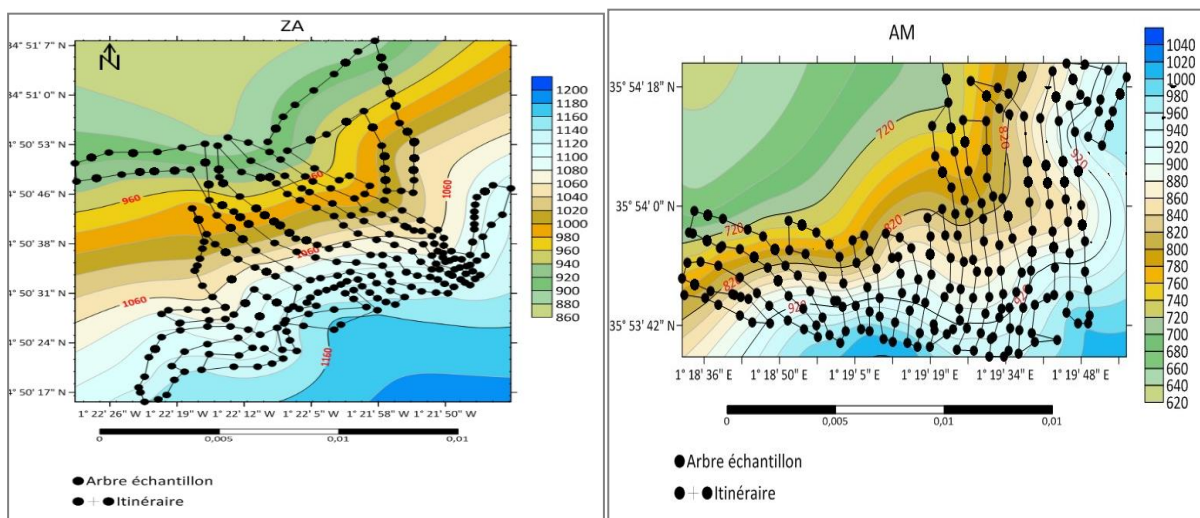
Tableau 17 : Données topographiques relatives à chaque itinéraire

Itinéraire	ITIN	N arbre	Distance itinéraire (km)	Elévation du terrain(m)	Limite de pente(%)	Distance moyenne entre arbres	Superficie parcourue (ha)
ZA	Itin1						
	Itin2						
	Itin3						
	Itin4						
AM	Itin1						
	Itin2						
	Itin3						
	Itin4						
TA	Itin1						
	Itin2						
	Itin3						
	Itin4						

-En effet, à Zariéffet, sur une superficie globale de prospection de l'ordre de 160,60 ha, les sujets échantillonnés ont été localisés sur des itinéraires long de 6,50 à 11,75 km, et sur des élévations du terrain chevauchant de 950 à 1164 m. Les pentes de terrain variaient de 13,1% à 42,0% (pente en amont) et -40,8% à -22,1% (pente en aval).

-A Ami-Moussa, le champs d'investigation a frôlé les 94ha totalisant une distance de trajet de l'ordre de 33,95km, avec des élévations oscillant entre 710 m et 1100m et des pentes du terrain variant entre 21,3 % et -33,7 % .

-Dans la subéraie de Tagdempt, les 200 sujets prospectés se répartissait sur 109ha. La distance totale parcourue était de l'ordre de 31,46 km avec des élévations oscillant entre 870m et 1005m. La pente du terrain décrit d'un relief accidenté variant entre 42,4% et -34,5% .



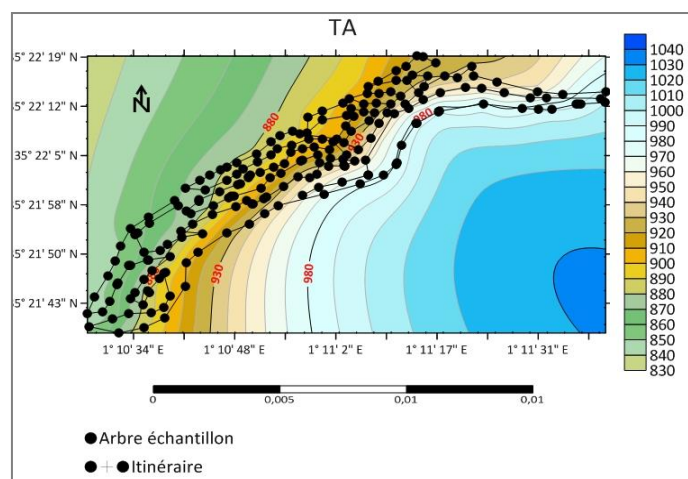


Figure 37 : Plan d'échantillonnage dans les trois subéraies

III.4.4- Caractéristiques des arbres échantillons

Les résultats des principales mesures dendrométriques et d'exploitation effectuées sur les arbres échantillons sont renseignés dans le tableau 18.

Tableau 18: Statistique descriptive des mesures dendrométriques et d'exploitation

Forêt	H(m)			Cir(cm)			Ep(mm)			He (m)			Ce		
	ZA	AM	TA	ZA	AM	TA	ZA	AM	TA	ZA	AM	TA	ZA	AM	TA
Moyenne N=200	11,7	11,79	10,61	124,45	135,1	116,65	24,53	23,72	27,29	2,33	2,1	1,5	2,04	1,7	1,42
Ecart-type	3,28	3,15	2,97	47,21	51,01	46,95	2,87	2,58	3,69	0,61	0,87	0,80	0,66	0,78	0,73
Moyenne N=600	11,37			125,41			25,18			1,98			1,71		
Ecart-type	2,96			46,89			3,58			0,8			0,73		
Minimum	7			57			14,5			1,4			1,27		
Maximum	20			437			37			5,3			4,3		
Médiane	11			111			24,5			1,73			1,73		
CV	26,01			37,38			14,22			40,613			42,86		

H(m) :Hauteur, Cir(cm) :Circonférence, Ep(mm) : Epaisseur, He (m) :Hauteur d'écorçage ,Ce : Coefficient d'écorçage, CV(%) : Coefficient de variation

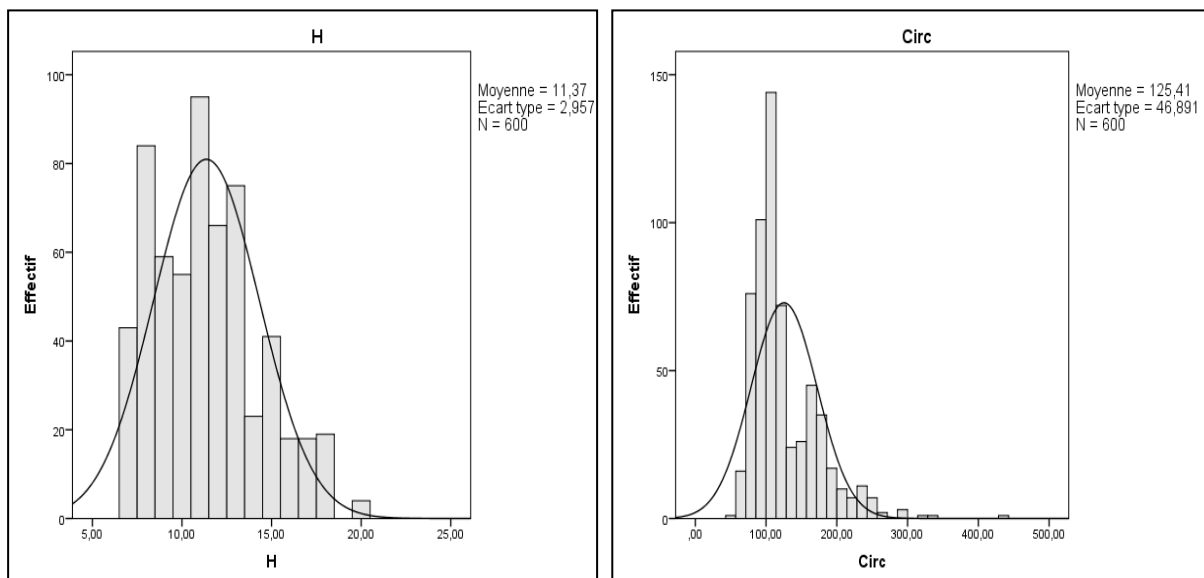
On se référant au tableau 18, nous distinguons une variabilité marquée intra-arbres, soit des coefficients de variation allant de 26,01% pour la hauteur à 37,38% pour la circonférence. La hauteur moyenne est de 11,37m superposée à une circonférence moyenne de l'ordre de 125,41cm synonyme d'arbres adultes en pleine production. D'ailleurs l'épaisseur du liège enregistre une moyenne totale de 25,18 mm avec une CV peu marqué dans les trois subéraies (CV=14,22%), puisqu'il s'agit de liège de montagne à croissance lente. La hauteur moyenne d'écorçage adoptée dans les trois forêts n'est pas excessive ne dépassant pas les 2m avec un minimum de 1,40m et un maximum de 5,30m. Le coefficient d'écorçage moyen semble à son tour < 2 adéquat aux peuplements de montagne et aux lièges de la région nord-ouest.

L'analyse de variance atteste une différence hautement significative des variables dendrométriques mesurées et superposées aux trois forêts (Tab.19).

Tableau 19: Variation inter-groupes et intra-sujets pour les trois suberaies

		Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Signification
H * Forêt	Inter-groupes	171,91	85,96	10,13	0,000
	Intra-classe	5065,16	8,48		
	Total	5237,07			
Circ * Forêt	Inter-groupes	34487,80	17243,90	8,03	0,000
	Intra-classe	1282591,69	2148,40		
	Total	1317079,49			
Ep * Forêt	Inter-groupes	1398,87	699,44	66,47	0,000
	Intra-classe	6281,71	10,52		
	Total	7680,58			
He* Forêt	Inter-groupes	72,78	36,39	69,13	0,000
	Intra-classe	314,28	0,53		
	Total	387,06			
Ce * Forêt	Inter-groupes	38,93	19,46	40,63	0,000
	Intra-classe	285,97	0,48		
	Total	324,90			

La distribution des variables selon leurs fréquences suit une distribution gaussienne, cela signifie que les arbres échantillons n'appartiennent pas à un seul itinéraire ou à une seule forêt (Fig.38).



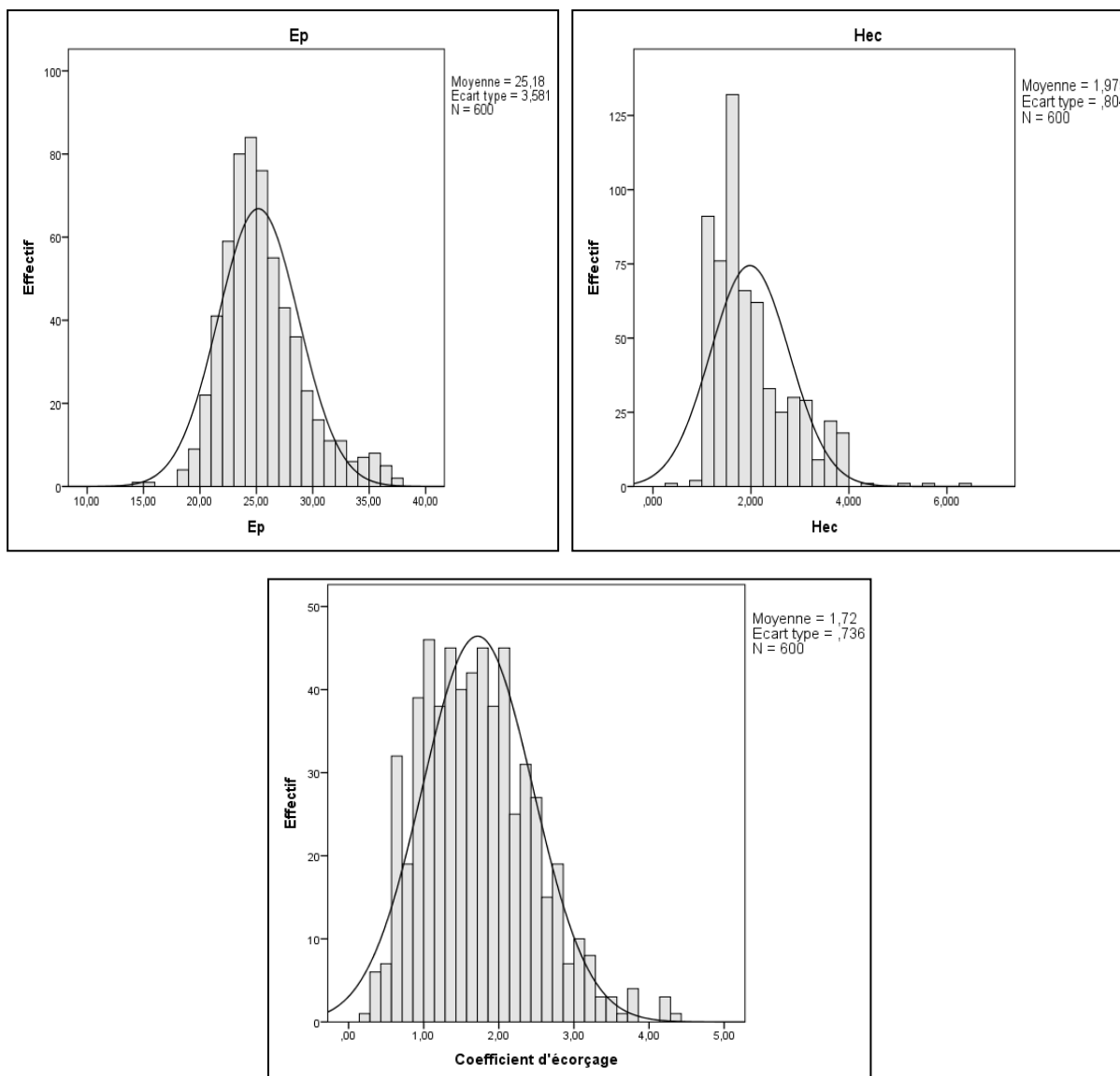


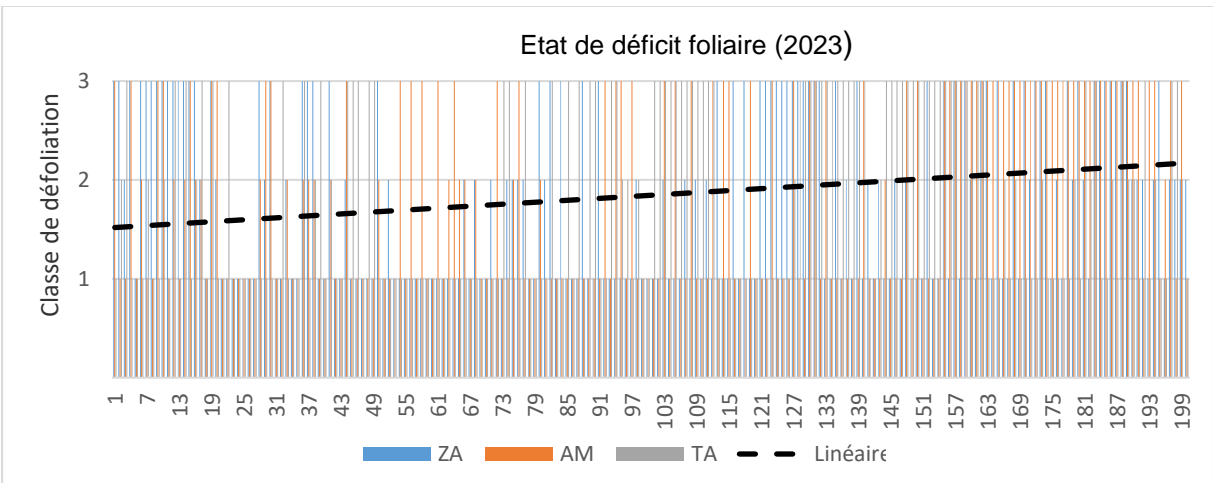
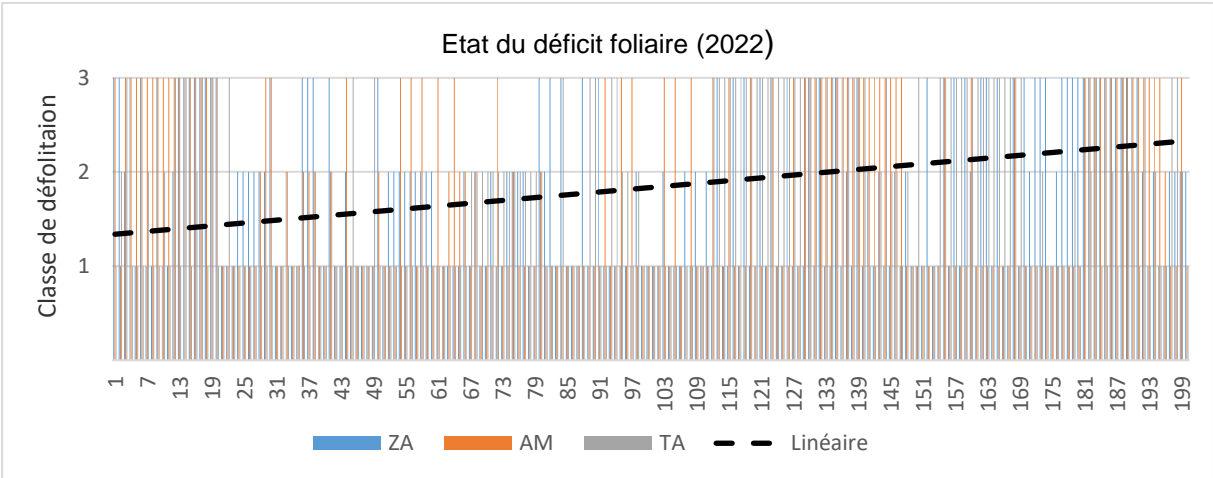
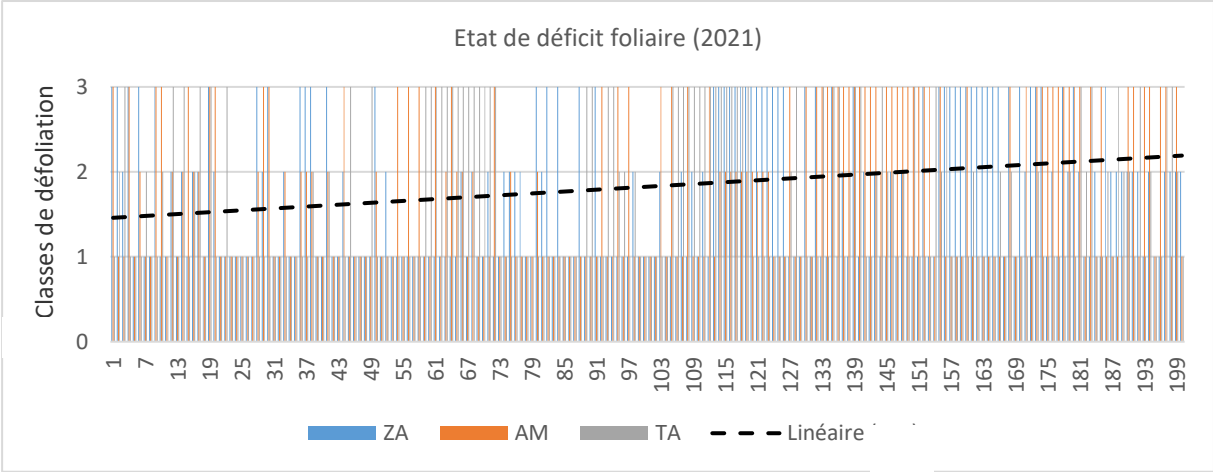
Figure 38: Distribution des fréquences pour les variables : calibre du liège, circonférence, hauteur et hauteur d'écorçage

III.4.5-Etude de l'état sanitaire des arbres-échantillons

Rappel : Le principe de l'analyse foliaire repose sur la visualisation de l'architecture de l'arbre . Ce critère, intégrateur, consiste à estimer le pourcentage des feuilles manquantes en fin de saison de végétation en estimant l'architecture du houppier par rapport à un arbre de référence qui croit localement dans des conditions normales (Sbrescia, 2016), ce qui permet de qualifier l'état de santé d'un arbre à différents stades de dépérissement.

III.4.5.1-Evolution annuelle de la défoliation

Les résultats de l'évolution annuelle de la défoliation des arbres-échantillons à l'échelle des trois forêts sont illustrés dans la figure 39.



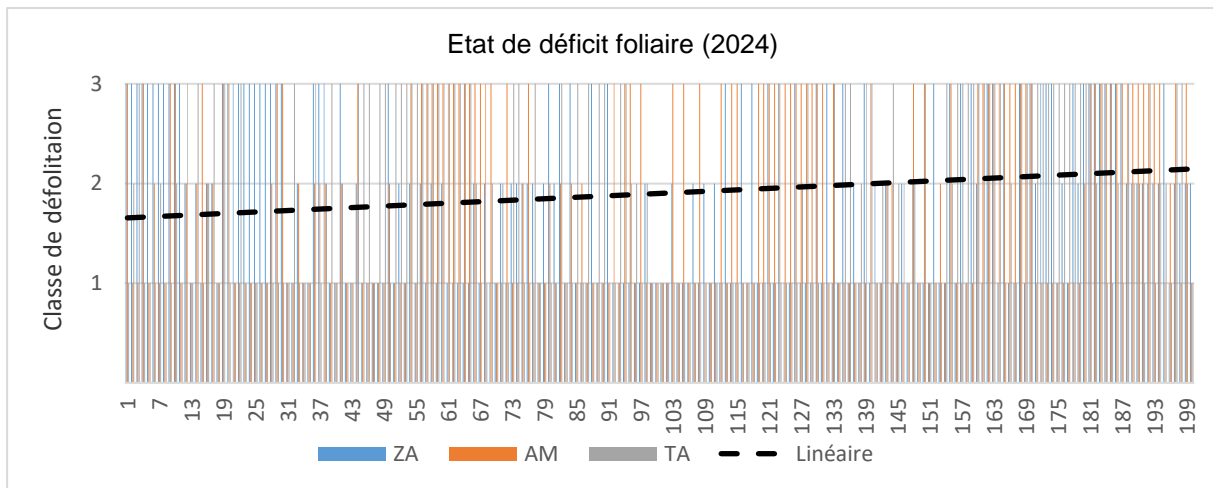


Figure 39: Tendence de l'évolution annuelle de la défoliation des arbres-échantillons (%)

Le suivi annuel de chaque forêt pendant les quatre années (2021-2024) a mis en évidence une certaine fluctuation annuelle :

- Durant l'année 2021, sur les 200 arbres répertoriés dans chaque subéraie, le nombre de sujets noté C1 « cime défoliée à moins de 20% » totalisait 99 sujets en bonne santé à Zariéffet, 103 à Ami-Moussa et 116 à Tagdempt. La faible dégradation sanitaire (C2 : 20-60%), synonyme d'arbres en début de souffrance concernait seulement 44 cas(ZA), 29(AM) et 27 (TA). En revanche, les individus en dégradation irréversible (C3>60%), abritait 57 spécimen (ZA), 68 (AM) et 57 (TA).
- Durant le suivi de l'année 2022, les trois entités ont connu une nette régression sanitaire plus vers les classes 3. En effet, les cas dégradés ont passé de 57 à 61 sujets (ZA), de 68 à 77(AM), et de 57 à 66 cas (TA). Par contre, les arbres en début de souffrance, les sujets de Zariéffet passent de 44 à 46 cas, tandis que dans les deux autres entités, ils virent de 29 à 14cas(AM), et de 27 à 35 cas(TA).
- Durant l'investigation de l'année 2023, les arbres en bonne santé totalisaient respectivement pour les trois forêts 96, 103 et 105 sujets de ce qu'a était comptabilisé au départ (99, 103 et 1116). D'ailleurs, une certaine régression a été enregistrée dans les cas en début de souffrance vers ceux en dégradation (66 cas (ZA),77 cas (AM) et 74 cas (TA).
- Enfin, durant l'année 2024, la situation sanitaire suit le même cheminement, elle vire toujours vers la régression des classes en bonne santé vers celles en souffrance et dégradée, et constitue un cumul de 111 sujets incluant des cas en souffrance et en dégradation à Zariéffet. Ce chiffre avoisine 104 cas à Ami-Moussa et à Tagdempt.

En terme de fréquence relative, on note globalement pour les trois subéraies une réduction moyenne des classes de défoliation (C1) qui passe de 49,5% à 40%(ZA), 51,5% à 40 % (AM) et de 58% à 45%, et cela de 2021 à 2024. D'ailleurs, pour la même période, les cas sévèrement défoliés (C3) ont connu une majoration notable de 28,5% à 42% (ZA), de 34% à 52% (AM) et de 29 % à 49 % (TA) (Fig.40). L'analyse de variance (Anova 2) atteste une différence très

significative entre les fréquences absolues des classes notées par rapport aux années de suivi ($F_{(ZA)}= 19,61$; $p=0,002$), ($F_{(AM)}= 50,15$; $p=0,0001$), ($F_{(TA)}= 105,11$; $p=0,0000$).

Figure 40 : Fluctuation annuelle des fréquences relative des classes de défoliation

III.4.5.2-Indice de dépérissement

Les indices de dépérissement calculés de 2021 à 2024 dans les trois subéraies sont présentés dans la figure 41 selon les classes du déficit foliaire.

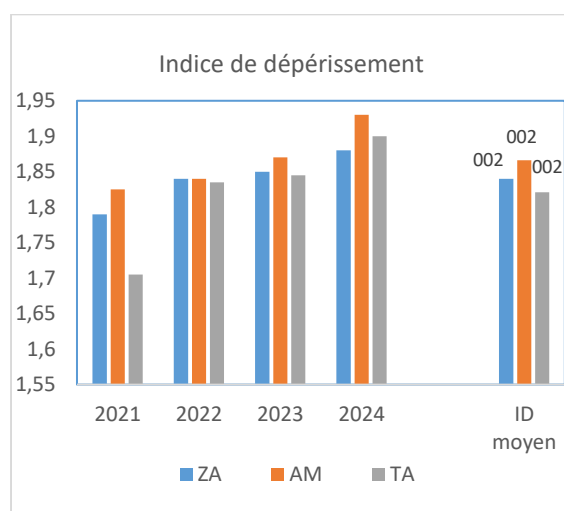


Figure 41 : Variations annuelles des indices de dépérissement selon les classes de défoliation

A travers les trois graphes (ZA, AM et TA), l'analyse de l'évolution interannuelle de l'état sanitaire des 600 arbres inventoriés met en évidence une tendance vers la dégradation sanitaire progressive que plutôt la stabilité ou l'amélioration. Aucun cas de mortalité n'a été observé durant les quatre années de suivi.

Les indices de dépérissement comptabilisés selon la seule variable « classe de défoliation » font état d'une variation interannuelle croissante vers le dépérissement dans les trois subéraies. A Zariéffet, les quatre indices indiquent une aliénation du début de dépérissement vers un dépérissement assez grave, soit un ID moyen de l'ordre de 1,84. Le même constat concerne respectivement les deux autres forêts: 1,87(AM) et 1,82 (TA).

III.4.5.3-Explication du déficit foliaire selon les variables continues indépendantes

III.4.5.3.1-Characterisation des arbres échantillons

Les différentes mesures réalisées sur les arbres-échantillons sont ordonnées selon leur variables explicatives indépendantes.

III.4.5.3.1.1-Les variables de morphologie et d'exploitation

La morphologie des arbres échantillons s'articulait sur le facteur d'élanement (FE) tandis que la variable d'exploitation concernait l'intensité du déliègeage (ID) (Fig.42).

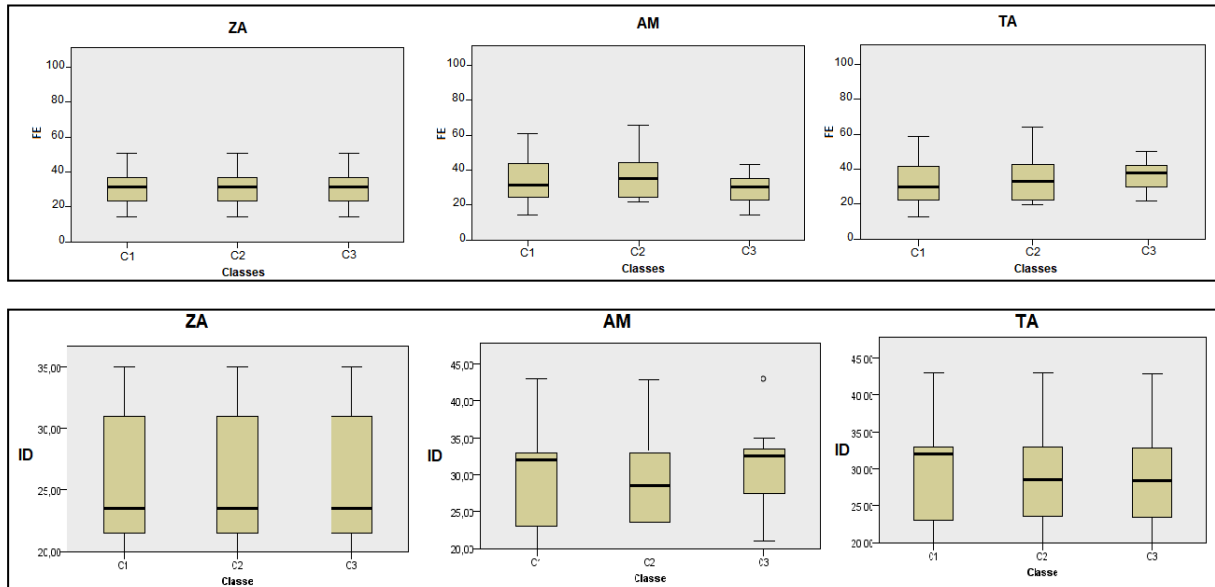


Figure 42: Distribution des variables explicatives (facteur d'élanement et intensité du déliègeage) selon leurs classes de défollitaions respectives

Selon les résultats obtenus des box plots, il s'avère que le facteur d'élanement (FE) et l'intensité du déliègeage (ID) calculés selon les trois classes de défoliation ne varient pas au sein de chaque suberaie. Le test de Kuskall-Wallis des échantillons indépendants atteste une différence non significative ($p > 0,5$).

En effet, les quotients moyens calculés pour l'ensemble des trois suberaies enregistrent 33,95(C1) ; 35,59(C2) et 30,81(C3), cela signifie que les sujets possèdent une forme équilibrée entre la hauteur de l'arbre et le diamètre du tronc ($FE < 80$), c'est-à-dire ils ne subissent pas l'effet de l'ombre imposé par les autres végétaux concurrents, et par conséquent ne sont pas sujets au flexion de leur cime en quête de lumière et de photosynthèse.

La même constatation s'ajuste à l'intensité du déliègeage (ID), celle-ci ne diverge pas entre les trois classes de déficit foliaire ($p > 0,5$). Les moyennes totales des quotients obtenues pour les trois suberaies comptabilisent 28,46(C1), 27,73(C2) et 29,01(C3). Ces valeurs affirment que l'écorage appliqué aux arbres ne constituent pas une pression sur la santé des arbres, et que la surface déliégée est en accord avec la hauteur du fût et le coefficient d'écorage appliqué.

III.4.5.3.1.2-Les variables de l'état du tronc

Les variables indépendantes d'état du tronc sont représentées par les dommages (DT) et la conductivité électrique du liber (CE)(Fig.43).

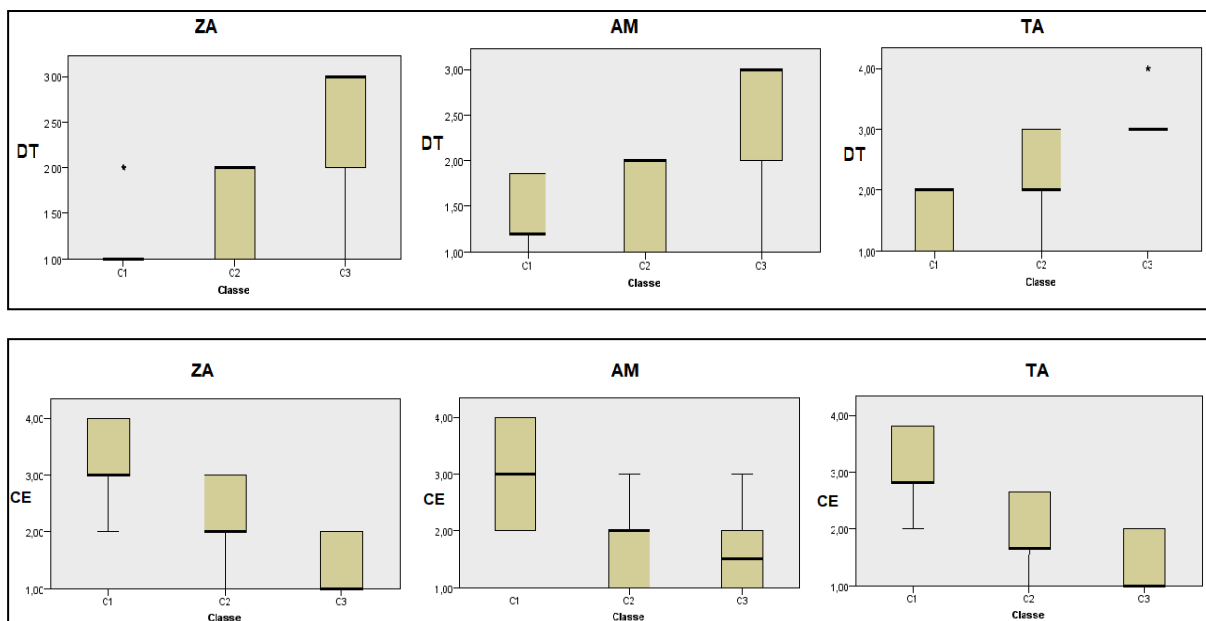


Figure 43: Distribution des variables explicatives dommages sur le tronc et la conductivité électrique du liber

La figure 43 fait ressortir une variation marquée entre les classes de dommages perpétrés sur le tronc des arbres dans les trois classes de défoliation. Le test de Kuskall-Wallis des échantillons indépendants enregistre une différence très significative ($p < 0,000$).

Effectivement, les classes de défoliation C3, dans chaque suberaie cumulent les blessures les plus aggravés DT3 (Dommages forts) à l'instar des cavités issues de la mauvaise manitention de la hache, de l'arrachage forcé du liège avec la mère, des trous de perforations de divers insectes xylophages y compris la fourmi du liège, et le plus dangereux la presence du chancre carbonateux dans les parties les plus détériorées du tronc. Ces derniers représentent 60% des occurrences.

Il est en est de même, pour la variable conductivité électrique du liber qui s'accroît plus sur les sujets peu défoliés (C1), et contrairement se décroît sur ceux dans les cime sont altérées. Nous enregistrons respectivement pour les trois classes des proportions de 70 à 30 % des classes de conductivité forte (EC3) à très forte (EC4) et 45 à 55% des cas moyens (C2) à faible (C1). Le test de Kuskall-Wallis des échantillons indépendants enregistre une différence très significative ($p < 0,000$).

III.4.5.3.1.3-La variable de l'état de la cime

La variable indépendante associée à l'état de déficit foliaire se rapporte aux mesures de la composition minérale des feuilles (Tab.20).

Tableau 20: Variations des teneurs en composés minéraux par classe de défoliation

Forêt	Classe déficit foliaire	N	Statistique	Composition minérale (% m.s)				
ZA	C1	99	Moyenne					
			Ecart-type					
	C2	44	Moyenne					
			Ecart-type					
	C3	57	Moyenne					
			Ecart-type					
			Total					
AM	C1	103	Moyenne					
			Ecart-type					
	C2	29	Moyenne					
			Ecart-type					
	C3	27	Moyenne					
			Ecart-type					
			Total					
TA	C1	116	Moyenne					
			Ecart-type					
	C2	27	Moyenne					
			Ecart-type					
	C3	57	Moyenne					
			Ecart-type					
		Total						

Selon les résultats du tableau 20, les teneurs en éléments minéraux des feuilles de chêne-liège appartiennent aux fourchettes de valeurs rencontrées dans la littérature existante sur la nutrition minérale du chêne-liège (Orgeas et Bonin, 1996 ; Courtois et Masson, 1999): Ca (0,27 à 0,60 % m.s), K (0,49 à 1,04 % m.s), P(0,04 à 0,19 % m.s), Mg (0,04 à 0,23 % m.s), N (1,30 à 1,63 % m.s).

Statistiquement, la composition minérale des feuilles analysées ne diffèrent pas en prenant en compte tous les arbres échantillons des trois forêts par composé spécifique ($p > 0,50$) (Fig.44).

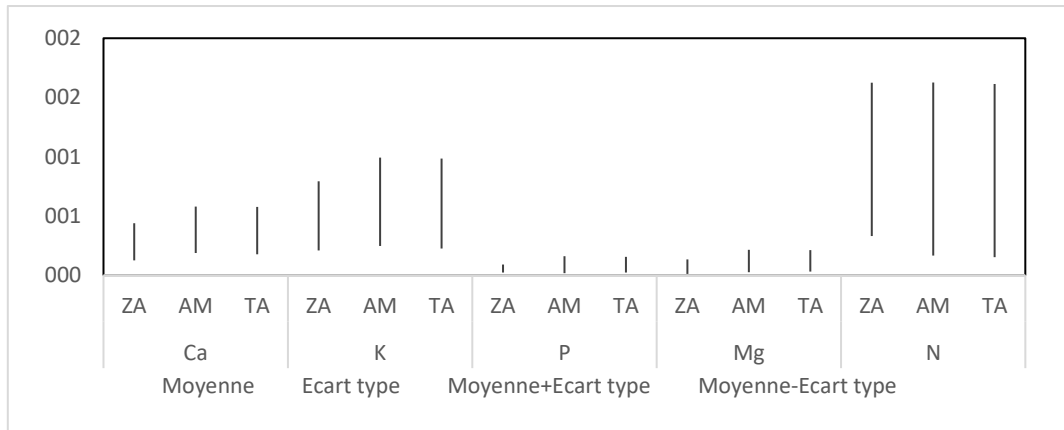


Figure 44: Composition minérale des feuilles selon les trois suberaies

A travers les résultats du tableau 20, il s'observe aussi que le déficit foliaire faible (C1) à une conséquence positive sur la teneur des éléments minéraux des feuilles.

Au niveau de la cime, les classes de défoliation identifiées dans chaque suberaie ont été homogénéisées à leur classes de contenu minérale. En effet, la variable continue (CM) varie d'une classe à une autre (Fig.45).

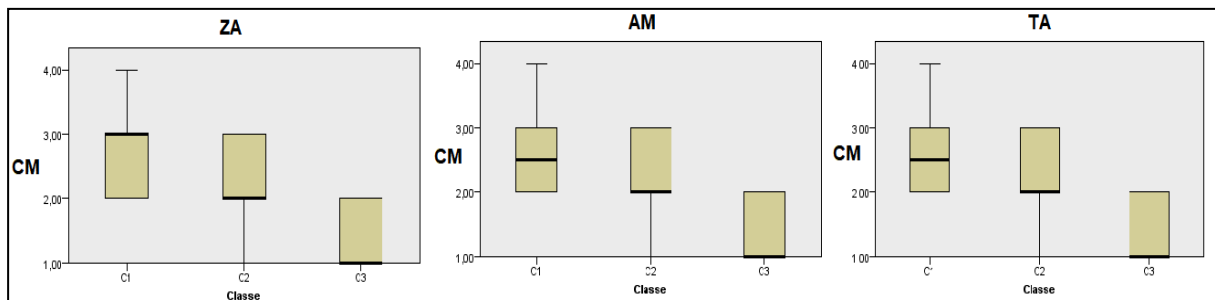


Figure 45: Variation de la composition minérale selon les classes de défoliation

La figure 45 décele une tendance marquée de la composition minérale forte vers la classe de déficit foliaire C1 dans les trois forêts. Par ailleurs, la classe de composition minérale faible s'ajuste plus au feuilles issues de la classe3 (C3). A titre d'indication, l'analyse minéralogique des feuilles de la suberaie de Zariéffet chutent significativement de la classe C1 vers C3 (C1: Ca (0,60% m.s), K(1,04% m.s) P(0,19% m.s), Mg(0,23% m.s) et N (1,63% m.s)) ; (C3: Ca (0,31 % m.s), K(0,49 % m.s) P(0,04% m.s), Mg(0,04% m.s) et N (1,29% m.s)).

Pour les trois subéraies analysées, le test de Kuskall-Wallis des échantillons indépendants enregistre une différence très significative (Test= 70,94 ; ddl=2 ; $p < 0,000$) pour les trois classes de défoliation.

III.4.5.4-Application de la regression linéaire multiple

III.4.5.4.1-La qualité d'ajustement

La première sortie du modèle se définit par le calcul du coefficient de détermination (R^2) ou le pourcentage de variance expliquée par la régression (Tab.21).

Tableau 21 : Récapitulatif des modèles^b

	Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
ZA	1	0,932 ^a	0,869	0,856	0,312
AM	1	0,844 ^a	0,712	0,685	0,462
TA	1	0,864 ^a	0,764	0,742	0,418
Zone d'étude	1	0,875 ^a	0,766	0,759	0,402

a. Valeurs prédites : (constantes), CM, FE, ID, CE, DT

b. Variable dépendante : Classe de défoliation ou Déperissement

Respectivement pour les trois subéraies, le tableau 21 met en exergue un apport d'information globale variant de 87%(ZA), 71%(AM) à 76%(TA) de la part des variables explicatives indépendantes CM, FE, ID, CE, DT par rapport à la variable dépendante Y (Classe de défoliation). Le coefficient de corrélation entre les variables explicatives de Y est de l'ordre de 0,93(ZA), 0,84(AM) et 0,86(AT). La qualité de la regression est très bonne dans les trois cas, soit un $r = 0,87$). Les variables indépendantes expliquent copieusement le dépérissement selon les classes de déficit foliaire.

III.4.5.4.2-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 pour les trois subéraies. Globalement, en comparant la signification associée (0,000) au seuil de signification, on admet aussi que la regression est très significative pour l'état de déficit foliaire ($F = 113,73$; $p < 0,000$), c'est-à-dire au moins un $\beta_j \neq 0$ (Y dépend d'au moins un x) (Tab.22).

Tableau 22 : Analyse de variance Anova^a des classes de défoliation

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
1 Régression	91,886	5	18,377	113,738	0,000 ^b
Résidu	28,114	174	0,162		
Total	120,000	179			

a. Variable dépendante : Classe de défoliation

b. Valeurs prédites : (constantes),

III.4.5.4.3-La signification de l'apport marginal de chaque variable

La troisième sortie du modèle concerne les coefficients. Sur la base des paramètres des trois modèles du tableau 23, les variables suivantes apportent de l'information significative pour expliquer la variabilité de la variable dépendante classe de défoliation: CM, FE, ID, CE, DT.

Tableau 23: Coefficients^a du modèle globale pour les trois suberaies

	Source	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.	Codes de signification des p-valeurs
		A	Erreur standard	Bêta			
β 0	(Constante)						***
β 1	FE						o
β 2	ID						o
β 3	CE						***
β 4	DT						***
β 5	CM						***

a. Variable dépendante : Classe de défoliation ou déperissement

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

A travers le test de student on remarque que chaque variable (β)≠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 β₁, et β₂ ne sont pas significatives (< 0.1 < ° < 1). L'équation du modèle (Classe de défoliation) se valide comme suit :

Classe de défoliation =

Dans ce modèle les variables DT, CM et CE sont les plus influentes.

III.4.5.4.4-Test de 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 0,59. D'ailleurs le VIF des cinq variables est inférieur à 4. Cela veut dire qu'il n'y a pas de problèmes de colinéarité entre les variables (Tab.24).

Tableau 24: Statistique de multi-colinéarité (cime altérée)

	Tolérance	VIF
FE		
ID		
CE		
ID		
CM		

III.4.5.4.5-Interprétation et choix du modèle

On se focalisant sur le modèle obtenu, on remarque que les hypothèses EF(p=0,810) et ID(p=0,351) ne sont pas intégrées dans l'explication de Y (Classe de défoliation). De ce fait les Hypotheses H1 et H5 ne sont pas validées et doivent être supprimées de l'équation.

Classe de défoliation =

La décision statistique : on doit refaire la régression pour le modèle.

III.4.5.4.6-Validation finale du modèle

La suppression des deux variables FE et ID a engendré les paramètres suivants du modèle (Tab.25) :

Tableau 25 . Paramètres statistiques des coefficients non standardisés et standardisés (Classe de défoliation pour les trois subéraies)

Source	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.	Codes de signification des p-valeurs
	A	Erreur standard	Bêta			
(Constante)	2,458	0,202				***
	-0,319	0,037				***
	0,381	0,044				***
	-0,278	0,043				***

La nouvelle équation du modèle final est comme suit :

Y (Classe de défoliation) =

Y (Dépérissement) =

Parmi les trois variables explicatives, la variable DT demeure la plus influente. Le modèle conceptuel validé pour l'état de défoliation des cimes est illustré dans la figure 46.

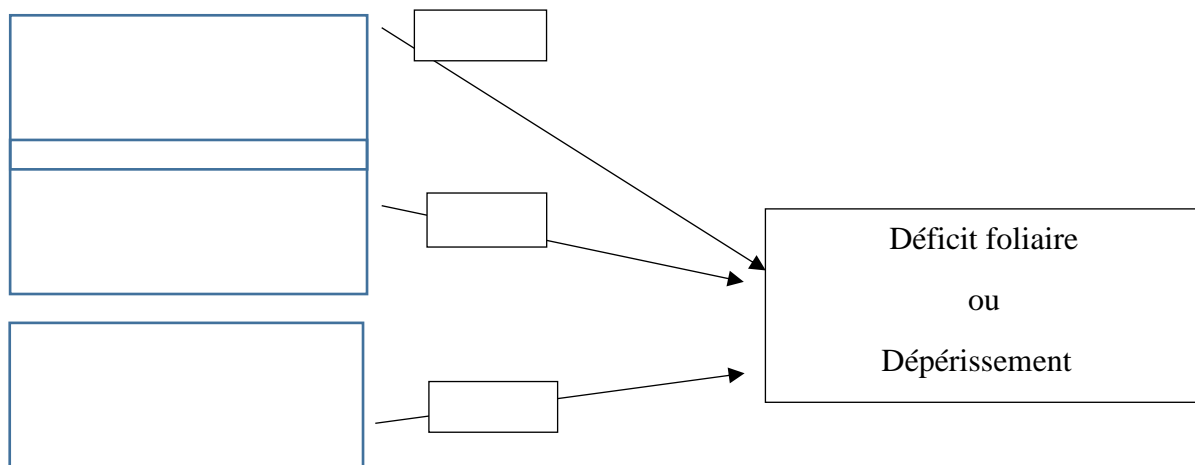


Figure 46. Modèle de prédiction pour statuer sur le dépérissement du chêne liège selon l'état de défoliation

III.5-Discussion

La santé d'un arbre et/ou d'un peuplement forestier n'est pas un concept très précis. Il ne se définit pas seulement à déceler la présence/absence de la masse foliaire au niveau des ramifications. En effet, la note d'observation constatée au moment du diagnostic visuel n'est en réalité qu'une conséquence de l'interaction de plusieurs facteurs qui se succèdent et qui s'alignent pour affaiblir l'état physiologique l'arbre et conduire à sa mort.

Afin de réduire cette subjectivité qui est limitée uniquement à la notation de l'état des cimes des arbres, le recours aux autres facteurs endogènes réels liés à la réponse physiologique de l'arbre s'impose. Ce dernier, dans un cadre de changement global sont tributaires des conditions de croissance de l'arbre en question à savoir les contraintes édaphiques et climatiques, la concurrence des autres arbres et la dynamique des populations d'insectes ravageurs (insectes, champignons) (De Sousa et Atay, 2005).

Dans cette étude on s'est penché sur l'application d'autres critères plus fiables en interférant un modèle de régression logistique binaire: il s'agit d'un outil qui permet d'établir une équation pour classer une variable binaire dépendante en fonction d'un certain nombre de variables continues indépendantes, entraînant le déclenchement du dépérissement.

En effet, le chêne liège est une espèce forestière méditerranéenne largement appréciée par ses atouts économiques dont l'exploitation du liège est le maillot d'une industrie fleurissante à l'échelle mondiale. Cette forme de récolte périodique (9 à 14 ans) constitue en elle-même un traumatisme physiologique imposé par l'homme nécessitant beaucoup d'énergie aux arbres récoltés afin de reconstituer leurs lièges et leurs houppiers. D'ailleurs, la littérature dans ce sens met l'accent sur le fait que le non-respect des normes d'exploitation à savoir l'âge des arbres, la hauteur d'écorçage, l'épaisseur marchande du liège et la qualité d'exploitation induisent fortement à des épreuves physiologiques dépassant l'endurance habituelle de cette essence forestière (Natividade, 1956 ; Gottaredona, 1992 ; Franceschini et al., 1999). Le constat devient amer lorsque les conditions du milieu qui suivent la récolte sont très défavorables (sécheresse aigue, incendies et attaques parasitaires), les cimes peuvent subir d'importantes défoliations et mortalité de branches du houppier.

Ce phénomène est devenu manifeste au cours des années 1980, et ne concerne pas uniquement les subéraies algériennes et demeure préoccupant dans la plupart subéraies méditerranéennes, ce qui a rendu ces écosystèmes très fragiles (Costa et al., 2016).

Durant le même constat, on a observé parallèlement un déclin similaire d'autres essences forestières (*Quercus spp.*, *Abies spp.*, *Picea spp.*, *Pinus spp.*, *Fagus spp.*, *Castanea sativa*) en Europe et en Amérique du Nord (Bonneau & Guy, 1985). Depuis lors, deux préoccupations majeures retiennent l'attention des gestionnaires forestiers: la confirmation et la quantification du dépérissement et l'identification des facteurs responsables.

Le diagnostic sanitaire réalisé sur les trois subéraies productifs (2021-2024) a révélé une inclinaison marquée vers le dépérissement argumenté par les classes de défoliation C3 qui ont augmenté de 40%. En Italie, Luciano & Prota (1995) ont signalé une diminution de 40 à 60% de la production de liège dans les peuplements ayant subi une défoliation sévère (supérieure à 60% (C3)).

Le modèle validé pour expliquer le déclin sanitaire du chêne liège s'aligne aux hypothèses qui soutiennent que le dépérissement des subéraies est un processus graduel faisant intervenir plusieurs facteurs complexes, plutôt qu'un seul agent biotique ou abiotique.

Dans notre opinion, les variables indépendantes explicatives du modèle de dépérissement ne s'écartent pas des facteurs de prédisposition et de déclenchement déjà signalés dans d'autres subéraies Tunisiennes et Marocaines à savoir l'abondance, la mauvaise gestion et l'exploitation incorrecte du liège (Ben Jamaa et Hasnaoui, 1996). Le modèle a clairement démontré le degré important des variables indépendantes suivantes : les divers dommages perpétrés sur le tronc (DT), la conductivité électrique du liber (CE) et l'alimentation minérale des feuilles (CM). Parallèlement, les résultats du modèle ont fortuitement écarté les deux autres variables à savoir le facteur d'élancement des arbres (FE) et l'intensité du déliègeage (ID).

Pour ces deux dernières variables, cela concorde avec Costa et Cherubini (2021), qui ont constaté que la taille de l'arbre n'affecte pas l'épaisseur du liège et ont conclu que la taille de l'arbre influence la croissance du bois mais pas celle du liège. D'autre part, Sanchez-Gonzalez et al (2023), Beira-Dávila et al (2014) estiment que l'exploitation raisonnée du liège selon la taille de l'arbre influencent positivement l'état de santé du chêne-liège, sa production future et les rendements obtenus à partir des planches de liège lors de la transformation industrielle. Les constatations faites sur le terrain affirment la très faible présence de sujets excessivement écorcés jusqu'aux branches principales, et que les coefficients d'écorçage ne dépassent pas le 2. En outre, la faible densité à l'hectare s'ajoute au tempérament héliophile de l'espèce avec une photosynthèse optimale. Selon Bréda et al (2002), le feuillage est considéré comme récepteur majeur de la radiation : 80 à 90% de la radiation solaire absorbée par le couvert l'est par les feuilles, le reste est absorbé par les autres organes. Dans notre cas cette situation limite la flexion et l'instabilité des cimes.

Le poids du premier coefficient (DT= 0,381) semble majeur et tranchant sur la vitalité des arbres. Dans notre opinion c'est l'origine du mal, un arbre soumis à un régime d'exploitation anarchique cumule les blessures dues à la mauvaise manipulation de la hache et de l'utilisation d'instruments inadéquats non désinfectés. Dans la plupart des cas, l'extraction du liège se déroule par arrachage forcé que plutôt par adresse. Le nouveau liège formé après la récolte ne parvient pas à exercer son pouvoir protecteur et isolant et ces blessures deviennent irréversibles et propices aux effets néfastes du climat (sécheresse et gel) et des agents pathogènes (Fig.47).

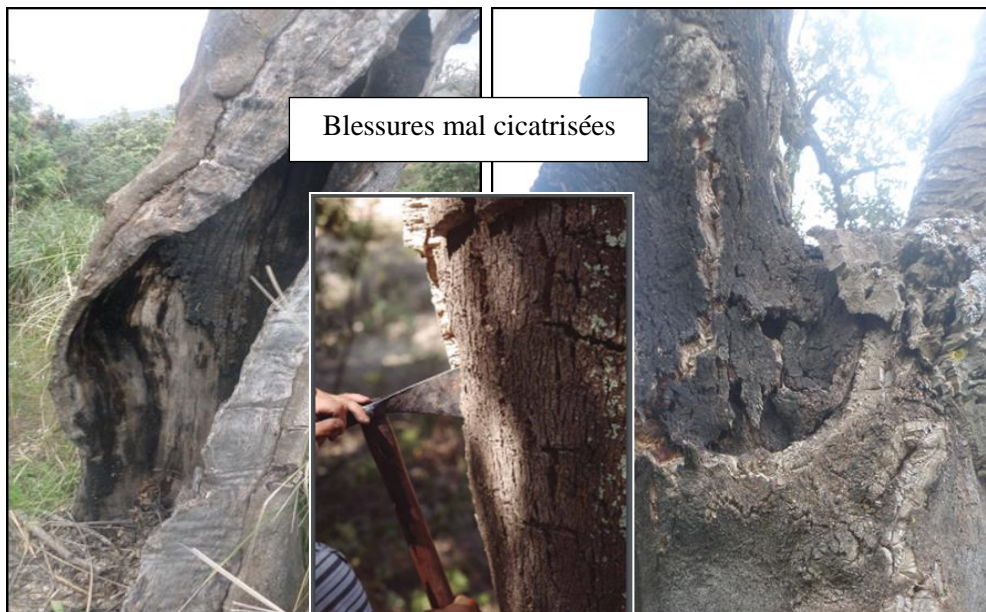


Figure 47 :

Domages occasionnés par la mauvaise manipulation de la hache

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 détruit réduit le taux d'absorption d'eau (Rundel, 1973). D'ailleurs, 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. De plus, les changements induits par le stress de l'écorçage imparfait réduisent la capacité des arbres à se défendre contre les attaques d'insectes ou de champignons (Wargo, 1996).

Dans ce sens, dans la zone d'étude, les trous d'insectes observés sur certains sujets déperissants ne constituent pas une grande menace pour la survie des chênes-lièges ou présentent des grandes colonies d'infestation ou de foyers d'attaques sévères, à l'égard de ce qui a été signalé au Maroc, en Espagne, au Portugal et en Italie, en particulier pour *Cerambyx cerdo*, *P. cylindrus* (Platypodidae), où plusieurs espèces de champignons lui ont été associés à l'égard de *Biscogniauxia mediterranea*, les Botryosphaeriaceae ou le genre *Phytophthora* (*Phytophthora cinnamomi*) (Inàcio et al., 2011 ; Tiberi et al., 2016; Panzavolta et al., 2017 ; Cardillo et al., 2021).

La deuxième variable explicative qui semble aussi influencer sur le déficit foliaire sévère est sans doute la conductivité électrique du liber (CE). Selon Blanchard et al(1983), la mesure de la résistance électrique du cambium est considérée comme une indication de l'activité cambiale de l'arbre, reflétant le fonctionnement du houppier (photosynthèse, transpiration, etc.) et du système racinaire (nutrition minérale, alimentation hydrique, etc.) en fonction de paramètres physiologiques et environnementaux (Fig.48).



Arbre C1



Figure 48: Instrument de mesure de la conductivité électrique du chêne liège

Un chêne liège perturbé qui n'arrive pas à cicatriser ses blessures durant le cycle de production à cause des dommages infligés à l'aubier, au cambium et au phloème vivant (le liber) voit son alimentation en sève brute et élaborée se dérouler à grand-peine et ne permettant pas l'assimilation des réserves par le périoderme (association phelloderme—phellogène—suber), ce qui explique la conductivité électrique faible à moyenne sur les sujets C3 et C2. D'ailleurs, cette perte de conductivité électrique est aussi associée à une mauvaise alimentation hydrique au niveau des tissus conducteurs agissant par embolie et cavitation, et favorisant l'installation des insectes et des maladies pathogènes, conduisant inévitablement au déperissement et à la mort de l'arbre (Abdenbi, 2003).

A l'opposé, la forte conductivité électrique du tronc des sujets en bonne vigueur est une indication physiologique de la vivacité de la mère de liège et des tissus conducteurs (Bernal Chacón et Cardillo Amo, 2005). D'ailleurs, Iwsa et Kabo (1997), associent la forte conductivité électrique durant la période végétative qui suit la perturbation à une bonne alimentation hydrique et minérale.

La troisième variable explicative du modèle relève de la composition minérale prélevée dans les classes de défoliation. Dans l'ensemble, la dynamique des nutriments du chêne-liège révélée dans cette étude est cohérente avec d'autres études sur le chêne-liège (Oliveira et al., 1996; Orgeas et Bonin, 1996 ; Robert et al., 1996 ; Orgeas et al., 2002). Les résultats dégagés de l'analyse minérale, confirment que les fortes compositions étaient allouées à la classe C1 (arbre sain) spécialement pour l'azote et le potassium. La teneur en éléments nutritifs foliaires est largement reconnue comme une mesure efficace de l'état nutritionnel des plantes (Martin-Prével et al., 1984; Tamm 1995). En effet, les feuilles sont les principaux sites d'activité physiologique, notamment la photosynthèse, la respiration, la transpiration, les échanges gazeux et le stockage des nutriments (Marschner, 1986 ; Richter, 1993). Cette alimentation minérale est en réalité reliée à une insuffisance ou à un excès de certains éléments chimiques dans le sol, ou à une

mauvaise alimentation hydrique, ou à la destruction du sous-bois et l'accroissement de l'érosion (Bernardo et al., 1992; Sousa et al., 2000).

Dans cette étude, les fortes teneurs en macroéléments primaire (azote et en potassium) du feuillage, se corrélaient positivement au sujets sains ou peu perturbés quelque soit la suberaie ou l'itinéraire entrepris et sont plus abondant que les macroéléments secondaires (calcium et Magnésium) dont la plante ne les utilise qu'en petites quantités et à certains moments de l'année (Fig.49).

Figure 49: Diagramme à point pour les composés analysés selon le déficit foliaire et la provenance

- En effet, l'Azote (N) est un élément nutritif essentiel à la croissance et au développement des végétaux et donc à la production de la biomasse. C'est un constituant des acides aminés, protéines végétales, et de plusieurs vitamines, sa carence provoque la diminution marquée de la chlorophylle, d'où cette chlorose (jaunissement) d'abord des vieilles feuilles puis des jeunes, suivie du ralentissement et de l'arrêt de la photosynthèse et chute prématurée des feuilles (Orgeas et Bonin,1993).
- Le potassium (K^+) est un activateur de différentes enzymes (Ben Mimoun, 2002). Il permet l'augmentation de la pression cellulaire en régularisant l'économie de l'eau dans la plante et en réduisant l'évaporation c'est-à-dire la résistance à la sécheresse . Il améliore le rendement de l'assimilation chlorophyllienne et la résistance au gel (Zaid, 2000).
- Le phosphore (P) est parmi les macroéléments les plus indispensables pour les transferts d'énergie et en tant qu'élément constitutif des membranes cellulaires et la transmission des caractères héréditaires (acide nucléique) et il est essentiel pour la floraison des bourgeons (Pancrazio et Laflaquière, 2006). Une carence en P ralentit la croissance; le développement des racines et la densité des populations est réduite ; la floraison et la maturation sont retardées et la résistance au gel est moins bonne.
- Le calcium (Ca^{+2}) : le chêne liège est une espèce calcifuge, sa présence est minime pour lutter contre l'excès du taux de transpiration, comme une humidité élevée ou des températures extrêmes. Une augmentation de la salinité du sol pourrait également causer une carence en Ca^{+2} en diminuant l'absorption d'eau par la plante (Marschner, 1994).
- Le magnésium (Mg^{+2}) est un constituant de la chlorophylle. Il en favorise la synthèse ainsi que celle de la xanthophylle et celle du carotène. Par ailleurs, Il favorise l'absorption du phosphore et son transport dans les graines ou il favorise la synthèse des lipides. Le magnésium évite l'absorption excessive de potassium par les plantes

En combinant les différentes informations issues des trois variables indépendantes en relation avec le déficit foliaire, il s'est avéré que la conductivité électrique est liée à certains éléments minéraux principalement le potassium ZA($r= 0,81$), AM ($r= 0,92$), TA($r= 0,93$) (Fig.50).

Figure 50: Corrélation entre la teneur en potassium (K) et la conductivité électrique (CE)

En effet, cette remarque a été aussi soulevée par d'autres auteurs à l'instar de Tattar et al (1972) et Malia & Tattar (1978) qui dépendaient la conductivité électrique à la présence d'ions mobiles, principalement du potassium présent dans l'apophase situé entre les deux électrodes du conductivimètre. En effet, Blanchard et al (1983) en étudiant l'épicéa, affirment que la faible conductivité électrique s'aligne au dépérissement et provient également de concentrations différentes en potassium. Ce constat a été aussi identifié dans cette thèse par la forte conductivité électrique due à la concentration du potassium dans les arbres à faible défoliation (C1)(Fig.51).

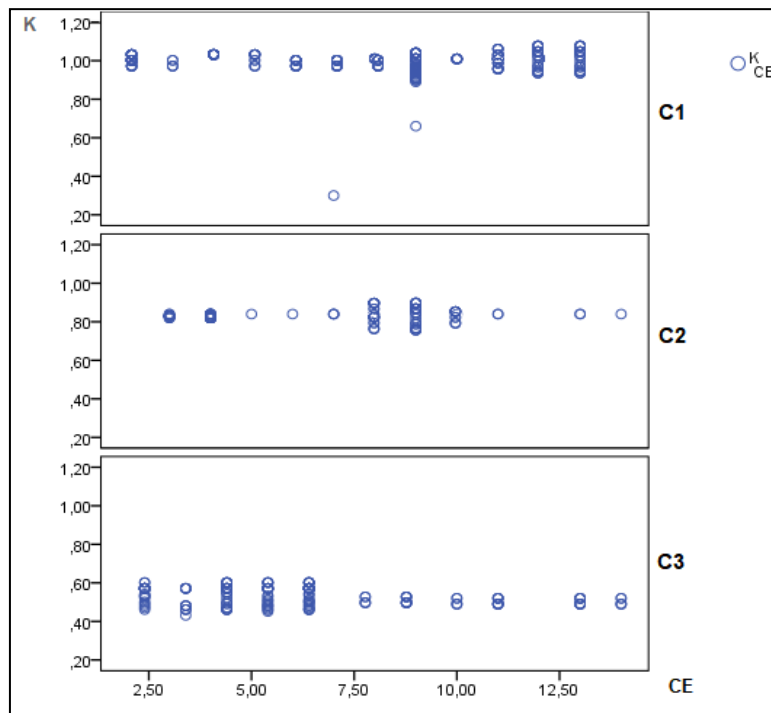


Figure 51: Variation de la conductivité électrique et du potassium selon les classes de défoliation

Selon Marschner (1995), la teneur en K pourrait être influencée par la disponibilité de l'eau dans le sol. Le potassium joue également un rôle spécifique dans l'économie de l'eau. Il participe à l'augmentation de la pression osmotique et au contrôle des stomates. En activant leur fermeture, il limite la transpiration dès que celle-ci tend à s'exagérer; à l'inverse, en activant l'ouverture il favorise la photosynthèse lorsque le déficit d'eau n'est pas limitant.

A travers la matrice de corrélation établie entre les variables indépendantes explicatives (Tab.26), on peut avancer d'une manière globale que le dépérissement diagnostiqué dans les trois subéraies à partir du déficit foliaire n'est qu'une conséquence des blessures engendrées sur le tronc affectant l'alimentation hydrique (CE) et minérale des feuilles (CM) depuis les racines via l'assise cambiale imposée par le climat actuel à savoir la sécheresse ($r = -0,539$; $r = -0,488$). Les sujets perturbés n'arrivent pas à conserver leur feuillage à cause de la transpiration élevée et l'ouverture continue des stomates, il s'agit d'une interaction partielle entre l'alimentation hydrique (conductivité électrique) de l'arbre et sa nutrition minérale principalement en potassium (K) ($r = 0,351$).

Tableau 26: Corrélations de Pearson entre les variables indépendantes explicatives du dépérissement

	Corrélation de Pearson	1				
	Sig. (bilatérale)					
	Corrélation de Pearson	0,351**	1			
	Sig. (bilatérale)	0,000				
	Corrélation de Pearson	0,143	0,039	1		
	Sig. (bilatérale)	0,055	0,605			
	Corrélation de Pearson	-0,034	0,149*	0,051	1	
	Sig. (bilatérale)	0,651	0,045	0,493		
	Corrélation de Pearson	-0,539**	-0,488**	-0,083	0,073	1
	Sig. (bilatérale)	0,000	0,000	0,269	0,333	
**. La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).						
*. La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).						

Conductivité électrique du tronc (CE), Composition minérale des feuilles (CM) Facteur d'élançement ou de stabilité (FE), Dommages sur le tronc (DT), Indice de dépérissement (ID)

III.6-Conclusion

Le suivi de l'état sanitaire du chêne liège dans les trois subéraies a révélé la vulnérabilité des peuplements aux différents stress. L'évolution interannuelle du déficit foliaire des 600 arbres inventoriés (2021-2024) a fait ressortir une orientation vers la dégradation sanitaire progressive que plutôt la stabilité ou l'amélioration. Les trois subéraies enregistrent une disposition accrue vers un dépérissement assez grave exprimé par des ID moyen de l'ordre de 1,84 (ZA), 1,87(AM) et 1,82 (AT).

A l'opposé de ce qui est évoqué dans les autres subéraies de la méditerranée liant le dépérissement à une augmentation notable des attaques phytopathogène en premier degré, le suivi entrepris dans la zone d'étude a montré que les blessures et les diverses mutilations sur les arbres, dues à des techniques d'exploitation malfaçonées étaient la principale cause abiotique des problèmes sanitaires observés. La coïncidence temporelle entre cette pratique incorrecte et le réchauffement climatique actuel n'a fait qu'empirer la sensibilité des arbres au déficit hydrique accentué par la concurrence des autres végétaux fouillant les sols calcaires vers ceux légers et siliceux. Le surpâturage semble aussi pesé lourdement sur ces écosystèmes fragiles (le tassement du sol réduit sa perméabilité et favorise le ruissellement et l'érosion des nutriments ce qui a eu un impact majeur sur le contenu en minéraux des feuilles des arbres perturbés. Somme toutes, les peuplements poussent dans des milieux arides et sur des substrats sans fertilité entravant la nutrition minérale des racines et des cimes, multipliant la transpiration et la fermeture constante des stomates. Dans ce contexte, le diagnostic sanitaire a révélé une réduction marquée en contenu du potassium sur les classes de déficit C3 (sujets perturbés) ajustée à une conductivité électrique faible et à des blessures irréversibles sur le tronc.

Globalement, la caractérisation du risque environnemental en suberaie, diagnostiqué par le déficit foliaire conduisant au dépérissement des arbres productifs, exprimé analytiquement par le modèle mathématique par régression linéaire multiple a clairement démontré le degré important des variables indépendantes suivantes : les divers dommages perpétrés sur le tronc(DT), la conductivité

electrique du liber (CE) et l'alimentation minérale des feuilles(CM). Parallèlement, les résultats du modèle ont fortuitement écarté les deux autres variables à savoir le facteur d'élancement des arbres (FE) et l'intensité du déliegeage (ID).

Chapitre IV

Impact du risque environnemental sur la technologie du liège

IV.1-Introduction

Dans le monde, le liège se distingue comme étant un produit forestier non ligneux très puisé dans l'industrie de transformation à caractère technologique. En suberaie, ce bien fait de la nature qui, par sa nature et l'hétérogénéité des facteurs affectant sa production a une forte variabilité, d'où le concept de technologie du liège est difficile à définir (Carrasquinho, 1987). Dans le liège les caractères morphologiques sont des bio-indicateurs de qualité par la relation étroite existante entre les propriétés du matériau, les caractéristiques et la disposition des tissu subéreux (Paixao, 1965). Au cours du processus de sa formation, les perturbations environnementales qui surviennent affectent aussi bien sa croissance, sa couleur, sa texture, sa densité et la fréquence de sa porosité. Ces altérations peuvent limiter les applications du produit parce qu'elles sont considérées comme des défauts (Molinas et Oliva, 1990).

Le liège produit annuellement par le chêne liège n'est en réalité que le fruit de l'activité saisonnière du phellogène résultant de l'état physiologique de l'arbre et son adaptation au milieu extérieur. Cet équilibre n'est permise qu'à travers les particules ouvertes sous forme de pores traversant le liège de l'intérieur vers l'extérieur permettant les échanges gazeuses avec l'extérieur et constituent en même temps une forme de transpiration et d'aération particulière pour le tronc où loge le cambium (Fortes et al., 2004).

Dans ce contexte, et dans un cadre de gestion durable forestière, des pays comme le Portugal, l'Espagne, l'Italie, le Maroc et la Tunisie ont commencé ces dernières années à prendre conscience aussi bien de l'importance écologique des suberaies que de leur utilité économique tout en essayant de trouver des solutions satisfaisantes pour l'estimation des paramètres technologiques du liège sur arbre ou empilé (Benkirane, 2001; Chorana, 2021). Ces méthodes constituent un premier outil de décision qui permet au forestier de quantifier correctement la récolte du liège à commercialiser (IPROCOR, 1994). Le principe de cette estimation dépend essentiellement de l'opération de classement en qualité des échantillons de liège prélevés des arbres producteurs. Cette opération de classement en différentes classes de qualité se fait en fonction de deux variables technologiques: l'épaisseur des morceaux de liège et leur aspect (défauts de liège) (Dehane, 2012).

Dans un cadre du maintien de la santé et de la vitalité de l'écosystème forestier, l'exploitation en masse des suberaies écartant le contexte environnemanat actuel défavorable aboutie à d'énormes préjudices aux peuplements, et générant d'importants dommages ultérieurs causés par des agents biotiques et abiotiques (insectes, maladies, secheresse, manque de fertilité des sols.... Ces altérations s'extériorisent rapidement sur l'architecture des arbres par des défoliations graves, de pertes de croissance et de qualité, sur des surfaces annuelles concernées (Koestel, et al., 2002).

L'objectif principal de ce chapitre est de déceler une probable influence du risque environnemental (mesuré analytiquement par le déperissement) sur les indices technologiques du liège.

IV.2-Materieles et méthodes

La méthodologie adoptée pour l'étude des paramètres technologiques du liège est typiquement associée à la spécialité sciences et technologie du bois et du liège. Ce domaine de

recherche est très développée en Espagne et au Portugal, vu le nombre important de publications scientifiques et d'ouvrages spécialisés dans ce domaine des sciences forestières.

IV.2.1-Les paramètres de la technologie du liège

IV.2.1.1-Echantillonnage et façonnage

Conjointement au diagnostic sanitaire opéré sur les arbres-échantillons. Sur le tronc de chaque arbre repéré, un carré de 10cmx10cm est tracé à la craie à 1,30m du sol, puis sondé au Coveless CQ05 pour l'étude ultérieure de la technologie du liège (Fig. 52).

L'appareil s'appuie sur la conductivité électrique du phloème vivant (liber) grâce à une sonde (électrode) préalablement plantée dans l'écorce de l'arbre. L'autre extrémité est également connectée au coveless CQ05 formant ainsi un circuit fermé. Le calibre et l'aspect du liège sont mesurés empiriquement. Cinq sondages dans le carré tracés à la craie permettent de définir la classe de qualité espérée. La vitesse de pénétration du dispositif doit être constante, dans un intervalle de valeurs prédéfinies afin que les données soient correctes, dans le cas contraire, un message d'erreur s'affiche et il faut recommencer le sondage (Fig.53). Pour une fiabilité des résultats, le constructeur exige le changement de l'exposition à chaque sondage (en dépit du tempérament écologique de l'espèce envers le soleil). Les données relatives à la technologie du liège peuvent être exportées vers l'Excel sous forme de base de données.



Figure 53: Protocole expérimental sur terrain relative à la technologie du liège

Le carré tracé à la craie est extrait soigneusement sans blesser la mère du liège. Selon les normes de l'IPROCOR (2006), nous avons extraits plus de 75 échantillons c'est-à-dire 80 calas par subéraie à travers les itinéraires entrepris dans les trois niveaux du terrain, soit un total de 240 calas. Selon Montero Gonzales (2004), ce chiffre de 75 échantillons par site est la seule méthode permettant d'atteindre une erreur d'estimation <15%. Chaque échantillon extrait est étiqueté selon le numéro d'ordre assigné à l'arbre, la provenance et la classe de déficit foliaire notée. Par la suite, les trois lots sont préparés pour l'opération de bouillage.

IV.2.1.2- Le bouillage du liège

Le bouillage est une opération industrielle très importante qui permet d'une part, le nettoyage et la désinfection du liège, d'autre part, favorise son expansion linéaire (Radiale, transversale et tangentiel) et volumétrique.

Ce procédé consiste à ficeler un lot de 10 échantillons à l'aide d'un fil d'attache (bien codés selon leur état sanitaire et leur provenance), puis les émerger dans une bassine en aluminium remplie d'eau propre bouillante pendant 1h à 100°C, sans ajout d'aucun produit chimique. L'eau est changée après chaque renouvellement de l'opération jusqu'au dernier lot.

Après chaque bouillage, les échantillons sont déficelés puis regroupés à nouveau selon leur codage respectif, puis desséchés à l'air libre pendant 15 jours pour la stabilisation de son humidité et élimination de l'eau d'imbibition provenant de l'opération du bouillage. L'humidité d'équilibre est donnée par la formule (Dehane, 2012):

Où P_t et P_1 désignent respectivement les poids aux états humide et anhydre. Chaque échantillon est pesé sur une balance de précision (à 0,01g près) selon la méthode adoptée par Gonzalez Hernandez et al(2000) (Fig.54). L'humidité d'équilibre (H_c) est atteinte une fois la masse des planches devient pratiquement constante.

Les mesures de gonflement linéaire et volumétrique ainsi que les taux d'expansion en volume et en calibre ont été réalisés selon deux modes avant bouillage et après bouillage.



Liège brut incurvé avant bouillage



Redressement du cala et pesée après bouillage

Figure 54: Protocole expérimental au laboratoire relative à la technologie du liège

IV.2.1.3- L'aspect du liège

L'aspect du liège est défini selon la classification du CYCITEX (2020), sur la base des données fournies par le Coveless CQ 05, pour chaque échantillon sondé par l'instrument, une classe d'aspect lui a été validée (Tab.27).

Tableau 27: Classes d'aspect du liège de reproduction (CYCITEX, 2020)

Classe	Choix	Aspect
1		
2		
3		
4		
5		

Chaque classe d'aspect validée par le Coveless CQ 05 doit être aussi approuvée visuellement par l'occurrence des défauts ou les anomalies qui parcourent la section transversale puis calculées selon leurs fréquences absolues et relatives. A ce stade, chaque échantillon est minutieusement contourné et chaque défaut identifié est mentionné sur une fiche (Fig. 55).

Figure 55 : Préparation des échantillons pour l'opération d'identification des défauts de liège

Ces défauts sont examinés visuellement en interférant les facteurs ou les déterminants suivants (Dehane,2012):

a) Les déterminants extrinsèques: Anglobant, des défauts propres au matériau liés à sa structure et à sa texture externe, dont les variations au sein d'une série de rangs définissent sa qualité. Il s'agit des anomalies suivantes :

- Croûte du liège
- Etat de la mie du liège
- Etat du dos du liège
- Lignification verticale et horizontale
- Plaques terreuse
- Liège terreux

b) les déterminants extrinsèques: ils expriment la réponse de l'essence aux agents externes. Ce sont des défauts majeurs endogènes qui, lorsqu'ils se produisent, réduisent plus ou moins la qualité du produit. Les plus importants sont les suivants:

- Liège doublé
- Soufflures
- Liège vert
- Tache jaune
- Galeries d'insectes
- Liège âgé
- Autres taches

Par ailleurs, ces défauts sont rangés selon leur degrés d'aggravation qui envoient irrémédiablement la planche du liège à sa qualité réciproque définitive. Les défauts identifiés sont mentionnés dans base de données selon leur gravité, leur code .

IV.2.1.4- La croissance du liège

Les mesures des épaisseurs du liège ont été effectuées au moyen d'un pied de ligne d'une précision de 0,1 à 0,01mm puis vérifier par analyse d'image par le logiciel imageJ. Sur chaque échantillon est tracé cinq lignes verticales dans les deux sections transversales. La moyenne enregistrée pour chaque cala et celle des cinq mesures tracées verticalement (Fig.56).

Les épaisseurs des 240 calas sont ordonnées selon la classification commerciale de l'IPROCOR (2006) en lignes et en millimètres (Tab.28).

Tableau 28: Classes des calibres du liège en lignes et en mm (IPROCOR, 2006)

Classes	Epaisseur en ligne	Epaisseur en mm
1		
2		
3		
4		
5		

1ligne= 2,25mm

Afin d'adapter les épaisseurs au contexte algérien, nous avons fusionné les 5 classes en 3 classes commerciales et industrielles du liège (Tab.29).

Tableau 29: Homogénéisation des classes des calibres du liège (Chorana, 2021)

Classes	Epaisseur en mm	Appellation Commerciale	Appellation industrielle
1			
2			
3			

IV.2.1.5- La densité volumétrique du liège

La densité volumétrique est calculée selon la masse obtenue (kg) par unité de surface génératrice du liège (m^3) (longueur * largeur * épaisseur) (kg/m^3) (Tab.30).

Tableau 30: Classes de densité du liège (Gonzalez Hernandez , 2000)

Classes	Limite de densité (kg/m^3)

1		
2		
3		
4		

IV.2.1.6- La porosité du liège

La porosité est un paramètre principal de la technologie du liège défini par le volume occupé par les canaux lenticulaires qui se développent de la mie du liège vers l'écorce dans une direction à la fois radiale et transversale. La porosité est exprimée par le coefficient de porosité CP (%), dont les valeurs établissent des limites de qualité des lièges d'une récolte à des fins industrielles (Fortes et al., 2004).

Dans la présente thèse, la porosité transversale a été mesurée par le logiciel ImageJ à partir d'analyse d'image scannées suivant la méthodologie développée par Pereira et al(1996). Les pores ont une couleur plus foncée que la masse de liège et peuvent être délimités comme des objets sur l'image numérisée par sélection d'un niveau de gris ou coloré. Le dos du liège a été soustrait sur l'image avant sa manipulation pour qu'il ne soit pas considéré comme un objet dû à sa couleur sombre(Fig.57).

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

Les paramètres de calcul de la porosité (par le logiciel ImageJ) ont été déterminés pour chaque échantillon comme moyenne des deux images obtenues, correspondant aux deux sections transversales (Dehane, 2012):

- N° de pores par 10cm: nombre total de pores calculé sur 10cm de longueur de l'échantillon;
- Superficie moyenne des pores, en mm² ;
- Dimensions des pores en mm : longueur et largeur spécifiques ;
- Facteur de forme: $(4\pi*S)/P^2$ où S est la superficie et P le périmètre de l'objet ; ce paramètre mesure l'irrégularité du contour des pores, (1) pour un cercle, (0) pour les objets très irréguliers);
- Facteur de géométrie: quotient entre les diamètres minimum et maximum (une forme circulaire a la valeur 1 et linéaire 0).

IV.2.1.7- La compression du liège

Grâce à sa souplesse et sa compressibilité, le liège de reproduction est principalement utilisé technologiquement pour la fabrication des matériaux d'isolation aptes à supporter des poids et

des chocs énormes. Le module d'élasticité en compression le plus établi est donné par la formule de Hooke (Pereira, 2007) : $E = \sigma / \varepsilon$

Dans le cadre de cette these, les tests mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes avec une machine de compression modèle Testwell, l'appareil d'essai universel s'opère à vitesse de chargement réglable. Les essais de compression ont été réalisés à une vitesse de traverse constante de 2 mm min^{-1} (Fig.58) .

De chaque unité d'échantillonnage codée selon l'origine de la perturbation et de la provenance, 4 éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \text{ cm}$ sont découpées de l'échantillon de départ ($10 \times 10 \text{ cm}$). Un échantillon est tiré au hasard pour le test. L'axe de compression était, dans différents tests, verticale à la direction axiale, radiale et tangentielle.

La résistance à la compression mécanique (RCM) (exprimée en Megapascal(MPa)) est donnée par le rapport de la force (N) appliquée à la surface de contact (mm^2) (Pereira, 2007):

IV.2.1.8- Les indices de qualité

La fusion des classes du calibre à celles des aspects selon la nomenclature du CYCITEX (2020) définit 9 classes de qualité. Pour chaque classe est attribué un indice de qualité variant de 1,5 à 19,5 (Tab.31).

Tableau 31 : Classification utilisée pour estimer les indices de qualité (CYCITEX, 2020)

Type	Classe de qualité élargie	Indice de qualité
Q1		
Q2		
Q3		
Q4		
Q5		
Q6		
Q7		
Q8		
Q9		

IV.2.1.9- Analyse microscopique

L'analyse microscopique du tissu subéreux s'articule sur certaines caractéristiques biométriques à savoir les ondulations, la taille des cellules (rapport h/l), diamètre(μm), nombre de cellules par mm^2 , surface cellulaire (μm^2), l'épaisseur des parois(μm) selon les trois plan d'observation (Fig.59), (Pereira et al., 1992 ; Fortes et al.,2004). Les limites des anneaux de croissance sont marquées par une zone plus sombre composée de cellules de liège d'automne

aux parois cellulaires épaisses et aux dimensions plus petites. Toutes ces mesures ont été réalisées par le microscope électronique à balayage (MEB-HITACHI).

IV.2.2-Analyse statistique

Les analyses statistiques (ANOVA 1 et 2, moyenne, écart type, coefficient de Pearson, matrice de corrélation de Pearson et régression linéaire) ont été réalisées avec le logiciel statistique SPSS 21 et Xlstat.

IV.3-Résultats

L'aboutissement du protocole expérimental appliqué au liège des trois provenances est énuméré selon les paramètres technologiques quantifiés.

IV.3-1-Humidité du liège

Les résultats des mesures de l'humidité des lièges des trois provenances sont illustrés dans le tableau 33 selon l'origine de la perturbation.

Tableau 33: Humidité d'équilibre du liège des trois provenances

Classe de défoliation	Moyenne	N	Ecart-type
C1	7,9	122	2,27
C2	8,13	55	1,96
C3	8,08	63	2,30
Total	8	240	2,22

C1: Arbre non perturbé (Sain) ; C2 : Arbre modérément perturbé(Affaibli) ; C3:Arbre perturbé(Dépérissant)

L'humidité d'équilibre des planches de liège ainsi séchées était en moyenne de 8%. Aucune différence n'est observée entre les trois classes($p>0,05$). Cette moyenne concorde à celle indiquée par Pereira (2007) se rangeant entre 5 et 10% pour un séchage dans un milieu aéré.

IV.3-2-Etude du gonflement industriel du liège

IV.3-2.1-Gonflement linéaire

Selon les résultats du tableau 34, l'expansion du liège sous l'effet de la température de l'eau s'est manifesté par des gonflements linéaires variant respectivement pour les trois provenances $Gf^r(\%)$ (2,66 ; 3,76 ; 2,95), $Gf^r(\%)$ (2,44 ; 3,11 ; 2,69) ; $Gf^g(\%)$ (1,67 ; 2,31 ; 1,74). Les variations intra provenance semblent très marquées pour les trois types de gonflement avec des

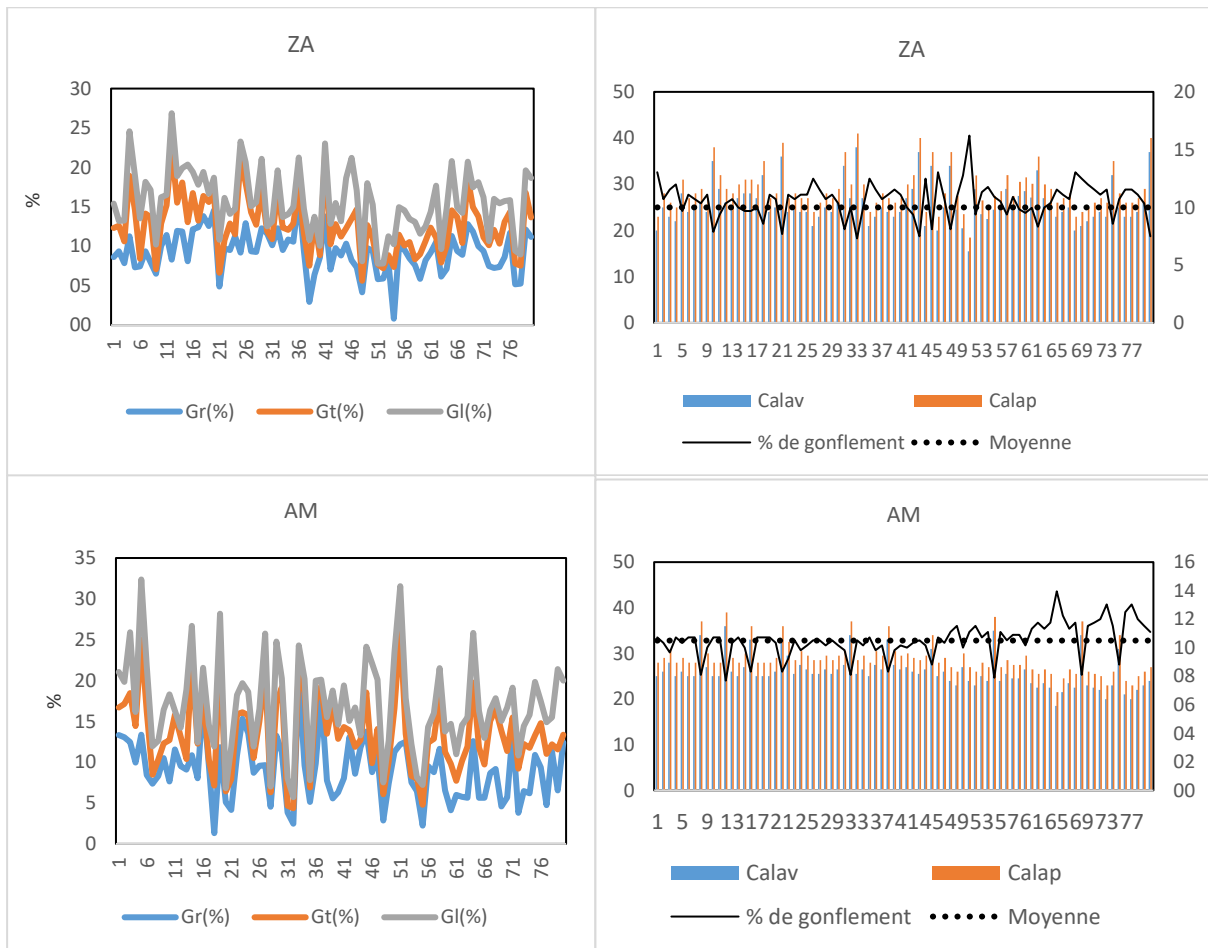
coefficients de variation oscillant de 28,69% -72,59 %-54,84% (ZA) ; 41,65% -69,57% - 65,65% (AM) et 36,84; 68,85; 54,29 (TA).

Tableau 34: Statistique descriptive du gonflement linéaire

	ZA			AM			TA		
	Gf ^r (%)	Gf ^{te} (%)	Gf ^{tg} (%)	Gf ^r (%)	Gf ^{te} (%)	Gf ^{tg} (%)	Gf ^r (%)	Gf ^{te} (%)	Gf ^{tg} (%)
Moyenne									
Ecart type									
CV									

Gf^r(%) :Gonflement radiale; Gf^t(%): Gonflement transversale: Gf^r(%) ; Gonflement tangentiel :Gf^{tg}(%)

A son tour l’expansion du calibre avant et après bouillage (Calav et Calap) suit le même cheminement pour les trois provenances en comptabilisant une moyenne totale de gonflement allant de 10%(ZA) ; 10,50%(AM) et 10,70% (TA) (Fig.60)



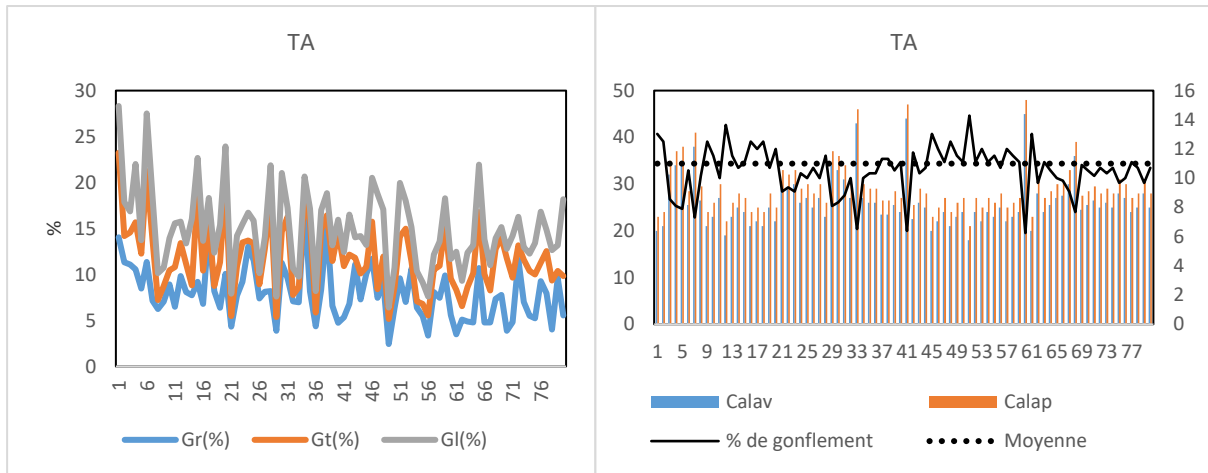


Figure 60 : Variation du gonflement linéaire selon les trois sections et par rapport au calibre (N=240)

Statistiquement, l'analyse de variance du gonflement lineaire en fonction du calibre est homogene sur les trois provenances ($p > 0,05$) (Tab.35).

Tableau 35: Analyse de variance du gonflement linéaire

ANOVA à 1 facteur						
		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Gf ^r	Inter-groupes	331,686	34	9,755	0,951	0,550
	Intra-groupes	2102,559	205	10,256		
	Total	2434,245	239			
Gf ^t	Inter-groupes	101,523	34	2,986	0,777	0,808
	Intra-groupes	788,256	205	3,845		
	Total	889,779	239			
Gf ^l	Inter-groupes	139,641	34	4,107	0,490	0,992
	Intra-groupes	1717,787	205	8,379		
	Total	1857,428	239			

IV.3-2.2-Gonflement volumétrique

Le gonflement volumique (Gf^V) d'une planche de liège n'est que la conséquence de l'expansion dimensionnel de son calibre (Largeur x hauteur x longueur) dans les trois sections radiale, transversale et tangentielle (Fig.61).

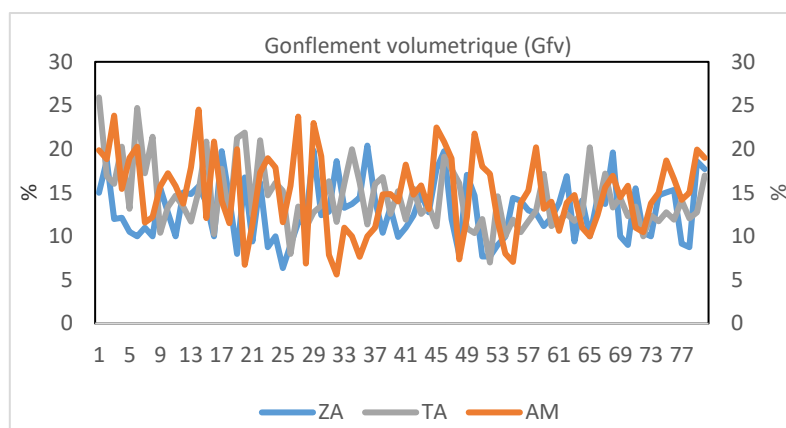


Figure 61: Variation du gonflement volumétrique selon les trois provenances (N=240)

Les fluctuations des gonflements volumétriques des 240 échantillons font état d'une variation peu marquée entre les trois provenances ($p=0,04$) soit des Gf^V moyens oscillant entre 13% (ZA), 14,95%(AM) et 14,42% (TA). Le maximum retenu est de l'ordre de 26% (TA) et le minimum aux alentours de 6%(ZA).

L'homogénéisation des taux de gonflement volumétrique des 240 échantillons selon l'origine de la perturbation environnementale à savoir les classes de déficit foliaire constaté lors du diagnostic de terrain est illustrée dans le tableau 36.

Tableau 36: Statistique descriptive du gonflement volumétrique

Classe de déficit foliaire	Provenance	Moyenne	Ecart-type	CV
C1	AM			
	TA			
	ZA			
	Total			
C2	AM			
	TA			
	ZA			
	Total			
C3	AM			
	TA			
	ZA			
	Total			
Total	AM			
	TA			
	ZA			
	Total			

Les résultats du tableau 36 indiquent un gonflement volumétrique moyen de l'ordre de 14,71% pour les arbres sains (C1), suivi d'un taux de 14,38% pour les cas affaiblis (C2) et 12,58% pour les lièges issus des arbres déperissants(C3)(Fig.62).

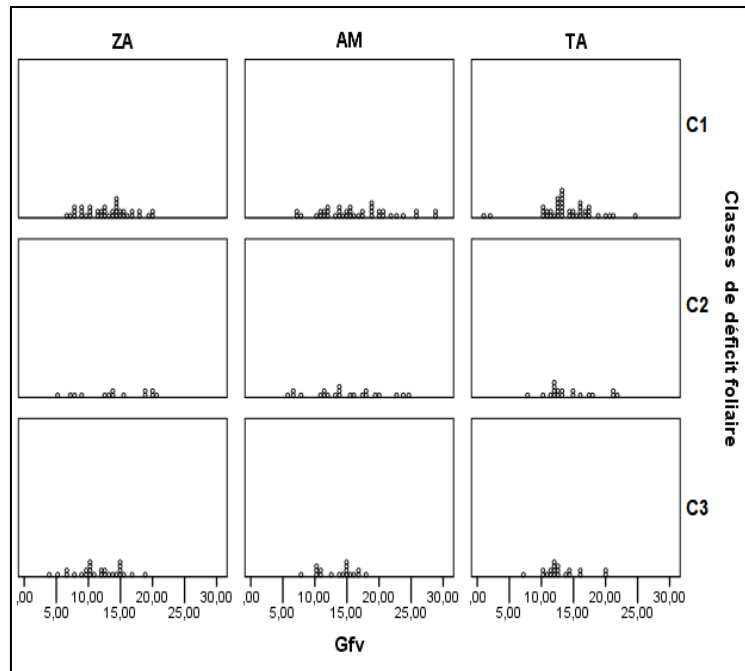


Figure 62 : Seuils des gonflements volumétriques selon le déficit foliaire dans chaque provenance

Selon la figure 62, au sein des sujets non perturbés de la classe C1, 55% des cas de gonflement sont comprises entre des Gf^V allant de 20 -25%. En revanche, les sujets perturbés de la classe C3; 60% des échantillons s’alignent dans la plage des 10-15%. Par ailleurs, pour les classes C2 de déficit foliaire, ce seuil peut aller de 15 à 20% dans 40% des cas.

L’analyse univariée enregistre une différence significative en intégrant séparément le gonflement volumétrique au déficit foliaire et à la provenance ($p < 0,05$ (Tab.37)).

Tableau 37: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante: Gf^V

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	505,099 ^a	8	63,14	3,58	0,001
Ordonnée à l'origine	40510,53	1	40510,53	2299,93	0,000
Déficit foliaire	163,46	2	81,73	4,64	0,011
Provenance	154,14	2	77,07	4,38	0,014
Déficit * Provenance	54,90	4	13,73	0,78	0,540
Erreur	4068,78	231	17,61		
Total	51979,99	240			
Total corrigé	4573,88	239			

IV.3.3-Aspect du liège

La distribution des classes d’aspect du liège est illustrée dans la figure 63.

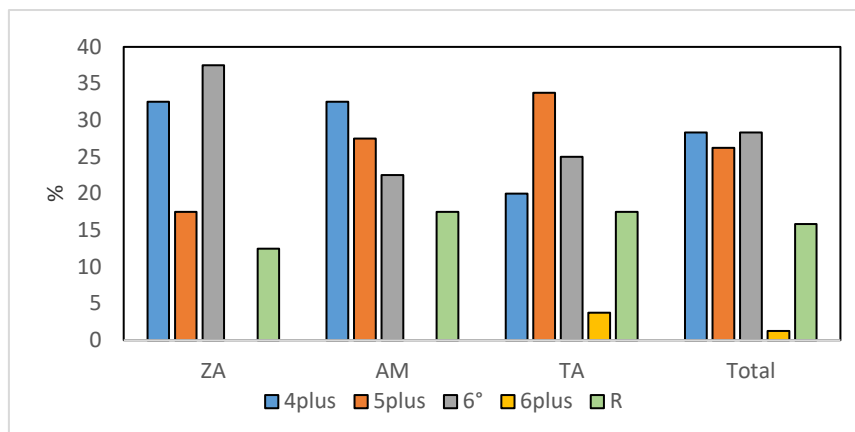


Figure 63: Fréquence relative des classes d'aspect du liège selon la provenance

Selon la figure 63, l'aspect analysé sur les 240 échantillons est réparti entre 26,25% « 5plus », 28,33% « 6° » et 28,33% « 4plus ». A l'opposé, la classe « R » participe avec 15,83%. Une infime occurrence du liège 6plus a été identifiée uniquement sur les échantillons de Tagdempt avec un taux de 1,25% seulement. Par ordre de provenance, les échantillons de Tagdempt détiennent la plus grande fréquence de l'aspect « 5plus » avec 33,75% suivi de ceux d'Ami-Moussa avec 27,5% et de Zariéffet (17,5%). En revanche l'aspect « 6° » est bien présent sur les planches de Zariéffet avec un taux de 37,5% alors que l'aspect « R » est équitablement distribué entre TA(17,5%) et AM (17,5%).

La répartition des aspects selon le degré de la perturbation indique la présence de 18,33% de la classe « 5plus » au sein des échantillons issus des cas non perturbés (C1) ; 4,58% dans les sujets modérément perturbés (C2) et 3,75% dans ceux perturbés (C3) (Fig.64). De son côté, l'aspect « 6° » passe de 13,33% dans la classe saine(C1) à 9,17% dans la classe affaibli(C2), et 6,67% dans celle déperissante(C3). En ce qui concerne l'aspect « 4plus » la figure 64 mentionne 13,33% pour les planches des arbres sains ; 3,33% pour ceux affaiblis et 10,83% pour les déperissants. L'aspect « R » faisant référence au liège rebut est moins associé aux échantillons des arbres sains(C1) et ne présente que 3,75%. D'ailleurs, il passe de 5,83% dans la classe affaiblie(C2) à 6,25% dans celle déperissante(C3) (Fig.64).

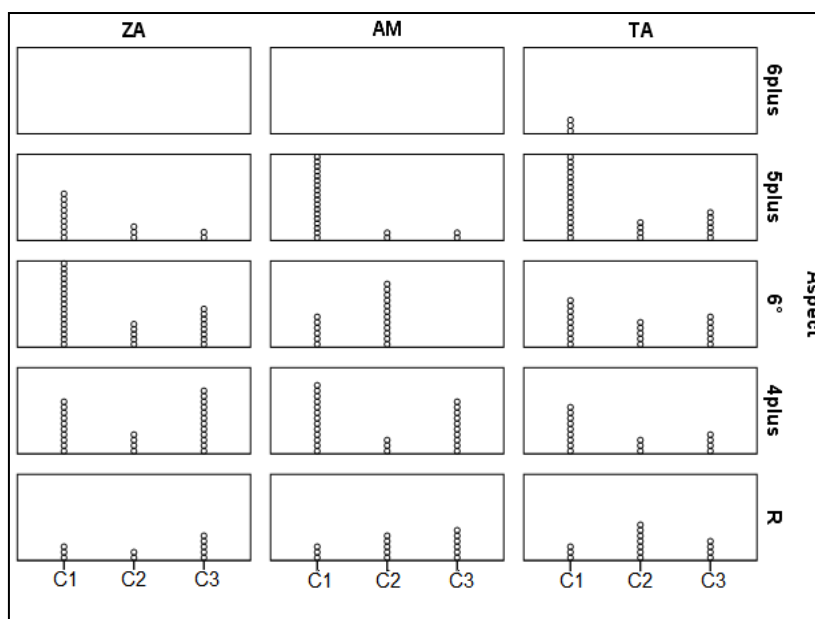


Figure 64: Distribution relative des classes d'aspect selon le déficit foliaire dans chaque provenance

La figure 64 met en exergue la présence marquée de l'aspect « 5plus » dans la catégorie saine des provenances AM (23%), 21%(TA) et 11% (ZA). Par contre ces fréquences rétrogradent pour atteindre seulement 3% (AM), 8%(TA) et 1% (ZA) dans la catégorie déperissante. Il en est de même pour l'aspect « R » qui enregistre les mêmes taux de 4% (AM, TA et ZA) dans la classe saine progresse ensuite vers des fréquence élevées dans la catégorie perturbée (8% (AM), -%(TA) et 5% (ZA)). L'analyse univariée enregistre une différence significative en intégrant individuellement l'aspect au déficit foliaire et à la provenance ($p < 0,05$ (Tab.38)).

Tableau 38: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante aspect du liège

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	56,426 ^a	8	7,053	3,901	0,000
Ordonnée à l'origine	2124,588	1	2124,588	1175,135	0,000
Déficit foliaire	38,674	2	19,337	10,696	0,000
Provenance	4,775	2	2,387	1,321	0,269
Déficit foliaire * Provenance	10,528	4	2,632	1,456	0,217
Erreur	417,637	231	1,808		
Total	2725,000	240			
Total corrigé	474,063	239			

a. R deux = 0,119 (R deux ajusté = 0,089)

IV.3.4-Croissance du liège

Les résultats relatifs aux mesures des épaisseurs du liège selon les trois provenances et les classes d'état sanitaire sont mentionnés dans le tableau 39.

Tableau 39: Statistiques descriptives de la variable dépendante calibre du liège

Provenance	Classe de déficit foliaire	Moyenne (mm)	Ecart-type	N	%	CV
AM	C1					
	C2					
	C3					
	Total					
TA	C1					
	C2					
	C3					
	Total					
ZA	C1					
	C2					
	C3					
	Total					
Total	C1					
	C2					
	C3					
	Total					

Selon le tableau 39, le calibre moyen enregistré sur les 240 échantillons est de l'ordre de 26mm, il s'agit d'un liège mince typique des aires de montagnes. Cette moyenne se distribue entre 26,95mm (122 arbres non perturbés-C1), 25,55mm (55 arbres modérément perturbés-C2) et 24,57mm (63 arbres perturbés-C3). Une variation intra-arbre a été décelée soit des coefficients de variation oscillant entre 13,45%(AM), 20%(TA) et 16,61%(ZA).

Point de vue provenance, dans la catégorie non perturbée, la figure 65 fait respectivement état de 39 échantillons de liège mince à ordinaire à Zariéffet, 40cas (AM) et 43cas (TA) ce qui représentent respectivement des fréquences relatives de 48,75% ; 50% et 53,75%. Une infime quantité de liège épais a été constatée sur les provenances de Tagdempt (3 cas ; 3,75%).

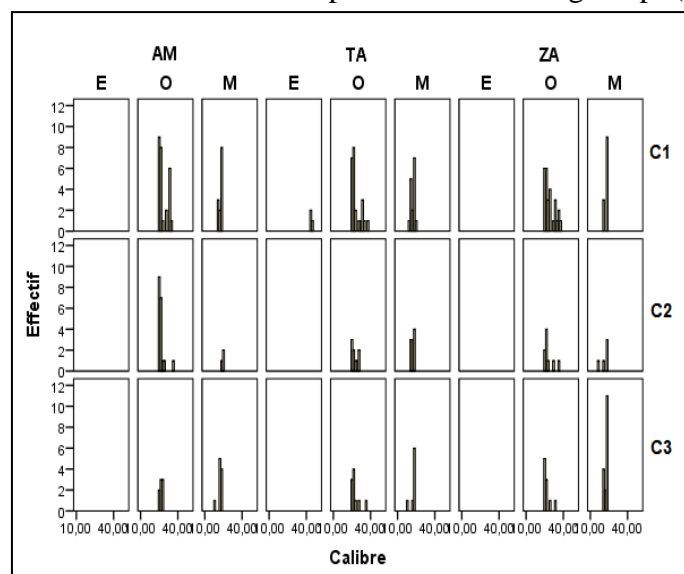


Figure 65: Distribution absolue des classes de calibre selon le déficit foliaire dans chaque provenance

En ce qui concerne, la catégorie modérément perturbée ces deux classes détiennent respectivement entre fréquence absolue et relative : ZA (14cas ; 17,5%), AM (22cas ; 27,5%), TA(19cas.23,75%). Ce résonnement s'applique aussi à la catégorie perturbée: ZA (27cas ;33,75%), AM(18cas ; 22,5%), TA(18cas ; 22,5%).

L'analyse de variance indique une différence très significative en prenant en compte uniquement l'épaisseur du liège selon le déficit foliaire ($p < 0,000$) (Tab.40).

Tableau 40: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante calibre du liège

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	319,265 ^a	8	39,91	2,16	0,032
Ordonnée à l'origine	136667,11	1	136667,11	7382,33	0,000
Provenance	0,47	2	0,23	0,01	0,987
Déficit foliaire	233,23	2	116,61	6,30	0,002
Provenance * Déficit foliaire	67,49	4	16,87	0,91	0,458
Erreur	4276,44	231	18,51		
Total	166892,91	240			
Total corrigé	4595,70	239			

IV.3.5-Densité volumétrique

Le tableau 41 illustre les mesures de densité volumétrique relevées sur les 240 échantillons par ordre de déficit foliaire

Tableau 41: Statistiques descriptives de la variable dépendante densité volumétrique du liège

Provenance		Moyenne kg/m ³	Ecart-type	%	CV	Max	Min
AM	C1						
	C2						
	C3						
	Total						
TA	C1						
	C2						
	C3						
	Total						
ZA	C1						
	C2						
	C3						
	Total						
Total	C1						
	C2						
	C3						
	Total						

Les résultats du tableau 41 mettent en évidence une densité moyenne totale de 224,45kg/m³ soit un liège de densité acceptable. Cette dernière se répartisse entre 214,60 kg/m³ (Sujets non perturbés-C1), 224,82 kg/m³(Sujets modérément perturbés-C2) et 243,21kg/m³(Sujets perturbés-C3).

Dans la classe non perturbée (C1), la figure 66 associe respectivement une moyenne de 211,82 kg/m³ à une fréquence absolue de 40 cas (AM); 247,65 kg/m³ à 43 cas (TA) et 181,00 kg/m³ à 39 cas (ZA). Ce qui est de la classe modérément perturbée (C2), 22 échantillons enregistrent une densité moyenne de 214,36 kg/m³ (AM), 19 échantillons une moyenne de 269,58 kg/m³(AT) et 14 échantillons une moyenne de 180,49 kg/m³. Concernant, la classe perturbée(C3), les trois provenances réalisent respectivement des effectifs de 18 (AM), 18(TA) et 27(ZA) pour des moyennes analogues à 241,09 kg/m³ ; 297,72 kg/m³ et 208,29 kg/m³. La variation intra-échantillons dans la même classe de déficit foliaire est marquée, elle enregistre 14,20% ; 18,14%; 18,14% et 18,26%.

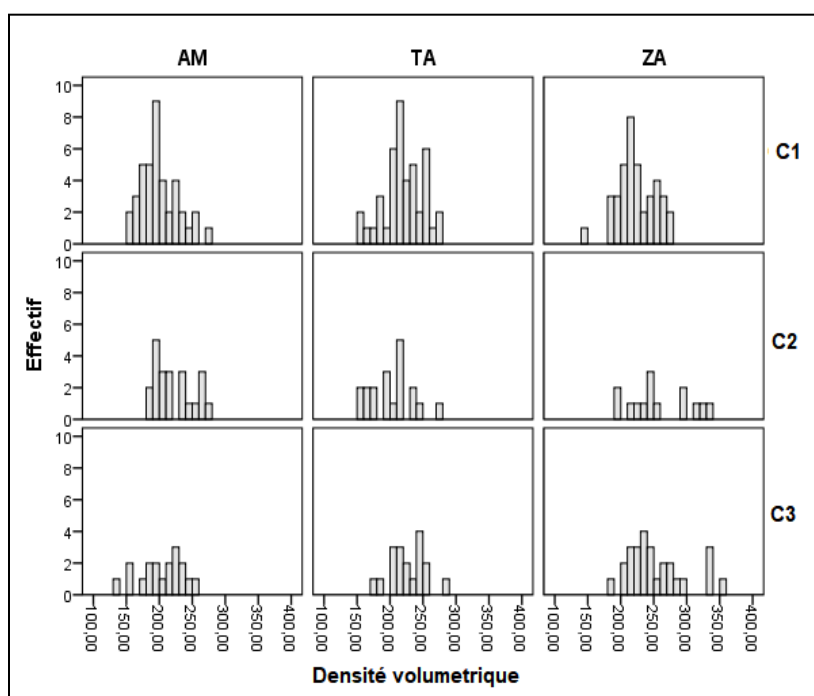


Figure 66: Distribution absolue des classes de densité selon le déficit foliaire dans chaque provenance

L'analyse de variance indique une différence très significative en superposant la densité volumétrique au déficit foliaire et à la provenance ($p < 0,001$) (Tab.42).

Tableau 42: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante densité volumétrique du liège

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	79603,113 ^a	8	9950,39	9,32	0,000
Ordonnée à l'origine	10344391,95	1	10344391,95	9693,63	0,000
Provenance	50743,39	2	25371,70	23,78	0,000

Etat de défoliation	11027,36	2	5513,68	5,17	0,006
Provenance * Etat de défoliation	23103,72	4	5775,93	5,41	0,000
Erreur	246507,65	231	1067,13		
Total	12103825,44	240			
Total corrigé	326110,77	239			
a. R deux = 0,244 (R deux ajusté = 0,218)					

IV.3.6-Porosité

La caractérisation de la porosité par analyse d'image numérique est élucidée dans le tableau 43.

Tableau 43: Statistiques descriptives de la variable dépendante porosité du liège

Déficit foliaire	Provenance	Moyenne (%)	Ecart-type	%	Min	Max	CV
C1	AM						
	TA						
	ZA						
	Total						
C2	AM						
	TA						
	ZA						
	Total						
C3	AM						
	TA						
	ZA						
	Total						
Total	AM						
	TA						
	ZA						
	Total						

Le tableau 43 met en relief une porosité moyenne globale de 4,90% c'est-à-dire un liège à porosité moyenne. Une montée en crescendo s'observe de la classe 1 (de déficit foliaire C1) vers la classe C3 soit une porosité de 3,99% pour un effectif de 122 cas issus de sujets non perturbés; 4,28% pour 55 cas modérément perturbés-C2 et 7,23% pour les 65 perturbés-C3. La variation intra-sujets est très marquée pour les classes de perturbation et des provenances (CV>22,43%).

A travers la figure 67, le minimum et le maximum enregistré dans chaque classe de perturbation passe respectivement de 1,4 à 7% (non perturbé-C2), de 3 à 5% (modérément perturbé-C2) et de 3,5 à 13% (perturbé-C3).

Figure 67 : Oscillation de la porosité selon les classes de défoliation et la provenance

L'analyse des effets inter-sujets mentionne une différence très significative en superposant séparément et conjointement la porosité au déficit foliaire et à la provenance ($p < 0,001$) (Tab.44).

Tableau 44: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante porosité du liège

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	556,873 ^a	8	69,609	27,905	0,000
Ordonnée à l'origine	5530,809	1	5530,809	2217,227	0,000
Provenance	29,759	2	14,879	5,965	0,003
Déficit foliaire	487,490	2	243,745	97,714	0,000
Provenance * Etat de défoliation	62,639	4	15,660	6,278	0,000
Erreur	576,223	231	2,494		
Total	6905,300	240			
Total corrigé	1133,096	239			

a. R deux = 0,491 (R deux ajusté = 0,474)

IV.3.7-Analyse mécanique

Les résultats des tests mécaniques sous des forces de compression verticales sont synthétisés dans le tableau 45.

Tableau 45 : Statistique de la variable dépendante compression mécanique du liège

Déficit foliaire	Provenance	Moyenne(MPa)	Ecart-type	%	CV (%)	Min	Max
C1	AM						
	TA						
	ZA						
	Total						
C2	AM						
	TA						
	ZA						
	Total						
C3	AM						
	TA						
	ZA						
	Total						
Total	AM						
	TA						
	ZA						
	Total						

Globalement, le liège des trois provenances est totalement comprimé sous une force moyenne de 14,70MPa. Cette force de compression varie d'un échantillon à un autre (CV=24,66%). Elle enregistre respectivement 14,73MPa (AM), 16,28MPa (TA) et 13,10MPa (ZA).

La figure 68 discerne clairement la résistance mécanique du liège selon les trois classes de déficit foliaire. Dans la classe non perturbée(C1), les 122 échantillons de liège se concentrent massivement dans les rangs compris entre 12,08 - 15,20 Mpa. Dans la classe modérément perturbée(C2) (55 échantillons), la représentativité est plus condensée dans les rangs allant de 13,12 à 16,85 MPa; soit une moyenne de l'ordre de 14,92 MPa. Enfin, la classe perturbée(C3) (63 échantillons), la moyenne enregistrée de 15,98 Mpa s'aligne aux rangs chevauchant entre 14,58 et 18,24 MPa. Cela signifie que la résistance du liège est proportionnée à l'aggravation de la perturbation.

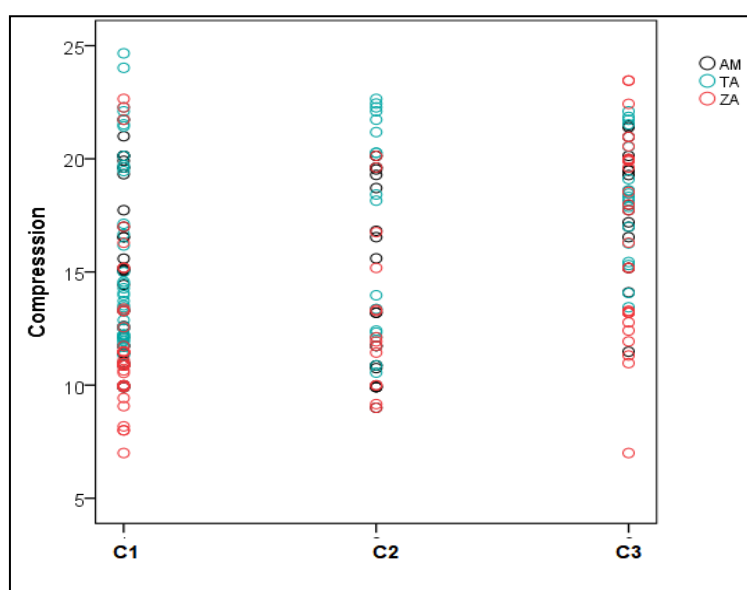


Figure 68 : Variabilité de la résistance mécanique selon le déficit foliaire et la provenance

L'analyse de variance reflète une différence très significative en associant individuellement la compression du liège au déficit foliaire et à la provenance ($p < 0,001$) (Tab.46).

Tableau 46: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante compression mécanique du liège

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	655,433 ^a	8	81,93	5,462	0,000
Ordonnée à l'origine	46341,26	1	46341,26	3089,18	0,000
Déficit foliaire	217,59	2	108,79	7,25	0,001
Provenance	417,34	2	208,67	13,91	0,000
Déficit foliaire * Provenance	28,29	4	7,07	0,47	0,757
Erreur	3465,27	231	15,00		
Total	56003,18	240			
Total corrigé	4120,70	239			

a. R deux = 0,159 (R deux ajusté = 0,130)

IV.3.8-Indice de qualité

L'interprétation des données relatives aux calculs des indices de qualité du liège fait état d'un indice moyen (IQ) de l'ordre de 8,44 faisant référence à une qualité juste moyenne(Tab.47).

Tableau 47 : Description statistique de la variable dépendante indice de qualité (IQ)

Déficit foliaire		Moyenne	Ecart-type	Min	Max	CV(%)
C1	AM					
	TA					
	ZA					
	Total					
C2	AM					
	TA					
	ZA					
	Total					
C3	AM					
	TA					
	ZA					
	Total					
Total	AM					
	TA					
	ZA					
	Total					

Le tableau 47 se rapportant aux variables paramétriques dévoile des variations statistiques (CV=48,47 à 75,91%) et par conséquent atteste une différence intra-arbres très significative. Le minimum obtenu correspond au liège rebut (IQ=1,5) et le maximum (IQ=19,5) équivalent au liège de bonne qualité. La moyenne enregistrée varie entre 8,38 (ZA), 8,41(TA) et 8,54(TA).

L'addition des indices de qualité aux classes de défoliation manifestent une tendance à la régression pour les sujets perturbés(IQ=7) et modérément perturbés (IQ=7,20). La classe non perturbée(C1) manifeste un indice de qualité très satisfaisant (IQ=9,73).

La figure 69 mentionne une présence peu marquée des IQ très faible (IQ= 1,5) dans la classe C1 et pour les trois provenances, soit une fréquence relative moyenne de 3,75%. D'ailleurs, elle progresse significativement dans la classe C2 et C3(5,41% et 13,75%).

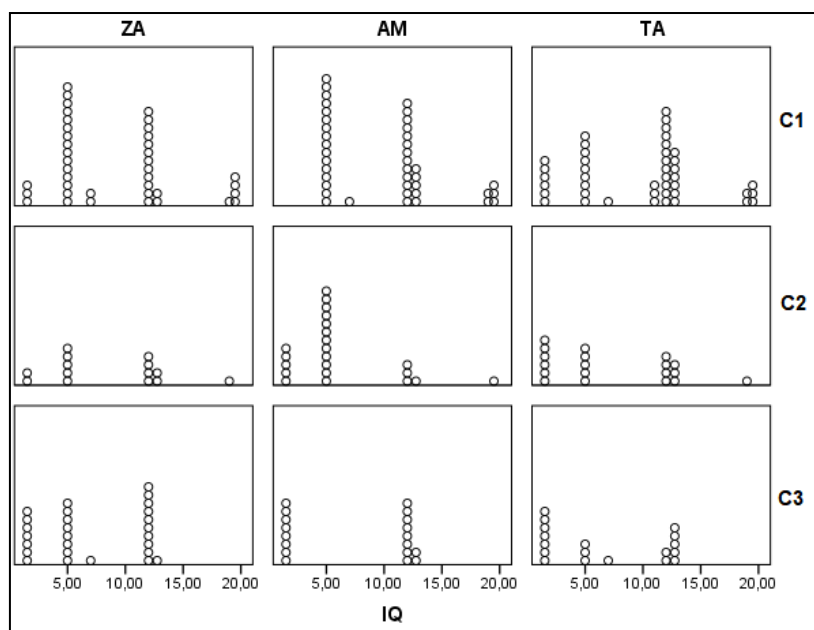


Figure 69 : Fréquence absolue des indices de qualité selon le déficit foliaire et la provenance

En ce qui concerne les IQ de qualité moyenne (IQ=12), la figure ci-dessus rapporte un taux moyen de l'ordre de 15,41% (C1) ; 4,58% (C2) et 8,33% (C3). En revanche, les IQ de qualité bonne à très bonne (IQ=19 et IQ=19,5) semblent plus accentués dans la classe C1 (6,25%), très faibles dans C2 (1,25%) et totalement absents dans la classe C3 (0%).

L'analyse de variance Anova 2 confirme la significativité du test en superposant les indices de qualité au déficit foliaire ($p=0,001$) et non aux provenances ($p>0,05$) (Tab. 48).

Tableau 48: Tests des effets inter-sujets de la variable dépendante indice de qualité du liège

Source	Somme des carrés de type III	ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
Modèle corrigé	482,366 ^a	8	60,30	2,31	0,021
Ordonnée à l'origine	13393,06	1	13393,06	512,14	0,000
Etat de défoliation	377,97	2	188,99	7,23	0,001
Provenance	6,47	2	3,24	0,12	0,884
Etat de défoliation * Provenance	71,49	4	17,87	0,68	0,604
Erreur	6040,88	231	26,15		
Total	23634,50	240			
Total corrigé	6523,24	239			

a. R deux = 0,074 (R deux ajusté = 0,042)

IV.4-Discussion des mesures technologiques du liège

La technologie du liège en fonction de la perturbation environnementale « déficit foliaire des cimes » n'a jamais été évoquée suffisamment en Algérie hormis le travail de Dehane. (2012). En effet, le liège est un matériau hétérogène à structure interne composée

essentiellement de cellules mortes, hermétiques remplies de gaz vraisemblablement similaire à l'air (Gibson,1981). Cette structure typique est responsable de son poids spécifique très faible, offrant à son tissu un allongement facile sous contrainte, et un rétrécissement rapide lorsqu'il est comprimé, induisant des usages industrielles et domestiques indéniables.

Au niveau de l'arbre, ce tissu mort est superposé à deux assises génératrices dont l'une interne sous le liber ((cambium vasculaire) qui bénéficie constamment des facteurs du milieu (eau et élément minéraux) à l'origine de l'opération de photosynthèse et de la formation foliaire et radiale, et une deuxième assise externe sur le liber (cambium corticale) qui forme le phellogène responsable de la division de nouvelles cellules du liège.

Les récoltes successives du liège (sur l'arbre) comprennent une perte d'eau accrue de la surface exposée aux aléas extérieurs, ce qui peut induire une diminution de l'activité stomatique (réduction de l'activité biologique de l'arbre) et à une mauvaise cicatrisation du tronc par le nouveau liège (Pereira,1988). La croissance de l'arbre (bois) est également affectée par l'extraction du liège avec une diminution considérable de la largeur des cernes et une anatomie perturbée (Baptista et Vaz,1993). Dans le cycle de production du liège (10 à 15 ans), les perturbations environnementales (sécheresse climatique, déficit hydrique du sol, pollution, incendie et dépérissement) que subissent les subéraies sont directement captées par le tissu subéreux sous forme d'anomalies diverses: croissance subéreuse annuelle très rapide ou très lente, porosité excessive, incursion ligneuse dans le suber, dureté exagérée au toucher, coloration et taches visibles, en plus des galeries d'insectes. En terme de qualité, ces protubérances limitent le prix du liège et le rendent impropre à tous usage sauf la trituration, une incidence fâcheuse sur la gestion des subéraies remplacée par l'abandon et l'indifférence (Dehane, 2019).

La technologie liège est une filière économique très rentable dans les pays subéricoles, notamment au Portugal et en Espagne, il s'agit d'une chaîne de production qui s'amorce depuis la récolte en forêt jusqu'à la transformation industrielle finie du produit (Gil,1998).

IV.4.1-Le bouillage industriel du liège

Le premier paramètre technologique de la transformation du liège (en usine) est son bouillage qui détermine son taux de gonflement linéaire et volumétrique. Tout liège doit être bouilli avant d'être travaillé pour le rendre moins dense et plus souple, et pour que les lenticelles ou les pores se rétrécissent. La bibliographie dans ce sens affirme qu'avant le bouillage, les cellules du liège sont entassées et froissées, mais après contact avec l'eau en ébullition (pendant environ 1h à 1h30), le gaz à l'intérieur des cellules se dilate pour créer une structure cellulaire droite et uniforme (Lopes et al., 2000).

Les résultats obtenus dans cette thèse mentionnent un gonflement volumétrique moyen de l'ordre de 14,71% pour les 122 arbres sains (non perturbés-C1), suivi d'un taux de 14,38% pour les 55 cas affaiblis (modérément perturbés-C2) et 12,58% pour les lièges issus des 63 arbres déperissants (perturbés-C3).

Ces constatations ne s'éloignent pas à celles révélées par Dehane (2012) pour le liège de la même région. D'ailleurs, nos résultats semblent éloignés des seuils indiqués dans d'autres travaux non reliés au déficit foliaire. Au Portugal, selon Rosa et al(1990), les variations dimensionnelles qui en résultent sont d'environ 10 à 15% dans la direction radiale, 5 à 7% dans

les directions axiale et tangentielle, avec une augmentation de volume d'environ 30%. A son tour Cumbre et al(2000) étayent que l'expansion totale du calibre était en moyenne de 4,2 mm, ce qui correspond à une augmentation de 14% de la dimension initiale.

Dans ce contexte, la présente thèse atteste, un gonflement volumétrique moyen globale de 14,05% avec des gonflements linéaires variant respectivement pour les trois provenances $Gf^r(\%)$ (2,66 ; 3,76 ; 2,95), $Gf^t(\%)$ (2,44 ; 3,11 ; 2,69) ; $Gf^l(\%)$ (1,67 ; 2,31 ; 1,74), et une expansion calibrage moyenne de 10,35%. Dans notre opinion, cette nette différence de dilatation du tissu subéreux est imputée principalement à la croissance annuelle du liège qui dépasse les 3,5mm/an(Portugal) (Pereira, 2007) alors qu'elle s'estompe dans les 2,1mm/an dans la zone d'étude (Chorana, 2021). Il s'agit d'un gonflement plus au moins partiel. En effet, le redressement n'est optimal qu'avec une température au-dessus de 250°C (Rosa et al.,1990).

A travers les résultats obtenus, nous pouvons déduire que le gonflement du tissu subéreux est fortement relié à sa structure géométrique de type ondulée. Ces ondulations proviennent essentiellement du stress de croissance qui prend d'ampleur lorsque de nouvelles assises subéreuses sont poussées contre les anciennes et viennent heurter les boucles des parois latérales (Pereira et al.1987; Rosa et Fortes,1988).

Durant le bouillage, l'absorption de la vapeur d'eau pendant son ébullition ramollit les parois cellulaires, alors que les différences de pression entre les cellules adjacentes induisent des contraintes de traction assez hautes pour redresser les parois (Rosa et al., 1990). Le bouillage est considéré donc comme un traitement de soulagement au stress en éliminant la légère courbure des bords du liège (Fig.70 et 71).

Dans les conditions normales de végétation des arbres productifs, la zone d'étude est très connue pour produire du liège mince, de ce fait la transition entre le liège de printemps et celui de l'été-automne n'est pas visible du point de vue anatomique. Selon Dehane (2006), ce type de liège se caractérise par 80% des cellules à taille réduite et aux parois épaisses, avec des ondulations faibles dans les trois sections d'observation.

Avec l'accentuation de la perturbation, la perte de l'alimentation hydrique et minérale se répercute sur la photosynthèse et le fonctionnement du parenchyme chlorophyllien par le blocage des transports des assimilats vers les chloroplastes, il s'ensuit un dysfonctionnement du cambium et du phellogène et chute anormale des feuilles (Silva, 1996 ; Cumbre et al., 2000). En effet, le liège produit par ces arbres est très mince, aux parois très dures sans ondulations visibles qui n'arrivent pas à se redresser sous la température du bouillage.

Anatomiquement, l'expansion du liège avec le bouillage a été expliquée par les changements structurels des cellules correspondant à l'atténuation des ondulations des parois cellulaires (Rosa et al., 1990). Le modèle d'ondulation des cellules du liège peut varier considérablement en raison des différentes contraintes tangentielles et radiales causées par la croissance meristématique de l'arbre. En effet, certaines cellules de taille amincies sans ondulations restent droites, d'autres ayant des parois presque plates, d'autres présentant des ondulations régulières et souvent sans ondulations ou même un effondrement dans les cas extrêmes (Pereira et al., 1987). Les différences dans l'étendue des ondulations sont susceptibles d'expliquer la variabilité observée sur la variation dimensionnelle avec le bouillage à la fois sur les volumes et les calibres des échantillons.

IV.4.2- Les paramètres de la qualité visuelle

IV.4.2.1- L'apparence externe du liège

Le deuxième paramètre technologique du liège est imputé à sa qualité visuelle ou son aspect externe. Cet attribut si complexe est évalué traditionnellement par un opérateur humain, d'une manière visuelle, et seuls les professionnels du liège par leur contact permanent avec la matière arrivent à définir les classes d'aspect. Depuis les années 2000, l'aire de l'automatisme est survenue à la rescousse par l'application de la vision artificielle par analyse d'images numériques et par l'utilisation des capteurs optiques couplés à un générateur à rayons X (Benkirane,2001).

L'aspect du liège définit le côté qualitatif d'une planche. Il règle la valeur marchande et les orientations industrielles d'une récolte. Techniquement, cet attribut est lié à plusieurs paramètres d'ordre physico-chimique et même phytopathologiques (Pereira, 2007). Ces derniers ont une incidence capitale sur les propriétés hermétiques, de souplesse, d'imperméabilité, d'esthétique, de couleur et de comportement mécanique (González Adrados et al.,1993).

Selon Monterro (2004), l'aspect du liège est régi par deux paramètres: l'un extrinsèque visible à l'œil nu comprenant certaines limitations macroscopiques du produit à savoir la porosité, la densité, l'état du dos et de la mie, la couleur externe du suber, et les anneaux de croissance du liège. Le deuxième paramètre de nature occasionnelle est relié aux altérations plus au moins abondantes internes qui rongent le tissu subéreux et le remplacent totalement par d'autres matériaux que le suber, dans ce cas on cite les défauts de soufflures, les crevasses, les diverses taches, le liège terreux et les inclusions ligneuses.

Le sondage au coveless a révélé l'occurrence des cinq classes d'aspect usuelles avec des fréquences relatives variées : 1,25% «6plus » ; 26,25% « 5plus » ; 28,33% « 4plus » ; 28,33% «6°» et 15,83% «R» . Cette dernière fréquence synonyme de liège délabré confirme que l'aspect n'est pas à son haut niveau.

En répartissant l'aspect « R » selon les trois classes de perturbation il s'est avéré qu'il s'accroît dans les échantillons des arbres dépérissants(C3) et représente 6,25% par rapport aux sujets sains(C1) (3,75%) et affaiblis (C2) (5,83%). La même remarque concerne l'aspect « 5plus » (analogue à un liège sain) diminuée fortement dans la classe perturbée (4,16%) contre 18,33% dans celle non perturbée(Fig.72).

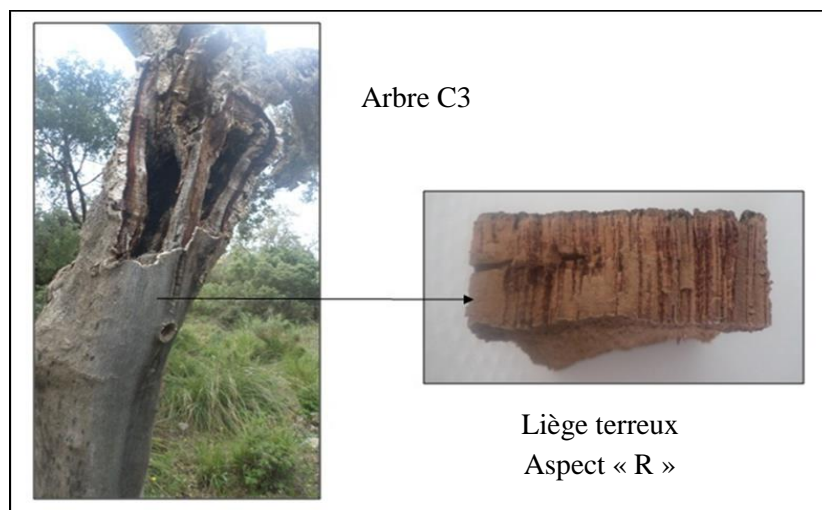


Figure 72 : Liège terreux produit par un sujet perturbé de la classe C3

La superposition de classes d'aspect selon l'origine des altérations(défauts) et le degré de perturbation est illustrée dans la figure 73.

Figure 73: Distribution des fréquences absolues des anomalies selon les le classes du déficit foliaire

La figure 73 montre clairement que les échantillons issus des arbres non perturbés «C1» sont plus infectés par de défauts mineurs sans incidence profonde sur l'aspect du liège. Il s'agit en effet des anomalies de l'état de la mie, l'état du dos et la croûte, qui par conséquent représentent 73,77% d'occurrences, et bien associés aux aspects « 6° » (22,13%), 18% « 6plus » et 17% « 4plus ».

Ces trois anomalies se présentent sous forme d'ouvertures et de crevasses de diamètres et de longueurs irrégulières du côté de la croûte et du ventre provoquées par l'irrégularité de la mère du liège, des renflements et les déformations sous l'effet de plaies d'écorçage et d'attaques de parasites (Garcia de Ceca, 2001 ; Santiago Beltrán, 2020) (Fig.74).

Figure 74 : Exemples de défauts mineurs (a : état du dos, b : état de la mie, c : épaisseur de la croûte)

Pour les sujets modérément perturbés « C2 », une nette représentativité est corrélée aux anomalies de soufflures et d'incrustation ligneuse avec un taux de 14,5% chacune, bien ancré dans l'aspect " « 6plus » et « 6° ». Ces deux défauts considérés comme majeurs ont un impact négatif sur l'aspect du liège.

Pour le premier défaut, le tissu subéreux est parsemé de canaux intra-tissulaires de grand diamètre, ouverts et plus ou moins déformés, en forme de losange en section transversale. Cette déformation est due en générale à une activité subéreuse intense, du fait des caractéristiques hydriques des sols hydromorphes (Pereira, 2007 ; Dehane, 2012).

Pour le deuxième défaut, le liège présente des tissus lignifiés sclerenchymateux (nodules en bois) dans l'épaisseur du liège, ce qui le rend plus dur et plus dense. La cause de ce défaut est

reliée au mauvais fonctionnement du phellogène. Certains auteurs l'associent à des pourcentages élevés de calcaire par endroit autour des arbres (Dehane, 2019 ; Santiago Beltrán, 2020) (Fig.75).

Figure 75 : Liège présentant des tissus lignifiés et sclérenchymateux

En ce qui concerne, les échantillons émanant des sujets perturbés « C3 », deux défauts graves entachent le tissu subéreux soit par le liège terreux ou les plaques terreuses, avec un degré moins le liège doublé. Les deux premiers défauts sont occurrence avec taux de 22% et 19%, et ils sont bien représentés dans l'aspect « R » avec 11% et 9,53%.

Le liège dit « terreux » est remplacé totalement par une matière pulvérulente autour des pores, présentant un matériau lâche et poudreux, plus ou moins compact (qui détache facilement en le grattant). Pour le liège sous forme de plaques terreuses, le suber présente des canaux lenticulaires de forme conique dont la base est tournée vers la mie. Ces canaux, bien localisés, sont remplis de matière pulvérulente rougeâtre (Natividade, 1956, Adrados et al, 2005). La cause de ces deux anomalies sont reliées à une mauvaise alimentation hydrique et minérale du sol (Sanchez-Gonzalez et al., 2023) (Fig.76). En revanche, le liège doublé est synonyme d'un nouveau liège néoformé après un stress intense, qui dans notre cas est issu du dépérissement.

Figure 76 : Anomalies majeurs associés au liège terreux, plaques terreuses et doublé (C3)

Globalement, nous pouvons attester que la perturbation diagnostiquée au niveau des cimes des arbres a une incidence sur l'aspect du liège. Dans les conditions actuelles de sécheresse et de déficit hydrique intense toute l'activité physiologique est réservée à la photosynthèse et à la production foliaire au détriment des autres organes à savoir le bois et le liège. Le mauvais fonctionnement du cambium et du phellogène affectent directement l'activité subéreuse qui ne produit que du liège entaché de défauts majeurs. D'ailleurs dans ce sens, Sanchez-Cuesta et al(2021) et Sanchez-Gonzalez et al(2023) évoquent la responsabilité des changements globaux à l'égard du réchauffement climatique dont la réduction de la croissance du liège et la proliférations des anomalies liés aux lièges terreux ou au liège doublé suite à une infection pathogène reliant un dépérissement.

En définitif, le suivi des anomalies du liège est très important pour les subéraies est non seulement d'un point de vue économique mais aussi environnemental, car l'aspect du liège indique l'état de santé de la forêt (Pereira, 2007) (Fig.77).

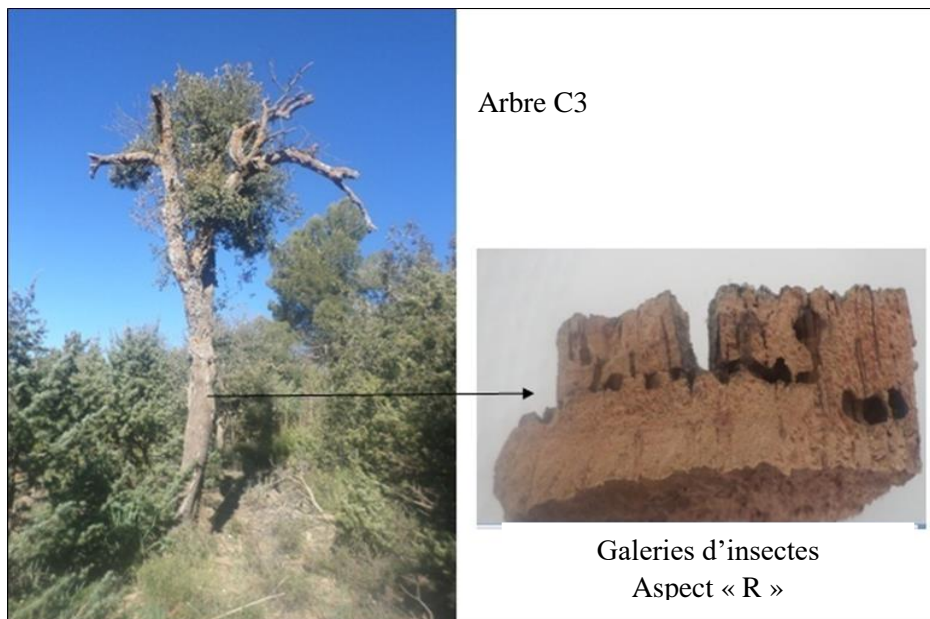


Figure 77 : Anomalie du liège parsemé par des galeries d'insectes sur un sujet C3

IV.4.2.2-L'épaisseur marchande du liège

Le calibre, ou épaisseur d'une planche de liège, est l'un des paramètres qui influence amplement le rendement d'une forêt de chênes-lièges, car il détermine les différentes applications industrielles de la matière première. Pour être exploité et valorisé économiquement, le calibre marchand d'un peuplement ou d'une subéraie doit être supérieur à 27 mm, la meilleure performance étant obtenue lorsqu'elle est comprise entre 29 et 33 mm (Adrados et al., 2000).

Les calibres inférieurs à 27 mm obligent la matière première à être utilisée pour la fabrication de produits de moindre valeur (trituration et aggloméré), tandis que les plaques de calibre supérieur à 40 mm contiennent un pourcentage excessif de déchets. Cette dsircordance fait du « calibrage » (le processus de regroupement des calas en catégories de calibres homogènes) une étape préalable essentielle à la classification du liège lui-même, et donne une idée globale sur la vigueur des arbres productifs.

Les résultats obtenus déterminent pour la zone d'étude un calibre moyen de l'ordre de 26mm, pour un cycle de production de 10 années. Il s'agit d'un liège mince typique des aires de montagnes de la région Nord-Ouest (Dehane et Ghefar, 2017). Cette épaisseur moyenne est similaire à celle indiquée par Chorana et al (2019) pour huit suberaies étudiées, et qui est de 26,50 mm. Elle demeure aussi proche des rangs obtenus par Lanzo et al(2013) pour neuf régions étudiées en Espagne (27,5-28,88mm). Cependant, elle est inférieure à l'épaisseur moyenne mentionnée par Sanchez-Gonzalez et al(2021) (30,80-33,27 mm), et très inférieure à celle obtenue au Portugal (30-33,9 mm) (Lauw et al., 2018) (Fig.78).

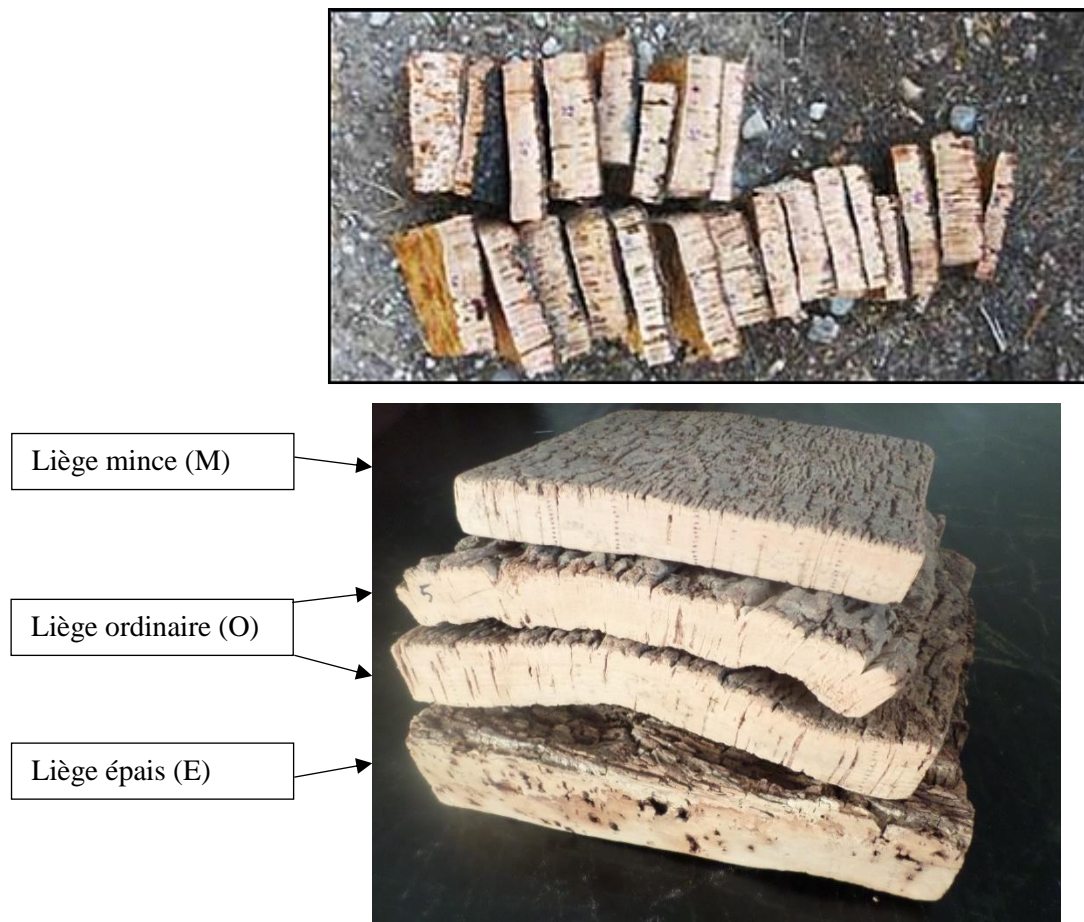


Figure 78 : Variation dimensionnelle des calibres de liège dans le même peuplement

En conséquent, les différents calibres obtenus ne sont que le cumul des accroissements du liège produit annuellement par l'arbre et dépendant fortement de l'adjonction des deux fonctions vasculaires citées auparavant (cambium et phellogène). Selon Pereira (2007), les variations annuelles enregistrées sur les accroissements peuvent varier de 1 à 7mm dans le même échantillon du liège.

Plusieurs études ont été consacrées à examiner l'épaisseur du liège en fonction des facteurs du milieu environnemental tels que la densité des peuplements (Pizzurro et al., 2010), la composition du sol (Pestana et Gomes, 2014), le régime hydrique (Poeiras et al., 2022 ; Camilo-Alves et al., 2020), les fluctuations dans les précipitations (Ferreira et al., 2000 ; Costa et al., 2016 ; Leite et al., 2019.), et l'état sanitaire des arbres (Dehane et al., 2013). Tous ces auteurs confirment la sensibilité du phellogène (tissu responsable de la production du liège) au stress environnemental.

Le chêne-liège est une essence typique, il croît plus intensément pendant deux périodes de l'année: (1) Durant la phase printanière, lorsque les conditions de végétation sont optimales (réserves hydriques et minéralisation); et (2) estivo-automnale, lorsque la croissance varie de faible à modérée en fonction de la température et des précipitations (Oliveira et al., 2016 ; Vaz et al., 2011)

Si l'arbre reçoit suffisamment d'eau et de nutriments, les produits de la photosynthèse présents dans la sève élaborée circulent dans les organes du végétal, où ils sont transformés, sous l'action d'enzymes, en molécules assurant différentes fonctions biologiques. La première

fonction est le remplacement progressif des anciennes feuilles par les nouvelles et par conséquent l'amorçage de la croissance apicale et caudale (méristèmes primaires), suivie par l'activation du cambium vasculaire et du phellogène (méristèmes secondaires). Cette activation du phellogène s'étend de fin Mars à Fin novembre ; l'arrêt hivernal se manifeste par des zones sombres très visibles, délimitant le phellem produit chaque année (Vaz et al., 2011 ; Dehane, 2012 ; Oliveira et al. 2016).

En évoquant la perturbation environnementale qui est le déficit foliaire, les résultats dégagés ont identifiés une épaisseur moyenne de 26,95mm (arbres non perturbés-C1), 25,55mm (arbres modérément perturbés-C2) et 24,57 mm (arbres perturbés-C3).

Afin d'élucider ces résultats, l'approche anatomique basée sur les mesures biométriques est la seule méthode susceptible d'expliquer cette variation entre les épaisseurs du liège par rapport à l'état sanitaire des arbres. Les résultats des mesures biométriques selon les deux plans tangentielle et transversale sont illustrés dans les tableaux 49,50 et 51.

Tableau 49 : Moyenne \pm intervalle de confiance de la caractérisation biométrique du plan tangentiel, dans une région d'intérêt de $150 \mu\text{m}^2$ par degré de perturbation

Etat sanitaire	Nombre de cellules par (mm^2)	Surface cellulaire (μm^2)	Diamètre max (μm)	Diamètre min (μm)
C1				
C2				
C3				

Tableau 50: Moyenne \pm intervalle de confiance de la caractérisation biométrique dans le plan transversal, mesurée dans 25 cellules, par degré de perturbation

Etat sanitaire	Surface cellulaire (μm^2)	Diamètre maximum(μm)	Diamètre minimum (μm)
C1			
C2			
C3			

Tableau 51 : Moyenne de la caractérisation biométrique dans le plan transversale et radiale, mesurée dans 25 cellules, par degré de perturbation

Etat sanitaire	Transversale			Radiale		
	Hauteur (μm)	Largeur (μm)	H/L (μm)	Hauteur (μm)	Largeur (μm)	H/l (μm)
C1						
C2						
C3						

La surface cellulaire des échantillons de liège provenant de chênes-lièges non perturbés était plus grande dans les deux plans (plan tangentiel : $569,70 \pm 4,4\mu\text{m}^2$; plan transversal : $569,70 \pm 400,15\mu\text{m}^2$) que celle des échantillons provenant des sujets perturbés (plan tangentiel : $294,31$

$\pm 205.83\mu\text{m}^2$; plan transversal : $320,65 \pm 2,4\mu\text{m}^2$). Le nombre d'assises passe respectivement pour les deux états sanitaires de 934 à 753 cellules soit une réduction de 20% .

Les Dimension des cellules accusent aussi une différence minime. En section transversale, les hauteurs des cellules atteignent en moyenne $35,45\mu\text{m}$ dans le suber des sujets non-perturbés-C1 contre $31,23\mu\text{m}$ dans ceux perturbés-C3. En section radiale, les hauteurs des assises liégeuses des deux états sanitaires sont en moyenne $35,85\mu\text{m}$ et $32,78\mu\text{m}$. En ce qui concerne la largeur des cellules, la moyenne est en générale inférieure à $25\mu\text{m}$ pour les deux sections d'observation et les trois degrés de perturbation, plus marquée dans la classe C3 (Fig.79).

Figure 79: Variable biométriques mesurées dans les trois sections radiale, transversale et tangentielle

Les valeurs moyennes enregistrées dans la présente étude se situent dans les plages indiquées par Pereira (2007), soit des valeurs des diamètre cellulaires (\emptyset) comprises entre 10 et 20 μm . Elles s'insèrent aussi dans les seuils révélés par Fortes et al (2004), qui ont rapporté des surfaces cellulaires moyennes allant de 400 à 600 μm^2 .

Après analyse de la variance, il a été constaté que dans les trois plans, chaque source de variation était significative. Les échantillons et les régions d'intérêt au sein de chaque échantillon ont toutes une influence aussi bien sur la taille des cellules que leur nombre et sur leurs surfaces cellulaires (Tab.52).

Tableau 52: Analyse de variance entre les variables biométriques et la perturbation environnemental

Mesures biométriques	Test statistique	Plan obs.	Perturbation	Plan obs* Perturbation
Nombre de cellules par mm^2	F			
	p			
Surface cellulaire (μm^2)	F			
	p			
Diamètre maximum(μm)	F			
	p			
H/L(μm)	F			
	p			

Les résultats du tableau 52 démontrent que le déficit foliaire a agi négativement sur le fonctionnement du phellogène en perpétrant une multiplication cellulaire amoindrie, caractérisée anatomiquement par des dimensions cellulaires réduites plus sur les échantillons des arbres perturbés-C3. Cette observation corrobore les conclusions formulées par Dehane (2012) et Chorana (2021): loin de toute aspect génétique, la faible croissance cumulée du liège dans un cycle production est une réduction de ses aspects biométriques.

En relation avec le milieu ambiant, la croissance du chêne liège est également influencée par les caractéristiques du sol et de sa rétention hydrique, car il a été démontré qu'une diminution des eaux souterraines suite à une sécheresse réduit la croissance du liège (Mendes et al., 2016).

IV.4.3- Les paramètres de qualité physique

IV.4.3.1-La dureté du liège

Selon Fortes et al (2004), la densité volumique du liège est le résultat de sa nature composite qui comprend à la fois le tissu de liège et la couche externe qui est la croûte (tissu ligneux). La littérature dans ce sens étaye que le liège présente un degré élevé de variation des mesures de densité volumétrique qui s'amorcent de 162 à 474kg/m³ (Pereira, 2007). Les résultats de la présente thèse mettent en évidence une densité moyenne totale de 224,45kg/m³ (190,12- 264,13 kg/m³) plaçant le liège de la région d'étude ayant une densité acceptable.

Ces moyennes obtenues ne s'éloignent pas à celles citées dans la littérature sur le sujet. Elles se rapprochent des lièges des forêts du nord et du sud de l'Espagne, se rangeant entre 201,4 et 247,4kg/m³ (González Hernández et al.,2000) ; de Ain Draham en Tunisie (254kg/m³), variant entre 237,9 à 268,7 kg/m³ (Aloui et al., 2006) et aussi par rapport au liège Portugais, notamment la région de production du bassin du fleuve Sado. La densité moyenne dans cette région est de l'ordre de 266 kg/m³, oscillant de 250 à 279 kg/m³ (Ferreira et al., 2000). A leur tour, Silva et al (2005) et Anjos et al (2008) se réfèrent à des moyennes comprises entre 120 et 240 kg/m³.

Par contre, les moyennes obtenues semblent inférieures de celles des suberaies du Maroc, du plateau d'Oulmes, qui enregistrent des valeurs entre 285 et 288 kg/m³ (Mourad et al., 2001). En Algérie, nos résultats sont supérieurs à ceux obtenus par Metna (2003) pour les subéraies orientales de Tizi-Ouzou (172,86 à 207,89 kg/m³) et très inférieures à ceux de Raoula et Messaoudene (2015) (290 kg/m³), pour le liège de Texena à Jijel (Nord-Est d'Algérie). Cette large gamme de valeurs démontre le haut degré de variabilité du liège.

En superposant les mesures de la densité par rapport aux classes de perturbation « Déficit foliaire » les résultats indiquent des moyennes qui varient de 214,60 kg/m³ (Sujets non perturbés-C1), 224,82 kg/m³ (Sujets modérément perturbés-C2) et 243,21kg/m³ (Sujets perturbés-C3).

En effet, l'accentuation de la densité volumique sur le liège des sujets perturbés ne peut être disloquée de ce qui a été expliqué pour la croissance du liège (Fig.80).

Liège dur
Densité volumétrique forte

Figure 80: Variation de la souplesse du liège selon sa densité volumétrique

D'après Gonzales-Adrados et al (2000), la faible activité subéreuse imprime au liège une densité accrue, puisque la majorité de l'activité du phellogène s'effectue entre l'été et l'automne. Durant la sécheresse estivale, elle coïncide avec la période du stress environnemental. D'ailleurs, Pereira et al(1992) et Pereira (2015), signalent que les

accroissements produits au printemps (Fin Mars- début Juin) contiennent en moyenne entre 40 à 200 cellules par rangée radiale, soit une densité de l'ordre de 110 kg/m^3 , inférieure à ceux de l'été-automne (fin Juin-fin Novembre), mais de densité élevée de 420 kg/m^3 . Les mêmes auteurs soulignent que la densité volumétrique du liège varie sur les accroissements larges et minces selon la proportion du liège de printemps et de l'automne avec des taux marqués (95%-5% et 75% -25% respectivement).

D'autres auteurs mettent en relief, la structure interne du liège: géométrie, dimension des cellules, dimension des cellules en automne et au printemps, présence de canaux lenticulaires, inclusions, discontinuités, ondulation des parois cellulaires et degré de porosité (Fortes et al., 2004 ; Pereira, 2015 ; Anjos et al., 2008).

Grâce au microscope électronique à balayage, il a été possible de mesurer l'épaisseur de la paroi cellulaire et d'obtenir une vue améliorée de la structure du liège (Tab 53 et Fig.83).

Tableau 53: Moyenne \pm intervalle de confiance de l'épaisseur des parois cellulaires du liège, par type de perturbation (25 cellules/ section transversale)

Etat sanitaire	Epaisseur des parois cellulaire (μm)	Coefficient de variation(%)
C1		
C2		
C3		

La navigation sous le microscope électronique à balayage nous a permis aussi d'observer et d'identifier la forme réelle de l'assise subéreuse en forme de prisme rectangulaire (Fig.81).

Figure 81 : Impact de la structure anatomique du liège sur la nature de la densité (a : liège de printemps aux parois minces ; b : liège d'automne aux parois épaisses)

Les mesures des épaisseurs des parois cellulaires du liège des sujets non perturbés allaient d'un minimum de $0,45$ à un maximum de $2,75 \mu\text{m}$, avec une moyenne et un intervalle de confiance de $1,45 \pm 0,26 \mu\text{m}$ (Tab.62), tandis que les valeurs pour les chênes-lièges perturbées cheminant d'un minimum de $0,84 \mu\text{m}$ à un maximum de $3,23 \mu\text{m}$, avec une moyenne et un écart type de $3,238 \pm 0,157$. Ces valeurs confirment la densité réduite associée au liège des cas non perturbés-C1. L'analyse de la variance atteste une différence très significative en interférant les épaisseurs des parois aux classes de déficit foliaire ($F=65,01$; $p<0,000$).

Selon Dehane (2012), la structure anatomique des parois cellulaires semble jouer un rôle déterminant. Une dureté marquée du liège s'ajuste à un volume d'air réduit dans les assises cellulaires. Il s'agit bien de cellules à parois épaisses, très lignifiées et lourdes. Dans la même idée, Marrafa (2016), Ribeiro et al (2006) et Ribeiro et Surovy (2011) indiquent que la largeur des cernes et la densité volumique sont affectées par la compétition intra spécifique (une compétition intense pour la photosynthèse conduisant à une largeur plus petite des cernes et à une densité plus élevée du liège). De plus, Fonseca et al(1994) signalent une relation significativement négative entre la croissance de la largeur des cernes et la densité.

Dans notre cas, on affirme une relation significative entre la densité volumétrique et les épaisseurs des parois cellulaires ($r=0,54$) plus marquée sur les sujets perturbés ($r_{C3}=0,60$) (Fig.82).

Figure 82: Corrélation entre la densité volumétrique et les épaisseurs des parois cellulaires

IV.4.3.2—Le taux de porosité

La porosité macroscopique du liège, principal indicateur de sa qualité physique, correspond à la prévalence de canaux lenticulaires qui traversent les planches de liège de manière radiale. Selon Fortes et al (2004), la porosité est définie comme la fraction occupée par les canaux lenticulaires et d'autres défauts structurels. Les canaux lenticulaires traversent la planche de liège radialement, du phellogène à la surface externe, permettant les échanges gazeux de l'arbre avec le milieu extérieur (Oliveira & Pereira 2020). Il existe une grande variation de la porosité entre les différents arbres du même peuplement ainsi que dans les lièges précoces du printemps et tardifs de l'été-automne (Molinas, 1993).

Les résultats de présente these font état d'un coefficient de porosité global de 4,90% avec un minimum de 1,4% et un maximum de 13% selon un coefficient de variation de 44%. Ces deux extrêmes concordent avec ceux indiqués par Pereira (2007) pour 680 arbres étudiés, fluctuant entre 0,5 et 14,6% et des moyennes variant de 3,2 et 8,8% pour un cv de 40%. D'ailleurs, ils s'alignent avec ceux constatés par Chorana (2021) pour le liège de l'ouest algérien, enregistrant une moyenne globale de 5,61% avec un maximum de 14% et un minimum 1,2%.

Dans les conditions normales de croissance du chêne liège, la respiration et les échanges gazeux avec le milieu ambiant se font selon deux niveaux: le premier niveau engendre la cime et particulièrement les stomates des feuilles, ces petits orifices ovales microscopiques sont capables de s'ouvrir et de se fermer selon les conditions extérieures. Le deuxième niveau caractérise l'écorce où est logé le phellogène, ce tissu méristématique responsable de la mitose (division cellulaire) produit annuellement des millions de cellules entassées les unes sur les autres sans connection et sans métabolisme. Le liège agit ainsi comme une barrière naturelle entre l'atmosphère et le cortex (Fortes et al., 2004), et les lenticelles formées servent de canaux de transfert de masse pour l'eau et les gaz, ce qui assure l'oxygénation du phellogène (entrée de l'air et sortie du dioxyde de carbone) et sa vivacité tout au long de la vie de l'arbre.

Face à la perturbation environnementale qui est dans notre cas le déficit foliaire, la chute prématurée des feuilles engendrée par une photosynthèse réduite, disloque la respiration par les stomates et alloue cette fonction aux canaux lenticulaires qui vont se multiplier davantage sur le tissu subéreux en nombre et en dimension, une forme d'adaptation au stress environnemental.

Ces pores à l'origine équivalents à des vides comme c'est le cas dans d'autres matériaux, comme dans le bois vont subir toutes les agressions du milieu extérieur (gaz à effet de serre, sécheresse, pollution atmosphérique, poussière, attaques parasitaires...). Au fil des années, ces perturbations vont s'accumuler sous forme de tissu compact sur les pourtours des pores. Selon

Pereira et al (1996) et Liese et al (1983), les canaux lenticulaires sont remplis d'un matériau non subereux, dans certains cas sont tapissés de cellules lignifiées à parois épaisses.

L'observation du liège par microscopie électronique à balayage a confirmé ces constatations. Premièrement, les canaux lenticulaires sont remplis d'un matériau composé de cellules plutôt sphériques qui, bien que présentant de nombreux vides intercellulaires, sont disposées de manière condensée et ont des parois cellulaires plus épaisses et pulvérulentes que les cellules de liège (Fig.83).

Pore issu d'un sujet non perturbé



Pore issu d'un sujet perturbé

Figure 83: Forme du canal lenticulaire selon la perturbation environnementale

Les résultats de la présente étude vont dans le même sens à ce qui a été expliqué auparavant, une prononciation marquée de la porosité sur les échantillons dérivant des arbres perturbés, soit un coefficient de porosité moyen de l'ordre de 7,23% contre 3,99% dans ceux non perturbés. Les résultats de l'analyse d'image de la porosité transversale sont mentionnés dans la figure 84 par état de déficit foliaire.

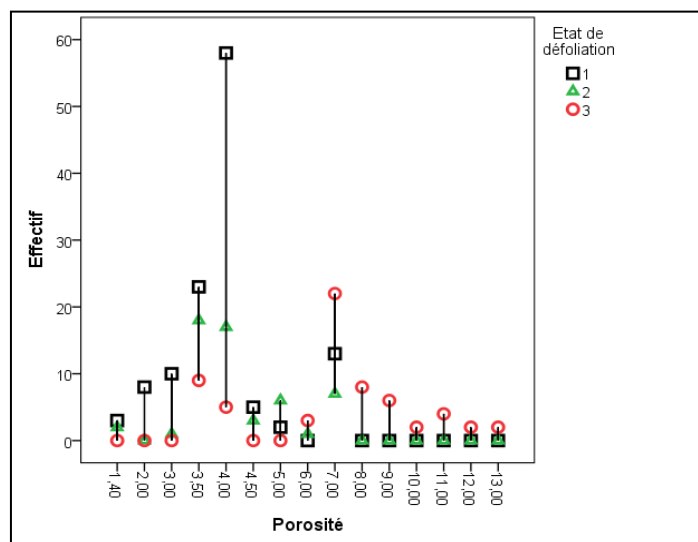


Figure 84: Fréquence absolue de porosité selon la classe de déficit foliaire

La figure 84 met en exergue un effectif moyennement marqué à porosité élevée dans les plages [6-13%] pour les échantillons des arbres perturbés-C3, soit une fréquence absolue de 49 échantillons pour une porosité moyenne de 8,24%. A l'opposée, une porosité basse à acceptable est notée pour les sujets non perturbés-C1, 107 échantillons dans le rang [1,4-4,5%] avec une moyenne de 3,6% (Fig.85).



Figure 85 : Exemples d'échantillons aux coefficients de porosité variant selon le déficit foliaire

La caractérisation des principaux paramètres de la porosité par analyse d'images numériques est illustrée dans le tableau 54.

Tableau 54: Paramètres de la porosité selon les classes de déficit foliaire

Paramètre	C1 (122)	C2 (55)	C3 (63)
Coefficient de porosité			
N° de pores par 10cm			
Superficie moyenne (mm ²)			
Périmètre (mm)			
Longueur (mm)			
Largeur (mm)			
Facteur de forme			
Facteur de géométrie			

Les constatations du tableau 54 montrent clairement que c'est la taille des pores et non pas leur nombre qui influent sur le coefficient de porosité. D'ailleurs, ces observations concordent avec celles révélés par Natividade (1956) et Pereira (2007).

Les paramètres de la porosité s'avèrent très prononcée sur les échantillons des arbres perturbés-C3, en moyenne 78 pores pour une superficie moyenne de 2,75 mm². Les pores sont 3 à 4 fois plus longs que larges (longueur spécifiques 2,1mm ; largeur spécifique 0,575mm). Avec un contour plus au moins irrégulier (facteur de géométrie 0,78) et une forme ellipsoïde (facteur de forme (0,50)). Une variation marquée a été enregistrée pour chaque paramètre mesurés selon le déficit foliaire($p < 0,001$).

En comparant ces dimensions avec celles présentées par Fortes et al (2004), signalant une longueur de pore de 14 mm dans la section transversale et un diamètre de l'ordre de 4 à 7 mm dans la section tangentielle (ces valeurs demeurent plus élevées que celles trouvées dans la présente these), ce qui fortifie la perturbation auquel est soumis les suberaies de la zone d'étude.

IV.4.3.3--La résistance mécanique

Le liège présente des paramètres mécaniques assez particulières, les propriétés de compression du liège sont d'une importance capitale pour les performances acquises lors des diverses utilisations des produits en liège face aux différentes contraintes physiques. Une description du liège sous compression a déjà été faite (Rosa et Fortes, 1988b ; Gibson et al., 1981): le suber est très résistant aux chocs et à la pression, car il est particulièrement élastique, il a donc une grande capacité à retrouver sa forme initiale une fois la contrainte levée. Suite à l'exercice d'une pression, même forte, il reprend 85% de son volume initial instantanément. C'est le seul solide qui, s'il est comprimé d'un côté, n'augmente pas de l'autre (Pereira et al., 1987).

Les résultats obtenus lors des tests de compression font état d'une moyenne globale de 14,70 MPa avec un minimum de 7,00 MPa et un maximum de 24,66 MPa. Ces constatations s'alignent à celles indiquées par Anjos et al(2008) qui stipulent des moyennes variant entre 12.31 et 18.3MPa pour les trois sections d'observation, et avec celles évoquées par Pereira(2007) (de 10 à 20MPa).

La superposition de la contrainte mécanique à l'état sanitaire de l'arbre a induit une compression moyenne 13,94MPa (non perturbé-C1), 14,92MPa (modérément perturbée-C2) et 15,98 MPa (perturbé-C3). Ces chiffres indiquent éloquentement une aggradation à la résistance mécanique une fois le stress environnemental est à son paroxysme:

Une sécheresse chronique implique des réserves hydriques du sol faible et une minéralisation défailante générant une sève brute maigre en nutriments ce qui désagrège les processus de la photosynthèse en produisant une sève élaborée pauvre en matière organique susceptible de stimuler le cambium vasculaire et le phellogène. Le liège formé est d'aspect dur à structure interne dominée par de petites cellules aux parois épaisses entachées de pores, aux contours lignifiés. Ces types de liège soumis à la contrainte mécanique (pression par rapport à la surface de contact) génèrent une courbe de compression (contrainte-déformation) en trois régions, liées aux trois mécanismes responsables des propriétés des matériaux cellulaires flexibles (Gibson and Ashby, 1997):

-La première région, jusqu'à environ 7% de déformation, correspond à la flexion élastique des parois cellulaires ;

-La seconde est un plateau presque horizontal, qui s'étend jusqu'à environ 70% de déformation, provoqué par l'aplatissement progressif des parois cellulaires ;
 -Finalement, l'écrasement des parois cellulaires et l'effondrement complet des cellules provoquent une forte montée de la courbe. La contrainte et la déformation d'effondrement pour le liège, correspondant à la fin du régime de plateau (Fig. 86).

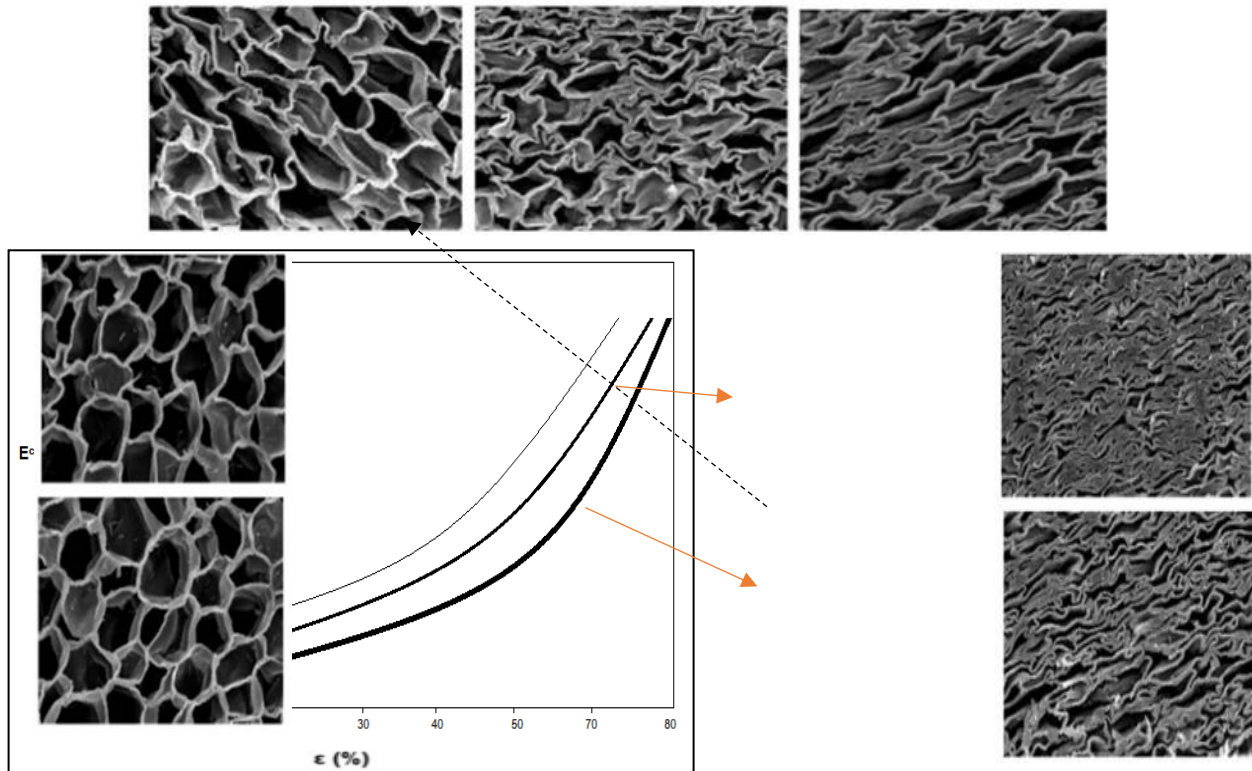


Figure 86: Compression mécanique du liège sous son aspect anatomique (Pereira, 2015)

D'une manière plus simple, lorsque le liège est comprimé dans la direction radiale, les parois cellulaires se plient et se tassent en raison de l'effondrement des ondulations qui s'aplatissent tandis que les bases cellulaires perpendiculaires à la direction radiale s'alignent. Les propriétés de compression du liège varient en fonction de la densité (Gibson et Ashby, 1997) et des dimensions cellulaires (Pereira et al., 1992) (Fig.87).

Figure 87 : Relation entre la compression mécanique et les épaisseurs des parois cellulaires

La figure 89 montre clairement que la forte compression est plus corrélée aux parois épaisses imputées à la classe de déficit foliaire C3 ($r=0,49$).

IV.4.4- Les paramètres mercatiques du liège

Le liège est rangé commercialement en différentes classes de qualité. L'évaluation de la qualité se fait habituellement par un opérateur humain par un tri visuel dans la section

transversale et radiale, aussi bien que dans la mie du liège (section tangentielle). Cette opération est très souvent subjective et ne donne des résultats concluants que pour la classe de bonne qualité et celle médiocre (Rebut) mais pas dans les classes de qualité intermédiaire. Paradoxalement, l'utilisation récente des procédés numériques par analyse d'image dans la classification a réduit de 80% les erreurs issues du tri traditionnel, où il est possible de différencier les canaux lenticulaires des galeries d'insectes (Gonzalez-Adrados et al., 2000).

Les deux principaux paramètres de la qualité sont l'épaisseur et l'aspect du liège, Ce dernier facteur se réfère à la porosité et les occurrences des anomalies dans le tissu subéreux. La fusion arithmétique de ces deux paramètres donne lieu aux indices de qualité du liège. Ces indices sont d'une importance capitale dans l'évaluation économique d'une récolte selon les vraies estimations de vente ou d'achat dans le marché du liège.

Les indices de qualité évalués dans cette étude enregistrent un IQ_{moyen} de l'ordre de 8,44 soit un liège de qualité juste moyenne. Ce résultat concorde à celui obtenu par Chorana (2021) pour le liège de huit subéraies de la région nord-ouest d'Algérie ($IQ=8,09$).

La stratification des indices de qualité par arborescence selon la méthode CHAID génère une seule profondeur et des nœuds différents. Chaque nœud regroupe ou fusionne les classes homogènes point de vue indice de qualité au seuil de signification ($Alpha= 0,05$) en incluant le test de khi deux par des rapports de vraisemblance (Fig. 88).

Figure 88: Classification arborescente des indices de qualité selon la méthode CHAID

La discrimination des indices de qualité selon les 5 classes d'aspect du liège individualise 3 nœuds distincts. Le premier nœud (4plus et 6plus) avec 29,6% de l'effectif total génère un indice de qualité bonne ($IQ= 10,29$). Le deuxième nœud (6°, R) totalise un taux de 44,2% et réalise un indice de qualité mauvaise ($IQ=4,78$). Enfin, le troisième nœud avec 26,3% de présence, se distingue avec un IQ de très bonne qualité de l'ordre de 12,40. Cela confirme que les indices de qualité s'améliorent et s'amenuisent avec l'aspect du liège.

Par ailleurs, la classification des indices de qualité selon la perturbation environnementale génère deux nœuds distincts (Fig.89).

Figure 89 : Classification par arbre des indices de qualité selon le déficit foliaire

En effet, l'arborescence atteste une différence hautement significative entre les trois classes de défoliation ($F= 15,97$; $p<0,000$) et les fusionne en deux nœuds. Le nœud 1 avec 50,80% de l'effectif total, synonyme d'arbres non perturbés (C1) enregistre un IQ_{moyen} de 9,73 (qualité bonne). Par contre, le nœud 2 avec 49,2% de fréquence relative analogue aux deux autres classes de déficit foliaire (C2 et C3) atteste un IQ_{moyen} de 7,11 (Qualité médiocre).

Ces affirmations confirment la sensibilité de la qualité du liège au stress environnemental. Selon Pinto Correia et al(2013), la qualité du liège est affectée à la fois par des facteurs génétiques (liée à l'allogamie de l'espèce) et par des facteurs externes (caractéristiques édaphiques et de stress climatique particulier au site). Dans ce contexte, Silva (1996) estime que dans les sols à hydromorphie très marquée sans drainage, une plus grande disponibilité en eau du sol conduit à des pores plus grands et un liège soufflé de mauvaise qualité. Costa(2016) part du principe qu'en tant qu'espèce tolérante à la sécheresse, le chêne-liège réduit son

allocation énergétique à la production de couches de liège et ne reprendra son activité que lorsque la sécheresse ne sera plus limitante.

Cette qualité dépend également du modèle de sylviculture mis en œuvre et des conditions spécifiques (concurrence du sous bois, pression d'écorçage et teneur en matière organique du sol) (Ribeiro et al., 2021). Elle peut être contrôlée aussi par la densité du peuplement et la régulation de la structure au fil du temps (Type de futaie productive), ce qui permet d'améliorer la qualité finale du liège grâce à la gestion (Montero et al., 1991 ; Tinoco et al., 2009 ; Ribeiro et al., 2011).

La combinaison de l'ensemble des paramètres technologiques entre eux et par rapport à la perturbation environnementale « le déficit foliaire » nous a ramené à l'établissement de la matrice de corrélation suivante (Tab.55).

Tableau 55: Matrice de corrélation entre les paramètres technologiques du liège et le déficit foliaire

Relations									
	Corrélation de Pearson	1							
	Sig. (bilatérale)								
	Corrélation de Pearson	-0,052	1						
	Sig. (bilatérale)	0,423							
	Corrélation de Pearson	0,380**	0,371**	1					
	Sig. (bilatérale)	0,000	0,000						
	Corrélation de Pearson	0,006	-0,006	-0,205**	1				
	Sig. (bilatérale)	0,929	0,929	0,004					
	Corrélation de Pearson	-0,17**	-0,171	-0,092	0,349**	1			
	Sig. (bilatérale)	0,007	0,027*	0,156	0,000				
	Corrélation de Pearson	0,014	-0,358	-0,331	0,324**	0,097	1		
	Sig. (bilatérale)	0,831	0,000	0,000	0,000	0,135			
	Corrélation de Pearson	0,395**	0,131*	0,224**	-0,178	-0,21**	-0,134*	1	
	Sig. (bilatérale)	0,000	0,032	0,000	0,028	0,001	0,038		
	Corrélation de Pearson	0,284**	-0,197**	-0,232**	0,305**	0,588**	0,206**	-0,23**	1
	Sig. (bilatérale)	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	

r : Coefficient de corrélation

La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

La corrélation est significative au niveau 0,05 (bilatéral).

Les résultats de la matrice attestent une corrélation positive très significative entre le gonflement volumétrique du liège (Gf^v(%)) et le calibre(mm) (r=0,371) d'une part et une relation négative avec la porosité d'autres part (r= -0,171) et non significative avec la densité volumétrique (r=-0,006). En effet, lors du traitement industriel du liège, la matière première est bouillie, ce qui provoque une expansion linéaire dans les trois sections (radiale, transversale et

tangentielle), produisant une augmentation de l'épaisseur et une réduction de la porosité alors que la densité volumétrique est peut affectée.

Ces affirmations concordent à celles avancées par Cumbré et al (2000) et Fortes et al (2004) qui stipulent que la porosité tombe à 50% et la densité subit également une petite variation d'environ 20%. Le traitement thermique à l'air affecte aussi les propriétés de compression du liège de reproduction ($r=-0,358$). Dans ce sens, Rosa et Fortes (1988) ont rapporté que le traitement à 100–300°C réduisait considérablement la résistance du liège, et que le module de Young diminuait d'un facteur d'environ 3. Pour certains professionnels du liège, le bouillage du tissu subéreux améliore la qualité ($r=0,13$) (Pereira, 2007).

La relation que tisse la densité volumétrique au calibre ($r=-0,205$) et à la porosité ($r=0,349$) est proportionnelle. Selon Fonseca et al(1994), la densité peut être influencée par un certain nombre de facteurs : géométrie et dimension des cellules dans les anneaux de croissance du liège, présence de canaux lenticulaires, inclusions, discontinuités, plissement des parois cellulaires et degré de porosité. D'ailleurs, sa relation avec la compression ($r=0,324$) est déterminante sur la qualité du liège ($r=-0,178$). Dans ce contexte, Oliveira et al (2014) ont trouvé une plus grande résistance à la compression dans les échantillons avec une densité élevée et une faible largeur d'anneau de croissance (dans notre cas $r=-0,331$).

Dans un autre cadre de liaison, l'aspect du liège (IDV) est positivement corrélé à la qualité ($r=0,395$) et au calibre ($r=0,380$), et il est très sensible à la porosité ($r=-0,173$).

En comparant les 7 paramètres technologiques du liège (IDV, Gf^v , calibre, D, CP, RCM et IQ) à la perturbation environnementale qui est le déficit foliaire, il s'observe une corrélation négative sur toute la ligne [-0,206 ; -0,588]. Les sujets perturbés produisent un liège mince à très mince, très dur au toucher, difficilement comprimé, entaché de défauts et de discontinuités et de qualité amoindrie. En effet, dans un milieu xérique, les blessures occasionnées sur les troncs des arbres productifs mal cicatrisées sont une sorte de caries favorisant l'installation et la pénétration des insectes defoliateurs et xylophages (*Lymatria dispar*, *Tortrix viridana*, *Cerambyx cerdo*, *Platypus cylindrus* et *Coroebus undatus...*), et la prolifération des champignons pathogènes à l'égard de *Phytophthora cinnamomi* Rands, *Diplodia mutila* et le charbon de la mère *Biscogniauxia mediterranea* (Villemant et Fraval, 1991 ; Tiberi et al , 2016) (Fig.90).

A ce niveau, la littérature associée à la pathologie des arbres forestiers, identifie plus de 300 espèces de champignons et d'oomycètes sur le chêne liège, dont au moins 100 sont pathogènes (Franceschini et al., 1993 ; Luque et al., 2000). Ces endophytes sont dans la majorité des pathogènes opportunistes sans induire de symptômes de maladie pendant une longue période sur les arbres sains. Par contre, lorsque les arbres sont affaiblis par des facteurs de stress environnementaux, ces champignons, initialement confinés, peuvent coloniser les tissus adjacents, provoquant un déclin progressif et finalement la mort de l'arbre (Moricca et Ragazzi 2008 ; Saikkonen et al., 1998).

Dans ce contexte, et à titre d'indication plusieurs auteurs considèrent *Phytophthora cinnamomi* Rands. comme la principale cause du déclin du chêne ibérique (Brasier, 1996; Cardillo et al.,2021; De Sampaio e Paiva Camilo-Alves et al.,2013). Le mycélium (ou hyphe) de ce champignon pousse à l'intérieur de la racine et le tronc des arbres blessés après démasclage où ils absorbe les glucides et les autres nutriments, en détruisant les structures, empêchant l'arbre de transporter la sève brute vers les tiges et la cime, et par conséquent diminuent la division cellulaire et la formation du tissus subéreux par le phellogen. Le liège apparait très mince, très lignifié et terreux.

A l'opposé, une bonne prise en charge de ces peuplements dans le cycle de production par des moyens de lutte et d'une gestion adéquate, l'incidence des ravageurs et des maladies seraient maintenues, cela signifie que les arbres seront entretenus en équilibre et resteront en bon état de santé. Dans la zone d'étude, les attaques des agents pathogènes semblent mineures et ne constituent pas une menace pour la survie des chênes-lièges.

Figure 90: Risque pathogène associé au dépérissement du chêne liège (RedFor,2006)

IV.5-Conclusion

L'étude des paramètres technologiques du liège en relation avec le dépérissement des arbres forestiers selon le déficit foliaire est une thématique compliquée et très peu abordée dans la science forestière. La comparaison des 240 échantillons de liège dérivant des trois classes de défoliation C1, C2 et C3, et provenant de trois subéraies de l'ouest algérien, a montré une certaine interdépendance des paramètres mesurés au stress environnemental. Effectivement, les caractéristiques technologiques du liège tels que le gonflement volumétrique, l'aspect, la croissance, la densité volumique, la porosité, la compression et la qualité ont été analysées, et les tissus ont été examinés (surface cellulaire, diamètre et épaisseur de la paroi cellulaire). Les constatations obtenues sont congruentes et soutiennent les connaissances empiriques et scientifiques déjà acquises, confirmant ainsi ce que l'on sait sur le chêne-liège et la technologie du liège, mais apportent également de nouvelles connaissances qui peuvent servir à améliorer les plans d'échantillonnage, de prélèvement, de diagnostics, et aider à la gestion durable des subéraies.

Les résultats de ce chapitre démontrent à quel point le dépérissement a eu un impact important sur la plupart des paramètres analysés. Une tendance à la baisse est observée dans les moyennes totales des variables technologiques du liège. Une explication rationnelle confirme nos observations sur le terrain: des sujets perturbés n'arrivant pas à accomplir une photosynthèse normale perdent une grande partie de leur feuillage à cause des blessures occasionnées sur le tronc lors des récoltes précédentes, entravant ainsi la montée de la sève nutritive riche en minéraux et en eau. La réaction défailante du cambium vasculaire est suivie

"ipso facto" par le dérèglement du phellogène qui ne produit que peu de cellules, de taille réduite, aux parois épaisses contournés de discontinuités de dimensions variables, et selon le degré de gravité apparaissent terreuses et lignifiés.

Dans notre opinion ce type de liège mince à très mince d'aspect dur est favorable au dépérissement par la perte prématurée des feuilles dans les houppiers. Les résultats atteints corroborent les constatations du terrain : les blessures à la hache sont plus marquées sur des épaisseurs de liège plus faibles obligeant les démascleurs à fournir une force de frappe mortelle atteignant rapidement le liber que sur un liège ordinaire et souple.

Globalement, l'analyse des paramètres technologiques du liège s'avère être un outil efficace pour évaluer le rendement économique des subéraies, mais se révèle plus importante pour statuer sur l'état de santé des forêts de chênes-lièges et l'évolution de ces peuplements au fil du temps. Les informations dégagées de cette étude pourraient également être réutilisées pour étudier d'autres zones subéricoles souffrant du même contexte sanitaire.

Chapitre V

La croissance du liège face aux variations climatiques

V.1-Introduction

A travers le monde, les forêts sont à la base de la subsistance de plus d'un milliard de personnes vivant dans un état de pauvreté extrême, et permettent de fournir des emplois salariés à plus de 100 millions d'individus (FAO, 2010). Cependant le changement climatique qui sévit ces dernières décennies présente d'énormes défis pour les forêts et les populations (Aykut et Maertens, 2021).

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007; GIEC, 2022) estime que les perturbations provoquées par le réchauffement climatique s'interagissent, ce qui en amplifie les effets de la sécheresse atmosphérique et édaphique sur de longues périodes. Ces rapports statuent sur le fait que les forêts boréales, de montagne, méditerranéennes, de mangrove, et tropicales humides sont les écosystèmes forestiers les plus susceptibles aux changements climatiques.

Par conséquent, plusieurs scénarios climatologiques sont proposés: un risque d'extinction dans les points chauds de biodiversité est multiplié par 10 entre 1,5°C et 3°C de réchauffement. Au-delà de +2°C, les écosystèmes seront poussés au-delà de leurs capacités d'adaptation naturelles (Reghezza-Zitt, 2023).

Le chêne liège est une espèce de pleine lumière, une de ses particularités est que l'activité du cambium vasculaire et corticale débute à partir du mois de Mars et s'étend jusqu'à la fin d'Octobre (Natividade, 1956). Cette période dans la plupart des pays subéricoles est liée à la période sèche et au déficit hydrique intense.

La bibliographie dans ce sens est unanime sur le fait que les accroissements annuels du liège sont maximales durant le printemps par la formation de cellules aux parois minces à cause de la disponibilité des réserves d'eau dans le sol (pluie hivernale et printanière) (Costa et al., 2002a; Leite et al., 2018). Par contre, cette croissance se ralentit et devient stable durant l'été à travers les petites assises aux parois épaisses à cause du taux important de l'évapotranspiration (Carita et al., 2000). Des études menées au Portugal ont montré que la faible croissance du liège serait donc une adaptation à l'augmentation du rayonnement UV provoquée par le réchauffement climatique observé ces dernières années (Teixeira et al., 2014). Les accroissements annuels reflètent en quelque sorte les variations du climat et permettent de déceler quelle variable influence significativement sur ces anneaux (Carita et al., 1996; Costa et al., 2002b). Peu d'informations sont connues sur les effets des variations climatiques sur l'activité cambiale ou du phellogène.

Le but de ce chapitre est d'analyser les relations probables entre les accroissements annuels du liège et les variables climatiques (Pluviométrie mensuelles et Températures) selon une approche dendro-climatologique typique au liège. Il était question aussi de superposer cette relation au changement environnemental actuel que traversent les suberaies de l'oranie.

V.2-Matériels et méthodes

V.2.1-Echantillonnage et mesures

Il s'agit du même mode d'échantillonnage décrit précédemment, on a eu recours à un échantillonnage par itinéraire que plutôt par placettes, selon les trois niveaux du sol (bas-fond, pente et crête).

Les 270 échantillons extraits ont été étiquetés selon leur origine et soumis à un bouillage pendant 1heure à 100°C, sans subir aucun adjuvant chimique ou industriel. Ensuite, ils ont été stabilisés à l'air libre pendant 15jours jusqu'au poids constant pour éliminer l'eau accumulée lors de l'ébullition. L'humidité d'équilibre des planches de liège ainsi séchée était en moyenne de 7%.

Avant d'entamer les mesures des accroissements annuels, chaque cala a subi un ponçage léger de ses deux section transversales et un nettoyage à l'air comprimé. Pour l'analyse de la croissance annuelle du liège, chaque section transversale a été divisée en trois parties égale distance représentées par trois lignes verticales sur lesquels les anneaux de croissance sont marqués par un stylo fin. Le scannage manuel des sections transversales nous a permis de mesurer les épaisseurs des anneaux de croissance par analyse d'image, en convertissant la résolution du scanner en mm par le logiciel ImageJ (Fig.91).

Figure 91: Méthode numérique des mesures des accroissements annuels du liège

La caractérisation du rythme de croissance annuelle du liège est obtenue en calculant pour chaque provenance les indices des accroissements (Iac) selon l'approche dendro-chronologique établie par Waren (1980): $Y_t = atbe - ctEt$.

Où :

- $Y_t = \dot{y}_t Et$,
- Y_t est la mesure actuelle de l'accroissement du liège
- \dot{y}_t est la valeur estimée
- Et la valeur résiduelle
- a, b et c = constants ; t = temps ou le numéro de l'accroissement, donc $IAC = \dot{y}_t / Et$

V.2.2-Analyse climatologique

Pour l'étude climatologique, nous avons utilisé des données climatiques (précipitation et températures) couvrant une période de 30ans (1992-2021). Ces dernières ont été recueillis auprès des organismes de météorologie et de service hydrauliques des trois wilayas ainsi que certaines plateformes météorologiques internationales spécialisées.

V.2.2.1-Les précipitations

Plusieurs indicateurs climatiques ont été testés pour caractériser la situation climatique de la zone d'étude et la croissance annuelle du liège échantillonné dont nous citons:

-L'indice de déficit pluviométrique(IDP) permet de montrer et de calculer le nombre des années déficitaires et leur succession. Une année est qualifiée d'humide si cet indice est positif, de sèche lorsqu'il est négatif. Il s'exprime par la formule suivante (Hayes,1998):

où: IDP: Indice de déficit pluviométrique (en pourcentage) ; P_i : précipitation annuelle (en mm) ; P_m : précipitation moyenne (en mm).

-Les précipitations cumulées à différentes périodes de l'année (t: année courante) et (t-1: année antérieure).

-L'indice Standardisé de Précipitation (ISP) exprimé par la formule empirique suivante (McKee et al., 1993, 1995) :

où: ISP = Indice standardisé de précipitation ; p_i = Moyenne inter-annuelle (mm) ; p_m = Moyenne de la série (mm) ; σ = Ecart type de la série (mm).

C'est un indice simple, puissant et souple à la fois, basé sur des données pluviométriques.

L'intensité des événements est évaluée selon la valeur de l'indice obtenu. L'indice ISP indique qu'une sécheresse débute quand sa valeur est inférieure ou égale à $-1,0$ et qu'une sécheresse se termine quand sa valeur devient positive.

- L'Indice de pluviosité (IP) est le rapport de la hauteur de précipitation d'une année à la hauteur moyenne annuelle de précipitation de la série. Il est exprimé par la formule suivante (Aghrab et al., 2007):

Une année est dite humide si ce rapport est supérieur à 1 et sèche s'il est inférieur à 1.

-L'indice de sécheresse (IS) permet d'estimer le déficit pluviométrique annuel. Cet écart à la moyenne est la différence entre la hauteur des précipitations d'une année P_i et la hauteur moyenne annuelle de précipitations P de la série (Byun et Wilhite, 1999). La formule est :

L'indice est positif pour les années humides et négatives pour les années sèches.

-L'indice de sévérité (ISV) est basé sur les occurrences des séquences humides et sèche de pluviométrie dans une série selon six classes de sévérité selon la formule suivante (Diaz, 2019) :

La sévérité est annoncée lorsque le ISV est consécutivement négatif et se termine lorsqu'il devient positif. On effectue une classification de sévérité suivant les valeurs du ISV obtenues :

V.2.2.2-Les températures

Les données utilisées dans cette étude sont des températures maximales et des températures minimales enregistrées dans les trois sites pour la période 2010-2021. Pour ce faire nous avons

déterminé les moyennes annuelles de ces températures et analysé les anomalies des moyennes annuelles de températures minimales et maximales durant l'ensemble de la période d'étude considérée. Ces anomalies sont déterminées selon la formule suivante (Diarra et al., 2019):

- Anomalies des moyennes annuelles de températures minimales
- Anomalies des moyennes annuelles de températures maximales

Dans les deux cas, s est l'écart-type des températures pour chaque site dans la période considérée.

V.2.3-Analyse dendro-climatologique

Les indices climatiques les plus couramment utilisés pour caractériser les variations interannuelles et sous-régionales du contexte hydro-climatique méditerranéen mettent principalement en évidence les deux éléments climatiques fondamentaux (température et précipitations) afin d'évaluer le niveau de dessiccation et de sécheresse du territoire analysé (Mokhtari, et. 2013 ; Aidoud, 2000 ; Croitoru et al., 2012) :

-L'indice d'aridité de De Martonne (I_a) est un indicateur utile pour caractériser le phénomène d'aridité en exprimant le caractère restrictif pour certaines formations végétales (De Martonne E., 1926), où P est la quantité annuelle de précipitations, T est la température moyenne annuelle de l'air.

- L'indice hydro-thermique (I_h)(Ionac et al., 2015). Il est calculé comme le produit de la température annuelle moyenne de l'air ($^{\circ}\text{C}$) et de la profondeur annuelle de l'eau (en mm) divisé par

- L'indice de Gaussen permet de déterminer les mois secs. Les mois secs sont ceux qui satisfont l'équation. Avec P le cumul mensuel des précipitations en mm/mois et T la température moyenne mensuelle en $^{\circ}\text{C}$ (Gaussen et Bagnouls, 1952).

-L'indice xérothermique (X), correspond (Gaussen et Bagnouls, 1952).

- L'indice du déficit thermo-pluviométrique de Dantín Cereceda et Carbonell (1941). Cet indice est exprimé par :

où P est la précipitation annuelle moyenne en mm et T est la température annuelle moyenne en $^{\circ}\text{C}$. On peut ainsi le classer en :

V.3- Traitement statistique

Les différents résultats des mesures ont été soumis à des traitements statistiques relevant des mesures de position (moyenne et coefficient de variation...)et des mesures de dispersion (écart-type, intervalle de confiance notamment, variance...). Des test paramétriques et non paramétriques ont été aussi exécutés tels que l'analyse de la variance Anova, la regression simple, la matrice de corrélation de Pearson.

Pour statuer sur la significations des tests statistiques adoptés, des seuils de signification ont été fixés : \circ -non significatif ($p > 0,05$) ; *-significatif ($p < 0,05$) ; **-très significatif ($p < 0,01$) ; ***-hautement significatif ($p < 0,001$).

V.4-Résultats

V.4.1- Caractéristiques des arbres-échantillons

Les résultats des principales mesures dendrométrique effectuées sur les 270 arbres échantillons réservés pour l'étude dendro-climatologique sont renseignés sur le tableau 56.

Tableau 56: Synthèse des résultats de l'analyse descriptive des variables continues

Statistique	Calibre (mm)	Circonférence (cm)	Hauteur (m)	Hauteur d'écorçage (m)	Coefficient d'écorçage	Production du liège (kg/arbre)
Moyenne	27,09	130,2	13,93	1,8	1,5	17,87
Coefficient de variation	21,24	31,77	33,58	23,38	61,56	54,09
Médiane	27	122	13	1,7	1,37	15,68
Ecart-type	5,89	40,8	3,25	0,6	0,65	9,66
Variance	34,77	1664,7	10,61	0,36	0,42	93,5
Asymétrie	1,124	1,11	0,45	1,92	1,3	2,87
Erreur std. d'asymétrie	0,029	0,02	0,02	0,02	0,05	0,02
Aplatissement	2,207	3,42	-0,08	6,24	2,47	12,61
Erreur std. d'aplatissement	0,059	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Minimum	6	60	5	0,8	0,5	3,63
Maximum	57	455	20	6,55	4,42	107,3

On se référant au tableau 56, nous distinguons une variabilité marquée intra-arbres, soit des coefficients de variation allant de 21,24% pour le calibre à 61,56% pour le coefficient d'écorçage. Le calibre moyen est de l'ordre de 27,09 mm, témoignant d'une faible activité subéreuse dans ces forêts. Il s'agit globalement d'arbres adultes en pleine production d'une circonférence moyenne sur liège de l'ordre de 130,20cm. La hauteur moyenne est aux alentours de 13,93m analogue à des arbres minces en quête de lumière à cause du maquis dense. D'ailleurs, la hauteur dominante de 20m la plus importante s'observe sur plusieurs peuplements (Tagdempt, Ami-Moussa).

La hauteur d'écorçage n'est pas assez respectée, elle oscille entre 0,80m et 6,55m. Le coefficient d'écorçage moyen adopté pour l'ensemble de la zone d'étude est de l'ordre de 1,50. Ce chiffre semble s'ajuster aux conditions forestières et écologiques dégradées que ces entités naturelles endurent (sécheresse, sous bois et incendies). Des coefficients d'écorçage >3 ont été enregistrés particulièrement pour les arbres dépassant 4m de tour. La majorité des arbres ont subi plus de 3 écorçages.

La production moyenne du liège est aux alentours de 17,87kg/arbre (0,17quintal/arbre). Elle varie significativement entre un maximum de 107kg/arbre et un minimum de 3,63kg/arbre. Cette faible moyenne(17kg/arbre) est une indication supplémentaire de l'impact négatif des facteurs abiotiques et biotiques sur la physiologie des arbres productifs.

V.4.2-Analyse climatique de la zone d'étude

V.4.2.1- Variations inter-annuelles des précipitations

Les variations inter-annuelles du régime pluviométrique de la zone d'étude sur une série de 30 ans (1992-2021) sont présentées dans la figure 92.

Figure 92: Variation inter-annuelle des precipitation pour la période 1992-2021

La figure 92 montre clairement que la pluviométrie est mal répartie durant les années ($R^2=0,03-0,04$). Sur une période de 30 années, les fluctuations annuelles sont nettement visibles pour la subéraie de Zarieffet, soit un coefficient de variation de l'ordre de 34%. Les moyennes enregistrées (pour la période 1992-2021) varient entre 541,90mm(ZA) ; 356,85mm(TA) et 298,59mm (AM). Les trois modèles linéaires indiquent une tendance générale à la réduction des précipitations pour les trois sites.

V.4.2.2-Indices de déficit pluviométrique, IDP(%)

Les trente années de la série 1992-2021 se sont caractérisées en 2013 par un excès pluviométrique maximal de 86,99% (ZA) ; (85,57%(TA) et 43,60% (AM) (Fig. 93). Pour les trois sites, les années humides, au nombre de 39, sont mal réparties dans la série. Un seul groupe émerge formé de sept années successives, allant de 2007 à 2012, avec un excès moyen de 19.17% (ZA); 19,62% (TA) et 18,28.% (AM) . L'excès pluviométrique s'est propagé au même temps durant les périodes 1996-1997 et 2003-2004 avec des taux allant de 7,82% à 50,51%.

Figure 93: Indice de Déficit Pluviométrique (IDP %) durant la période 1992-2021

La figure 93 met en exergue aussi les années déficitaires qui totalisent 51 évènements, dont 15 occurrences à Zarieffet et 18 respectivement pour Tagdempt et Ami-Moussa. Trois groupes distincts caractérisent cette situation climatique. Le premier groupe concerne deux années successives allant de 1993 à 1994 avec des déficits variants entre 18,29%(AM) et 26,03% (TA). La deuxième vague de déficit pluviométrique est imputable aux années 2005 et 2006 (0,55% (TA) et 36,06%(ZA). En revanche, le troisième groupe composé de sept années successives s'individualise à partir de 2015 jusqu'à 2021 englobant des pertes pluviométriques variant de -16,66% à -60,45% (ZA) et de -6,39% à -39,86%(TA) et enfin Ami-Moussa de -2,88% à -24,14%.

V.4.2.3. Indice standardisé de précipitations (ISP)

La figure 94 expose avec clarté l'indice de précipitations standardisé enregistré dans les trois sites entre 1992 et 2021. Deux périodes bien distinctes se sont révélées ; la première étant sèche tandis que la seconde est plutôt humide.

La période 2015-2021 consolide les résultats précédents, la région d'étude affronte une sécheresse aigue avec des indices plus significatifs pour la subéraie de Zarieffet allant de -1,36 à -1,80.

Figure 94 : Indice de précipitations standardisé (SPI) durant la période 1992-2021

Le tableau 57 met évidence les fréquences relatives enregistrées durant les trente années d’observation, de la série pluviométrique 1992-2021.

Tableau 57 : Fréquences des années pluviométriques en fonction de l’indice de précipitation

Echelle SPI	Observation	Nombre d’années	Echelle SPI	Observation	Nombre d’années
SPI>2					

La série pluviométrique 1992-2021 est marquée par 36 années de sécheresse légère et 23 ans d’humidité légère. Les années 2021 et 1999 ont connu respectivement pour les trois sites une sécheresse sévère (Pmm=214,3mm (ZA); Pmm=162,57mm(TA); Pmm=152,57mm (AM)). Les deux années 2012 et 2013 se sont individualisées par une humidité extrême avec une pluviométrie de 1013,3 mm (ZA) et 662,19mm(TA). La série a aussi connu pour chacun des sites trois années de sécheresse et d’humidité sévères.

V.4.2.4-Indice de pluviosité (IP)

Le graphique de la figure 95 fait état d’une évolution marquée des épisodes de sécheresse de 1992 à 1995 et de 1998 à 2002 (TA et AM) et de 2015 à 2021(ZA,TA et AM). Ces séquences sont en général d’une intensité allant de légère à modérée. La succession des années humides sont mal réparties dans la série et affichent une coïncidence temporelle de 2007 à 2013.

Figure 95 : Indice de Pluviosité (IP) durant la période 1992-2021

V.4.2.5-Indice de sécheresse (IS)

Le nombre d’années déficitaires est une indication de la sévérité de la sécheresse qui sévit dans la région (Fig.96). De 1998 à 2002, les trois sites accusent une perte allant de -53,70mm à -222,70mm (ZA), de -74,8mm à -194,28mm(TA) et de -80,51mm à -146,02mm. D’ailleurs, la situation devient très critique durant la période 2015-2021 ; la subéraie de Zariéffet semble payer un lourd tribut, avec des déficits très aggravés allant de -90,27mm à -327,60mm. La série pluviométrique témoigne aussi d’une succession d’années humides de 2007 à 2014(ZA: 0,50mm-471,40mm) et de 2006 à 2013 (TA: 39,89mm-305,34mm et AM :5,70mm-130,17mm).

Figure 96: Indice de sécheresse (IS) durant la période 1992-2021

V.4.2.6-Indice de sévérité (ISV)

L'analyse de la sévérité par occurrences des pluies fait état d'une diversité prononcée entre les séquences d'humidité et de sécheresse dans les trois sites. La chronologie climatique est moins perturbée pour la forêt de Zarieffet, nous enregistrons 17 occurrences plus au moins humides (4 extrêmement humides ; 9 sévèrement humides et 9 humides) contre 13 à variabilité sèche (1 sèche ; 7 sévèrement sèches et 5 extrêmement sèches). Cette chronologie humide à l'échelle de 30 années détient 56,67% des observations tandis que la séquence sèche enregistre 43,33%.

Respectivement, pour les deux autres sites, les trois variables des séquences sèches (sèche ; sévèrement sèches et extrêmement sèches) semblent dominées logiquement la constante climatique avec 53,33% chacune. La séquence humide proche de la moyenne de la période d'observation est homogène pour les deux subéraies (26,67%).

L'indice de sévérité semble atténué à Zarieffet avec des séquences légèrement sévères à très faiblement sévères durant les années 1996, 2011, 2012, 2014 et particulièrement en 2003 et en 2013. A Tagdempt et Ami-Moussa, la sévérité modérée est plus prononcée durant les années 1992-1995 et 1998-2002. L'année 2021 demeure extrêmement sévère à Zarieffet (ISV=-10,9). La période 2015-2021 se caractérise par une accentuation de la sécheresse, la situation climatique vire de sévérité modérée à la sévérité forte (Fig.97).

Figure 97 : Indice de sévérité (ISV) durant la période 1992-2021

V.4.2.7-Les températures

Les variations interannuelles des températures minimales et des températures maximales pour les trois sites durant la période 2000-2021 sont représentées sur la figure 98 .

Figure 98 : Variations interannuelles des températures minimales et maximales enregistrées dans les trois sites durant la période d'étude (2000-2021)

Pour Zarieffet, les moyennes annuelles des températures minimales et maximales varient respectivement de 9°C à 12,5°C et d'environ de 21,1°C à 25,5°C. Pour Tagdempt, ces moyennes fluctuent respectivement entre 7,7°C et 9,3°C et entre 19°C et 24°C. Pour Ami-Moussa, les moyennes annuelles des températures minimales et maximales évoluent respectivement de 13°C à 14,5°C et d'environ 26°C à 28°C.

V.4.2.8-Anomalies des températures

Les variations interannuelles des anomalies des moyennes annuelles de températures minimales et maximales sont représentées sur les figures 99 et 100 . Ces anomalies présentent de faibles tendances positives et négatives par rapport à la normale.

Figure 99 : Anomalies des moyennes annuelles de températures maximales enregistrées dans les trois sites durant la période d'étude (2000-2021).

Pour la subéraie de Zarieffet, les anomalies de températures maximales indiquent une faible tendance négative par rapport à la normale de 2000 à 2014, avec de valeurs comprises entre $-1,2^{\circ}\text{C}$ et $-0,30^{\circ}\text{C}$. Par contre, de 2015 à 2021, les anomalies de températures maximales indiquent une tendance positive par rapport à la normale, avec de valeurs comprises entre 1°C et $1,80^{\circ}\text{C}$.

Dans la subéraie de Tagdempt, la même tendance négative est observée par rapport à la normale, les anomalies se rangent entre $-1,71^{\circ}\text{C}$ et $-0,18^{\circ}\text{C}$ pour la période 2000-2014 et montent en crescendo à partir de l'année 2015 de $2,59^{\circ}\text{C}$ à $3,28^{\circ}\text{C}$ en 2021.

En ce qui concerne la subéraie d'Ami- Moussa, sauf les années 2000, 2001, 2006,2008 et 2014 , où les anomalies sont positives égales respectivement à $2,32^{\circ}\text{C}$; $0,54^{\circ}\text{C}$; $0,34^{\circ}\text{C}$ et $0,54^{\circ}\text{C}$, les autres années sont à variante négative, chevauchant entre $-1,64^{\circ}\text{C}$ et $-0,05^{\circ}\text{C}$. D'ailleurs une montée sensible en température est enregistrée entre 2015 et 2020($0,14^{\circ}\text{C}$ et $0,94^{\circ}\text{C}$).

Figure 100: Anomalies des moyennes annuelles de températures minimales enregistrées dans les trois sites durant la période d'étude (2000-2021)

Les variations des anomalies des températures moyennes minimales analogues à la période 2000-2021 varient selon à la normale de chaque site. Elles prennent une tendance négative séquentielle particulièrement à Zarieffet, de 2000 à 2015 ($-0,02^{\circ}\text{C}$ et $-1,27^{\circ}\text{C}$) et de 2004 à 2009 pour Tagdempt ($-0,31^{\circ}\text{C}$ et $-1,45^{\circ}\text{C}$) et enfin de 2007 à 2014 pour Ami-Moussa ($-0,43^{\circ}\text{C}$ et $-1,59^{\circ}\text{C}$).

Les tendances positives des températures moyennes minimales restent généralement instables. Dans le cas de Zarieffet, de 2018 à 2021 elles varient de $0,71^{\circ}\text{C}$ à $2,58^{\circ}\text{C}$. Elles prennent une allure alternée pour Tagdempt (2014 et 2017 : 0°C - $0,98^{\circ}\text{C}$ et 2019-2021 : $0,39^{\circ}\text{C}$ - $1,57^{\circ}\text{C}$). Elles demeurent régulières à Ami-Moussa de $0,72^{\circ}\text{C}$ à $1,30^{\circ}\text{C}$ (2015-2021).

En terme de bilan climatique, les résultats obtenus divergent significativement entre la première décade allant de 2000 à 2010 et la deuxième de 2011 à 2021 (Fig.101).

Figure 101: Tendances de progression et de régression des températures maximales

En ce qui concerne les températures maximales, les trois sites enregistrent une montée sensible de la chaleur ; elle varie de $-0,16^{\circ}\text{C}$ à $0,16^{\circ}\text{C}$ (AM) ; $-0,87^{\circ}\text{C}$ à $1,41^{\circ}\text{C}$ (TA) et $-0,65^{\circ}\text{C}$ à $0,65^{\circ}\text{C}$ (ZA) (2000-2010 ; 2011-2021).

Figure 102: Tendances de progression et de régression des températures minimales

A leur tour, les températures minimales suivent la même tendance, les trois sites enregistrent une escalade thermique sensible; elle varie de $-0,18^{\circ}\text{C}$ à $0,20^{\circ}\text{C}$ (AM) ; $-0,11^{\circ}\text{C}$ à $0,14^{\circ}\text{C}$ (TA) et $-0,39^{\circ}\text{C}$ à $0,41^{\circ}\text{C}$ (ZA) (2000-2010 ; 2011-2021) (Fig.102).

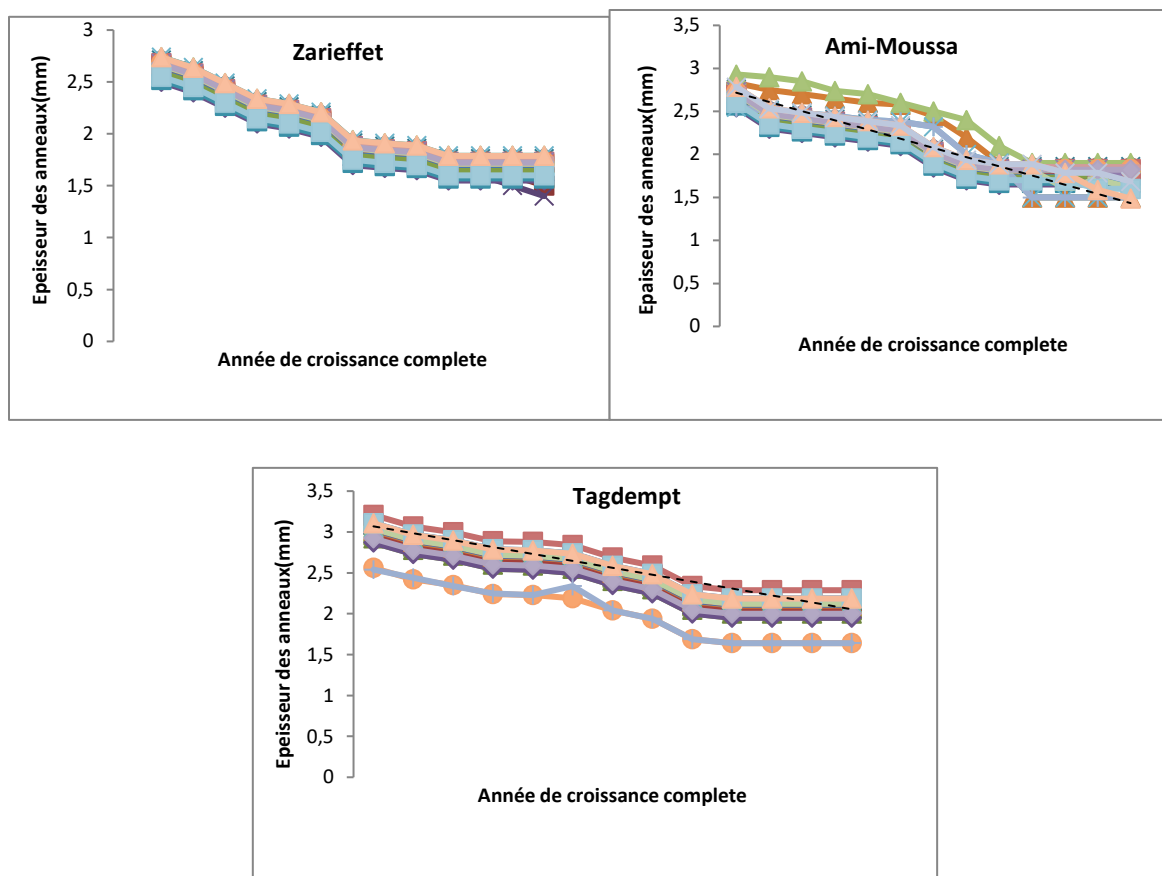


Figure 103: Courbe de croissance du liège des trois provenances, avec treize années de croissance complète (N=90/site)

Respectivement pour les trois provenances, une tendance générale à la diminution de l'épaisseur des accroissements en fonction de l'augmentation de l'âge du liège dans le cycle de production. L'épaisseur des anneaux de croissance du liège diminue à partir de la première année de croissance complète et, en général, la pente de la courbe est plus élevée dans les premières années du cycle. On constate également que, dans la plupart des cas, la diminution de l'épaisseur des anneaux de croissance est plus marquée dans les lièges de plus grand calibre.

A leur tour, les indices d'accroissement (IAC) demeurent très stables pour les trois provenances. Pour un IAC_{moyen} de l'ordre de 0,99 ; la variabilité inter-annuelle entre indices d'accroissement mesurée (Fritts,1976) est faible, elle varie de 0,03 pour ZA ; 0,02 pour AM et 0,04) pour TA(0,23) (Fig.104)). Les IAC extrêmes se rangent entre 1,04 comme maximum et 0,93 comme minimum.

Figure 104 : Indices d'accroissements du liège pour les trois sites

La relation qui relie les indices d'accroissement du liège à leurs accroissements annuels est significativement positive ($r=0,345$) malgré que les informations fournies par le modèle mathématique qui est de l'ordre de 11,9% (Tab.59).

Tableau 59 : Récapitulatif des modèles^b

Modèle	r	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	0,345 ^a	0,119	0,087	0,12592

En effet, quel que soit la provenance, les meilleurs indices d'accroissements sont imputés aux accroissements annuels élevés (Fig. 105).

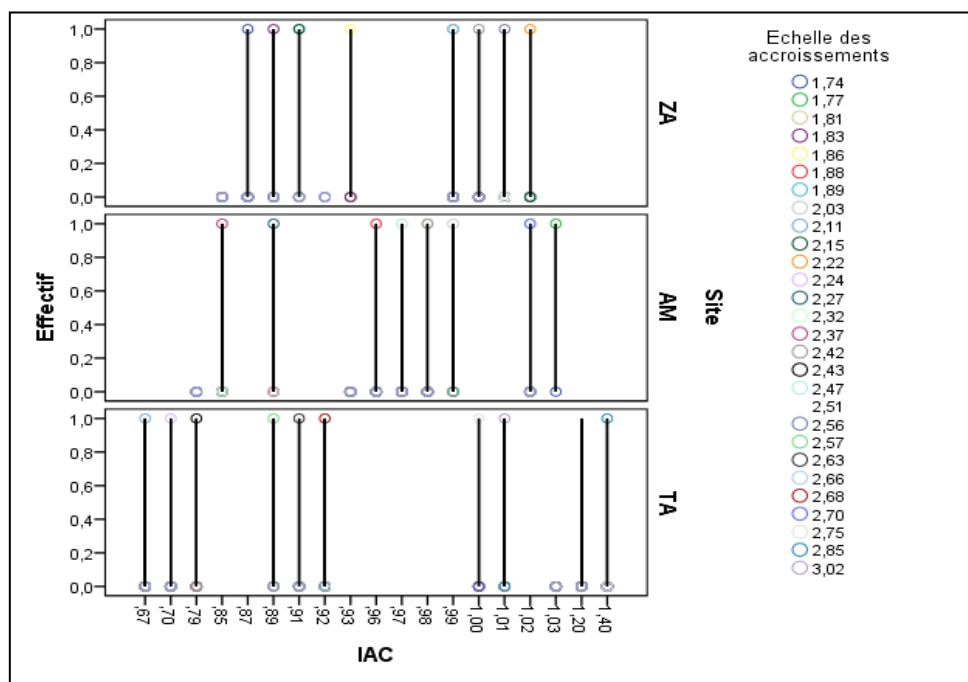


Figure 105: Relation entre indices d'accroissements et accroissement annuel

V.4.3.2- Caractérisation climatique des trois provenances analogue au cycle de croissance

Les données des précipitations annuelles pour les trois sites ont été ordonnées selon une approche simple faisant ressortir les années sèches des années humides ou les années déficitaires des années excédentaires par la différence entre la pluie annuelle et moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée (Fig.106).

Pluie annuel : Annual rainfall, Exés : Excess ; Déficit : Deficit ; Moyenne : Mean

Figure 106 : Bilan annuelle des précipitations dans les trois subéraies

La synthèse climatique des 13 années analogues à la croissance complète montre le début de la sécheresse effective à Zariéffet à partir de l'année 2016. Cette zone au passé climatique récent de type subhumide semble plus sensible aux changements climatiques actuels que les deux autres sites du semi-aride (Tagdempt et Ami-Moussa).

Etant donné le R^2 , 63%(ZA); 82%(TA) et 26%(AM) de la variabilité de la variable dépendante IAC est expliquée par la variable explicative $P_{annuelle}$. Etant donné le niveau de signification de 5% choisi, l'information apportée par les variables explicatives (Pluie annuelle) est significativement meilleure comparée à ce qu'expliquerait la seule moyenne de la variable dépendante (Fig.108).

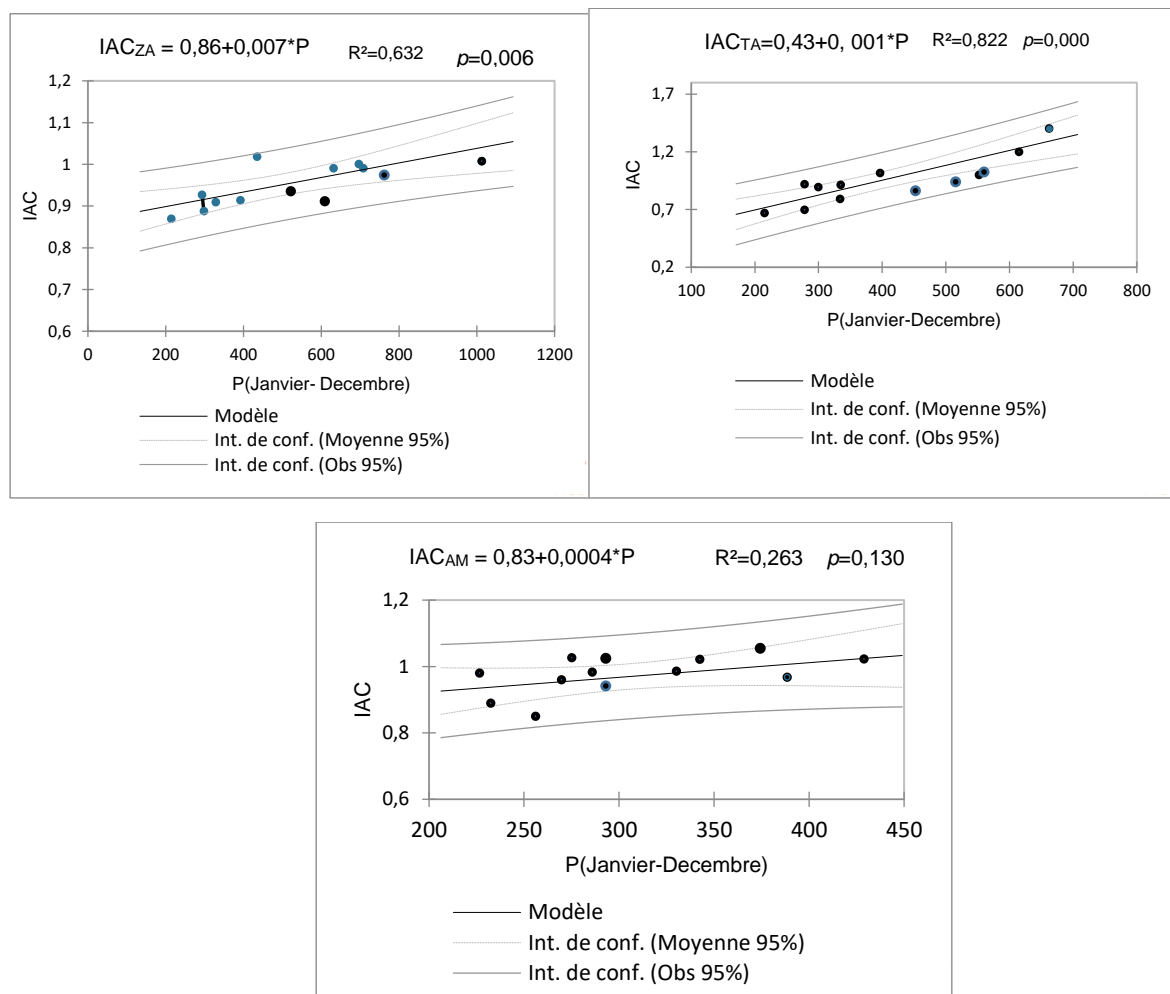


Figure 108 : Relation entre indice d'accroissement (IAC) et précipitation annuelle ; Scatterplots pour la période Janvier-Décembre

Les résultats du tableau 60 mettent aussi en exergue l'influence des précipitations printanières (Mars-Mai) sur la croissance annuelle du liège AC : 0,61(ZA) ; 0,76(TA) ; 0,58(AM) et sur les indices d'accroissement IAC : 0,53(ZA) ; 0,49(TA) ; 0,80(AM) (Fig.109 et 110).

Figure 109: Courbes de largeurs d'anneaux de liège (AC) et indices de croissance (IAC) par rapport aux précipitations printanières accumulées de mars à Mai

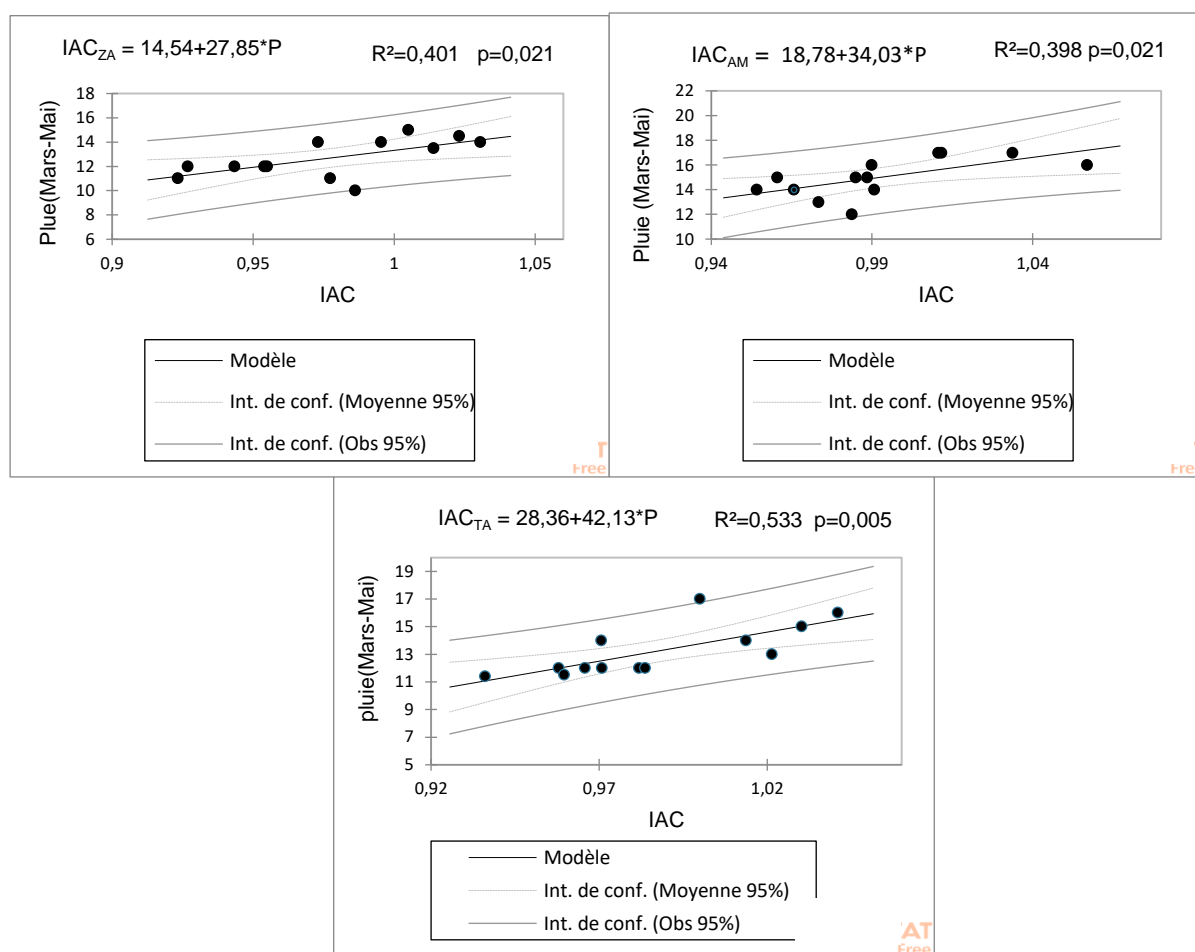


Figure 110 : Relation entre indice d'accroissement (IAC) et précipitation printanière. Scatterplots pour la période Mars-Mai

V.4.3.2.2-Influence des températures

Le chêne liège est une espèce héliophile de pleine lumière, avec une forte activité physiologique s'étalant du mois de mars au mois d'octobre. La température ne semble pas être un facteur limitant à sa croissance. Paradoxalement, comme toute espèce forestière exploitable, certains extrêmes de températures peuvent influencer négativement ses performances productives (Fig.111 et 112).

Figure 111. Réponse des indices de croissance du liège à la température (T) basée sur les coefficients de corrélation de Pearson (r) à Zariffet (ZA), Tagdemt (TA) et Ami-Moussa (AM). Symboles: \diamond , Tm, moyenne mensuelle; \square , Tmax, maximum moyen; Δ , Tmin, minimum moyen.

La figure 111 met en évidence une variation des coefficients de corrélation entre les indices d'accroissement et les températures mensuelles moyennes, maximales et minimales pour les trois provenances. Globalement, une corrélation négative a été observée avec les indices de croissance pour le cycle de 13 ans étudié. Cette situation n'est pas valable pour le mois d'avril par rapport aux températures maximales (ZA=0,252 ; TA=0,351 ; AM=0,367) et minimales (ZA=0,319 ; TA=0,249 ; AM=0,265), aux températures moyennes et minimales de janvier (ZA=0,212-0,344 ; TA=0,315-0,330; AM=0,225-0,310) et février (ZA=0,114-0,256 ; TA=0,218-0,175 ; AM=0,245-0,198), ni aux températures moyennes de septembre (ZA=0,075 ; TA=0,185 ; AM=0,169).

La figure 112 ci-dessous indique que les coefficients de corrélation significatifs les plus élevés ont été obtenus pour les températures moyennes du mois de mars avec les indices de croissance

(ZA=0,633 ; TA=0,731 ; AM=0,667), ce qui a un effet stimulant sur le démarrage de l'activité liégeuse à partir du mois d'avril (ZA=0,310 ; TA=0,342 ; AM=0,301).

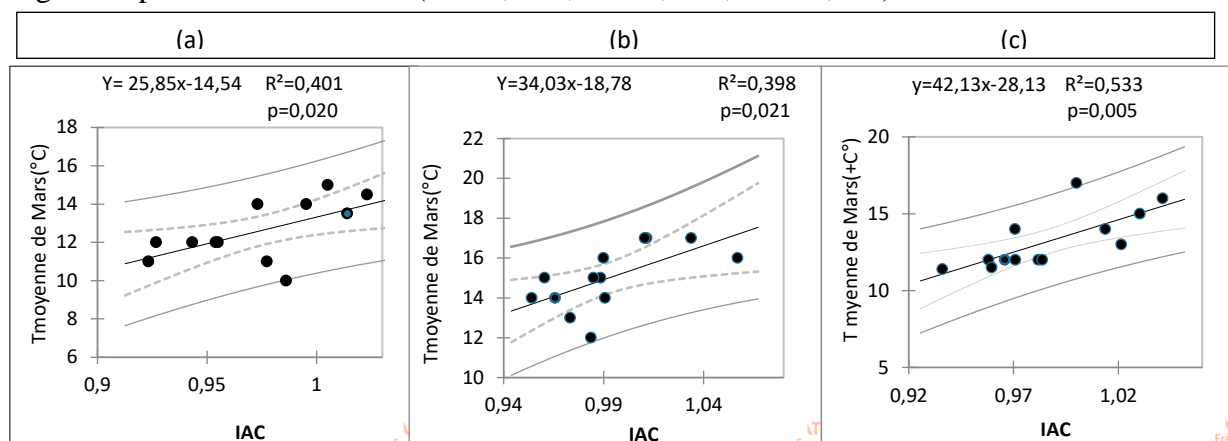


Figure 112: Coefficients de corrélation entre les indices de croissance (IAC) et la température moyenne mensuelle de mars: (a) Zarieffet (ZA), (b) Tagdempt (TA) et (c)

V.4.3.2.3-Effet des précipitations et des températures

Les coefficients de corrélation obtenus entre la croissance du liège et les indices climatiques montrent une relation significative pour les trois provenances (Tab.61).

Tableau 61 : Corrélation de Pearson, coefficients (r) entre la largeur des cernes annuels (AC), les indices des accroissements (IAC) et les indices climatiques

Indices climatiques	Coefficient de corrélation					
	AC			IAC		
	ZA	AM	TA	ZA	AM	TA

Les astérisques indiquent les coefficients statistiquement significatifs (* = P < 0,05, ** = P < 0,01 et *** = P < 0,001).

Les quatre indices climatiques utilisés expriment des conditions de sécheresse avancée dans la zone d'étude. La comparaison entre les indices d'aridité de De Martonne avec les largeurs des cernes annuels et les indices des accroissements confirment tous des moyennes réduites en cas de sécheresse, et par contre élevées en cas de saison humide. Des corrélations positives ont été notées pour les provenances de Zarieffet (AC-IAC=0,76-0,57), Tagdempt (AC-IAC=0,54-0,61) et Ami-Moussa (AC-IAC=0,66-0,55). Les liens de causalité entre la croissance annuelle du liège (AC-IAC) et l'indice hydro-thermique se traduisent par des corrélations négatives, très significatives à Zarieffet AC-IAC=-0,84 ; -0,65).

Pour les trois provenance, l'indice hydro-thermique met quant à lui en évidence une accentuation de l'aridité à partir de l'année 2016, très corrélée aux faibles valeurs de AC et IAC. A titre indicatif, à Zarieffet, cet indice climatique augmente fortement de 4,36 en 2016 à 8,82 en

2021, et se rapporte significativement à un AC variant de 1,89 à 1,45 et à un IAC variant de 0,95 à 0,92 (Fig.113).

Figure 113. Variation annuelle de l'indice des accroissements selon l'aridité de De Martonne et les indices hydrothermiques

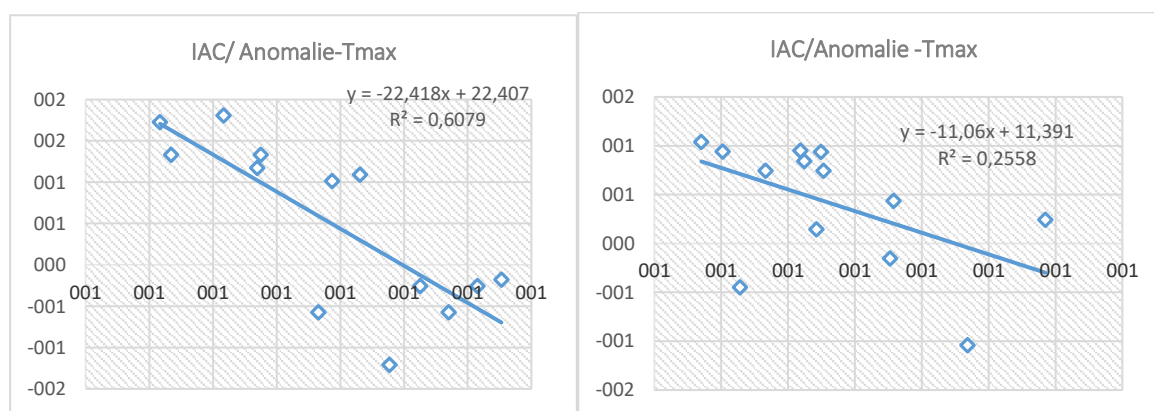
La figure 113, révèle une convergence marquée entre l'indice de Gaussen et l'indice xérothermique. En effet, l'allongement de la saison sèche exprime également le nombre de jours sans pluie parmi les mois considérés comme consécutifs secs au cours de l'année. Les trois provenances enregistrent en moyenne un indice xérothermique dépassant 130 jours analogue à 4,5 mois secs consécutifs.

A Zarieffet, pour une moyenne de 121 jour sèche (4 mois secs), les deux indices montrent une tendance à l'augmentation des mois secs consécutifs à partir de l'année 2015 (118 jours ; 4 mois secs) pour atteindre 7 mois en 2021 (197 jours). A Tagdempt et Ami-Moussa, la situation semble plus xérique, la période sèche dépasse en moyenne 5 mois pour un nombre de jours secs allant de 131 à 137, avec un pic de 7 mois en 2017 (TA) et en 2015 (AM).

La superposition des valeurs moyennes des deux indices climatiques sur les indices des accroissements met en évidence une forte corrélation négative ($-0,89 < r < -0,70$), très significative pour les trois provenance ($p < 0,001$). L'étalement de la sécheresse de mai à octobre affecte l'activité du liège au printemps et en automne (Fig.114).

Figure 114: Fluctuation annuelle de l'indice de croissance (IAC) comparée à la variation des indices de Gaussen et xérothermique.

Les six graphes de la figure 115 mettent en exergue une influence significative des anomalies des températures maximales sur les indices d'accroissements dans le cycle de production de liège (2009-2021). En effet, une disposition à l'amenuisement des IAC à chaque fois que les anomalies des températures s'accroissent et inversement dans l'état contraire. Des corrélations négatives ont été enregistrées entre les deux variables avec des coefficients de détermination (R^2) variant entre 77 % (ZA) et 37% (TA) et 50% (AM).



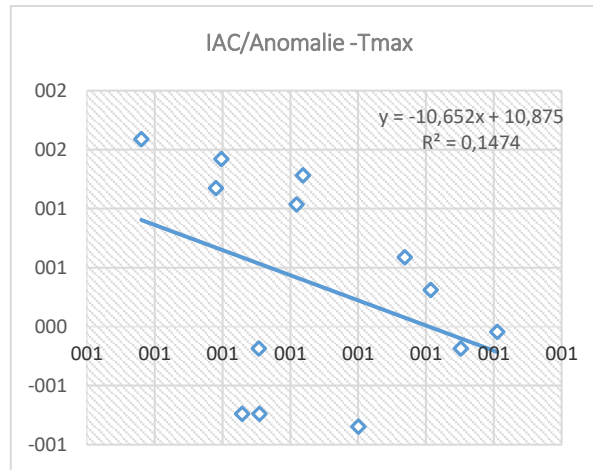


Figure 115 : Relation entre les anomalies des températures maximales et les IAC

Les liaisons cause à effet vont dans le même sens pour les anomalies des températures minimales avec des coefficients de corrélation négatives (Fig.116).

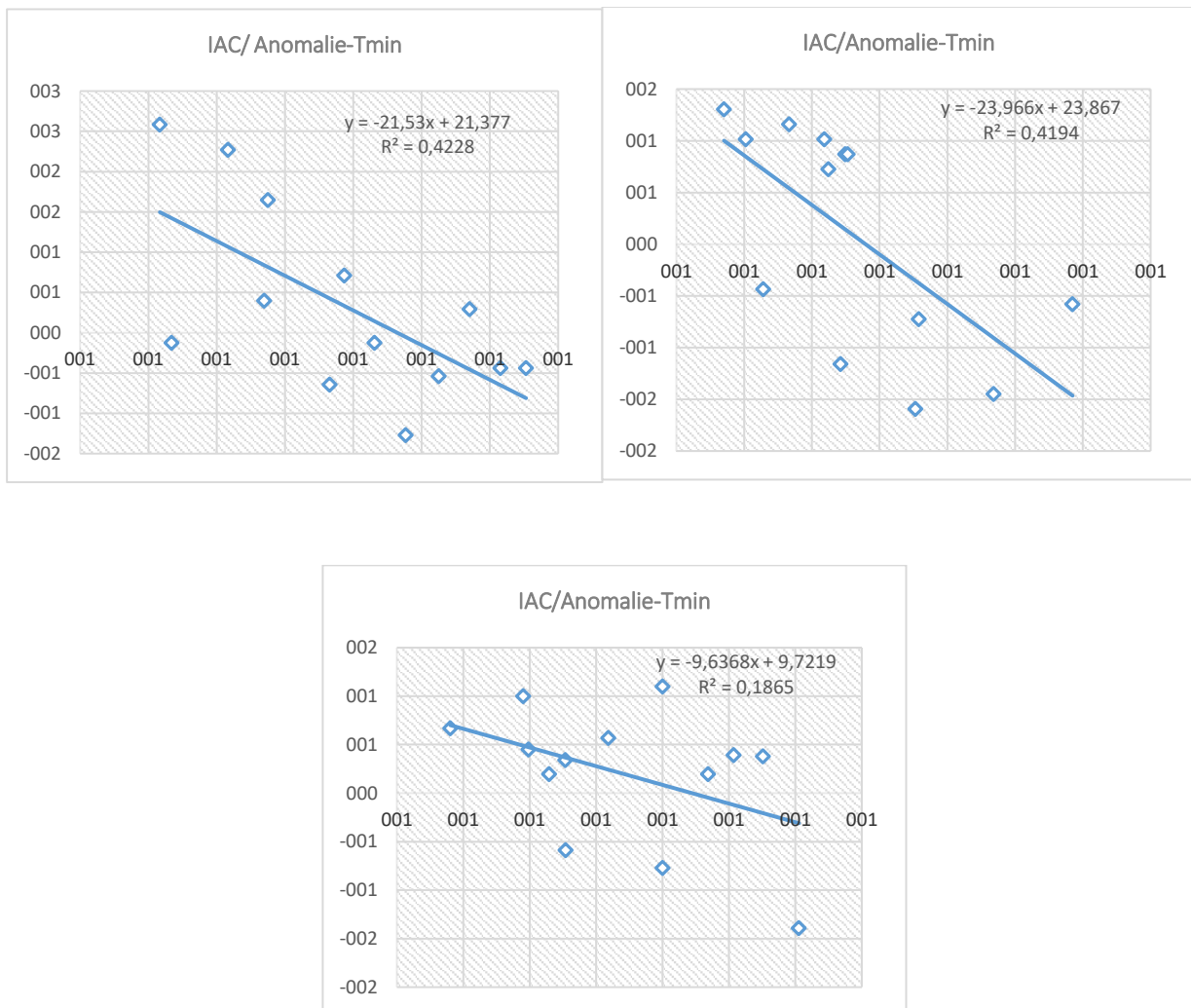
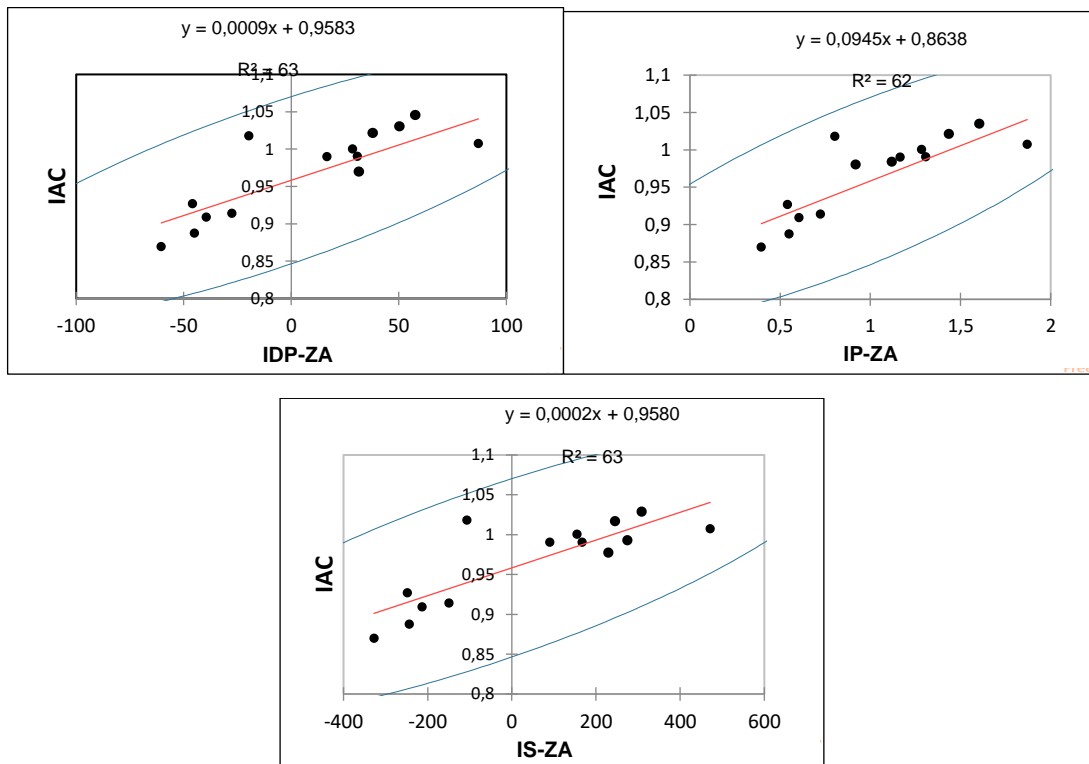


Figure 116 : Relation entre les anomalies des températures minimales et les IAC

ISP-TA
 ISV-TA

 IAC-AM
 IDP-AM
 IP-AM
 IS-AM
 ISP-AM
 ISV-AM

Une corrélation forte a été décelée entre les indices d'accroissements et les différents indices climatiques ($R^2_{ZA} = 63\%$; $R^2_{TA} = 58\%$ et $R^2_{AM} = 25\%$). En effet, il a été constaté une réduction des indices de croissance du liège une fois les différents indices chutent et juste dans le cas contraire, quel que soit le site (Fig.117-118-119). Dans notre opinion, cette situation n'est que le reflet des tendances d'aridité qui sévit ces dernières années dans la zone d'étude.



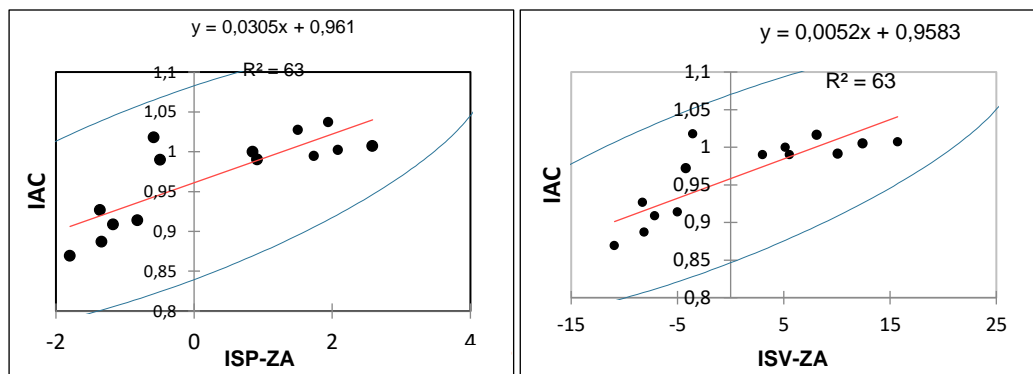


Figure 117: Corrélation entre les indices d’accroissements du liège et les indices climatiques(ZA)

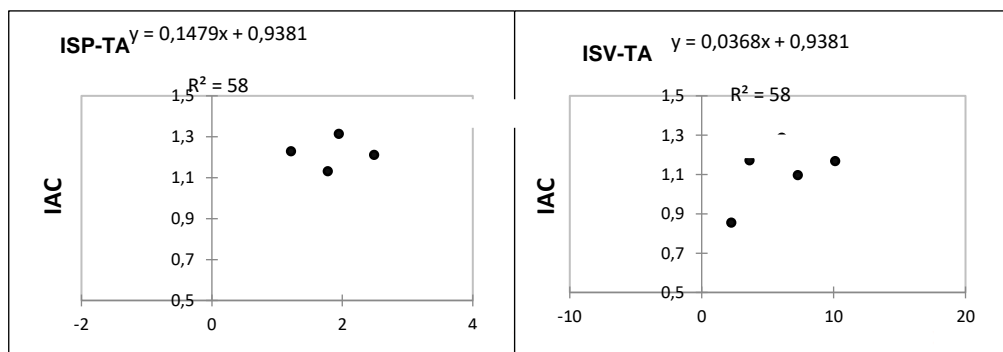


Figure 118 : Corrélation entre les indices d’accroissements du liège et les indices climatiques(TA)

Figure 119: Corrélation entre les indices d’accroissements du liège et les indices climatiques(AM)

Les cumuls des précipitations et les indices climatiques superposés aux indices d’accroissements durant le cycle de production de 13 années complètes se sont montrés corrélés positivement à l’exception des températures extrêmes (Tab.64-65-66).

Tableau 64 : Matrice de corrélation entre les IAC et les indicateurs climatiques(ZA)

Variables									
	1	0,80	0,54	-0,67	-0,81	0,80	0,80	0,80	0,80
	0,80	1	0,85	-0,90	-0,88	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,54	0,85	1	-0,717	-0,69	0,85	0,85	0,85	0,85
	-0,67	-0,90	-0,72	1	0,82	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90

	-0,81	-0,88	-0,69	0,82	1	-0,88	-0,88	-0,88	-0,88
	0,80	1,00	0,85	-0,90	-0,88	1	1,00	1,00	1,00
	0,80	1,00	0,85	-0,90	-0,88	1,00	1	1,00	1,00
	0,80	1,00	0,85	-0,90	-0,88	1,00	1,00	1	
	0,80	1,00	0,85	-0,90	-0,88	1,00	1,00	1,000	1

Tableau 65: Matrice de corrélation entre les IAC et les indicateurs climatiques(TA) 159

Variables									
	1	0,91	0,81	-0,79	-0,84	0,76	0,76	0,76	0,76
	0,91	1	0,83	-0,74	-0,65	0,80	0,80	0,80	0,80
	0,81	0,83	1	-0,81	-0,72	0,75	0,75	0,75	0,75
	-0,79	-0,74	-0,81	1	0,60	-0,91	-0,91	-0,91	-0,91
	-0,84	-0,65	-0,72	0,60	1	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49
	0,76	0,80	0,75	-0,91	-0,49	1	1,00	1,00	1,00
	0,76	0,80	0,75	-0,91	-0,49	1,00	1	1,00	1,00
	0,76	0,80	0,75	-0,91	-0,49	1,00	1,00	1	1,00
	0,76	0,80	0,75	-0,91	-0,49	1,00	1,00	1,00	1

Tableau 66 : Matrice de corrélation entre les IAC et les indicateurs climatiques(AM) 159

Variables									
	1	0,51	0,50	-0,39	-0,23	0,50	0,50	0,50	0,50
	0,51	1,00	0,84	-0,47	-0,75	0,98	0,98	0,98	0,98
	0,50	0,84	1,00	-0,23	-0,71	0,88	0,88	0,88	0,88
	-0,39	-0,47	-0,23	1,00	0,56	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49
	-0,23	-0,75	-0,71	0,56	1,00	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78
	0,50	0,98	0,88	-0,49	-0,78	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,50	0,98	0,88	-0,49	-0,78	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,50	0,98	0,88	-0,49	-0,78	1,00	1,00	1,00	1,00
	0,50	0,982	0,878	-0,495	-0,783	1,00	1,00	1,00	1

V.5-Discussion

Le chêne liège est une espèce forestière purement héliophile dont l'activité méristématique secondaire des deux assises cambiale et corticale est fortement réglée par la température printanière et estivale. Cela signifie, que l'arbre bénéficie d'une manière directe des réserves en eau stockées dans le sol durant la période de repos végétative, allant du mois de novembre à mars (Natividade,1956). Cette adaptation normale de l'espèce est mal confirmée dans le cas des trois subéraies étudiées. Le problème de la distribution saisonnière de la pluviométrie est majeur dans notre zone d'étude. La saison humide qui précède la saison de croissance du liège est caractérisée par l'accumulation d'une certaine quantité de pluies pendant une période plus au moins longue.

Cette distribution est variable selon les années. Il y a des années où la pluviométrie est assez bien répartie et d'autres où elle est soit concentrée au début soit à la fin de la saison (Daget, 1977).

En effet, la synthèse climatique des treize années analogues aux années de croissance complète du liège s'est traduite par un bilan hydrique négative caractérisé par la dominance des années sèches et déficitaires de l'ordre de 70 %, soit une perte moyenne variant entre 200 et 300mm par rapport à la moyenne tombée habituellement dans chaque subéraie.

L'analyse dendro-climatologique des échantillons du liège a révélé une similitude avec ce qui est cité dans la littérature (Natividade, 1956 ; Fos et al., 1997 ; Costa et al., 2002 ; Fortes et al., 2004 ; Montero et Canellas, 1999): les épaisseurs maximales des anneaux de croissance se produisent dans le premier accroissement complet après la levée. Par ailleurs, la quantité de liège dans chaque cycle végétatif se réduit progressivement après la première année et significativement après la quatrième année. Ces derniers représentent 45% de la production subéreuse en 13 années complète, tandis que sur le liège portugais ce taux avoisine 75% en seulement 9 années (Pereira et Tomé, 2004 ; Chorana, 2021).

La croissance annuelle moyenne de 2,17 mm classe le suber de la zone d'étude dans la catégorie des lièges minces de montagne, similaire à celle signalée en Espagne par Fos et Barreno (1994) et Caritas et al(1996) avec des largeur moyenne allant 1,6 à 2,9 mm/an .

Notre moyenne demeure éloignée du liège Portugais, dont les intervalles varient entre 3,08 et 5,17mm/an (Poeiras, 2021). Dans un contexte scientifique, cette moyenne annuelle est proche du minimum cité dans le Projet Européen de Recherche sur le Liège (CORKASSESS,2001): 2,1mm/an (Portugal) ; 2,0mm/an (Catalogne-Espagne) ; 2,8mm/an (Corse-France) et 2,3mm/an (Sardaigne-Italie).

Durant le cycle de production du liège marchand, généralement de 9 ans à 15 ans, il existe une tendance de diminution de la largeur des cernes avec l'augmentation de la perturbation environnementale. Au cours de ce cycle, la rectitude de la courbe de croissance du suber peut être modifiée par l'action de divers facteurs qu'il est souvent difficile de distinguer ou de quantifier l'importance relative.

La croissance du liège est largement influencée par les conditions climatiques, comme l'ont prouvé certaines études (Ferreira et al., 1998 ; Schmidt et al., 2009 ; Vaz et al., 2011 ; Oliveira et al., 2016 ; Leite et al., 2019). Tous ces auteurs affirment que la croissance du suber est très influencée par les événements météorologiques extrêmes, principalement les précipitations, la durée de la saison estivale et la rétention hydrique du sol.

Dans ce contexte, les approches méthodologiques utilisées en dendro-écologie pour corrélérer les variables climatiques avec la largeur des cernes dans le bois (Fritts,1976 ; Schweingruber,1988) ont également été appliquées à la largeur des cernes dans le liège, et l'effet des précipitations et de la température à différentes périodes de l'année a été aussi analysé dans un cadre de dendro-climatologie (Ferreira et al., 1988 ; Costa et al., 2002).

Pereira (2007) soutient que la croissance annuelle du liège est plus élevée durant les années avec plus de précipitations et significativement réduite les années de sécheresse (précipitations inférieures à 500 mm). Ce résultat a été confirmé dans cette étude par les précipitations cumulées de janvier à décembre avec des corrélations très significatives ($p < 0,001$).

Contrairement à ce qui a été rapporté sur les lièges de la rive nord de la Méditerranée (Caritat et al., 2000), aucune corrélation n'a été interceptée en superposant les largeurs de cernes et les indices des accroissements sur les cumuls de pluie des années précédentes (t-1). Cette observation semble très logique, la sécheresse de ces dernières années rend ce bilan hydrique interannuel très négatif pour pouvoir compenser les pertes des années précédentes. Les deux résultats qui semblent les plus proches de l'adaptation physiologique de l'espèce à la réalité climatique actuelle sont les cumuls de pluies des précipitations printanières (mars-mai) et les pluies de janvier à juin de l'année en cours. A notre avis, ces deux périodes de l'année sont les meilleures pour alimenter les réserves hydriques du sol, car elles coïncident avec le débourrement et la montée de la sève brute et par conséquent l'activité du cambium et du phellogène. Ces deux périodes affectent de manière significative le liège de printemps et donc le nombre des grandes cellules (Dehane et Ghefar, 2017). Cette constatation concorde avec celle de Caremero et al (2024) affirmant que la croissance du est principalement favorisée par des conditions printanières humides et fraîches, particulièrement dans les sites les plus secs.

En effet, la sévérité climatique qui règne dans la zone d'étude a fait que l'ensemble des indicateurs de ces indices influent significativement sur l'activité des deux assises cambiales et corticales. Les corrélations positives avec les précipitations annuelles et de la fin du printemps sont des réponses typiques de nombreuses espèces qui poussent dans un climat méditerranéen (Tessier, 1986; Gutiérrez, 1988). D'ailleurs Camarero et al(2023), estiment que les anneaux de liège ont tendance à être plus étroits pendant les années sèches.

En ce qui concerne la température, on observe généralement un faible effet positif et également un impact négatif sur la largeur des cernes et l'indice de croissance du liège sauf la période qui précède le début de l'activité phellogène en mars (Tmoyenne). Paradoxalement, les températures maximales et minimales du mois de mars peuvent affecter négativement voire significativement la croissance du liège pendant la période printanière (avril, mai et juin) (gelées tardives ou pic de température). Il est également le cas aux températures maximales estivales et automnales dépassant 40°C, la croissance du liège devient alors limitée par le stress hydrique. Ce qui est rapporté également par d'autres travaux (Corcuera et al., 2004 ; Alla et Camarero, 2012 ; Granda et al., 2014) : les températures maximales estivales élevées ont tendance à restreindre la formation de liège, en augmentant les taux d'évapotranspiration et en entraînant un stress dû à la sécheresse, un phénomène couramment observé chez les espèces de chênes méditerranéens.

A ce niveau de température extrême, la capacité nette d'assimilation du CO₂ diminue à cause de la transpiration intense des feuilles qui entrave la photosynthèse, en augmentant le risque de cavitation et d'embolie estivale (Byun,1999 ; Abdenbi, 2003). Selon Caritat et al(1996), la dynamique du cambium du liège est positivement sensible aux facteurs climatiques pendant les années où la température est modérément douce, il met aussi l'accent sur le fait que les

températures élevées ou très basses du mois de mars pourraient inhiber l'activité des phellogène. Houston (1992), va dans le même sens du resonnement, dans l'état normal des choses, les longues périodes de sécheresse très sévères portent préjudices aux plantes, y compris qui sont réputées par leur résistance comme le chêne liège. Cela est justifié dans notre zone d'étude puisque la saison sèche dure actuellement jusqu'à six mois (Mai-Octobre) voire sept.

Dans un contexte de changement global, Le GIEC a identifié la région méditerranéenne, déjà préoccupante, comme un « point chaud » du changement climatique (Stocker et al., 2014). Les valeurs de l'indice De Martonne expriment clairement l'aridité interannuelle entre les périodes de sécheresse et d'humidité, elles oscillent entre 37 et 7 à Zariéffet, entre 27 et 9 à Tagdempt, et entre 14 et 7 à Ami-Moussa. Dans cette région d'Algérie, les contrastes climatiques rigoureux sont proportionnels à la continentalité, passant du sub-humide au semi-aride. Avec une moyenne de 15 (indice de sécheresse) similaire au cycle de croissance de 13 ans, le climat actuel évolue vers l'aridité, entravant copieusement la croissance des espèces forestières. D'ailleurs, cela a été confirmé par l'indice hydrothermique avec des corrélations négatives avec AC et IAC.

Dans la zone d'étude, l'allongement de la saison sèche signifie un changement climatique brutal pour les trois sites. Elle dépasse en moyenne les cinq mois et est actuellement proche du chiffre 7, compte tenu des jours consécutifs secs sans pluie qui culminent à 131 jours.

Plusieurs auteurs s'accordent à dire que l'eau est un facteur déterminant dans le développement de la forêt. Elle représente généralement 85% à 90% du poids frais total des arbres et des plantes en général; ses caractéristiques physico-chimiques lui permettent d'être le support des processus métaboliques et la base de la structure morphologique de la plante (Bradford et Hsiao, 1982). Conformément à Pereira et al (1992), les précipitations ont une large influence positive sur la croissance du liège et la sécheresse est un facteur limitant, indiquant l'importance des réserves en eau du sol. L'arbre réagit à un manque temporaire d'eau ou à une température excessive par une réduction de la croissance radiale et subéreuse, puis le cycle végétatif reprend avec l'amélioration des conditions hydriques.

Mais, dans des conditions de croissance extrêmes et négatives (sécheresse aigue), l'arbre ne peut puiser que dans ses réserves d'eau accumulées au cours des années précédentes et, dans les cas critiques, ne dispose que des réserves gagnées pendant les trois mois du printemps. Des études menées au Portugal ont montré que pendant les périodes sans pluies avec chaleur excessive, 72 % des eaux transpirées par le chêne liège émanent de l'eau stockée dans le sol (David et al., 2004).

L'économie de l'eau pendant le stress hydrique est très discuté pour le cas du chêne liège (Ribeiro et Tomé, 2002 ; Nadezhdina et al., 2008). L'arbre en perdant ses capacités physiologiques à satisfaire ses différents organes productifs à savoir le cambium, le phellogène, les bourgeons adventifs et terminaux, réagit négativement en diminuant les épaisseurs des anneaux subéreux au profit des autres organes (Costa et al.,2002).

En effet, la sévérité climatique qui plane dans la zone d'étude a fait que l'ensemble des indicateurs de ces indices influent significativement sur l'activité des deux assises cambiales et corticales. Les corrélations positives avec les précipitations annuelles et de la fin du printemps

sont des réponses typiques de nombreuses espèces qui poussent dans un climat méditerranéen (Tessier, 1986; Gutiérrez, 1988).

Dans la région d'étude, l'activité ordinaire du phellogène (tissu responsable de l'activité subéreuse) dure du mois d'Avril à Septembre, très influencée par l'humidité de l'air et du sol même en période sèche. Elle reçoit un coup fatal, quand le climat devient xérique sous l'effet de l'évapotranspiration importante des végétaux et du sol durant une période continue de sécheresse. Natividade (1956) signale que le tempérament xérophyte du chêne liège fait qu'un minimum de conditions lui est nécessaire pour vivre, en dehors desquelles les arbres entrent en régression.

Dans un contexte forestier optimiste, le chêne liège malgré la sensibilité de la production de liège à la sécheresse, la croissance du liège montre également une reprise rapide après des années exceptionnellement sèches (KurzBesson et al., 2014 ; Oliveira et al., 2016). Comme d'autres espèces de chênes, le chêne-liège peut s'adapter en alternant entre une utilisation radicale des sources d'eau du sol peu profondes et des sources d'eau souterraine profondes pendant le stress environnant pour maintenir sa croissance, affichant également une adaptation hydraulique (Kurz-Besson et al., 2006 ; Otieno et al., 2006 ; David et al., 2007, 2013 ; Mendes et al., 2016).

V.6-Conclusion

La croissance annuelle moyenne du liège de la zone d'étude est de l'ordre de 2,17 mm le classant ainsi dans la catégorie des lièges minces de montagne. Les largeurs des accroissements annuels du liège de *Q. suber* exprimées par leurs indices d'accroissement se sont avérées très sensibles à la variabilité climatique d'une année à l'autre, et notamment aux pluies printanières (mars-mai) et les pluies de janvier à juin de l'année en cours (t). D'ailleurs aucune aucune corrélation n'a été dégagée en superposant les largeurs de cernes et les indices des accroissements sur les cumuls de pluie des années précédentes (t-1).

Dans le cas du chêne-liège, l'effet de la température est moins important que celui des précipitations. Mais, la situation actuelle du changement climatique résultant de variations plus subtiles et progressives des facteurs environnementaux tels que l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'air, la sécheresse aiguë est devenue une réalité dans la zone d'étude. Le stress hydrique coïncidant avec la période végétative du chêne-liège affecte grandement l'activité du phellogène responsable de la croissance annuelle du liège.

Un bilan hydrique annuel négatif, dû à des longs mois de sécheresses et des températures extrêmes inhabituelles et à des taux d'évapotranspiration élevés, est préjudiciable à la production de liège. En effet, la synthèse climatique des treize années analogues aux années de croissance complète du liège s'est soldée par un bilan hydrique négative à prédominance des années sèches et déficitaires de l'ordre de 70 %, soit une perte moyenne variant entre 200 et 300mm par rapport à la moyenne tombée habituellement dans chaque subéraie.

La zone d'étude de par sa situation géographique à la limite de distribution la plus méridionale du chêne-liège dans le nord-ouest de la méditerranée, subit d'énormes dégâts environnementaux à cause du réchauffement climatique. Cet impact négatif de ces changements environnementaux

brutaux est plus marqué dans les peuplements continentaux de chêne-liège à l'instar de la région Nord-Ouest d'Algérie que les autres subéraies des régions Centre et Est, plus humides et plus frais.

Chapitre VI
Analyse globale du risque environnemental en suberaie

VI.1- Introduction

Le monde fait face à de nombreuses crises, d'ordre sociale, économique, climatique, écologique et sanitaire, qui s'interagissent dans le temps et dans l'espace sans épargner les écosystèmes forestiers (GIEC, 2022). En effet, les crises environnementales observées en forêt ces dernières décennies, indiquent d'une manière éloquente l'ampleur des dégâts perpétrés par les crises naturelles (secheresses, feux de forêts, inondations, tempêtes, séismes, éruptions volcanique...) et technologiques tels que les émissions industriels, nucléaires et biologiques (Masrouri et Pantet, 2009). Tous ces risques peuvent être classés en fonction de leur fréquence d'apparition et de leur gravité (Farmer, 1967).

Parmi ces écosystèmes socio-économiques perturbés, les suberaies méditerranéennes demeurent un modèle de forêts anéantis par le stress environnemental, selon lequel un arbre soumis à un stress répété (insuffisance hydrique et minérale, une blessure ou une maladie pathogène par exemple) finit par être endommagé et devient susceptible à l'attaque d'organismes secondaires le conduisant éventuellement à la mort. Les premiers récits durant les années 1960 étagent le stress environnemental à un système à trois échelons successifs de facteurs, les facteurs prédisposants, les facteurs déclenchants et les facteurs aggravants (Houston, 1967 ; Sinclair, 1967). Plus tard, les concepts ont évolué vers d'autres causes plus directes, l'épisode de secheresse aigue, à l'origine de progrès majeurs dans la connaissance des mécanismes de réponse des différentes essences au stress hydrique (Aussenac, 1978). Plus tard durant le début des années 2000, on assiste à une évolution de la compréhension des crises environnementales en forêt: on évoque plutôt les risques en cascade, par exemple les interactions entre sécheresse-gestion forestière et l'apparition des agents pathogènes sur les peuplements (Nageleisen & Huart, 2005 ; DSF, 2014).

Depuis l'édition du rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC-IPCC,2014), le stress environnemental est plutôt associé aux phénomènes météorologiques extrêmes. Ce rapport atteste d'une manière claire qu'à l'avenir les épisodes climatiques vont se produire avec une intensité et une fréquence accrue du fait du changement climatique en cours, et constitueront un risque central pour le secteur forestier (Brunier et al., 2020). De ce fait, la gestion forestière va passer rapidement de son concept traditionnel basé sur l'aménagement classique et les travaux sylvicoles associés vers une de gestion de crise en forêt, ou plutôt vers la notion de gestion des risques environnementaux (Gauquelin et al., 2010 ; Murray & Ebi, 2012).

L'objectif principale de ce chapitre est de caractériser le risque environnemental dans la zone d'étude, et de permettre au forestier d'opter vers une nouvelle stratégie dans la gestion durable des peuplements de chêne liège, et plus particulièrement dans le contexte des changements environnementaux, ou clairement la gestion des risques après perturbation et tous ce qui en découle : déficit hydrique, abandon des suberaies, dépérissement et mauvaise exploitation du liège.

VI.2-Matériels et méthodes

VI.2.1-Méthode d'analyse du risque en forêt

La gestion des risques environnementaux en forêt est charpentée sur trois principes : l'aléa, la vulnérabilité et les enjeux. On appelle risque le produit de ces trois variables (Brunier et al., 2020) :

En l'absence d'enjeu, il n'y a pas de risque. Par exemple, il n'y a pas de risque si la sécheresse (même fréquente et intense) touche une zone non exploitée et désertique. Un risque provoquant d'énormes impacts, il peut alors devenir une catastrophe perturbant durablement les équilibres naturels et sociaux à divers niveaux d'échelle.

- L'aléa correspond à un « processus ou un phénomène naturel plus ou moins prévisible, hors de contrôle humain susceptible d'entraîner des perturbations socio-économiques ou une dégradation de l'environnement. Les aléas peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. Les aléas naturels sont essentiellement associés à des processus et à des phénomènes naturels (climatiques, hydrologiques, géologiques ou géomorphologiques). Les aléas anthropiques, ou aléas induits par l'homme, tels que l'élevage intensif en forêt, transformation des terres forestières et coupes illicites du bois (PNUD, 2010).

Les aléas peuvent avoir une origine et des conséquences individuelles, séquentielles ou cumulatives : les changements d'utilisation des terres et la dégradation anthropique et naturelle des écosystèmes. Chaque aléa est caractérisé par sa localisation, son intensité, son ampleur, sa fréquence et le degré de probabilité qui lui est associé (Bréda, 2023).

- La vulnérabilité est la « condition provoquée par des facteurs ou processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux qui ont pour effet de rendre les personnes, les communautés, les biens matériels ou les écosystèmes plus sensibles aux aléas (Bentrou Mathlouthi et Pomade, 2023).
- Les enjeux sont les personnes, biens, équipements, environnement, susceptibles d'être affectés par un phénomène d'origine naturelle et/ou anthropique et de subir des préjudices ou des dommages. Les enjeux ne sont étudiés que dans la mesure où ils présentent une certaine vulnérabilité face aux aléas (Nitschke et Innes, 2008).

Dans le cas de la présente thèse, le principal risque environnemental qui entrave le devenir de la forêt dans le secteur nord-ouest d'Algérie est fortement imputé au dépérissement du chêne liège. Ce phénomène naturel résulte d'un cumul d'aléas (interaction entre facteurs abiotiques et biotiques, alimentés par des événements extrêmes) sur des arbres en sénescence, endommagés, vulnérables à la mauvaise exploitation du liège, et au tassement du sol, au manque de fertilité des sols et de leur sensibilité à la sécheresse atmosphérique et édaphique. Les enjeux à savoir le secteur forestier consolide des pertes économiques énormes point de vue production et qualité du liège, et le milieu environnemental enchaîne la disparition de la biodiversité et les rôles écologiques fondamentaux de la forêt (Fig.120).

Figure 120: Schéma synthétisant l'analyse de la crise du chêne liège dans la zone d'étude

VI.2.2-Analyse et compréhension d'une crise environnementale en subéraie

Cette analyse vise à définir les éléments clés spécifiant une crise environnementale en subéraie. Cette gestion s'articule sur les étapes suivantes:

L'identification et l'évaluation des aléas en subéraie perturbée visent à quantifier les symptômes identifiés. Chaque aléa noté doit être apprécié selon quatre attributs : sa probabilité d'occurrence, sa gravité, sa criticité, son niveau d'apparence (bas ou haut), et la décision à apporter à l'aléa (les mesures de contrôle).

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer, avec le plus haut degré de vraisemblance possible, les probabilités qu'un aléa se manifeste à divers niveaux d'intensité (très faible, faible, moyenne et élevée ou très rare, rare, fréquent et peu fréquent) et le niveau de gravité (les impacts ou conséquences possibles) (négligeables, mineurs, modérés, majeurs, et catastrophiques).

La pondération des deux propriétés (probabilité et gravité) est projetée selon deux axes (X et Y). L'objectif espéré est d'obtenir une matrice de criticité en multipliant les échelles de la probabilité à celles de la gravité (Criticité ou impact du risque= Probabilité x Gravité). La figure 121 est un exemple de la forme finale d'évaluation du risque étudié. Les cases à l'intérieur de la matrice sont les scores du risque.



Figure 121 : Matrice de criticité (Probabilité x Gravité)

Selon la figure 121, la matrice de criticité est une mosaïque de couleur allant du vert clair au rouge foncé. Le vert clair indique que le risque est insignifiant avec une criticité très faible, le vert foncé est synonyme de risque acceptable ou une criticité faible, l'orange annonce un risque moyen avec une criticité modérée, tandis que le rouge annonce l'alarme c'est un risqué élevé ou fort, enfin, le rouge foncé s'amorce quand le risque devient très dangereux ou très fort, il s'agit d'une criticité extrême.

L'indice de risque sylvo-sanitaire (IRS) est calculé selon les scores du risque des lignes de disfonctionnement et les colonnes qui sont l'impact d'un disfonctionnement. Cinq classes de risque sont définies :

VI.2.3- Analyse multivariée entre les indices technologiques du liège et les paramètres environnementaux

Afin de mieux expliquer la relation entre les indices technologiques du liège et certains facteurs entourant la croissance du chêne liège, une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a été réalisée par le biais du logiciel XLStat. Le tableau 67 retrace les modalités utilisés pour expliquer cette relation.

Tableau 67 : Les variables et les modalités retenues pour l'ACM

Variables	Code	Modalité
	ID	
	IRS	
	Itp	
	ISV	
	IST	
	EMB	
	ENR	
	INC	
	APY	
	QX	
	IDV	
	IAC	

	ICM	
	IQ	

VI.3-Résultats et discussion

Le management des risques ou la gestion des risques est l'étape principale pour contrôler et suivre les aléas. Les résultats de l'analyse et la compréhension d'une crise environnementale en subéraie passent inévitablement par la clarification des éléments suivants:

VI.3.1- L'identification et l'évaluation des aléas

Cette étape s'amorce au moment où des symptômes inhabituels très nets apparaissent. Il convient donc tout d'abord d'identifier ces symptômes, et de sortir le maximum d'aléas possibles. Cela nécessite une très bonne connaissance du terrain et des mécanismes d'inventaires fiables pour réaliser ces diagnostics : la végétation, les paramètres climatiques, les événements extrêmes, la topographie et les facteurs humains sont les principales composantes de l'aléa.

Dans la présente thèse nous avons identifié et évalué 16 aléas susceptibles d'amplifier le dépérissement et compromettre le devenir du chêne liège dans la zone étudiée (Tab.68).

Tableau 68: Différents aléas associés à la crise environnemental en suberaie

Nombre	Origine de l'aléa
Aléa1	
Aléa2	
Aléa3	
Aléa4	
Aléa5	
Aléa6	
Aléa7	
Aléa8	
Aléa9	
Aléa10	
Aléa11	
Aléa12	
Aléa13	
Aléa14	
Aléa15	
Aléa16	

VI.3.2- Analyse des aléas

L'Analyse des aléas vise essentiellement à déterminer les facteurs déclenchant du risque à travers des relations de cause à effet entre les aléas. Il s'agit entre autres de réaliser une cartographie du risque.

Dans le cadre de cette thèse, à travers le croisement entre les échelles graduelles de probabilité et celle de gravité des aléas, la matrice de criticité dégagée démontre clairement le niveau du risque environnemental auquel sont confrontés les trois subéraies (Fig.122).

Figure 122: Criticité de risque du dépérissement du chêne liège dans la zone d'étude

Les résultats de la figure 125 mentionnent cinq niveaux de criticité susceptible de générer un risque graduel de défoliation ou de dépérissement du chêne liège.

- Une criticité très faible imputée à deux aléas représentés par les insectes xylophages, et les défoliateurs. Comme indiqué dans le chapitre v précédent, l'occurrence des insectes nocifs pour la santé du chêne liège est très faible et ne constitue pas un sérieux risque à l'instar des autres pays subéricoles. On est très loin de la catastrophe et de la prolifération.
- Une criticité faible reliée seulement à l'aléa « cycle de production incorrecte ». En effet, la présence de plusieurs cycles de récoltes dans le même peuplement ne constitue pas une menace pour la vigueur des arbres, plutôt favorise l'exploitation en continue selon le régime de futaie jardinée et ne compromet pas l'avenir des arbres en cas d'incendie.
- Une criticité moyenne ou modérée perpétrée par une cascade d'aléas d'origine différente : Surpâturage, déficit hydrique du sol, érosion, abandon et la mauvaise gestion. Dans un contexte d'une bonne gestion administrative et forestière, ce dernier facteur demeure primordial pour la durabilité de n'importe quel socio-écosystème. La mauvaise gestion ou l'incompétence génère l'abandon des lieux au profit des mauvaises mœurs tels que le surpâturage avec des charges à l'hectare dépassant la tolérance des peuplements sur des sols déjà fragilisés par la sécheresse édaphique et l'érosion, conséquences directes du tassement des sols. Le laxisme administratif se définit aussi par le nombre d'arbres mutilés par l'arrachage illicite du liège et les coefficients de démasclage excessifs appliqués aux arbres producteurs. Le cumul de ces aléas au fil des années constitue un risque de dépérissement modéré pour le chêne liège. Il s'agit d'une situation réversible qui peut être corrigée avec plus de responsabilité et de fermeté, par exemple une mise en défens sur des périodes allant de 5 à 10ans.
- Une criticité élevée, conséquence directe de la conjonction de plusieurs aléas préjudiciables et en même temps redoutables sur la vigueur des arbres : une sécheresse aigue, des incendies récurrents, des attaques phytopathogène mortelles, un enrésinement mal contrôlé superposé à un sous-bois dense et broussailleux, et des dommages sur les troncs témoignant d'une qualité d'exploitation très défailante. Le risque de dépérissement est énorme et la sonnette d'alarme est déclenchée. Nous sommes dans la situation de la crise sylvo-sanitaire proprement dite qui ne peut être remédiée que par la gestion des risques à moyen et à long terme.
- Une criticité très élevée absente, mais très probable et prégnante à long terme, si les changements environnementaux extrêmes se manifestent avec une dangerosité accrue.

VI.3.3-Actions face aux aléas ou la gestion du risque environnemental

Les actions face aux aléas s'entament lorsque les composantes du risque sont identifiées, il devient possible d'élaborer des stratégies de gestion, qui comprennent des actions nécessaires aujourd'hui et à l'avenir pour faciliter les réponses aux aléas. L'objectif est d'atténuer le risque environnemental en diminuant sa probabilité et sa gravité et dans le cas extrême de l'externaliser. Selon Dequinsey et Thomas (2017), le plan d'action s'échelonne sur l'organigramme suivant (Fig.123) :

Figure 123 : Récapitulatif des principaux termes liés à la notion de risque

La figure 123 s'identifie dans les actions suivantes :

- La prévision est l'étude de l'aléa (nature, fréquence, localisation, intensité, voire date des événements majeurs) permettant un calcul plus précis du risque.
- La protection est l'ensemble des mesures prises pour diminuer l'impact potentiel d'un aléa sur un enjeu donné (population, activités anthropiques...), et donc diminuer le risque en diminuant la vulnérabilité.
- L'adaptation est la diminution de la vulnérabilité par diminution à la fois de l'exposition à l'aléa et de ses effets potentiels en prenant en compte les caractéristiques de l'aléa (mise en place de dispositifs spécifiques du fait de la présence d'un aléa donné à un endroit donné). La recherche de la diminution de l'exposition est la limitation alors que la recherche de la baisse des effets néfastes est l'atténuation.

Par exemple, étudier la prévision du dépérissement dans la zone d'étude par la fréquence des arbres perturbés (diagnostiqués annuellement) permet de statuer sur l'intensité du risque et de le dater et même de le comparer aux années antérieures, et par conséquent suivre son évolution dans le temps à travers une base de données (stabilité sanitaire, dégradation ou amélioration). Plus l'origine des dégâts sera comprise, plus les actions de gestion réactive à court terme pendant la crise seront permises par des actions de protection adaptative de type limitation :

- Aucune exploitation du liège si les événements extrêmes sont prévisibles.
- Rabaissement des hauteurs d'écorçage lors de la prochaine récolte.
- Eviter d'exploiter le liège sur les sujets stressés.

D'autres actions de type atténuation seront aussi à prescrire :

- Réduire le sous-bois et les espèces concurrentes autour des arbres producteurs.
- Effectuer des coupes d'amélioration de type éclaircie (forêt irrégulière), de surface variable mais généralement modéré (extraction jusqu'à 25% de la surface terrière initiale).
- Déboisement sélectif, avec maintien d'un couvert arbustif variable, de 0-10% à 30-40% respectant particulièrement les espèces d'intérêt pour la biodiversité : arbousier (*Arbutus unedo*), ou chêne vert (*Quercus ilex*), et espèces protégées ou rares.
- Traitement des restes et des rémanents de coupes (par concassage ou broyage) pour éviter les risques d'incendie et les infestations par les agents pathogènes.
-

VI.3.5-Suivi et surveillance des aléas

Le suivi et la surveillance des aléas et mis en œuvre afin d'identifier l'état du risque environnemental selon les mécanismes suivants:

- Le risque peut être occasionnel ou passager et par conséquent supprimé s'il est du passé et ne représente aucune menace pour le système socio-écologique à l'avenir.
- Il peut être actif et surgir à tout moment. Dans ce cas les systèmes de veille et les réseaux de surveillance de l'état sylvo-sanitaire des arbres sont des opérations de longue haleine indispensables pour détecter et objectiver les crises à venir.
- Le risque peut être latent ou couvant. Dans cette situation on doit le soumettre à un système d'observation avancé tels que les systèmes de détection technologique de pointe comme les satellites, le SIG, le Lidar et les systèmes de détection biomécanique du dépérissement directement sur arbre à l'instar du résistographe (Fig.126).

La cartographie de l'aléa au SIG

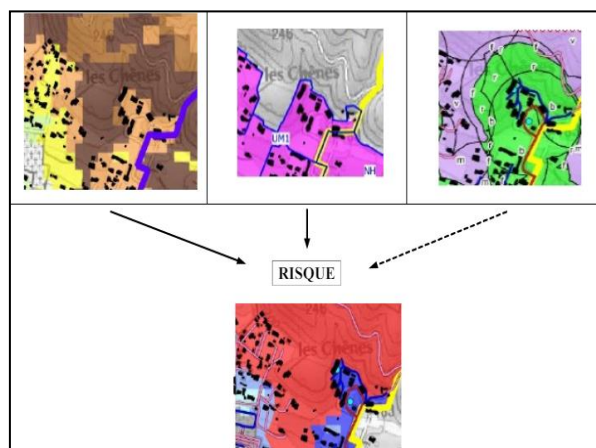


Figure 126 : Systèmes d'observation avancée pour le suivi du risque environnemental (CEIBA, 2024)

Le résistographe détermine la qualité mécanique des tissus du bois et mesure l'importance des cavités par un sondage du tronc de l'arbre. Une mèche de faible diamètre (environ 2,5 mm) pénètre dans le tronc et enregistre un graphique faisant état de la qualité du bois et des défauts éventuels.

VI.3.6- Mesures d'adaptation et de résilience envers les aléas

Les mesures d'adaptation et de résilience envers les aléas représentent l'ensemble d'initiatives et de mesures prises pour réduire la vulnérabilité et renforcer l'acclimatation imposée et la résilience des systèmes naturels et humains aux effets réels ou prévus des changements environnementaux (Fig.127).

Figure 127 : Gestion du risque environnemental en suberaie

L'adaptation et la résilience sont des abstractions fondamentales pour caractériser le comportement dynamique des écosystèmes, qui rendent compte de leur plus ou moins grande capacité à se transformer ou à s'effondrer sous les aléas.

Plusieurs concepts ont été proposés pour gérer les différentes crises en forêts, tels que la « gestion durable (Lanly, 1999) » ou sa branche émergente « la foresterie intelligente face au climat (Bowditch et al., 2020) » qui vise à gérer les forêts en réponse au changement climatique, « la gestion adaptative (Cordonnier & Gosselin, 2009) » pour faire face aux événements naturels extrêmes.

Parallèlement, l'étude d'un risque environnemental tels que le dépérissement forestier passe inévitablement par une analyse des différents paramètres forestiers qui peuvent influencer sur la vitalité des arbres : contexte climatique, contexte stationnel, contexte sylvicole et facteurs biotiques, la disponibilité des arbres producteurs à une éventuelle exploitation du liège ou vers un report allongé jusqu'à disparition du stress environnemental.

Cette analyse permet de mettre en évidence un cortège de facteurs actifs ou aléas dans le processus du dépérissement.

Dans le cas d'un écosystème équilibré, les interactions entre les facteurs abiotiques et biotiques font que le passage d'un état sain à un état de stress, ou d'un état de stress à un état de dépérissement soient réversibles, cette dualité semble difficile dans le contexte environnemental actuel. Dans cette équation, le stress hydrique intense résultant d'une longue période de sécheresse semble le premier catalyseur (Cellerino et Gennaro, 2000).

Selon Houston (1992), dans l'état normal des choses, les longues périodes de sécheresse très sévères portent préjudices aux végétaux, y compris qui sont réputées par leur résistance. En effet, les arbres sains (de chêne liège) deviennent vulnérables au stress hydrique quand les pertes par transpiration dépassent l'absorption de l'eau par les racines. Ce déficit hydrique incite l'arbre à l'adoption d'une stratégie de résistance par une série de modifications morphologiques et physiologiques :

1- Cas d'un stress réversible avec atténuation des facteurs abiotiques

- Fermeture momentanée des stomates.
- Baisse de la surface foliaire, augmentation de la surface racines.
- Maintien des fonctions physiologiques et de la croissance.
- Défense positive de l'arbre.

2- Cas d'un stress hydrique irréversible avec accentuation des facteurs abiotiques

- Perte d'eaux plus importantes que la réserve disponible dans le sol.
- Relâchement total des stomates.
- Dessèchement des tissus par une perte excessive de l'eau.
- Perte de conductivité hydrique à cause de la perturbation du mouvement de l'eau dans les vaisseaux par cavitation et embolisme.

- Perte volontaire des feuilles.
- Baisse de défense et affaiblissement des arbres.

3- Cas d'un stress hydrique irréversible avec une accentuation intense des facteurs abiotiques

- Dessèchement des rameaux et des branches.
- Arrêt prolongé de la croissance.
- Vulnérabilité des arbres envers les facteurs déclenchant avec une faible résistance
 - A la concurrence inter et intra-spécifique,
 - Aux vagues de chaleurs intenses (Sirocco),
 - Au froid et au gel,
 - Au tassement du sol et à l'érosion,
 - Au débroussaillage excessif,
 - A la mauvaise levée du liège,
 - Aux simples blessures du cambium et de la mère du liège
 - Aux incendies,
- Déficit foliaire important.
- Dépérissement de l'arbre.
- Absence total de défense de l'arbre.
- Installation des insectes sous corticaux et xylophages et d'autres champignons pathogènes d'achèvement.
- Mort de l'arbre

VI.3.7-Relation entre indices technologiques du liège et indices environnementaux

Les subéraies oranaises ont joué depuis jadis un rôle non seulement écologique, paysager et touristique, mais aussi économique et social. Le liège constitue l'unique produit naturel tiré directement de ces forêts afin d'alimenter en qualité un tissu industriel qui ne cesse d'augmenter à travers le pays et assurant l'emploi de plusieurs centaines de personnes. La chute alarmante de la production subéricole à l'échelle de ces zones est une affirmation des difficultés rencontrées par l'espèce à assurer non seulement une production quantitative et qualitative stable mais aussi la conservation même de la pérennité des arbres et des peuplements.

La diminution continue des indices technologiques du liège est liée à plusieurs facteurs tous issus des changements environnementaux dans lesquels évoluent les peuplements productifs. Parmi les principaux éléments retenus dans notre étude et qui s'avèrent responsables de ce déclin, nous citons particulièrement le phénomène du déficit foliaire des cimes ou dépérissement et les perturbations climatiques locales et régionales.

Ce phénomène environnemental touche les trois forêts étudiées depuis longtemps à l'égard des autres pays de la méditerranée occidentale. La bibliographie relate peu d'engouement des scientifiques pour de tels phénomènes dans la zone d'étude. Les premières dégradations datent de la fin du 19^{ème} siècle (A.E.F.C.O., 1961).

Dans la région nord-ouest de l'Algérie, ce phénomène n'a été que peu étudié, les deux seuls travaux scientifiques exhaustifs, ont été réalisés par Bouhraoua (2003) et Dehane (2012). Ce n'est qu'en 1975 (date de la première exploitation de liège après l'indépendance), que le dépérissement a attiré l'attention des forestiers locaux mais les réels travaux de diagnostic et de détermination des causes éventuelles n'ont commencé qu'à partir des années 1980. Plusieurs missions ont alors été organisées sur place entre 1983 et 1995 (Lanier et *al.*, 1986 ; Aici et Abbas, 1988). Pendant cette période, une progression nette du dépérissement a été constatée sous forme de taches apparaissant à travers tous les peuplements. D'ailleurs à Zariéffet, une forte mortalité des arbres a été observée à la fin des années 80 sur environ 720 ha (Aici et *al.*, 1994).

L'analyse multi-variée représentait par l'ACM vise à élucider l'impact des indices environnementaux sur les indices technologiques du liège en interférant 14 variables quantitatives à celles qualitatives. La représentation des variables dans le plan factoriel F1 et F2 est représentée dans la figure 128.

Figure 128: Représentation dans le plan factoriel F1 x F2 (graphe symétrique) des paramètres d'indices environnementaux sur les indices technologiques du liège

L'Analyse de l'ACM fait sortir que le premier axe représente 30,56 % de l'inertie, alors que le deuxième repère nous donne 16,06% (Tab.70).

Tableau 70: Valeurs propres et pourcentages d'inertie

	F1	F2
Valeur propre	0,611	0,321
Variabilité (%)	30,561	16,060
% cumulé	30,561	46,622

Ces deux axes expliquent ensemble 46,62% de la majeure partie de la variation du nuage de points des arbres échantillons et des modalités prises en considération (Fig. 129).

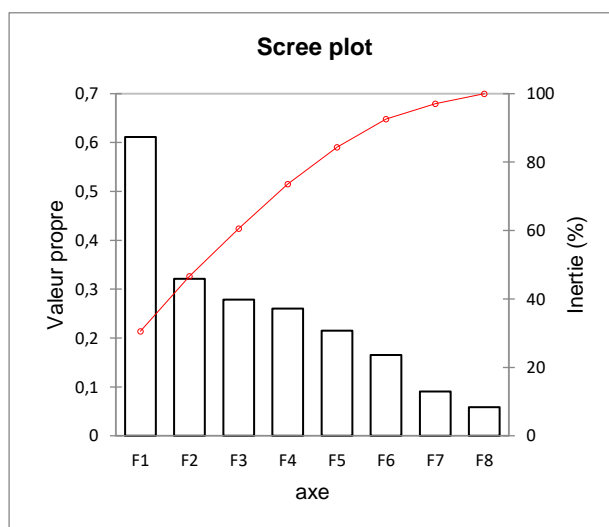


Figure 129: % d'inertie cumulé des indices environnementaux sur les indices technologiques du liège

A travers la figure 127, dans le plan factoriel F1, l'impact du risque sylvosanitaire IRS-2 (Faible) spécifiant l'aspect minimal des aléas s'oppose catégoriquement aux deux autres IRS-3 et IRS-4, tandis que dans l'axe F2 il s'associe uniquement avec IRS-3. Cela émerge du fait que le risque sylvosanitaire élevé (IRS-4) définit la configuration extrême des aléas alors que IRS-3 (Modéré) le côté réversible de la situation. Parmi les facteurs pesant sur la vigueur l'essence dans les trois suberaies, nous citons en particulier les variations climatiques, interprétés dans l'ACM par l'indice de déficit thermo-pluviométrique(Itp) et l'indice de sévérité (ISV).

En effet, les variations climatiques sont presque toujours impliquées comme des facteurs prédisposants, les plus souvent invoqués sont les épisodes des sécheresses en continu (Auclair et al.,1992). Dans la zone d'étude, la synthèse climatique a montré que le climat actuel est généralement défavorable à la croissance normale des arbres (Itp-3 et ISV-3). Pour la période d'observation dans les trois suberaies (2009-2021), les années déficitaires totalisent 33 événements de sévérité moyenne à forte contre 6 de sévérité faible, alors que les séquences de déficit thermo-pluviométrique passent de 26 (fort à très fort) à 13 (Moyenne à faible). Ces constatations confirment le contexte d'aridité qui frappe la zone d'étude particulièrement depuis l'année 2015 (Fig.130).

Figure 130: Synthèse climatique entre l'indice de déficit thermo-pluviométrique(Itp) et l'indice de sévérité (ISV)

Les précipitations qui jouent un rôle primordial dans l'alimentation hydrique des arbres sont souvent les premiers facteurs mis en évidence dans de nombreux travaux de recherche pour expliquer ce processus. D'ailleurs dans ce sens, Touhami et al (2020) lient la durabilité de la production de liège à une menace moindre par le réchauffement climatique et l'aridité, car des sécheresses sévères, chaudes et prolongées augmentent le taux de mortalité en raison de la pénurie d'eau ou en amplifiant l'incidence des ravageurs.

D'autres auteurs ibériques mettent le doigt directement sur le mal et étayent que la déficience hydrique du sol est la conséquence d'une réduction des précipitations printanières (Oliveira et al., 1992 ; David et al., 1992 ; Méthy et al., 1996). Les modèles climatiques convergent dans la même orientation prévoyant des scénarios plus chauds et plus secs dans la péninsule ibérique à la fin du 21^e siècle (Jacob et al., 2014). Des printemps et des étés plus chauds et plus secs devraient réduire les récoltes de liège, et probablement la croissance du chêne-liège, dans certaines zones des principaux pays producteurs, en particulier dans les sites continentaux à saison sèche (Caramero et al., 2024).

La sensibilité du chêne liège semble aussi fragilisée par d'autres facteurs environnants tels que la compétition intra et interspécifique. Parmi les conséquences de la mauvaise gestion des suberaies algériennes et en particulier oranaises sont l'abandon et l'absence quasi totale des soins culturels apportés aux suberaies (Dehane, 2012). L'embroussaillage (EMB) et l'enrésinement (ENR) demeurent deux aléas entravant la vigueur des arbres (ID-3, EMB-3, ENR-3). Certains auteurs, affirment que le chêne liège se montre plus sensible que le chêne vert et le chêne pubescent aux effets négatifs dus à l'augmentation de la compétition entre les arbres, surtout par rapport aux ressources hydriques et les éléments minéraux (Ruiu et al., 2005).

Dans la zone d'étude cette sensibilité est plus marquée vers le pin d'Alep et le chêne zéen et elle est d'une nature très fâcheuse sur la vitalité du chêne liège.

Ruiu et al (2005), dévoilant aussi le rôle spécifique des travaux sylvicoles, rapportent que les peuplements embroussaillés et non pâturés présentent un indice de dépérissement significativement élevé que les peuplements débroussaillés et pâturés (ID-1, EMB-1, ENR-1). Des sujets privés de la photosynthèse et de la lumière du soleil s'adaptent très mal à l'effet de l'ombre instauré par les espèces concurrentes à croissance rapide. Ce faisant, il se crée un phénomène de ploiement irréversible de la cime et du tronc ou une croissance monopodale de type longiligne (EMB-3, ENR-3, ID-3, IST-3) (Fig. 131 et 132).

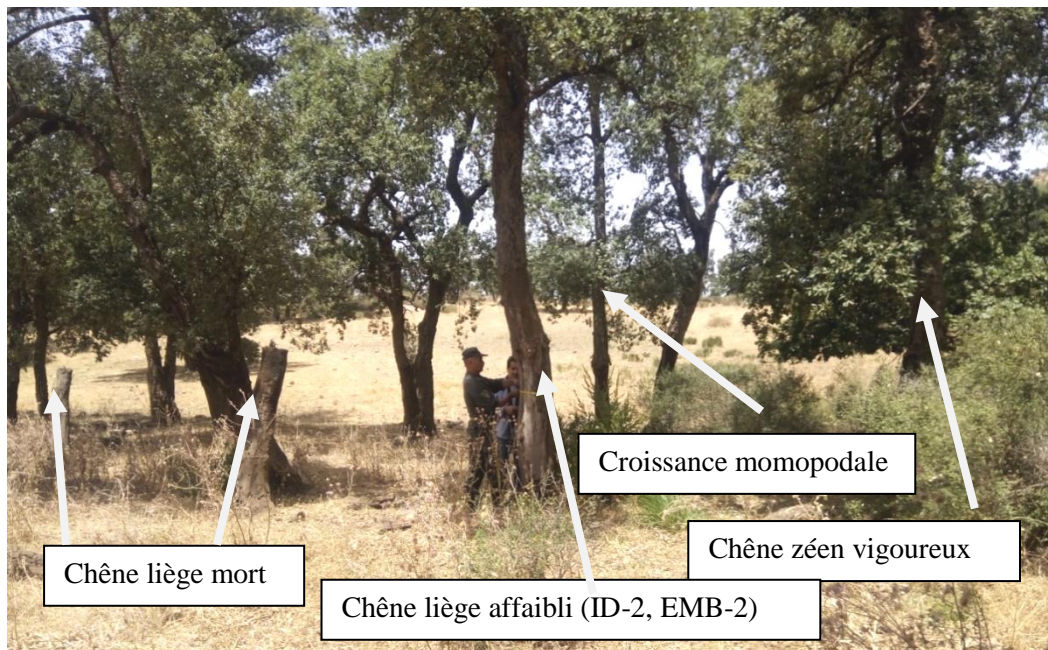


Figure 131 : Arbres-échantillons envahis par le chêne zeen (Ami-Moussa)



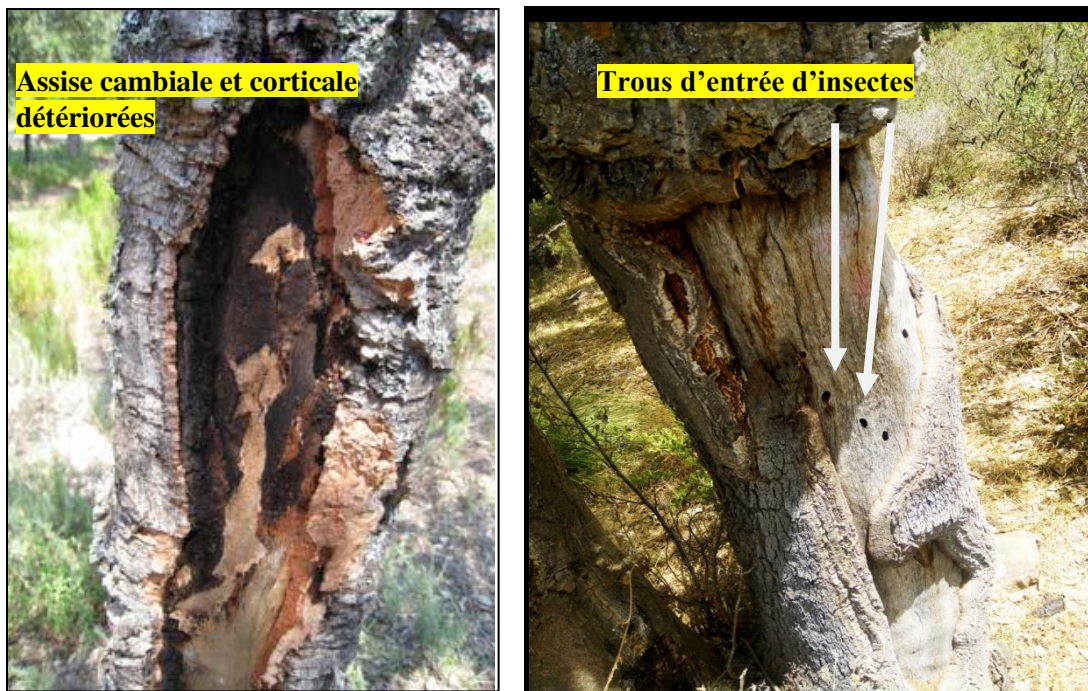
Figure 132 : Arbres-échantillons supportant mal l'ombre (Ami-Moussa)

Dans un milieu fermé par l'embroussaillage et l'enrésinement, la continuité verticale et horizontale créée par le chevauchement de la végétation est susceptible de déclencher des incendies ravageurs de la litière vers les houppiers, cette situation est très amplifiée par la composition chimique de la végétation (teneur en essences volatiles ou en résines) (EMB-2, ERN-3, INC-3). D'après Silva et Catry (2006), les arbres jeune ou plus âgés colportant un liège mince ou épais crevassé avec un sous-bois dense, sont particulièrement sensibles au feu.

Cette situation de gestion forestière inadéquate ne permet pas une exploitation confortable du liège, la mauvaise manipulation de la hache fait que le cambium et la mère soient touchés (EMB-3, ENR-3, QX-3), et par conséquent, ne jouent plus leur rôle dans la synthèse du liège et l'approvisionnement en eau et en amidon d'où l'attrance des agents pathogènes (insectes et champignons) (EMB-3, ENR-3, QX-3, ID-3 et APY-3) (Fig.133 et 134).



Figure 133 : Qualité d'exploitation du liège à Tagdempt



Le charbon de la « mère ». Attaques d'insectes xylophages sur le chêne liège
« *Biscogniauxia mediterranea*(De Notaris)»

Figure 134 : Arbres déperissants infectés par des agents pathogènes (Tagdempt)

En outre, le réchauffement climatique peut également avoir un impact sur la qualité du liège, qui dépend des facteurs tels que la mauvaise circulation de la sève, l'épaisseur faible et la porosité du liège, ainsi que les défauts liés aux galeries d'insectes ou aux inclusions de bois (ID-3, IAC-1, IDV-1, ICM-3, IQ-1). Le liège produit par les arbres perturbés est d'aspect très dur, avec une forte résistance mécanique, se détachant difficilement du tronc, imposant l'arrachage forcé de la mère du liège (Fig.135). L'effet de l'arrachage agressif du liège sur la santé des arbres a toujours été une préoccupation pour la gestion durable des forêts de chênes-lièges (Correia et al., 1992). En plus d'une perte d'eau importante, l'arrachage du liège provoque souvent des blessures dangereuses qui représentent la voie d'entrée de nombreux champignons.

Dans ce contexte, le recours à ces méthodes traditionnelles de récoltes dans les situations actuelles du stress climatique ne peut qu'empirer la vitalité des suberaies. Palma et al (2015) présentent un scénario pessimiste, le changement climatique pourrait entraîner une diminution de 20% de la production de liège d'ici 2100.



Figure 135: Lige classé Rebut, aux indices technologiques faibles, s'exploitant en morceaux (IDV-1, et IQ-1)

VI.4-Conclusion

Globalement, on peut dire que le risque environnemental exprimé par le risque sylvosanitaire (le déperissement) se définit comme la probabilité d'occurrence d'aléas dangereux sur un système présentant des fragilités, incapable de se défendre. Dans ce contexte, 16 aléas ont été identifiés et susceptibles d'amplifier le déficit foliaire et compromettre le devenir du chêne liège dans la zone d'étude.

Face à ce risque environnemental aggravant, la gestion des risques s'amorce au moment où des symptômes atypiques très nets se manifestent. Plus les mesures de contrôle de risque sont fixées par les actions de protection et de prévention plus la gestion proactive qui s'impose, qui consiste à se préparer et à agir par anticipation d'un risque futur, c'est-à-dire l'adaptation et la résilience des peuplements à long terme. En effet, ces options d'adaptation viseront à réduire la vulnérabilité actuelle des forêts et du secteur forestier, et à accélérer la récupération après une perturbation. Une suberaie adaptée au changement environnemental est apte à conserver sa fonction essentielle, son identité et sa structure, tout en gardant ses facultés d'apprentissage et de transformation.

L'analyse multi-variée incorporant les indices technologiques du liège aux indices environnementaux a montré l'impact négatif du risque environnemental sur l'aspect sylvosanitaire des suberaies et par conséquent les paramètres technologiques fonctionnels du liège de la zone d'étude. En effet, les indices climatiques négatifs favorisent la sécheresse aigüe qui se traduit par une aridité édaphique, privant les arbres producteurs d'une photosynthèse normale et les conduisant à une grande fébrilité aux espèces concurrentes. Il s'agit d'une relation de cause à effet, où la dualité entre les variations climatiques extrêmes et le déperissement sont directement responsables des performances productives des arbres qui se manifestent par des indices technologiques faibles qui induisent de grandes pertes économiques pour le secteur forestier et industriel, accentuant plus la vulnérabilité aux agents pathogènes d'achèvement lors de l'exploitation périodique du liège.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

La forêt à base de chêne liège est un socio-écosystème qui nécessite l'accompagnement continu de l'Homme pour être entretenu dans le respect des bonnes pratiques. Il est donc primordial de considérer cet écosystème à travers une gestion forestière durable. Cette gestion permettra un suivi dans le temps des opérations de levée du liège et les travaux sylvicoles associés pour produire un liège de qualité tout en respectant la bonne vigueur des arbres. Une grande activité industrielle dépend constamment des suberaies notamment la transformation du liège qui implique un certain nombre de petites et moyennes entreprises et fournit des milliers d'emplois dans les régions les moins démunies du pays. Cependant, la soumission totale aux changements environnementaux contribue à un abandon progressif des forêts à base de chênes-lièges et à l'envahissement ultérieur par le maquis et à l'enrésinement affectant de manière directe la vitalité des peuplements.

Devant l'évidence des changements environnementaux actuels imposée par les variations climatiques extrêmes, l'accroissement des activités humaines et la mauvaise gestion, il est plus que jamais important de connaître les problèmes pour mieux gérer avec des solutions réductrices que curatives dont les conséquences sont inconnues.

Les résultats de l'étude de l'impact du risque sylvo-sanitaire sur les indices technologiques du liège démontrent à quel point le dépérissement induit par le climat défavorable a eu un impact important sur la plupart des paramètres analysés. Une tendance à la baisse est observée dans les valeurs moyennes totales des variables technologiques du liège pour tous les arbres échantillonnés. Une explication rationnelle confirme nos observations sur le terrain: des sujets perturbés n'arrivant pas à accomplir une photosynthèse normale perdent une grande partie de leur feuillage à cause des blessures occasionnées sur le tronc lors des récoltes précédentes, entravant ainsi la montée de la sève nutritive riche en minéraux et en eau. La réaction défaillante du cambium vasculaire est suivie "ipso facto" par le dérèglement du phellogène qui ne produit que peu de cellules, de taille réduite, aux parois épaisses contournés de discontinuités de dimensions variables, et selon le degré de gravité apparaissent terreuses et lignifiés.

Dans notre opinion ce type de liège mince à très mince d'aspect dur est favorable au dépérissement par la perte prématurée des feuilles. Les résultats atteints corroborent les constatations du terrain : les blessures à la hache sont plus marquées sur des épaisseurs de liège plus faibles obligeant les démascleurs à fournir une force de frappe supérieure atteignant rapidement le liber que sur un liège ordinaire et souple.

Afin de limiter l'impact changement environnemental causant le dépérissement du chêne liège de la zone d'étude, certaines actions sont primordiales:

- Il est important d'éviter l'exploitation du liège sur des arbres stressés(C3).
- De fixer le coefficient de démasclage à 1 et de le réduire à 1,5 sur les sujets déjà écorcés.
- Faire des récoltes à base de futaie jardinée qu'équienne pour ne pas exploiter tous les arbres.
- Augmenter le cycle production du liège au-delà de 15 années pour réduire le stress physiologique.
- Canaliser les usages du sol, en réduisant fortement le surpâturage de manière à minimiser les impacts négatifs sur les systèmes racinaires, sur l'érosion et la lixiviation des éléments chimiques et nutritives.
- Intégrer l'analyse de la conductivité électrique du liber avant la campagne de récolte.

- Promouvoir une sylviculture spécifique adaptée au changement climatique par le maintien du cortège floristique habituel du chêne liège, une condition idéale pour les fonctions de symbioses: l'économie de l'eau, la lutte contre les insectes et les champignons pathogènes, et la promotion de la mycorhization.
- Ne jamais confier la récolte du liège aux entreprises et aux personnes non qualifiées.
- Exiger un cahier de charges et des clauses techniques strictes dans l'octroi des marchés des récoltes du liège.
- Formation du personnel qualifié pour le suivi et le contrôle des compagnes de récolte.

Les options de la gestion durable des forêts de chênes-lièges doivent tenir compte du contexte économique, environnemental et social spécifique, en prenant en considération les caractéristiques de la suberaie et de sa capacité à produire des produits valorisés. Dans un cadre de gestion du risque environnemental en suberaie, les principales recommandations pour améliorer l'adaptation et la résilience post-stress se résument dans les actions suivantes :

- L'instauration des systèmes de veille par des réseaux de surveillance appuyant le maintien de la santé et de la vitalité de l'écosystème forestier. Il s'agit de surveiller et de diagnostiquer les sujets perturbés à chaque inventaire afin de contrôler correctement non seulement l'évolution des paramètres technologiques du liège, mais aussi la présence de défauts sur le liège qui serviront de bio-indicateurs indélébiles de la santé probable de l'arbre.
- L'utilisation des nouveaux outils et systèmes d'écorçage mécanisés du liège pour réduire les dommages tels que les machines à scies rotatives au lieu des haches.
- De bénéficier des expériences des autres nations subericoles (Portugal et Espagne) analogues aux systèmes d'irrigation adaptée à la sécheresse (entre les mois de juin et octobre) pour stimuler la croissance du liège et la vigueur des arbres.
- L'utilisation des fongicides pour la lutte contre les maladies fongiques en foresterie à l'égard des fongicides à base de benzimidazole (thiophanate-méthyl et carbendazime) pour réduire l'incidence et la gravité des chancre carbonateux.
- La mise en défens sur des périodes longues (5 à 10 ans) permettant une remontée de la diversité biologique associée au chêne liège .

Globalement nous pouvons conclure que l'étude dendro-climatologique reliant climat-croissance du liège pourrait améliorer la gestion adaptative du chêne-liège en réponse à l'aridité croissante. Cette adaptation de la gestion forestière s'initie par :

- L'optimisation du calendrier d'extraction du liège.
- La réduction de la surface d'écorçage.
- Réduction du sous bois attirant les champignons pathogènes pour intensifier la productivité du liège dans le contexte du changement climatique futur.

Les résultats de l'étude dendro-climatologique ouvrent la voie à d'autres études spécialisées principalement dans le domaine de l'hydraulique et de la résistance des arbres à la sécheresse, la modélisation climatique en relation avec la croissance des arbres forestiers, les indices de compensation climatique (ICC) combiné aux cartes de vigilance de l'état de santé des peuplements. Tous ces créneaux permettront de statuer sur la prédisposition climatique et forestière des stations à la plantation par le chêne liège(favorable, moins favorable ou

défavorable pour le chêne-liège). Des réponses doivent être obtenues à court terme à ces questions clés :

-Le chêne-liège de la zone d'étude peut-il s'acclimater ou s'adapter à des conditions environnementales plus sèches ?

-Peut-on identifier des géotypes ou écotypes plus résistants à la sécheresse ?

- Quelles nouvelles pratiques culturales permettront de réduire l'impact de la sécheresse et du déficit hydrique ?

-L'avenir du liège est aussi l'avenir de l'Algérie sylvatique subéricole.

Références bibliographiques

1. A.E.F.C.O., 1961. Fascicule de gestion du cantonnement d'Oran. Rapport, 4p.
2. Abbas M., 2013. Incidence économique des feux de forêts sur les suberaies. Journées d'Etude sur : La réhabilitation des Suberaies Incendrées et Reboisements. Tlemcen les 16 et 17 Janvier 2013.
3. Abdendi Z.E.A., 2003. Le dépérissement des forêts au Maroc. Analyse des causes et stratégie de lutte. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, (14) 4: 209-218.
4. Adrados et al ;
5. AENOR., 1988. Asociación Española de Normalización y Certificación, 1988. Norma Española. Corcho en plancha comercialmente seco. Definiciones, calibrado, clasificación y embalaje. UNE 56-915-88. Madrid. European Commission, 1997. proyecto FAIR-CT97-1438.
6. Agard J., & Schipper E.L.F., 2018. Annex II Glossary In: AR5 Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability (pp. 1757-1776). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_WGII_glossary_FR.pdf
7. Aghrab A., Bouabid R., Elalaoui C., 2007. Drought characterization using drought indices in two areas of the Mediterranean basin: Meknes, Morocco and Cortoba, Spain. *Option Méditerranéenne*, Serie A, 80: 6p.
8. Aici M. et Abbas M., 1988. Rapport de la mission dans les wilayas d'Oran, Relizane, Tiaret et Chlef du 29 mai au 04 juin 1988. Inst. Nat. Rech. For., Alger, 8 p.
9. Aici, M., Lafer, M. & Bahakemi, S., 1994. Rapport de mission effectué du 13 / 06 / 94 au 15 / 06 / 94 dans les conservations des forêts d'Oran et Sidi Bel Abbes, A.N.F.- I.N.R. F., Alger, 4 p.
10. Aidoud A., 2000. Les écosystèmes méditerranéens: diversité et fragilité. Université d'été, MED-CNES, La Londe-desMaures, France.
11. Alla A.Q., Camarero J.J., 2012. Contrasting responses of radial growth and wood anatomy to climate in a Mediterranean ring-porous oak: implications for its future persistence or why the variance matters more than the mean. *European Journal of Forest Research*, 131:1537–1550.
12. Allen C.D., 2009. Climate-induced forest dieback: an escalating global phenomenon?. *Unasylva* 231/232, 60: 43-49.
13. Aloui F. 2001. Etude du dépérissement du chêne-liège de la forêt de Bellif. Projet de fin d'Etude. Institut National Agronomique en Tunisie, 15-19.
14. Aloui, A., Ajaibi, A., Benhamadi, N. 2006. Etude de la qualité du liège de reproduction des suberaies d'Ain Draham. Actes du séminaire «Gestion intégrée des forêts de chêne liège et de pin d'Alep: Ann. INRGREEC, 9(1):44-59.
15. Amandier L., 2006. Les causes de dépérissement du chêne liège et de chêne vert. Séminaire Vitalité des peuplements des chênes liège et des chênes vert: situation actuelle, état des connaissances et actions à entreprendre ». Evora, Portugal, 3p.
16. 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.
17. Anjos O., Pereira H., Rosa M.E., 2008. Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork. *Holz Roh – Werkst*, 66(4):295–301. <https://doi.org/10.1007/s00107-008-0248-2>
18. APCOR, 2019. Associação Portuguesa da Cortiça, APCOR anuario,

19. APCOR, 2007. A Importancia Ambiental do Montado. Cork Information Bureau. Asociación Portuguesa de Corcho y Dirección General de Recursos Forestales.
20. Aranda I., Castro L., Pardos M., Gil L., Pardos J.A., 2005. Effects of the interaction between drought and shade on water relations, gas exchange and morphological. *Forest Ecology and Management*, 210:1–3.
21. Arezki, B., 2018. L'exportation de liège a rapporté à l'Algérie 4 millions d'euro en 2017. <https://www.algerie-eco.com/2018/06/27/l'exportation-de-liege-a-rapporte-a-lalgerie-4-millions-deuro-en-2017/> 27 juin 2018.
22. Aronson J., Pereira J.S., & Pugas J.G., 2009. Cork Oak Woodland on the edge. Island press. Washington. Covelo. London. 350p.
23. Aubert G. & Monjauze A., 1946. Observations sur quelques sols de l'Oranie NordOccidentale-Influence du déboisement, de l'érosion, sur leur évolution(I) Comptendu du sommaire des Séances de la Société de Biogéographie ,(23),199:44- 51.
24. Auclair A.N.D., Worrest R.G., Lachance D., Martin H.C. 1992. Climatic perturbation as a general mechanism of forest dieback . In : Forest decline concepts / P .D . Manion, D . Lachance Eds .Saint-Paul (Minn.) : American Phytopathological Society. 38-58.
25. Aussenac G., 1978. La Sécheresse de 1976: Influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers. *Revue forestière française*, 30(2):103-114. <https://doi.org/10.4267/2042/21213>.
26. Avila L., Bernal C., 1998. Manual didáctico del taponero. Mérida, Junta de Extremadura. IPROCOR.FUNDECYT. 199 p
27. Awad A.B., Williams H. and. Fink C.S.J., 2003. Effect of phytosterols on cholesterol metabolism and MAP kinase in MDA-MB-231 human breast cancer cells *Nutritional Biochemistry*, 14: 111–119
28. Aykut S., Maertens L., 2021. The climatization of global politics: introduction to the special issue". *International Politics* 58(4);501-518.
29. Bagnouls F. & Gaussen H., 1957 : Les climats biologiques et leurs classifications. *Ann. Geog.* 335 :193 -220.
30. Gaussen H, et Bagnouls F., 1952. " Indice Xérothermique," 10–16.
31. Baptista A.P.M., Vaz M.D.C., 1993. Comparative wear testing of flooring materials. *Wear*, (162-164): 990 –995.
32. Beaudin I., 2007. Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen. Rapport de Maîtrise en Sciences Géomatiques, Université Laval, 233p.
33. Becker M., Lévy G., 1982. Le dépérissement du chêne en forêt de Tronçais: Les causes écologiques. *Annales des Sciences Forestières*, 39: 439–444
34. Beccarisi L., Biondi E., Casavecchia S., Ernandes P., Medagli, P., and Zuccarello V. 2010. La quercia da sughero (*Quercus suber* L.) nel Salento: analisi diacronica e sinfitosociologica (Adriatico meridionale, Italia). *Fitosociologia*, 47:3-16.
35. Beira-Davila J., Prades-Lopez C., Santiago-Beltran, R., 2014. New tools for extracting cork from *Quercus suber* L.: Increasing productivity and reducing damage. *Forest Systems*, 23, 22–35. <https://doi.org/10.5424/fs/2014231-0301>
36. Ben Jamaa M. L. B. & Hasnaoui E. 1996. Le dépérissement du chêne liège (*Quercus suber* L.) en Tunisie. In: Colloque national sur le dépérissement des forêts au Maroc, Rabat, Résumés des communications.
37. Ben Mimoun M., 2002. La gestion de la fertilisation potassique en arboriculture fruitière. INRA-Tunisie, 12p.
38. Bénézit J.J., 1991. Dépérissement et gestion forestière. *Revue Forestière Française*, 43: 109–118.

39. Bentirou Mathlouthi R., Pomade A., 2023. Vulnérabilité(s) environnementale(s): perspectives pluridisciplinaires. *Préface de Sylvia Becerra*, Paris, Éditions L'Harmattan, coll. Environnement, 622 p.
40. Bernal Chacón C.& Cardillo Amo E.,2005. Efectos del fuego y selvicultura de su restauración. Tipificación de los alcornocales incendiados. Departamento Recursos Naturales Renovables. Instituto del Corcho, la Madera y el Carbón Vegetal.111p.
41. Bernard A.,1923. La structure de l'Algérie. *Annales de Géographie*,32 (177) : 271-275.
42. Bernardo A., Gomes A.A., Evaristo I., Tinoco I. & Saraiva A. 1992. Um exemplo de mortalidade de montado de sobro na região do Cercal-Herdade da Cordeira. In: 2^e Encontro sobre os montados de sobro e azinho, Évora, 238-247.
43. Bertrand R.,2007. Etude de l'impact du régime d'incendie sur la végétation et le chêne-liège (*Quercus suber*) en Provence siliceuse: mortalité, capacité de régénération et morphologie. Mastère spécialisé « Forêt, Nature et Société », 95p.
44. Blanchard R.O., Schortle W.C. & Davis W.,1983. Mechanism relating cambial electrical resistance to periodic growth rate of balsam fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 13: 472-480.
45. Blavoux B. & Collignon B.,1986. Les Sources Bicarbonatées Tièdes des Piémonts de la Meseta Oranaise', 6^{ème} Séminaire National des Sciences de la Terre, Alger.
46. Block S., Baccelli C., Tinant B., Meervelt L.V., Rozenberg R., Jiwan L.H, Llabre`s G., Pauw-Gillet M.C.D. and QuetinLeclercq J., 2004. Diterpenes from the leaves of *Croton zambesicus*. *Phytochemistry*, 65: 1165–1171.
47. Bonneau M. & Guy, L. 1985. Le dépérissement des forêts. *La Forêt Privée*, 166 : 21-33.
48. Boudy P., 1955. Economie forestière nord africaine. Tome 4 : Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Larose. Paris, 483p.
49. Bouhraoua R.T., 2003. Situation sanitaire de quelques forêts de chêne-liège de l'Ouest Algérien: Etude particulière des problèmes posés par les insectes. [Ph.D. Thesis.] Tlemcen, University of Tlemcen.
50. Bowditch E., Santopuoli G., Binder F., del Río M., La Porta N., Kluvankova T., Lesinski J., Motta R., Pach M., Panzacchi P., Pretzsch H., Temperli C., Tonon G., Smith M., Velikova V., Weatherall A., & Tognetti R., 2020. What is Climate-Smart Forestry? A definition from a multinational collaborative process focused on mountain regions of Europe. *Ecosystem Services*, 43, 101113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101113>
51. Bradford K.J. & Hsiao T.C., 1982. Physiological responses to moderate water stress. In: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H, eds. *Encyclopedia of Plant Physiology*. Berlin ; Heidelberg ; New York : *Springer-Verlag*,263-324.
52. Brasier C.M., 1992. Oak tree mortality in Iberia. *Nature*, 360-539.
53. Brasier C.M., 1996. *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in Southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Annals of Forest Sciences*: 53, 347–358. <https://doi.org/10.1051/forest:19960217>.
54. Bréda N., Soudani K., Bergonzini J.C., 2002. Mesure de l'indice foliaire en forêt. *ECOFOR*,154p .
55. Brunier L., Delpont F., Gauquelin X., Bréda, N., Cano B., Orazio C., Perrier C., Picard O., Riou-Nivert P., & Wimmers B.,2020. Guide de gestion des crises sanitaires en forêt. Paris-CNPF-IDF.184p.
56. Buttell F.H., Hawkins A.P. and Power A.G.,1990,"From limits to growth to global change. Constraints and contradictions in the evolution of environmental science and ideology".*Global Environmental Change*, 1: (1) :57-66.
57. Byun H. R., Wilhite D.A.,1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12, 2747-2756.

58. Camarero J.J., Sanchez-Miranda A.B., Michele Colangelo M.C., Matías L., 2024; Climatic drivers of cork growth depend on site aridity. *Science of The Total Environment*, 912: 169574.
59. Camarero J.J., Gazol A., Sangüesa-Barreda G., Oliva J., Vicente-Serrano S.M., 2015. To die or not to die: early-warning signals of dieback in response to a severe drought. *Journal of Ecology*, 103: 44–57.
60. Camilo-Alves C., Vaz M., Clara M., Ribeiro N., 2017. Chronic cork oak decline and water status: new insights. *New Forests*, 48:753–772.
61. Camilo-Alves C.a.d.S.e.P. Clara M.I.E.d., Ribeiro N.M.C.d.A., 2013. Decline of Mediterranean oak trees and its association with *Phytophthora cinnamomi*: a review. *European Journal of Forest Research*, 132: 411-432.
62. Cardillo E., Abad E., Meyer S., 2021. Iberian oak decline caused by *Phytophthora cinnamomi*: A spatiotemporal analysis incorporating the effect of host heterogeneities at landscape scale. *Forest Pathology*, 51: e12667. <https://doi.org/10.1111/efp.12667>
63. Caritas A., Molinas M., & Gutierrez E., 1996. Annual cork-ring width variability of *Quercus suber* L. in relation to temperature and precipitation (Extremadura, southwestern Spain). *Forest Ecology and Management*, 86:113-120.
64. Caritat, A., Gutierrez, E. & Molinas, M. 2000. Influence of weather on cork-ring width. *Tree Physiology*, 20: 893-900.
65. Carrero Carrero A.J., 2015. Los aprovechamientos del monte en el Suroeste Peninsular : el corcho . Tesis doctoral, Universidad de Huelva, 329p.
66. Carriço C, Ribeiro H. M. y Marto J., 2018. Converting cork by-products to ecofriendly cork bioactive ingredients: Novel pharmaceutical and cosmetics applications. *Industrial Crops and Products*, 125: 72-84
67. Castola V., Marongiu B., Bighelli A., Floris C. and Casanova J. 2005. Extractives of cork (*Quercus suber* L.): chemical composition of dichloromethane and supercritical CO₂ extracts. *Industrial Crops and Products*, 21: 65–69.
68. CEIBA, 2024. Gestion des risques associés aux arbres. 2p.
69. CICYTEX, 2020. Guide des bonnes pratiques en matière de détermination de la qualité du liège et récolte de liège avec des nouvelles technologies [Guide to good practices in cork quality determination and cork harvesting with new technologies]. [WWW document] URL <http://cicytex.juntaex.es/descargas/descargar.php?id=26>
70. Cellerino G.P. & Gennaro M. 2000. Drought as predisposing factor in oak decline. In: Ragazzi et al. eds. Decline of oak species in Italy. Problems and perspectives. *Accad. Italian Sciences Forest.*, Firenze, 39-75.
71. CFWR, 2019. Bila exploitation du liège, Ami-Moussa, 1p.
72. C.F.W.R., 2018. Fiche technique de la forêt de Djbel Saadia. 2p.
73. C.F.W.T., 2008. Fiche technique de la forêt de Tagdempt. 3p
74. C.F.W.T., 2013. Fiche technique de la forêt de Tagdempt. 1p.
75. CFWT, 1996. Bilan des inventaires de l'exploitation de liège de la forêt de Zariéffet. Circonscription de Tlemcen, 4p.
76. CFWTr, 1992. Bila exploitation du liège, Tagdempt, 4p.
77. CFWT, 1996. Bilan des inventaires de l'exploitation de liège de la forêt de Zariéffet. Circonscription de Tlemcen, 4p.
78. Chang J., Gunhee H., Valverde J.M., Griswold N.C., Duque-Carrillo J.F., Sanchez-Sinencio E., 1997. Cork quality classification system using a unified image processing and fuzzy-neural network methodology. *IEEE Transactions on Neural Networks* (8), 4: 964 – 974 .
79. Charlemagne A., 1894. Chêne liège. Notices sur les forêts domaniales de l'Algérie. Edit. Giralt. 39p .

80. Charlot G. 1978. Dosages absorptiométriques des éléments minéraux. Elsevier-Masson, 444p.
81. Chorana A., Dehane B., Santiago Beltran R., 2019. Characterisation of the cork growth and quality of cork oak woodlands, North-West Algeria. *International Journal of Environmental Study*, 76: 507–522. <https://doi.org/10.1080/00207233.2019.1594290>
82. Chorana A., 2021. Etude et élaboration de la carte de qualité du liège de la région Nord-Ouest d'Algérie. Thèse. Doct. LMD. Département des ressources forestières. Fac. SNV-STU. Univ.Tlemcen. 261p.
83. CMA, 2006. Mapa de Series de Vegetación de Andalucía. Escala 1:10.000. Catálogo de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla, 65p. CMC, 1990. Instituto del Corcho, la Madera y el Carbón. Control de la calidad del corcho en campo. Documento interno inédito.
84. Cordonnier T., & Gosselin F., 2009. La Gestion forestière adaptative: intégrer l'acquisition de connaissances parmi les objectifs de gestion. *Revue forestière française*, 61(2): 131-143. <https://doi.org/10.4267/2042/28896>
85. Corkassess, 2001. Field assessment and modeling of cork production and quality. Final report. Contract FAIR.C97.1438. Brussels European Commission Research Directorate General, Life Sciences Agriculture Agro-Industry; Fisheries and Forestry.
86. Cork Quality Council, 2004. Visual Grading Standards. C. Q. C." www.corkqc.com
87. Costa A., 2016. Effetos del cambio climatic en los alcornoques."Effects of climate change on cork oak woodlands". *Diecinueve Líneas*, 42-47.
88. Costa A., Barbosa I., Roussado C., Graça J., Spiecker H., 2016. Climate response of cork growth in the Mediterranean oak (*Quercus suber* L.) woodlands of southwestern Portugal. *Dendrochronologia* 38, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.03.007>.
89. Costa A., Cherubini P., 2021. Is Cork Growth a Reliable Proxy for Stem Diameter Growth in Cork Oak (*Quercus suber* L.)? Implications for Forest Management under Climate Change in Mediterranean Regions. *Application Sciences*. 11. <https://doi.org/10.3390/app112411998>.
90. Costa A., Pereira, H. & Oliveira A., 2002a. Influence of climate on the seasonality of radial growth of cork oak during a cork production cycle. *Annals of Forest sciences*, 59: 429-437.
91. Costa A., Pereira H., Oliveira A., 2002b- Variability of radial growth in cork oak mature trees under cork production, *For. Ecol. Manage.* 175 (2003) 239–246
92. Costa Tenorio M., Morla Juaristi C., Sainz Ollero H., 1997. Los bosques ibéricos: una interpretación geobotánica. *Ecologia*, 12:497-505.
93. Courtois M., Masson P., 1999. Composition minérale et la composition minérale des feuilles du chêne-liège (*Quercus suber* L.). *Annals of Forest Science*, 56: 521-527.
94. Crang R., Lyons-Sobaski S. Wise R., 2019. *Plant Anatomy. A Concept-Based Approach to the Structure of Seed Plants.* Springer.
95. Crespo-Alonso M., Nurchi V.M., Biesuz R., Alberti G., Spano N., Pilo M.I., Sanna G., 2013. Biomass against emerging pollution in wastewater: Ability of cork for the removal of ofloxacin from aqueous solutions at different pH. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1:1199-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.09.010>
96. Croitoru A.E., Piticar A., Imbroane A., Burada D., 2012. Spatiotemporal distribution of aridity indices based on temperature and precipitation in the extra-Carpathian regions of Romania. *Theoretical and Applied Climatology*, 112: 597–607 DOI 10.1007/s00704-012-0755-2.
97. Cumbre F., Fernando Lopes F., Pereira H., 2000. The effect of water boiling on annual ring width and porosity of cork ; *Wood Fibre Sciences*, 32 (1): 125-133.

98. C.W.F.T., 2007. Fascicule de propriété : forêt domaniale de Tagdempt, 5p.
99. D.S.F.,2010. Département de la santé des forêts: Note de Service DGAL/SDQP/ N2010-8119.
100. Daget Ph., 1977:. Le bioclimat méditerranéen, caractère généraux, méthodes de classification. *Vegetatio*, 34(1):1-20.
101. Dahmani M., 1984. Contribution à l'étude des groupements à chêne vert des monts de Tlemcen (Ouest algérien). Approche phytosociologique et phyto-écologique. Thèse doct. 3° Cycle : Univ. H.Boumedienne, Alger. 238 p+ ann.
102. Dantín Cereceda, F. y Revenga Carbonell, A.,1941. Las líneas y las zonas Isoxéras de España según los índices termoplumiométricos. Avance al estudio de la aridez en España. *Estudios Geográficos*. Madrid, 35-91.
103. Dario de Noticias, Portugal. 2010. Le chêne-liège, outil de développement durable, Courrier International, , [\[1\] \[archive\]](#).
104. David T.S., Cabral M. T. & Sardinha R.M.A.,1992. A mortalidade dos sobreiros e a seca. *Finisterra*, 27 : 17-24.
105. David J.S., Ferreira, M.I., Cohen S., Perreira J.S., Chaves M.M. & David J.S.,2004. Constraints on transpiration for evergreen oak tree in southern Portugal. *Agricultural and Forest meteorology*, 122:193-205.
106. David T.S., Cabral M.T., Sardinha R., 1992. A mortalidade dos sobreiros e a seca. *Finisterra*, 27: 17–24.
107. David T.S., Henriques M.O., Kurz-Besson C., Nunes J., Valente F., Vaz, M., Pereira J.S., Siegwolf R., Chaves M.M., Gazarini L.C., David J.S., 2007. Water-use strategies in two co-occurring Mediterranean evergreen oaks: surviving the summer drought. *Tree Physiology*, 27: 793–803.
108. David T.S., Pinto C.A., Nadezhdina N., Kurz-Besson C., Henriques M.O., Quilho T.,Cermak J., Chaves M.M., Pereira J.S., David J.S., 2013. Root functioning, tree water use and hydraulic redistribution in *Quercus suber* trees: a modeling approach based on root sap flow. *Forest Ecology Management*, 307: 136–146.
109. Davis W., Shortle W. & Shigo A.,1980. Potential hazard rating system for fir stands infested with budworm using cambial electrical resistance. *Canadian Journal of Forest Research*, 10: 541-544.
110. De Sampaio e P. C-A.C., da Clara M.I.E., de Almeida Ribeiro N.M.C., 2013. Decline of Mediterranean oak trees and its association with *Phytophthora cinnamomi*: a review. *European Journal of Forest Research*,132: 411–432. [https:// doi.org/ 10.1007/ s10342-013-0688-z](https://doi.org/10.1007/s10342-013-0688-z).
111. De Sousa E., Atay Kadiri Z., 2005. Le déclenchement des perturbations physiologiques des peuplements de chêne-liège: une synthèse des relations agent/hôte. *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC/wprs Bull.*, 28(8): 9-16.
112. Debrach J., 1953. Notes sur les climats du Maroc occidental. *Maroc médical*, 32 (342) : 1122-1134.
113. Dehane B., et Chorana A., 2021. Study of the cork quality indices in the north-west region of Algeria. *International Journal Of Environmental Studies* . <https://doi.org/10.1080/00207233.2021.2006912>
114. Dehane B., 2019. Caracterización del crecimiento y de la calidad de corcho de los alcornoques del Noroeste de Argelia (región de Orán). *Ecosistemas*, 28(1): 97-105. Doi.: 10.7818/ECOS.1617
115. Dehane B., Ghafar M.. 2017. Etude de la variabilité de croissance du liège dans le Nord Algérien. *Geographie-Ecologie-Tropical*, 41:39-54.
116. Dehane, B., Bouhraoua, R.T., Belhoucine, L. & Hamani F.,2013 : La filière liège entre passé et présent. *Forêt Méditerranée*, 34(2) :143-152.

117. 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). These doctorat, (Algérie: Departement de Foresterie, Université de Tlemcen). doi:10.1094/PDIS-11-11-0999-PDN
118. 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.
119. Delord J., 2016. La responsabilité en crise face aux changements globaux », *Revue de métaphysique et de morale*, 1(89):87-102.
120. Del Pozo J.L. y Santiago R. 2000. Calidad del corcho de Marruecos a través de un nuevo método de muestreo en pila. Congreso Mundial del Alcornoque y el Corcho. Lisboa.
121. De Martonne E., 1926. Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité. *La météo*, 449 – 459.
122. Dequincey O., et Pierre Thoma P.,2017. Aléas et risques, Article apparu le site planet terre le | 01/12/2017.
123. DGF, 2021. Bilan de la production national de liège.1p.
124. Diarra C. Mody Sow M., et Dembele L., 2019. Variabilité des températures minimales et maximales durant quatre décennies récentes de 1970 à 2009 dans six grandes villes du Mali. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 8(5): 200-215.
125. Dias A., Gaspar M., Carvalho A., Pires J., Lima-Brito J., Silva M., 2018. Within - and between – tree variation of wood density components in *Pinus nigra* at six sites in Portugal. *Annals of Forest Science*,75:58.
126. Díaz A., 2019. Índices climáticos y bioclimáticos. *Biogeographia*,119p.
127. Díaz Fernández P.M., Jiménez P., Catalán G., Martín S., Gil L., 1995. Regiones de procedencia de *Quercus suber* L. ICONA, Madrid, 100p.
128. Domingues V., Alves A., Cabral M., Delerue-Matos C., 2005. Sorption behaviour of bifenthrin on cork. *Journal of Chromatography A*.1069 (1), 127–132.
129. Dordio A.V.,Goncalves P., Texeira D., Candeias A.J., Castanheiro J.E., Pinto A.P., Carvalho A.J.P., 2011. Pharmaceuticals sorption behaviour in granulated cork for the selection of a support matrix for a constructed wetlands system. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 91: 615–631.
130. DSF, 2014. Les grands événements sanitaires ayant marqué la santé des forêts par date. Consulté le 13/04/2024, du site <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/83624?token=6e0a4b1d1561eea1eac720493cd33b9bea4c3371b3aba497c8cde705e64b676b>
131. E-book,2018. Remplissages de liège. Apporter la nature aux systèmes de gazon synthétique. Amorim cork composites, 8p.
132. Emberger L., 1942. Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographique. *Bull. Sx. Hist. Nat. Toulouse*, 77 : 97 - 124.
133. Estienne P. et Godard A., 1970. Climatologie . Paris, Armand Colin, Collection U-Paris, 367 p.
134. EUFORGEN.,2003. Technical guidelines for genetic conservation and use <https://www.euforgen.org/species/quercus-suber/>
135. Farmer F.R., 1967. "Siting criteria: A new approach", Proceedings of the IAEA symposium on nuclear siting, *IAEA*, 303-329.
136. FAO,2010, Pour une agriculture intelligente face au climat. Rome, Italie,55p.
137. Ferreira A., Lopes F., Pereira H., 2000. Caractérisation de la croissance et de la qualité du liège dans une région de production. *Annals of Forest Sciences*, 57: 187–193. <https://doi.org/10.1051/forest:2000169>.

138. Ferreira A., Lopes, F. and Periera H., 2000. Caractérisation de la croissance et la qualité du liège dans une région de production . *Annals of Forest Sciences* 57, 187–193. doi: 10.1051/forest:2000169.
139. Ferreira A., Mendes C., Lopes F., Pereira H., 1998. Relação entre o crescimento da cortiça e condições climáticas na região da bacia do Sado, in: Pereira H. (Ed.), *Cork oak and Cork. Proceedings of an European Conference on Cork Oak and Cork*, Lisboa, 156-161.
140. Fleig A.K., Tallassee L.M., HisdaL H., Hannah D.M., 2011. Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types. *Hydrological Process*, 25 (7), 1163-1179.
141. Fonseca F.M.A., Lousada J.L.P.C., Silva M.E.C.M.,1994.Growth and Cork Quality – Microdensitometry capabilities. III National Forest Congress, Report 2. *Portuguese Society of Forest Science, Figueira da Foz*, 267–279.
142. Font Quer, P., 1979. Diccionario de botánica. Editorial Labor, Barcelona.
143. Fortes M. A., Rosa M.E. & Pereira H., 2004. A Cortiça. IST Press. Lisboa. 259 p.
144. Fos S. and Barreno E., 1994. Crecimiento radial del corcho de reproduccion de los alcomocales catalanes y valencianos. *Sciences Gerunding*, 20: 5-15.
145. Fos S., Pérez-Rovira P. & Barreno, E.1997. Crecimiento radial del corcho en los alcornocales españoles: relaciones entre anatomía y bioclima. *II Congreso Forestal Español*, 177-182 .
146. Franceschini A., Corda P., Maddau Sechi C. & Ruiu P.A. 1999. Manifestations de dépérissement du chêne liège en Sardaigne (Italy). *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC/wprs Bull.*,22: 1-3.
147. Franceschini A., Marras F., and Sechi C., 1993. Funghi segnalati sulla Quercia da sughero (*Quercus suber* L.). *Collana biologica* (3). Stazione Sperimentale del Sughero, Tempio Pausania, Italy.
148. Freytet F., 2020. Mesurer les arbres. CAUE 77, 9p.
149. Fritts H.C., 1976. Tree Rings and Climate. Academic, New York, 576 p.
150. G.G.A.,1927.Instruction sur les travaux d’exploitations dans les forêts de chêne liège.96p.
151. Gagnon R.R., Bauce E. & Pineau M.,1987. Relation between air water potential and cambial electrical resistance of balsam fir and white spruce after budbreak. *Canadian Journal of Forest Research*, 17: 105-108.
152. Gamero F., 1995. Calidad del corcho. Metodología para su estimación. I Jornadas de aprovechamientos no maderables. Universidad de Huelva.
153. Garcia De Ceca J.L., Gonzalez Hernandez F., Caceres Esteban M.J.L., and Gonzalez-Adrados, J.R., 2009. Relación entre el aspecto visual, la densidad y el comport amiento mecánico del tapón de corcho Actas del IX Congreso Forestal Español 21–25 de septiembre, Sociedad Española de Ciencias Forestales, (Espana: Avila), 2–10.
154. Gauquelin X., Bréda N., Nageleisen L.M., & Picard O., 2010. Guide de gestion des forêts en crise sanitaire. Paris : Office national des forêts ; Institut pour le développement forestier, 100 p.
155. Gentilesca T., Camarero J.J., Colangelo M., Nol`e A., Ripullone F., 2017. Drought-induced oak decline in the western mediterranean region: an overview on current evidences, mechanisms and management options to improve forest resilience. *IForest*, 10: 796–806.
156. Gibson L.J., Ashby M.F.,1997. Cellular Solids – Structure and properties, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge.
157. Gibson L.J., Easterling K.F. & Ashby M. F., 1981. The structure and mechanics of cork. *Proceedings Royal Society. London A* 377, 99-117.

158. GIEC, 2022. 6^{ème} rapport du GIEC – Changement climatique 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. IPCC Sixth Assessment Report.
159. GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2007. Changements climatiques 2007: rapport de synthèse. Quatrième rapport d'évaluation du GIEC, Genève, Suisse.
160. GIEC, 2014. Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 201p. https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-IntegrationBrochure_fr.pdf
161. Gil L., 1998. Cortiça: produção, tecnologia e aplicação, Ed. INETI(Lisbon) Portugal.
162. GIZ, 2011. Etude sur la vulnérabilité de la subéraie face au changement climatique, Ministère de l'environnement, Tunisie, 3p.
163. Goncalves F., Correia P., Silva S. P., & Almeida-Aguiar C., 2016. Evaluation of antimicrobial properties of cork. *FEMS Microbiology Letters*, 363(3): fnv231. doi:10.1093/femsle/ fnv231
164. González Adrados J.R., García de Ceca J.L., González Hernández F., 2005 . Evaluación de anomalías y clasificación del corcho. En AA.VV. *Actas del Congreso Internacional Alcornocales, Fábricas y Comerciantes: Pasado, Presente y Futuro del Negocio Corchero*, Palafrugell, 16-18 de febrero.
165. González F., González J.R., De la Vega R., Cristóbal A., 2001. Procesado de laboratorio para la obtención de los parametros característicos del corcho en plancha. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 6p.
166. González Adrados J.R., González Hernández F., Calvo Haro R., 2000. Predicción del calibre del corcho al final del turno y su aplicación al muestreo de la producción. *Investigation Agrarias: Sistemas y Recursos Forestals*, 9 (2): 363-374.
167. González-Adrados J.R., González-Hernández F., Garcia De Ceca, J.L., 2000. Variabilidad de los parametros característicos del corcho en plancha con la altura de extracción. IX Congreso forestal Esapagnol, 1-6.
168. González-Hernández, F., González-Adrados, J.R., García De Ceca, J.L., García-Arcal J., González-Hernández M., 2000. Las densidades volumétricas y superficial antes y después del hervido y su aplicación al cálculo de las expansions en volumen, superficie y calibre del corcho. In: Congreso Mundial do Sobreiro e da Cortiça (ed.). *Actas del Congreso Mundial do Sobreiro e da Cortiça*, Lisbon, Jul 19–21: 382–388.
169. Gonzalez-Montero J.A., 2004. Variacion de la produccion de corcho en cantidad y calidad en la comunidad de Extremadura [Variation of cork production in quantity and quality in the region of Extremadura], In. Polytechnic University of Madrid.
170. Gosuber, 2020, Miniguía nuevas aplicaciones del corcho. Grupo Operativo GO SUBER , 66p.
171. Gottarredona C. 1992. Estado fitosanitario de las massas forestales de Quercineas en los espacios naturales de Andalucía. In: *Actas simposio mediterraneo sobre regeneration del monte alcornocal*, Merida, Évora, Sevilla : 191-195.
172. Granda E., Rossatto D., R., Camarero J, Voltas J & Valladares F., 2014 Growth and carbon isotopes of Mediterranean trees reveal contrasting responses to increased carbon dioxide and drought. *Global change ecology*, 174:307–317.
173. Gutierrez E., 1988. Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). *Acta Oecologica Oecologia Plantarum*, 9: 301-309.
174. Guiot J., 1986. Sur la détermination de régions climatiques quasi-homogènes. *Revue de Statistique Appliquée*, 34 (2): 15-34.

175. Hamidi O., Touhami A.O., Benkirane R., Douira A., 2014. Élaboration d'un guide de santé des forêts relatif à la décision du déliègeage au niveau de la subéraie de la Mamora(Maroc). *Journal of Applied Biosciences*, 84: 7730–7739.
176. Hayes R., 1998. Drought indices. *Nature* (299): 46-47.
177. Heinimann H.R., 2010. A concept in adaptive ecosystem management—An engineering perspective. *Forest Ecology and Management*, 259(4):848-856.
178. Houston D.R., 1992. Host-stress-saprogen model for forest dieback-decline diseases. In : Manion P, Lachance D, éd. *Forest decline concepts*. Minnesita : PDS Press,3-25.
179. Houston D.R ., 1967. Dieback and decline of northeastern hardwoods .*Trees*, 28:12-14.
180. IM.I., 2005. La levée du liège. Guide technique et de vulgarisation, 24p.
181. IML,2021. Institut Méditerranéen du Liège, « [Aire de répartition et production de liège \[archive\]](#) », sur www.institutduliege.fr (consulté le 22 avril 2024)
182. Inácio M.L., Henriques J., Guerra-Guimarães L., Azinheira H.G., Lima A., Sousa E., 2011. *Platypus cylindrus* Fab.(Coleoptera: Platypodidae) transports *Biscogniauxia mediterranea*, agent of cork oak charcoal canker. *Plant Health Bulletin Pests*, 37: 181–186.
183. Infoliège n°12, 2017, Institut Méditerranéen du Liège,12p.
184. Ionac N., Grigore E., Constantin D.M., 2015. Évaluation des phénomènes de dessèchement et de sécheresse dans la zone continentale du plateau de la Dobroudja du sud. 28^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège . 269-274.
185. IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, New York, USA, Cambridge University Press, 27 p.
186. IPROCOR,2006. Recomendaciones para la saca del corcho. Folletos informativos sobre el alcornoque y el corcho. Serie Selvicultura del Alcornocal n°3. Ed. Instituto del Corcho, la Madera y el Carbón Vegetal. Mérida. Badajoz.
187. ITC (International Trade Center), 2023. Trade map. available at. <http://www.trademap.org>. Accessed on 10 September 2024.
188. Iwasa Y. et Kubo T.,1997. Optimal size of storage for recovery after unpredictable disturbances. *Evolutionary Ecology*, 11:41-65.
189. Jackson, M.L.,1958. *Soil Chemical Analysis*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 498 p.
190. Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O.B., Bouwer L.M., Braun A., Colette A., D'équ'e M., Georgievski G., 2014. EURO-CORDEX: new high- resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*,14: 563–578.
191. Jacq V., 2008, Les modèles de prévision climatique en région méditerranéenne. *Forêt méditerranéenne*, 29 (2): 107-112;
192. Jové P., Fiol N., Vilaescusa I., Verdum M., Aguilar L. Bosch C., Morató J. 2017. The use of cork waste as a sorbent for pesticides and heavy metals generated during the wine manufacturing process. *Materials Research Proceedings*, 3:75-83.
193. Jove P.,2015. *Catracterització del suro i subproductes de la industria surera. Valoració d'aquests com a biosorbents d'hidrocarburs aromàtics policíclics en aigües d'escorrentia*. Universitat de Girona. Tesi doctoral.
194. Kim H.N., Jin H.Y., Kwak M.J., Khaine I., You H.N., Lee T.Y., Ahn T.H., Woo S.Y., 2017. Why does *Quercus suber* species decline in Mediterranean areas?. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 10(3): 337–347.

195. Konkin D. et Hopkins K., 2009. Apprendre à s'adapter aux changements climatiques et aux perturbations forestières catastrophiques. *Unasyla*, (32), 17-23.
196. Koestel G., LECOMTE H. et RONDEUX J., 2002. La gestion forestière durable en région wallonne : l'apport de l'inventaire permanent. les cahiers forestiers de gembloux, 16p.
197. Krika F., Benlahbib O. el F., 2015. Removal of methyl orange from aqueous solution via adsorption on cork as a natural and low-cost adsorbent: equilibrium, kinetic and thermodynamic study of removal process. *Desalination and Water Treatment*, 53(13): 3711–3723.
198. Kurz-Besson C., Lobo do Vale R., Rodrigues M.L., Almeida P., Herd A., Grant O.M., David T.S., Schmidt M., Otieno D., Keenan T.F., Gouveia C., Meriaux C., Chaves M.M., Pereira J.S., 2014. Cork oak physiological responses to manipulated water availability in a Mediterranean woodland. *Agricultural and Forest Meteorology / Journal*, 184: 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.10.004>
199. Kurz-Besson C., Otieno D., Lobo do Vale R., Siegwolf R., Schmidt M., Herd A., Nogueira, C., David T.S., David J.S., Tenhunen J., Pereira J.S., Chaves M., 2006. Hydraulic lift in cork oak trees in a savannah-type Mediterranean ecosystem and its contribution to the local water balance. *Plant Soil*, 282: 361–378. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-0005-4>.
200. Laffly D., 2006. Régression multiple: principes et exemples d'application. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 33p.
201. Laisec J.U., 1949. Fitoquímica Florestal, 2^a parte. *I.F.I.E.* 44: 1-109.
202. Lamey A., 1893. Le chêne-liège : sa culture et son exploitation, Paris, Berger-Levrault éditeur, 289 p.
203. Landmann G., 1998. De la difficulté d'informer sur l'état sanitaire des forêts Européennes. *CE*, 33: 39-45. <http://www7.inra.fr/dpenv/so.htm>
204. Landmann G., 1994. Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. *Revue Forestière Française*. 45(5) : 405-413.
205. Landmann G., 1991. Dépérissement des forêts et pollution atmosphérique: bilan de cinq années de recherches (1985–1990) dans le cadre du Programme DEFORPA. *Pollution atmosphérique*, 33: 64–69
206. Lanier L., Abbas M. et Bensaada M., 1986. Rapport de mission effectuée à M'Sila. *Inst. Nationale de Recherche Forestière*, Alger, 3p.
207. Lanly J.-P., 1999. Aménagement et gestion durable. *Revue forestière française*, 51 (numéro spécial « L'aménagement forestier, hier, aujourd'hui, demain »), 45-49. <https://doi.org/10.4267/2042/5503>.
208. Lanzo R., Santiago R., Burgos M., 2013. Diagnóstico Selvícola y de la calidad del corcho del monte alcornocal en Extremadura. [Silvicultural and cork quality diagnosis of cork oak forests in Extremadura.] In, Ist Iberian Congress of the Dehesa and Montado, Badajoz (Spain) <http://riteca.gobex.es/es/documentacion-del-congreso-iberico-dela-dehesa-y-el-montado/posters>
209. Lapie G., 1928. La sylviculture française dans la région méditerranéenne ENEF, Ecole nationale des eaux et forêts, Nancy (FRA), 20p.
210. Larcher W., 1983. Physiological plant ecology. *Springer-Verlag, Berlin*.
211. Lauw A., Oliveira V., Lopes F., Pereira H., 2018. Variation of cork quality for wine stoppers across the production regions in Portugal. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76: 123–132. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1196-5>.
212. Leite C., Oliveira V., Lauw L., and Pereira H., 2018. Cork rings suggest how to manage *Quercus suber* to mitigate the effects of climate changes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266-267(1):12-19 DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.11.032

213. Leite C., Oliveira V., Lauw A., Pereira H., 2019: Cork rings suggest how to manage *Quercus suber* to mitigate the effects of climate changes. *Agricultural and Forest Meteorology*, (266–267):12–19.
214. Le Houérou H.N., 1992. Vegetation and Land Use in the Mediterranean Basin by the Year 2050. A Prospection Study. In: Jeftic, L., Milliman, J.D. and Sestini, G., Eds., *Climatic Change and the Mediterranean*, Edward Arnold, London.
215. Lescomplekt A., 1983. Etude et projet pour la mise en valeur des terres, aménagement des forêts et parcs nationaux dans le massif Ouarsenis. Schéma directeur d'aménagement, Rapport, vol. I, Bulgarie, 342 p.
216. Lewis T., Taylor L. R., 1967. *Introduction to Experimental Ecology*. London and New York : Academic Press , 402p.
217. Linaldeddu B.T., Scanu B., Maddau L., Franceschini A., 2014. *Diplodia corticola* and *Phytophthora cinnamomi*: the main pathogens involved in holm oak decline on Caprera Island (Italy). *For. Pathol.* 44, 191-200.
218. Livrelli J.N., 1993. Utilisation de la méthode du diagnostic foliaire chez les végétaux ligneux sclérophylles méditerranéens pour l'étude comparée de groupements préforestiers et forestiers. Application au problème du débroussaillage., Marseille, France.
219. Lombardini A., 2012. Rénover et gérer les forêts provençales de Chêne-liège. 12p.
220. Lopes F., and Pereira, H., 2000. Definition of quality classes for champagne cork stoppers in the high quality range, *Wood Sciences Technology*, 34(1): 3-10.
221. Lopes F., Pereira H., 2000. The effect of water boiling on annual ring width and porosity of cork. *Wood Fiber Sciences*. 32 (1):125–133.
222. López de Heredia U., Jiménez P., Collada C., Simeone M.C., Bellarosa R., Schirone B. Cervera M.T. and Gil L. 2007. Multi-marker phylogeny of three evergreen oaks reveals vicariant patterns in the Western Mediterranean. *Taxon*, 56(4): 1209-1220.
223. Luciano P. & Prota R. 1995. Insect pests in Sardinia cork oak forests. *Integrated Protection in Oak Forests, IOBC/wprs Bull.*, 18: 1-7.
224. Luque J., Pera J., and Parladé J., 2008. Evaluation of fungicides for the control of *Botryosphaeria corticola* on cork oak in Catalonia (NE Spain). *Forest Pathology*, 38:147-155.
225. MacDougall R.G., Thompson R.G. & Piene H., 1987. Stem electrical capacitance and resistance measurements as related to total foliar biomass of balsam fir trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 17:1071-1074.
226. Malia M.E. & Tattar T.A., 1978. Electrical resistance, physical characteristics, and cation concentrations in xylem of sugar maple infected with *M9f!ct7//ufn dahliae*. *Canadian Journal of Forest Research*, 8: 322-327
227. Manion P.D., 1981. *Tree Disease Concepts*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., 402p.
228. Marc H., 1930. Notes sur les forêts de l'Algérie .Collection du Centenaire de l'Algérie. Larose ,Paris.702p.
229. Marrafa S., 2016. Evaluation of cork Quality in 3 consecutive debarkings: Influence of tree and plot structure. Master Thesis Dissertation. University of Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
230. Marschner H., 1986. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, New York, 649p.
231. Marschner H., 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants, 3nd Edition. Academic Press, London, 649p.
232. Marschner, H., 1994. Mineral nutrition's of higher plants, 2^{eme} éd., Academic Press, London, 882p.

233. Martin-Prevel P., Gagnard J., Gautier P., 1984. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes. Paris [FRA] : Lavoisier, 810p.
234. Masrouri A., et Pantet A., 2009. Classification des risques. Université Numérique Ingénierie et Technologie(France). Polycopies, 27p.
235. McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scale. *8th Conference on Applied Climatology*, 179-184.
236. Mendes M.P., Ribeiro L., David T.S., Costa A., 2016. How dependent are cork oak (*Quercus suber* L.) woodlands on groundwater? A case study in southwestern Portugal. *Forest Ecology Management*, 378, 122–130.
237. Mendes M.P., Ribeiro L., Soares David T., Costa A., 2016. How dependent are cork oak (*Quercus suber* L.) woodlands on groundwater? A case study in southwestern Portugal. *Forest Ecology and Management*, 378:122-130.
238. Méthy M., Damesin C. & Rambal S. 1996. Drought and photosystem. II activity in two mediterranean oaks. *Annals of Science Forest*, 53: 255-262.
239. Metna B., 2003. Caractérisation physique et chimique du liège de reproduction de la suberaie orientale de la wilaya de Tizi-Ouzou. Mémoire Magister, Fac. Sci. Agr. Et Biol. Univ. Tizi-Ouzou. 96p.
240. Mishra A.K., Singh V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391: 202-216.
241. Mokhtari N.R Mrabet Lebailly P. and Bock L.. 2013. "Spatialisation des bioclimats ,de l'aridité et des étages de végétation du Maroc," 50–66. *Revue Marocaine des Sciences. Agronomiques et Vétérinaires*, 2 (1):50-66
242. Molinas M. L., and Verdaguer D., 1993. Lignotuber ontogeny in the cork oak (*Quercus suber*, Fagaceae) .2. Germination and young seedling. *American Journal of Botany*, 80:182-191.
243. Montenegro G., 1987. Quantification of Mediterranean plant phenology and growth, in: Tenhunen J.D. et al. (Eds.), Plant response to stress. Functional analysis in Mediterranean Ecosystems. *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg*, 469–488.
244. Montero G., 1987. Modelos para cuantificar la producción de corcho en alcornocales en función de la calidad de la estación y de los tratamientos selvícolas. I.N.I.A.Serie Tesis Doctorales. 277p.
245. Montero G., Cañellas I., 2003. Selvicultura de los Alcornoques en España. *Silva Lusitana*, 11(1): 1-19.
246. Montero G., San Miguel A., Alia R., 1991. Structure and Production of cork oaks (*Quercus suber* L.) in the south of Spain. *Investigacion Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, 69–74.
247. Montoya Oliver J.M., 1988. Los Alcornoques. SEA. Ministeri de Agricultura. Madrid, 267p.
248. Moricca S., Linaldeddu B., Beatrice G., Scanu B., 2016. Franceschini Endemic and Emerging Pathogens Threatening Cork Oak Trees: Management Options for Conserving a Unique Forest Ecosystem. *The American Phytopathological Society*, 2184-2193.
249. Moricca S., and Ragazzi A., 2000. Molecular markers and oak decline: how new diagnostic techniques can be used to address this multifaceted problem, 187-215. In: Decline of Oak Species in Italy: Problems and Perspectives. A. Ragazzi and I. Dellavalle, eds. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, Italy.
250. Mourad M., Fechtal A., El abid A., Adref M., 2000. Qualité du liège de reproduction du plateau d'Oulmes, *Annales de la Recherche Forestière du Maroc*, (34):119-127
251. Murray V., & Ebi K.L., 2012. IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX). *Journal of*

- Epidemiology and Community Health*, 66(9):759-760. <https://doi.org/10.1136/jech-212-201045>
252. Nadezhkina A., Ferreira M.I., Silva R., & Pacheco C.A., 2008. Seasonal variation of water uptake of a *Quercus suber* tree in Central Portugal. *Plant Soil*, 305:105–11. DOI 10.1007/s11104-007-9398-y
253. Nageleisen L.-M., & Huart O., 2005. Problèmes sanitaires d'actualité en hêtraie : la maladie du hêtre dans les Ardennes, *Revue forestière française*, 57(2):249-254. <https://doi.org/10.4267/2042/5040>
254. Nageleisen L.M., 1993. Les dépérissements d'essences feuillues en France. *Revue forestière française*, 45(6): 605-620.
255. Nalbantis I., Tsakiris G., 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23: 881-897.
256. Natividade J.V., 1956. Subericulture. Edition française de l'ouvrage portugais subericultura, 303 p.
257. Nitschke C.R., & Innes J.L., 2008. Integrating climate change into forest management in South-Central British Columbia: An assessment of landscape vulnerability and development of a climate-smart framework. *Forest Ecology and Management*, 256(3) : 313-327. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.026>
258. Oliveira V., Lauw A., Pereira H., 2016. Sensitivity of cork growth to drought events: insights from a 24-year chronology. *Climatic Change*, 137: 261–274. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1680-7>
259. Oliveira V., Rosa M.E., Pereira H., 2014. Variability of the compression properties of cork. *Wood Sciences Technology*, 48:937–948. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0651-2>
260. Oliveira G., Martins-Loução M., Correia O.A. and Catarino F. 1996. Nutrient dynamics in crown tissues of cork oak (*Quercus suber* L.). *Trees*, 10: 247–254
261. Oliveira G., Correia, O. A., Martins-Loução, M.A. and Catarino F. M., 1992. Water relations of cork-oak (*Quercus suber* L.) under natural conditions. *Vegetatio*, 99-100: 199-208.
262. Olivella M.A., Sen, A., Pereira, H., Villaescusa, I., and Fiol, N., 2011a, Sorption performance of *Quercus cerris* with polycyclic aromatic hydrocarbons and toxicity testing. *Bioresources*, 3 : 3363–3375.
263. Olivella M.À., Jové P., Oliveras A., 2011b. The use of cork waste as a biosorbent for persistent organic pollutants – study of adsorption/desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Environment Sciences and Health*, 46(8):824-32. doi: 10.1080/10934529.2011.579845.)
264. Olivella M.À., Fernández I., Cano L., Jové, P., Oliveras A., 2013a. Role of chemical components of cork on sorption of aqueous polycyclic aromatic hydrocarbons. *International Journal of Environment. Research*, 7: 225–234.
265. Olivella M.À., Jové P., Bianchi A., Bazzicalupi C., Cano L., 2013b. An integrated approach to understanding the sorption mechanism of phenanthrene by cork. *Chemosphere* 90, 1939–1944.
266. OMM, 2022. État du climat en Europe en 2022. 19 juin 2023.
267. Orcuera L., Camarero J.J, Gil-Pelegrin E.L., 2004. Effects of a severe drought on *Quercus ilex* radial growth and xylem anatomy. *Trees*, 18:83–92. DOI 10.1007/s00468-003-0284-9
268. Orgeas J., Ourcival J.M. and Bonin G., 2002. Seasonal and spatial patterns of foliar nutrients in cork oak (*Quercus suber* L.) growing on siliceous soils in Provence (France), *Plant Ecology*, 164: 201–211.

269. Orgeas J., Bonin G., 1996. Variabilité des nutriments foliaires de *Quercus suber* L. dans différentes situations écologiques dans le massif des Maures (Var, France) et relations avec la production de liège, *Annals of Sciences Forestières*, 53: 615-624.
270. Otieno D.O., Kurz-Besson C., Liu J., Schmidt M.W.T., Vale do Lobo R., David T.S., Siegwolf R., Pereira J.S., Tenhunen J.D., 2006. Seasonal variations in soil and plant water status in a *Quercus suber* L. stand: roots as determinants of tree productivity and survival in the Mediterranean-type ecosystem. *Plant and Soil*, 283: 119–135.
271. Ozenda P., 1982. Les végétaux dans la biosphère. Doin edi. Paris, 432 p.
272. Palma J.H.N., Paulo J.A., Faias S.P., 2015. Adaptive management and debarking schedule optimization of *Quercus suber* L. stands under climate change: case study in Chamusca, Portugal. *Regional Environmental Change*, 15: 1569–15.
273. Palmer W., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 58p.
274. Pancraccio A., Laflaquière M.T., 2006. Biologie et physiologie de la nutrition: la nutrition des plantes. Centre National de Promotion Rurale, 195p.
275. Panzavolta T., Panichi A., Bracalini M., Croci F., Ginetti B., Ragazzi A., Tiberi R., Moricca S., 2017. Dispersal and Propagule Pressure of Botryosphaeriaceae Species in a Declining Oak Stand is Affected by Insect Vectors. *Forests*, 8(7): 228. <https://doi.org/10.3390/f8070228>.
276. Pardos M., 1998. Comportamiento de la planta de alcornoque (*Quercus suber* L.) producida en envase: su evaluación mediante parámetros morfológicos y fisiológicos. Tesis Doctoral. INIA, Madrid, 205p.
277. Pausas J.G., Pereira J.S. and Aronson J., 2009. The tree, 11-21. In: J. Aronson, J.S. Pereira et J.G. Pausas (eds). *Cork oak woodlands on the edge. Ecology, adaptive management and restoration*. Island Press, Abingdon, Oxfordshire, UK.
278. Pereira H., 2015. The rationale behind cork properties: a review of structure and chemistry. *BioResources*. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3>. Pereira
279. Pereira H., 2007. The formation and growth of cork. *Cork*. <https://doi.org/10.1016/b978-044452967-1/50003-0>
280. Pereira H., and Tomé M., 2004. “Cork oak,” in: *Encyclopedia of Forest Sciences*, J. Burley, J. Evans, and J. Youngquist (eds.), Elsevier.
281. Pereira H. 1988. Boletim do Instituto dos Produtos Florestais – Cortiça, (600):15–18.
282. Pereira H., Graca J., Baptista C., 1992. The effect of growth-rate on the structure and compressive properties of cork. *IAWA Bull*, 13(4):389–396.
283. Pereira H., Rosa M.E., Fortes M.A., 1987. The cellular structure of cork from *Quercus suber* L. *IAWA Bull*, 8(3):213–218
284. Pérez-Sierra, A., López-García, C., León, M., García-Jiménez, J., Abad-Campos, P., Jung, T., 2013. Previously unrecorded low-temperature *Phytophthora* species associated with *Quercus* decline in a Mediterranean forest in eastern Spain. *Forest Pathology*. 43, 331-339.
285. Pinto-Correia T., Ribeiro N., Potes J., 2013. The Green book of the cork oak lands, *ICAAM*, Évora, 61p. (<http://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/10116>)
286. Pintor A.M.A., Ferreira C.I.A., Pereira J.C., Correia P., Silva S.P., Vilar V.J.P., Botelho C.M.S., Boaventura R.A.R., 2012. Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: a review. *Water Research*, 46: 3152–3166.
287. Piqué A., Ait Brahim L. Ait Ouali R., Amrhar M., et al., 1998. Evolution structurale des domaines atlasiques du Maghreb au Méso-Cénozoïque; le rôle des structures héritées dans la déformation du domaine Atlasique de l'Afrique du Nord. *Bulletin de la Société géologique de France*, 169(6): 797-810.

288. Plan Bleu, 2009. State of the Environment and Development in the Mediterranean. Athens, UNEP/MAP-Plan Bleu.
289. PNUD, 2010. Gestion des Risques Climatiques. Programme des Nations Unies pour le Développement, 4p.
290. Poeiras A., Silva M., Günther B., Vogel C., Surový P., Ribeiro N., 2021. Cork influenced by a specific water regime – macro and microstructure characterization: the first approach. *Wood Science and Technology*, 55:1653–1672.
291. Quezel P., 2000. Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen. Ibis Press, Paris, 117p.
292. Ragazzi, A., 2016. Endemic and emerging pathogens threatening cork oak trees: Management options for conserving a unique forest ecosystem. *Plant Disease* 100.
293. RedFor, 2006. Gestión integral del corcho Red Forestal de Desarrollo Rural Proyecto piloto en el marco de la Red Rural Nacional. 72p.
294. Reghezza-Zitt M., 2023. Sociétés humaines et territoires dans un climat qui change. Du réchauffement climatique global aux politiques climatiques. *Géoconfluences*, 28p.
295. Reghezza-Zitt M., Rufat S., 2019. Disentangling the range of responses to threats, hazards and disasters. Vulnerability, resilience and adaptation in question” *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.32917>
296. Regato P. 2008. Adaptación al cambio global. Los bosques mediterráneos. UICN Centre for Mediterranean Cooperation, Màlaga, Espanya. 254 p.
297. Remacha, A., 2008. Tecnología del corcho. Vision Libros Madrid ISBN: 978-84-9886-152-5. 150p.
298. Ribeiro F. et Tomé M (2002), Cork weight prediction at tree level. *Forest Ecology Management*, 171:231–241
299. Ribeiro N.A., Dias S., Surový P., Oliveira A.C., 2006. Modeling cork oak production in Portugal. In: Hasenauer H (ed) *Tree Growth Models for Forest Management in Europe*. Academic Publishers, Dordrecht, 285–313.
300. Ribeiro N.A., Surový P., 2011. Growth modeling in complex forest systems: CORKFITS a tree spatial growth model for cork oak woodlands. *Formath*, 10:263–278.
301. Robert B., Caritat A., Bertoni G., Vilar L., and Molinas M., 1996. Nutrient content and seasonal fluctuations in the leaf component of cork oak (*Quercus suber* L.) litterfall. *Vegetatio*, 122: 29–35.
302. Roger D. Launius et Dennis R. Jenkins, 2001. Coming Home: Reentry and Recovery from Space (*NASA SP-2011-593*, NASA).
303. Rosa M.E., Fortes M.A., 1988. Densidade da cortiça: factores que a influenciam, *Cortiça*, 593:65–69.
304. Rosa M.E., Pereira H. and Fortes A.M., 1990. Effects of hot water treatment on the structure and compressive properties of cork, *Wood and Fiber Sciences*. 22:149-164.
305. Rosa M.E., Fortes M.A. 1988., Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *Journal of Mater Sciences*, 23: 879–885.
306. Ross J., 1981. The radiation regime and architecture of plant stand. Junk Pub. 391p.
307. Roula B., et Messaoudene M., 2015. Etude de la qualité du liège de reproduction des suberaies de la région de Jijel (nord-est d'Algérie). Les actes du Med Suber1:1^{ère} Rencontre Méditerranéenne Chercheurs-Gestionnaires-Industriels sur la Gestion des Suberaies et la Qualité du liège, 90-97.
308. Ruiu P. A., Sechi C., Linaldeddu B.T. & Franceschini A. 2005. Variabilité de l'incidence du dépérissement des espèces de chênes présentes dans les suberaies de la Sardaigne. *IOBC/wprs Bull.*, 28(6) : 53-58.

309. Rundel P.W., 1973. The Relationship Between Basal Fire Scars and Crown Damage in *Giant Sequoia*. *Ecology*, 54(1): 210–213.
310. Saccardy L., 1938. Le Chêne-Liége et le Liège en Algérie. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 203:488-497;
311. Saccardy L., 1937. Notes sur le chêne-liège et le liège en Argerie". *Bulletin de la Station de Recherche Forestier du Nord de l'Afrique*, II, 271-374.
312. Saikkonen K., Faeth S. H., Helander M., and Sullivan T. J., 1998. Fungal endophytes: a continuum of interactions with host plants. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 29:319-343.
313. Sanchez-Cuesta, R., Ruiz-Gomez F.J., Duque-Lazo J., Gonzalez-Moreno P., Navarro-Cerrillo, R.M., 2021. The environmental drivers influencing spatio-temporal dynamics of oak defoliation and mortality in dehesas of Southern Spain. *Forest Ecology and Management*, (485), id.118946. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.118946
314. Sanchez-Gonzalez M., Beltran R.S., Lanzo Palacios R., Prades, C., 2023. Analysis of cork quality and cork tree health in stands of western Spain. *Forest Ecology and Management*. 539: 121012. doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121012
315. Sanchez-Gonzalez M., Sanchez M.F., Prades C., 2021. Fitting and calibrating a three level mixed effects cork growth model. *Forest Ecology and Management*, 497: 119510. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119510>.
316. Sanchez-Gonzalez M., Calama R., Canellas I., Montero G., 2007. Variables influencing cork thickness in spanish cork oak forests: A modelling approach. *Annals of Forest Science* 64(3): 301-312.
317. Santiago Beltran R., Benito Lopez J., Sánchez-Gonzalez, M., Gonzalez-Adrados, J.R., 2020. Guía de calidad del corcho [Guide on cork quality]. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Madrid.
318. Santos Pereira J., Burgalho M.N. & Caldeira M.C., 2008. From the cork oak to cork. A sustainable system. APCOR(Portugal). 44p.
319. Sbrescia A., 2016. Le chêne-liège face au changement climatique en Corse. *Forêt méditerranéenne*, 36 (4):319-326.
320. Sechi C., Ruiu P. A. & Franceschini A. & Corda P. 2002. Nouvelles recherches sur l'extension des phénomènes de dépérissement dans les subéraies de Sardaigne. – IOBC/wprsBull. 25(5) : 5-12.
321. Sechi C., Ruiu, P. A. & Franceschini A. & Corda P., 2005. Nouvelles recherches sur l'extension des phénomènes de dépérissement dans les subéraies de Sardaigne. IOBC/wprsBull. 25(5) : 5-12.
322. Seltzer P., 1946. Le climat de l'Algérie. Inst. Météor. Et Phys. Du Globe. Univ. Alger. 219 p+ Carte .
323. Shafer B.A., Edezman L.E., 1982. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: Proceedings of the Western Snow Conference. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 164-175.
324. Sharma T.C., Panu U.S., 2010. Analytical procedures for weekly hydrological droughts: a case of Canadian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 55 (1): 79-92.
325. Schmidt M.W.T., Schreiber D., Correia A., Ribeiro N., Surov P. 2009. Sap flow in cork oak trees at two contrasting sites in Portugal. *ISHS Acta Horticulturae* 846: VII International Workshop on Sap Flow. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.846.40
326. Silva M., 1996. Contribution to the cork quality study, evaluation of the relations between quality parameters. UTAD, Vila Real

327. Silva M., 1996. Contribution to the cork quality study, evaluation of the relations between quality parameters. UTAD, Vila Real.
328. Sinclair W.A., 1967. Decline of hardwoods: possible cause international shade. *Tree Conference Proceedings*, 42: 17-32.
329. Somot S., 2005. Modélisation climatique du bassin méditerranéen: variabilité et scénarios de changement climatique. These doctorat. U.F.R. Sciences de la Vie et de la terre. Université Toulouse iii - Paul Saba, 349p.
330. Sousa E., Santos N., Varela M.C. & Henriques J. 2007. Perda de vigor dos montados de sobre e azinho: Análise da situação e perspectivas. EFN/INIA, 91p.
331. Sousa E.M.R., Pinto J.C., Santos M.N.S., Gomes, A.A. & Bonifácio L. 2000. Association of soil, macro and micronutrients and cork oak decline in Portugal. In: "Recent advances on oak health in Europe", eds Oszako and Delatour : 215-218.
332. Spittlehouse D.L., & Stewart R.B., 2003. Adaptation to climate change in forest management. *Journal of Ecosystems and Management*, 4(1):7-17. <http://www.forrex.org/jem/2003/vol4/no1/art1.pdf>
333. STB, 2010. Tecnología del corcho, mediciones y prácticas. Documento interno inédito, 60p.
334. Steward F. and Durzan D. 1965. Metabolism of nitrogenous compounds. In: Steward F. (ed.), *Plant Physiology 4 A*. Academic Press, New York, 379–686.
335. Taferka S., 2008. Libérer notre liège des réseaux mafieux. Article édité dans le quotidien: "Le jour d'Algérie », 2p.
336. Tamm C. 1995. Towards an understanding of the relations between tree nutrition, nutrient cycling and environment. *Plant and Soil*, 168–169: 21–27.
337. Tattar T.A., Shigo A.L. & Chase T., 1972. Relationship between the degree of resistance to a pulsed electric current and wood in progressive stages of discoloration and decay in living trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 2:236-24.
338. Teixeira R.T., Margarida Fortes A.M., Pinheiro C., Pereira H., 2014. Comparison of good- and bad-quality cork: application of high-throughput sequencing of phellogenic tissue. *Journal of Experimental Botany*, 17: 4887- 4905. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru252>
339. Tenhunen J.D., Lange O.L., Gebel J., Beyschlag W. and Weber J.A., 1984. Changes in photosynthetic capacity, carboxylation efficiency, and CO₂ compensation point associated with midday stomatal closure and midday depression of net CO₂ exchange of leaves of *Quercus suher*. *Planta*, 162: 193-203.
340. Tessier L., 1986. Approche dendroclimatologique de l'écologie de *Pinus sylvestris* L. et *Quercus pubescens* Wild. dans le Sud-Est de la France. *Acta Oecologica Oecologia Plantarum*, 7: 339-355.
341. Thintoin R., 1948. Les Aspects Physiques du Tell Oranais. Essai de Morphologie. Ed. Fouquet, Oran, 639 p.
342. Thonicke K., Venevsky S., Sitch S., and Cramer W., 2001. The Role of Fire Disturbance for Global Vegetation Dynamics: Coupling Fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Global Ecology and Biogeography*, 10 (6): 661-677.
343. Tiberi R., Branco M., Bracalini M., Croci F., Panzavolta T., 2016. Cork oak pests: a review of insect damage and management. *Annals of Forest Sciences*, 73: 219–232. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0534-1>.
344. Tiberi R., Branco M., Bracalini M., Croci F., Panzavolta T., 2016. Cork oak pests: a review of insect damage and management. *Annals of Forest Sciences*. 73, 219–232. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0534-1>.

345. Tinoco I., Pestana M., Nóbrega F., 2009. Cork quality versus management modalities in the cork oak land. *Silva Lusitana*, 17:131–158.
346. Touhami I., Chirino E., Aouinti H., Khorchani A.E., Elaieb M.T., Khaldi A., Nasr Z., 2020. Decline and dieback of cork oak (*Quercus suber* L.) forests in the Mediterranean basin: a case study of Kroumirie, Northwest Tunisia. *Journal of Forest Research*, 31:1461–1477.
347. Varela M.C, 2008. Dépérissement des peuplements de chêne-liège et changement climatique. *Forêt méditerranéenne*, 19(2): 209-212 .
348. Vayreda J., 2018 . Efectos actuales y futuros del cambio climático en los bosques mediterráneos. Jornada Internacional Life+SUBER, 31p.
349. Vaz M., Maroco J., Ribeiro N., Gazarini L.C., Pereira J.S., Chaves M.M., 2011. Leaf-level responses to light in two co-occurring *Quercus* (*Quercus ilex* and *Quercus suber*): leaf structure, chemical composition and photosynthesis. *Agroforest System*, 82:173–181
350. Vaz M.F. and Fortes M.A., 1998. Friction properties of cork. *Journal of Materials Science*, 33 (8): 2087-2093.
351. Vennetier M., 2012. Changement climatique et dépérissements forestiers: causes et conséquences. In: Corvol A. (ed.): Changement climatique et modification forestiere. Paris, Institut d’histoire modern et contemporaine: 50–62.
352. Veuillon S., 1998. Guide de subériculture des Pyrénées orientales. Typologie de peuplement et étude préliminaire. Stage de fin d’étude. FIF-ENGREF, France, 68p + Annexes
353. Villemant C. and Fraval A., 1991. La faune du chêne-liège. Actes Editions. Rabat. 336 p.
354. Warren W. G., 1980. On removing the growth trend from dendrochronological data. *Tree-Ring Bulletin*, 40: 35-44.
355. Wargo P.M., 1996. Consequences of environmental stress on oak: predisposition to pathogens. *Annales des Sciences Forestières*, 53: 359–368.
356. Wilhite D.A., 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. Drought: A Global Assessment Routledge, London, UK. Beaudin.
357. Zaid H., 2006. Complément de cours de physiologie végétale Semestre 4, 11p.
358. Zapata Blanco S., 2002. Del suro a la cortiça. El ascenso de Portugal a primera potencia corchera del mundo., 22. Dep. d’Història Institucions Econòmiques de la Universitat de Barcelona.. *Historia Industrial*, 109-137.
- Zemrani M., Camarero J.J., Valeriano C., Rubio-Cuadrado A., Fule P.Z., Díaz-Delgado R., Taïqui L., 2023. Site-contingent responses to drought of core and relict *Tetraclinis articulata* populations from Morocco and Spain.