

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Université Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Thème

Exploration des propriétés mécaniques du liège local

Les membres de jury :

- **Président** Dr. Gueraïche Larbi
- **Examineur** Mr. Sedrat Toufik
- **Encadrant** Dr. Saadallah Younès

Présenté par :

- Zemour Iqbal
- Boulemnakher Faris

Promotion juin 2019

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le tout Puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué dans le cadre de préparation du mémoire de Master en Génie Mécanique, option "Construction Mécanique" au sein de la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Jijel.

Au terme de ce projet, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et notre immense respect à :

Monsieur *Younès SAAD ALLAH*, maître de conférences de la faculté des sciences et de la technologie, pour son soutien durant la préparation de ce mémoire. Nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance pour ses orientations, sa extrême disponibilité, sa rigueur scientifique, la confiance qu'il nous a accordée en nous proposant un sujet aussi passionnant et prometteur, ainsi que pour ses conseils fort constructifs. Nous le remercions vivement pour le temps et l'énergie qu'il nous a consacrés lors de la réalisation de cette étude malgré ses nombreuses responsabilités.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury Dr. Larbi Gueraiche et Mr. Toufik Sedrat leur disponibilité pour l'évaluation de notre travail.

Nous désirons aussi remercier les enseignants de l'université de **Mohamed Seddik Benyahia, Jijel**, et plus précisément ceux du département de Génie Mécanique, de nous avoir fourni tous les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires.

Nous tenons, enfin, à remercier toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce mémoire. Nous en citons en particulier le personnel du secteur des forêts à Jijel, celui de l'unité de production JLE à Jijel et celui de l'unité de recherche URASM à Annaba où nous avons réalisé nos essais mécaniques.

Dédicaces

*Louanges à Allah qui m'a doté de force, de patience, de courage et de persévérance durant tout le long de mon cursus universitaire et qui m'a gratifié de la **maman** la plus merveilleuse qui soit, qui a toujours fait passer la vie et le bonheur de ses enfants avant le sien. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon amour et ma considération pour tous les sacrifices que tu as consentis pour mon instruction et mon bien-être.*

A mon père

pour le soutien, les conseils et les encouragements qu'il m'a apportés, d'avoir instillé en moi l'importance du savoir depuis ma tendre enfance, pour le témoignage quotidien de son courage, qui m'a porté à ne jamais baisser les bras.

A mon grand père,

pour tout l'amour, l'aide et les encouragements que tu m'as apportés, tu n'as jamais cessé de me soutenir et de m'épauler, tu me voulais toujours le meilleur.

A mon grand frère Abd Elfetah,

pour tes encouragements inlassables, tes conseils précieux, ton aide constante, ton humour qui fait distraire du négatif, ton appui moral persistant. En témoignage de mon affection et de ma profonde reconnaissance, Merci !

A mes frères, aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur.

A mes sœurs, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

*A Mademoiselle **Linda**, responsable du laboratoire de Génie Mécanique pour votre aide et encouragement constante et surtout pour votre gentillesse. Merci !*

*A **Fares, Mohamed et Messaoud**, merci pour tous les moments partagés ensemble au cours mon cursus universitaire.*

A toutes mes aimés sans exceptions.

Iqbal

A mes parents,

*A mes chers parents, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu et aidé pour arriver
jusqu'ici.*

A mes frères,

*aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, votre joie et
votre gaieté me comblent de bonheur.*

A Mademoiselle Linda,

*responsable du laboratoire de Génie Mécanique pour votre aide et encouragement
constante et surtout pour votre gentillesse. Merci !*

Z Iqbal, R Mohamed et Ch Zaki,

merci pour tous les moments partagés ensemble au cours mon cursus universitaire.

A toutes mes aimés sans exceptions.

Fares

Table des figures

Figure I.1. Aire de distribution du chêne-liège en Méditerrané [5].	4
Figure I.2 . Graphique de récolte du liège (2010-2015) dans la wilaya de Jijel.	5
Figure I.3. Liège male.	6
Figure I.4. Liège de reproduction.	7
Figure I.5. Représentation des différentes directions d'un échantillon du liège [7].	8
Figure I.6. Structure du liège observée par microscopie électronique dans les trois différentes directions : a) radiale, b) axiale et c) tangentielle [9].	8
Figure I.7. Courbe contrainte-déformation pour une compression uni-axiale d'un échantillon de liège d'après [20].	9
Figure I.8. Courbes contrainte-déformation des échantillons du liège sous compression de différentes densités [19].	11
Figure I.9. Courbe contrainte-déformation en traction pour des échantillons du liège de différentes densités [21].	11
Figure II.1. a) Liège naturel ; b) Liège expansé.	12
Figure II.2. Organigramme de l'entreprise 'JLE' [25].	14
Figure II.3. Espace de dépôt du liège.	15
Figure II.4. Sécheur rotatif.	16
Figure II.5. Les autoclaves.	17
Figure II.6. Résine naturelle présente dans le liège.	17
Figure II.7. Blocs du liège mouillé pour refroidissement.	18
Figure II.8. Sciage et brossage.	19
Figure II.9. Stockage des plaques du liège expansé.	19
Figure II.10. Chaînes de fabrication du liège à l'entreprise 'JLE' [25].	20
Figure III.1. Echantillon en liège naturel.	22
Figure III.2. Echantillon en liège expansé.	23
Figure III.3. Détermination de la masse volumique : (a) mesure des dimensions, (b) et (c) pesée des échantillons de liège naturel et expansé.	23
Figure III.4. Exemple d'une éprouvette d'essai de traction [30].	25
Figure III.5. Diagramme contrainte-déformation d'une éprouvette en traction.	25

Figure III.6. Flexion trois points.....	26
Figure III.7. Essai de compression.	26
Figure III.8. Machine d'essai Zwick 1476.....	27
Figure IV.1. Courbes contrainte-déformation du liège naturel en compression.	29
Figure IV.2. Courbes contrainte-déformation du liège expansé en compression.	30
Figure IV.3. Effet de la masse volumique sur le module de Young du liège naturel.	31
Figure IV.4. Effet de la masse volumique sur le module de Young du liège expansé.	32
Figure IV.5. Comportement du liège naturel en compression.	33
Figure IV.6. Comportement du liège expansé en compression.	33
Figure IV.7. Recouvrance du liège naturel.	35
Figure IV.8. Courbes contrainte-déformation des échantillons du liège naturel/expansé en compression.....	36

Liste des tableaux

Tableau I.1: Répartition des subéraies et quantités de liège produites dans le monde [4].	4
Tableau I.2. Composition chimique du liège en pourcentage massique [15].	9
Tableau I.3. Propriétés mécaniques générales de liège [7, 22-24].....	10
Tableau III.1. Masses volumiques des échantillons en liège expansé.....	24
Tableau III.2. Masses volumiques des échantillons en liège naturel.	24
Tableau IV.1. Confrontation des résultats avec ceux de la littérature.	34

Liste des symboles

σ	Contrainte
ε	Déformation
E	Module d'élasticité (Module d'Young)
ν	Coefficient de poisson
ε_r	Recouvrance
l	Longueur de l'échantillon
R	Radial
NR	Non radial
JLE	Jijel Liège Etanchéité

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces.....	ii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Liste des symboles.....	vii
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Etude des caractéristiques du liège naturel

I.1. Introduction.....	3
I.2. Le liège.....	3
I.3. Répartition des forêts du liège	3
I.3.1. Forêts du liège à Jijel.....	4
I.3.2. Production locale.....	5
I.3.3. Types du liège récolté	5
I.4. Structure et morphologie.....	7
I.5. Composition chimique	8
I.6. Propriétés mécaniques	9
I.6.1. Comportement mécanique en traction et en compression.....	9
I.6.2. Effet de la densité et des pores sur les propriétés mécaniques	10
I.7. Conclusion	11

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

II.1. Introduction	12
II.2. Liège expansé	12
II.2.1. Définition	12
II.2.2. Utilisation.....	12
II.3. Unité de production du liège expansé.....	13
II.3.1. Description de l'unité de production	13
II.3.2. Importance économique de la JLE.....	14
II.3.3. Objectifs de la JLE.....	14
II.3.4. Structure de la JLE.....	14
II.4. Processus de production	15

II.4.1. Stockage du liège vierge	15
II.4.2. Trituration et sélection densimétrique	16
II.4.3. Séchage	16
II.4.4. Chauffage biomasse des fours	17
II.4.5. Refroidissement	18
II.4.6. Débitage et ponçage	19
II.4.7. Emballage et stockage.....	19
II.5. Propriétés mécaniques et physiques du produit fini	20
II.6. Conclusion	21

Chapitre III : Etude expérimentale

III.1. Introduction	22
III.2. Elaboration des échantillons.....	22
III.2.1. Liège naturel	22
III.2.2 Liège expansé	22
III.3 Masse volumique.....	23
III.4. Protocole expérimental	24
III.4.1. Essai de traction.....	24
III.4.2. Essai de flexion.....	25
III.4.3. Essai de compression.....	26
III.4.4. Choix de l'essai de compression	26
III.4.5. Machine d'essai	27
III.5. Méthodes de calcul.....	28
III.6. Conclusion.....	28

Chapitre IV. Discussion des résultats

IV.1. Introduction.....	29
IV.2. Allure des courbes de déformations.....	29
IV.2.1. Liège naturel.....	29
IV.2.2. Liège expansé	30
IV.3. Paramètres élastiques	30
IV.3.1. Module de Young du liège naturel	30
IV.3.2. Coefficient du Poisson du liège naturel.....	31
IV.3.3. Module de Young du liège expansé	32

VI.4. Limite élastique.....	32
IV.5. Confrontation avec des travaux antérieurs.....	34
IV.6. Recouvrance.....	34
IV.7. Confrontation liège naturel/expansé	35
IV.8. Conclusion	36
Conclusion générale	37
Références	38
Résumé	

Introduction générale

Le liège est un matériau naturel, renouvelable et durable. Il est extrait de l'écorce de chêne, c'est une éponge douce qui n'absorbe pas facilement l'eau et qui peut être comprimée dans une large mesure, mais elle revient à son état initial une fois la compression annulée. Possédant plusieurs caractéristiques qui le distinguent des autres matériaux, il a été utilisé dans divers domaines dont le bâtiment, bouchonnerie et l'industrie.

L'Algérie occupe la troisième place mondiale en termes de superficie forestière de chêne-liège. Jijel en est une wilaya dont les terres forestières occupent plus de la moitié de sa superficie. Le chêne-liège constitue l'essence dominante occupant près de **79 %** des superficies forestières totales. Cependant, l'exploitation du liège reste très faible par rapport en la comparant aux pays leaders dans ce domaine, tels que l'Espagne et le Portugal, qui considèrent que le liège est un élément principal de leur économie.

Notre étude porte donc sur un matériau naturel, disponible et abondant au niveau local. Or, en termes de caractérisation mécanique, nous avons constaté que très peu de travaux ont été consacrés à ce matériau qui est le liège naturel. De ce fait, nous nous sommes proposé à mener un travail de recherche qui nous permettrait d'explorer ces caractéristiques mécaniques. L'objectif étant une contribution dans la valorisation de cette ressource naturelle.

Ce travail, qui s'inscrit dans le cadre d'un mémoire de master, s'organise en quatre chapitres.

Le premier chapitre est dédié au liège naturel. D'une part, la répartition des forêts de chêne-liège aux niveaux mondial et local a été présentée. D'autre part, la lumière est jetée sur la structure morphologique, la composition chimique et les propriétés mécaniques de cette ressource écologique.

Le deuxième chapitre s'intéresse au liège expansé. Nous y avons décrit des étapes de la production suite à un stage pratique effectué au sein de l'unité de production Jijel Liège Etanchéité. En effet, le liège peut être aggloméré et expansé pour être utilisé dans différentes applications. C'est un produit 100% naturel sans additifs chimiques, ce qui représente un gain rentable pour sa forte demande sur les marchés mondiaux.

Le troisième chapitre fait l'objet d'une étude expérimentale. Le Protocole expérimental y est bien décrit. Des essais de compression ont été conduits sur des échantillons du liège naturel et expansé afin de déterminer les propriétés mécaniques de chacun d'eux.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation et la discussion des résultats. Les propriétés mécaniques du liège naturel et expansé sont identifiées à partir des courbes contrainte-déformation. Des interprétations physiques sont réalisées à la lumière des résultats obtenus. Des comparaisons avec d'autres résultats de la littérature sont présentées

Chapitre I

Étude des propriétés du liège naturel

I.1. Introduction

Ce chapitre fait l'objet d'une étude du liège naturel. Partant d'une définition du liège, on passe à une étape de localisation des régions où pousse l'arbre qui le produit, le chêne-liège. Ensuite, sa structure et sa composition chimique sont présentées tout en donnant enfin lieu à une synthèse sur ses propriétés mécaniques très particulières. En effet, ses composantes principales, la subérine et la lignine lui acquièrent un comportement mécanique très proche à celui des polymères tandis que la structure de ses cellules lui confère le caractère orthotropique.

I.2. Le liège

Le liège est un matériau naturel, renouvelable et durable qui a été utilisé depuis de nombreux siècles. Le liège est l'écorce du chêne (*Quercus suber* L.) qui se récolte généralement tous les 9-12 ans, en fonction de la région de culture. *Quercus suber* L, est le nom botanique d'une croissance lente, le chêne à feuilles persistantes, qui ne s'épanouit que dans des régions spécifiques de la Méditerranée occidentale [1-2]. En effet, le chêne-liège exige beaucoup de lumière solaire, de faibles précipitations combinées à une humidité assez élevée.

Le liège est l'un des matériaux naturels les plus souples. C'est un matériau léger, élastique, flexible, imperméable aux gaz et aux liquides, impérissable, bon isolateur électrique, thermique et phonique [3]. Ces caractéristiques font du liège un matériau de choix pour répondre à une grande variété d'application dans différents secteurs dont l'industrie et la construction.

I.3. Répartition des forêts du liège

Les forêts de chêne liège, appelées subéraies, sont présentes à des altitudes inférieures à 500 m, dans des régions au climat chaud et humide. Le chêne liège est cultivé dans le bassin méditerranéen, et plus particulièrement dans les régions méridionales de la Péninsule Ibérique soumises aux influences de l'océan Atlantique. La subéraie mondiale s'étend sur environ 2,28 millions d'hectares répartis sur sept pays: le Portugal, l'Espagne, l'Algérie, le Maroc, l'Italie, la France et la Tunisie (voir Tableau I.1).

Tableau I. 1 : Répartition des subéraies et quantités de liège produites dans le monde [4].

Pays	Superficie en hectares (2006)	Production en tonnes (2009)
Portugal	736 700	157 000
Espagne	506 000	88 400
Algérie	414 000	15 000
Maroc	345 000	11 000
Italie	92 000	17 000
France	92 000	3 400
Tunisie	92 000	7 500
Total	2277 000	300 000

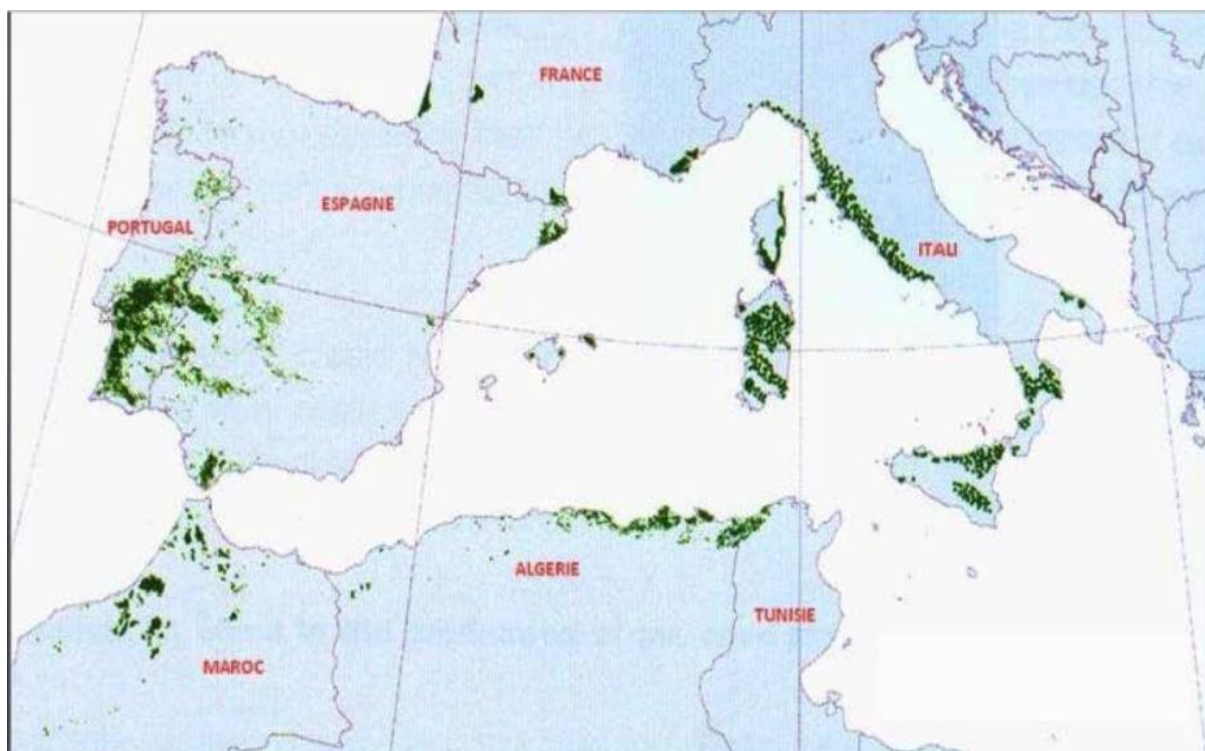


Figure I.1. Aire de distribution du chêne-liège en Méditerranée [5].

I.3.1. Forêts du liège à Jijel

Les formations forestières couvrent, sur la wilaya de Jijel, une superficie de 137 457 Ha correspondant à un taux de boisement élevé de 57 %. Les forêts proprement dites (forêts naturelles et reboisements) occupent une superficie de 99 123 Ha (72 %) qui se caractérisent par une diversité des essences et une dynamique de croissance.

Les formations forestières sont concentrées au niveau de sept sous zones à typologie forestière : Corniches de Ziama, Massifs côtiers de Ferdjouéne, Versants nord, Versant sud de

Oued Djendjen, Montagnes de Seddets Mahssen, Versants sud de Oued Mechtas, Collines d'El Milia.

La répartition des superficies forestières par essence fait ressortir une certaine diversité dans la composition des peuplements forestiers qui ont été cartographiés sur le terrain. Le Chêne liège constitue toutefois l'essence dominante et occupe près de 79 % des superficies forestières totales (Rapport BENEDER, décembre 2008).

I.3.2. Production locale

En Algérie, le chêne liège pousse dans 21 wilayas. La quantité la plus importante de la production nationale du liège est assurée par la région nord-est dont la wilaya de Jijel qui est considérée parmi les zones les plus productives. La Figure.I.2 représente la récolte annuelle de la wilaya pendant cinq années successives. Les statistiques sont obtenues auprès de la conservation des forêts de la wilaya de Jijel.

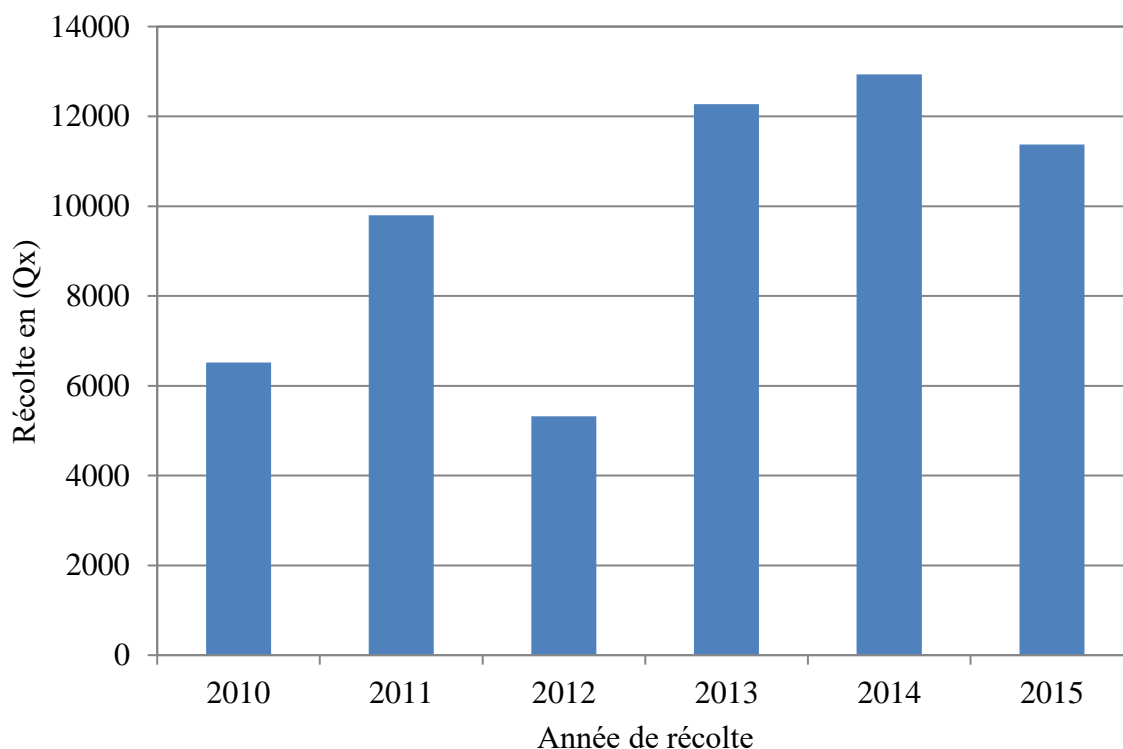


Figure I.2 . Graphique de récolte du liège (2010-2015) dans la wilaya de Jijel.

I.3.3. Types du liège récolté

Le liège est récolté du tronc et des branches du chêne-liège, sous forme semi-tubulaire, normalement en été. Il peut être extrait une fois que l'arbre a atteint 0,7 m de périmètre et 1,3 m du sol. Selon l'ordre de la récolte, trois types de liège sont distingués [6]:

a. Le liège male

Il est obtenu à partir de la première récolte. Il présente des irrégularités en structure, en épaisseur et en densité. Il développe des fractures et des fissures profondes qui s'étendent de manière irrégulière principalement longitudinale. Etant de mauvaise qualité et friable, il ne peut être utilisé que pour les panneaux de liège, les isolants, les joints d'étanchéité, les semelles de chaussures, etc.



Figure I.3. Liège male.

b. Le second liège

La deuxième récolte produit du liège dont la surface est plus uniforme que le liège male, ce que l'on appelle le second liège. Encore légèrement irrégulier, il reste de qualité insuffisante pour l'industrie du bouchon par exemple. Il a ainsi des utilisations similaires au liège male.

b. Le liège de reproduction

A partir de la troisième récolte, on assiste au liège dit de reproduction. Sa surface externe présente peu de fractures de telle manière qu'il est de qualité suffisante pour la bouchonnerie. La procédure du déliègeage peut être répétée avec des retraits successifs de liège de reproduction après quoi se produit une nouvelle couche. C'est la base de l'exploitation durable du chêne-liège en tant que producteur de liège pendant la vie des arbres.



Figure I.4. Liège de reproduction.

I.4. Structure et morphologie

Le liège est un matériau cellulaire à cellules fermées. Les cellules du liège ont été observées au microscope optique, la première fois par Hooke en 1664, puis par microscopie électronique à balayage par Gibson et al. en 1981[7]. Ces derniers ont très bien décrit la forme et l'arrangement des cellules du liège selon les trois sections de l'arbre: axiale, radiale et tangentielle (FigureI.5).

La Figure.I.6 montre la structure du liège observée par microscopie électronique dans les trois directions. Dans la direction radiale, les cellules sont disposées en «nid d'abeilles» et ont une forme principalement hexagonale. Certaines peuvent avoir cinq, sept ou huit côtés. Dans les directions axiale et tangentielle, l'arrangement des cellules est similaire. Leur apparence ressemble à un mur de briques avec des cellules alignées dans des rangées parallèles. Les cellules individuelles semblent rectangulaires, mais leur description topologique montre que trois côtés se rencontrent à chaque sommet et que le nombre de côtés de chaque cellule est en moyenne de six, avec une distribution qui ne soit pas substantiellement différente de la section tangentielle. D'après Rosner et al [8], dans toutes les directions, les cellules sont disposées sans espace intercellulaire.

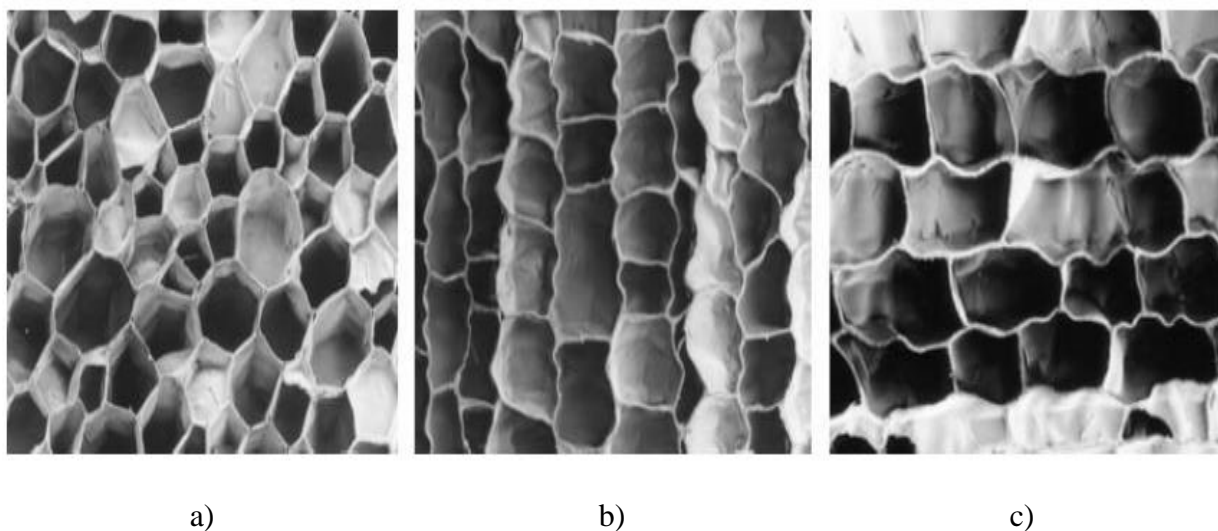
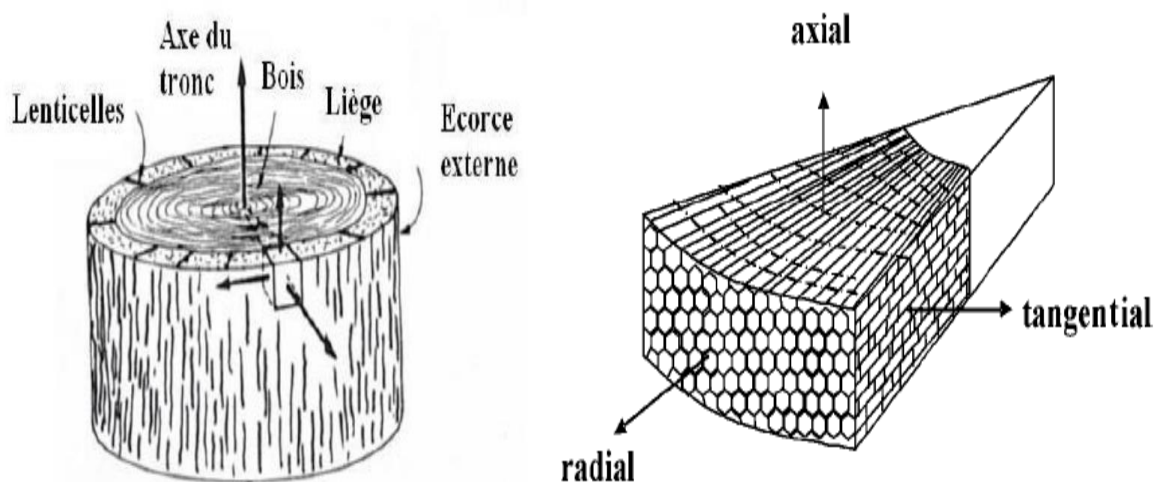


Figure I.6. Structure du liège observée par microscopie électronique dans les trois différentes directions : a) radiale, b) axiale et c) tangentielle [9].

I.5. Composition chimique

Le liège est un matériau alvéolaire de faible densité entre 120 et 240 kg.m⁻³. Il renferme près de 80 % d'air [7,10]. En termes de composition chimique, les parois cellulaires dont la densité est estimée à 1200 kg.m⁻³ [11] sont principalement composées de subérine (constituant principal et responsable de la compressibilité et de l'élasticité), de lignine et de cellulose, ainsi que de cires et de tanins. La quantité de ces constituants varie en fonction de nombreux facteurs tels que l'âge de l'arbre, l'origine géographique, le climat et le type de liège [12-15]. Le Tableau I.2 représente la composition chimique moyenne du liège en pourcentage massique.

Tableau I. 2. Composition chimique du liège en pourcentage massique [15].

Références	Subérine	Lignine	Polyosides (cellulose et hémicellulose)	Extractibles (cires et tannins)	Cendres (calcium, magnésium, ...)
Liège male	38,8-45	21-27	12-28,2	10-20	0,7-5
Liège de reproduction	33-62	13-26	6-26	11-15,8	0,85-3

I.6. Propriétés mécaniques

I.6.1. Comportement mécanique en traction et en compression

Les propriétés mécaniques d'un matériau sont souvent mises en évidence à partir des essais appropriés. Différents essais de compression et de traction uniaxiales ont été réalisés sur le liège et de nombreux articles y font référence [7,16-19]. En effet, la réponse mécanique du liège face à des sollicitations externes se rapproche de celle observée pour le bois [20]. En effet, Ceci est lié à ses deux composantes principales de nature polymères, la subérine et la lignine.

La Figure I.7 représente une courbe typique contrainte-déformation en compression pour le liège. On y distingue trois domaines. Dans un premier temps, le liège a un comportement élastique linéaire pour de faibles déformations pouvant atteindre 7 %. Cette phase est suivie d'un plateau quasiment horizontal qui s'étend jusqu'à environ 70 % de déformation et qui s'interprète par un effondrement des cellules. Enfin, la contrainte augmente fortement au-delà de 70 % de déformation, et les cellules se collapent progressivement. Cette région est appelée densification pour les mousses cellulaires.

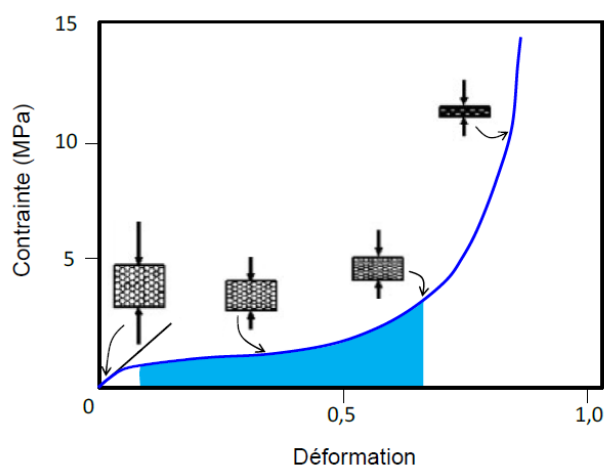


Figure I.7. Courbe contrainte-déformation pour une compression uni-axiale d'un échantillon de liège d'après [20].

Le comportement en traction des matériaux cellulaires dépend de l'homogénéité de la structure et est très sensible à la présence des défauts. Se référant aux travaux de la référence [21], les courbes contrainte-déformation montraient une région élastique linéaire jusqu'à environ 2% de déformation, suivie d'une région de pente décroissante jusqu'à la fracture avec à l'échelle d'une déformation de 5%. Par rapport à la compression, le liège en traction est plus résistant mais présente une déformation élastique inférieure.

Le tableau I.3 récapitule quelques valeurs (dans les directions radiale R et non-radiale NR) du module de Young en compression et en traction ainsi que la déformation à la rupture en traction sous différentes conditions.

Tableau I. 3. Propriétés mécaniques générales de liège [7, 22-24].

Propriétés	Valeur
Module en compression, liège naturel, non bouillie [MPa]	8–20 (R) 13–15 (NR)
Module en compression, bouilli [MPa]	6 (R) 8–9 (NR)
Module en compression à 100°C, 28 jours [MPa]	11(R) 11 (NR)
Module en compression, à 150°C, 28 jours [MPa]	15 (R) 14 (NR)
Module en traction [MPa]	38 (R) 24-26 (NR)
Déformation à la rupture en traction (%)	5 (R) 9 (NR)

I.6.2. Effet de la densité et des pores sur les propriétés mécaniques

La résistance du liège est plus élevée dans la direction radiale que dans les autres directions. La densité influence la compression de telle sorte que les échantillons à haute densité présentent une rigidité plus élevée en compression dans les trois directions : le module de Young augmente avec l'augmentation de la densité [19]. Cet effet de densité est plus important au niveau du plateau du flambement tel qu'il est illustré sur la figure I.8.

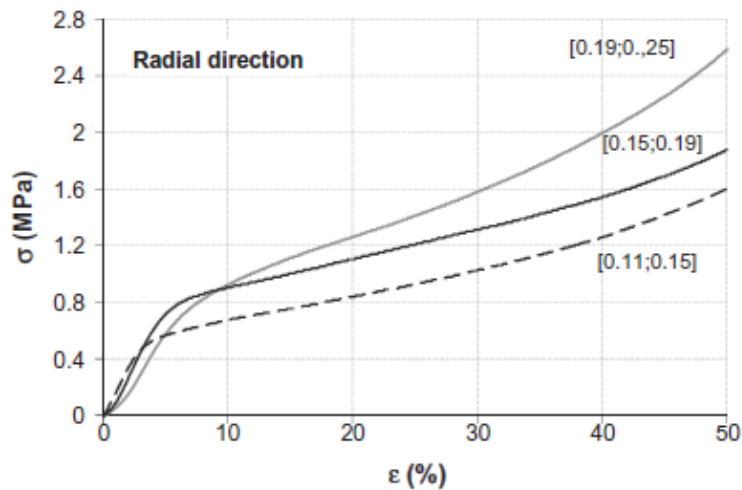


Figure I.8. Courbes contrainte-déformation des échantillons du liège sous compression de différentes densités [19].

En traction [21], les propriétés mécaniques du liège, à savoir le module de Young, la contrainte de rupture et la déformation à la rupture, sont influencées par la structure du liège en fonction des caractéristiques de densité. La figure I.9 illustre l'influence de la densité sur le comportement du liège en traction.

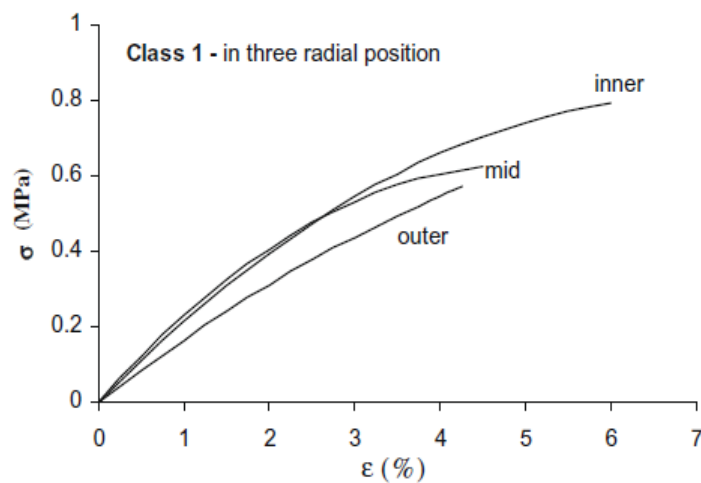


Figure I.9. Courbe contrainte-déformation en traction pour des échantillons du liège de différentes densités [21].

I.7. Conclusion

Le premier chapitre faisait l'objet d'une étude bibliographique sur le liège naturel. Après l'avoir défini, la répartition géographique des forêts du liège, aussi bien sur le plan mondial que local, a été présentée. Puis sa microstructure et sa composition chimique ont été mise en évidence. Enfin, la lumière est jetée sur les propriétés mécaniques du liège qui nous servira de référence lors de l'analyse des résultats de ce travail de mémoire.

Chapitre II

Production et

caractéristiques du liège

expansé

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

II.1. Introduction

Le présent chapitre présente une synthèse d'une étude réalisée au sein d'une unité de production de liège expansé. Il s'agit de l'unité Jijel Liège et Etanchéité (JLE). Le liège expansé est d'abord défini. Ensuite l'unité de production est présentée tout en passant par son organigramme et le processus de production du liège expansé. Enfin, les propriétés du produit fini sont énumérées.

II.2. Liège expansé

II.2.1. Définition

Breveté en 1891, le liège expansé est obtenu à partir du liège vierge brut (Figure II.1.a). Il convient de souligner que la production du liège expansé ne nécessite un liège de bonne qualité, les chutes et les déchets du liège provenant d'autres applications peuvent être exploités. Dans ce processus, les grains du liège préalablement broyés s'agglomèrent à haute température pour former des blocs sans nécessiter d'y ajouter de résine. En effet, l'agglomération est assurée avec la subérine, une substance dont le liège vierge est considérablement riche. Ainsi le produit fini, illustré sur la Figure 1.b est un matériau totalement naturel.



Figure II.1. a) Liège naturel ; b) Liège expansé.

II.2.2. Utilisation

Le liège de meilleure qualité est utilisé en bouchonnerie. Le liège de qualité moyenne est destiné à la fabrication des agglomérés sous formes de plaques. Ce dernier est utilisé surtout pour l'isolation thermique et phonique. Il est aussi utilisé en :

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

- Bâtiment (plafonds, murs et cloisons, murs extérieurs, revêtements isolants,).
- Revêtement des sols (salle de sport).
- Industrie (joints automobiles, joints industriels et joints mécaniques).
- Divers (chaussures, habillement, décoration ...).

II.3. Unité de production du liège expansé

Dans un souci d'explorer l'une des processus de transformation du liège, nous avons effectué un stage de 15 jours à l'unité de production Jijel Liège étanchéité. Nous avons d'abord découvert les différents services de l'unité. Ensuite nous avons bénéficié d'une explication détaillée sur le processus de production de la matière première jusqu'au produit fini. Enfin nous avons pu obtenir des échantillons du produit fini, planches de liège expansé pour servir de matériau objet d'étude. Ci-dessous la description de l'unité de production.

II.3.1. Description de l'unité de production

Jijel Liège Etanchéité (JLE) est une entreprise du secteur public qui occupe une place importante dans le marché national du liège par le biais des produits qu'elle présente. Elle est actuellement l'une des unités de l'ancienne entreprise nationale de liège (E.N.L) dont le siège est situé à Bouremel à la wilaya de Jijel.

Occupant une superficie de 4,60 hectares, l'unité se compose de deux ateliers principaux dont le premier est pour la production de liège et le second pour produire des matériaux isolants. La surface totale couverte de l'usine est estimée à 10 642 m² répartis comme suit :

- Un atelier de production de liège expansé d'une superficie de 5,374 m².
- Un atelier de produits d'isolation d'une superficie de 1800 m².
- Un service de maintenance de 750 m² de superficie.
- Un stock d'une superficie estimée à 1.130 m².
- L'administration et ses accessoires couvrent une superficie de 786 m².

D'autre part, l'unité comprend une surface aménagée et non couverte de 8,350 m² de superficie utilisée pour stocker la matière première du liège, d'une capacité allant jusqu'à 27 000 quintaux.

En ce qui concerne le nombre de travailleurs dans l'unité, il diminue d'année en année. Elle recrutait environ 178 travailleurs en 1994 tandis qu'en 2002, le nombre a diminué à 136 travailleurs. En 2018, l'unité ne compte que 86 travailleurs exerçant sous un régime de 8 heures par jour.

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

II.3.2. Importance économique de la JLE

L'importance économique de l'institution peut être résumée en ce qui suit:

- Constituer un soutien au secteur public.
- Contribuer à couvrir les besoins du marché national en liège et en matériaux isolants et chercher à exporter la plus grande quantité possible de production, ainsi contribuer à accroître les exportations au niveau économique national.
- Soutenir le secteur industriel aux niveaux local et national et exploiter les ressources locales de liège qui couvrent de vastes superficies de la wilaya et des wilayas voisins.

II.3.3. Objectifs de la JLE

La JLE vise à atteindre un ensemble d'objectifs dont les plus importants sont :

- Cherche à réaliser le plus grand profit possible en tant qu'entreprise nationale.
- Élargir le champ de son activité en installant de nouveaux points pour la production et la commercialisation de ses produits.
- Adapter une publicité avancée pour commercialiser leurs produits.
- Etablir des relations avec des pays étrangers afin de leur vendre ses produits.
- Couvrir le marché national de produits en liège et des matériaux isolants.

II.3.4. Structure de la JLE

La structure organisationnelle de cette unité reflète la nature de son activité productive et commerciale : elle comprend une direction générale dont le secrétariat général et cinq directions qui lui sont affiliées.

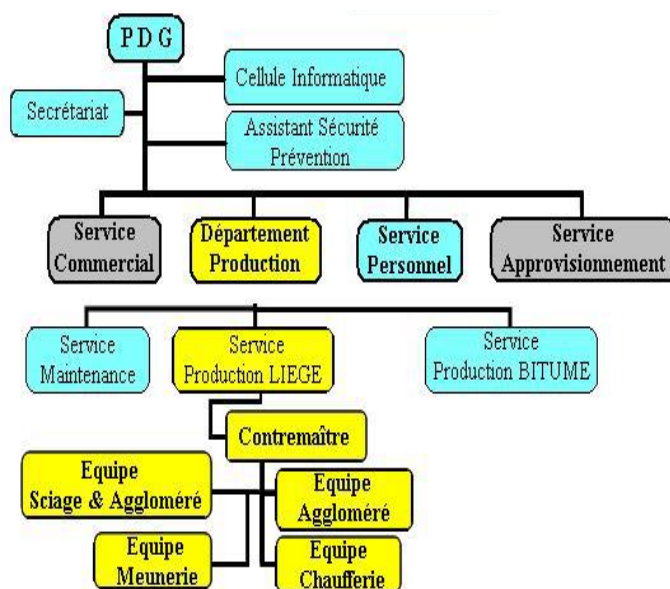


Figure II.2. Organigramme de l'entreprise 'JLE' [25].

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

Chacune de ces directions est divisée en sous-sections qui facilitent les processus de gestion, d'organisation et de productivité, la structure organisationnelle de la JLE est illustrée sur la Figure II.2.

II.4. Processus de production

La production du liège expansé est un processus qui comprend plusieurs étapes énumérées et décrites dans ce qui suit.

II.4.1. Stockage du liège vierge

Les camions chargés de liège vierge brut sont pesés à l'entrée de l'usine puis sont dirigés vers leurs lieux de stockage (Figure). Le liège déposé subit d'abord une action de triage. Ainsi, le liège de bonne qualité ira directement à la bouchonnerie tandis que l'autre liège, appelé rebut, sera destiné à la fabrication de l'aggloméré expansé.



Figure II.3. Espace de dépôt du liège.

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

II.4.2. Trituration et sélection densimétrique

Le liège est concassé dans un déchiqueteur comportant des mailles de 45 mm au produit calibré de 4 à 50 mm. Un transport pneumatique, avec séparation densimétrique en tête éliminant en majeure partie, les pierres et la terre, achemine ce premier granulé sur deux broyeurs à marteaux après passage sur un tambour magnétique retenant les parties métalliques. Les deux transporteurs pneumatiques portent ensuite les granulés vers deux tamiseurs – séparateurs où s’effectue un calibrage en trois catégories :

- Le bon produit d’un calibre compris entre 4 et 20 mm,
- Les poussières d’un calibre inférieur à 4 mm,
- Les gros d’un calibre supérieur à 20 mm.

Les gros sont réceptionnés à la sortie des séparateurs par les goulottes et envoyés sur des broyeurs à couteaux équipés de grilles calibrées donnant des granulés entre 4 à 20 mm, puis repris par transports pneumatiques et redistribué sur deux autres tamiseurs-séparateurs. A la sortie des quatre séparateurs, le bon produit (granulé de 4 à 20 mm) est récolté par deux vis sans fin qui, à travers une goulotte et une écluse, alimentent le transport pneumatique de distribution aux quatre silos de stockage.

II.4.3. Séchage

Le séchage des granulés humides provenant des quatre silos de stockage est réalisé dans un sécheur rotatif. Le séchage s’effectuant à une température maximum de 125 °C. Il n’y a pas de risque à laisser le liège plus ou moins longtemps dans l’appareil.



Figure II.4. Sécheur rotatif.

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

II.4.4. Chauffage biomasse des fours

Chaque ligne d'autoclaves est alimentée par une benne basculante à déplacement télécommandé. La cuisson du liège s'effectue dans des autoclaves cuiseurs, permettant l'obtention de blocs de $(1020 \times 520 \times 320) \text{ mm}^3$ d'une capacité de 0.19 m^3 disposés en deux rangées de cinq appareils, par le passage de vapeur surchauffée à la température de $375 \text{ }^\circ\text{C}$ et une pression de $0.75 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$.



Figure II.5. Les autoclaves.

Il est à noter que l'agglomération, contrairement à la ré-agglomération, s'effectue sans incorporation de corps étrangers (colles, eau) il s'agit d'une auto-agglomération à partir des résines naturelles présentes dans les granulés de liège (Figure II.6).

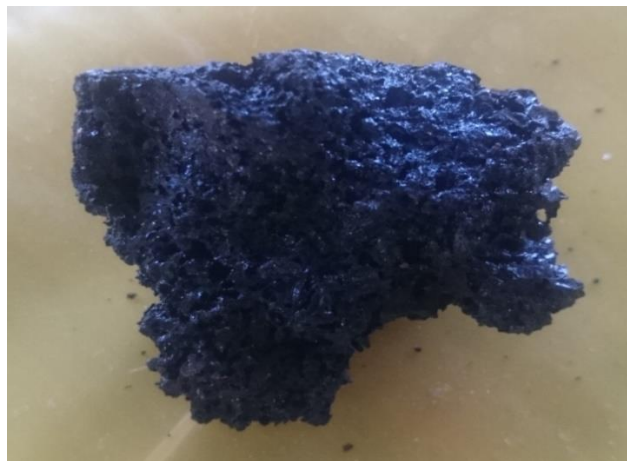


Figure II.6. Résine naturelle présente dans le liège.

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

II.4.5. Refroidissement

La fonction de la machine à refroidir est double pour réceptionner les deux linges de cuiseurs. Chaque compartiment fonctionne indépendamment du compartiment voisin. Lorsque le bloc est introduit dans la machine, deux contacts déclenchent le cycle de refroidissement. L'eau introduite dans le bloc à travers les aiguilles est sous pression à la température de 150°C environ afin de se vaporiser rapidement et de laisser les blocs le moins humide possible, ce qui permet de passer de 300°C à 100°C environ. Après une temporisation réglable, la vanne d'eau se referme, les plateaux s'écartent et le bloc est éjecté par le suivant sur le tapis transporteur.

A ce niveau, les blocs subissent un deuxième refroidissement mais cette fois-ci par simple jet à l'eau froide, enfin les blocs sont entreposés dans un hangar pendant 24 à 48 heures pour obtenir un refroidissement total.



Figure II.7. Blocs du liège mouillé pour refroidissement.

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

II.4.6. Débitage et ponçage

Le débitage des blocs est semi-automatique. Ils sont découpés en plaques par deux scies alternatives à lames horizontales. Les plaques peuvent avoir des épaisseurs différentes réglables, jusqu'à 20 mm minimum suivant les commandes du client. Les plaques étant sciées horizontalement, il est donc nécessaire de procéder à un dépoussiérage doublé d'un ponçage par brossage.



(a)

(b)

Figure II.8. Sciage et brossage.

II.4.7. Emballage et stockage

La production du liège expansé étant achevée, les plaques finies sont emballées puis empilées. Il est enfin lieu de procéder au stockage du produit fini dans des entrepôts aménagés à cet effet avant son expédition.



Figure II.9. Stockage des plaques du liège expansé.

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

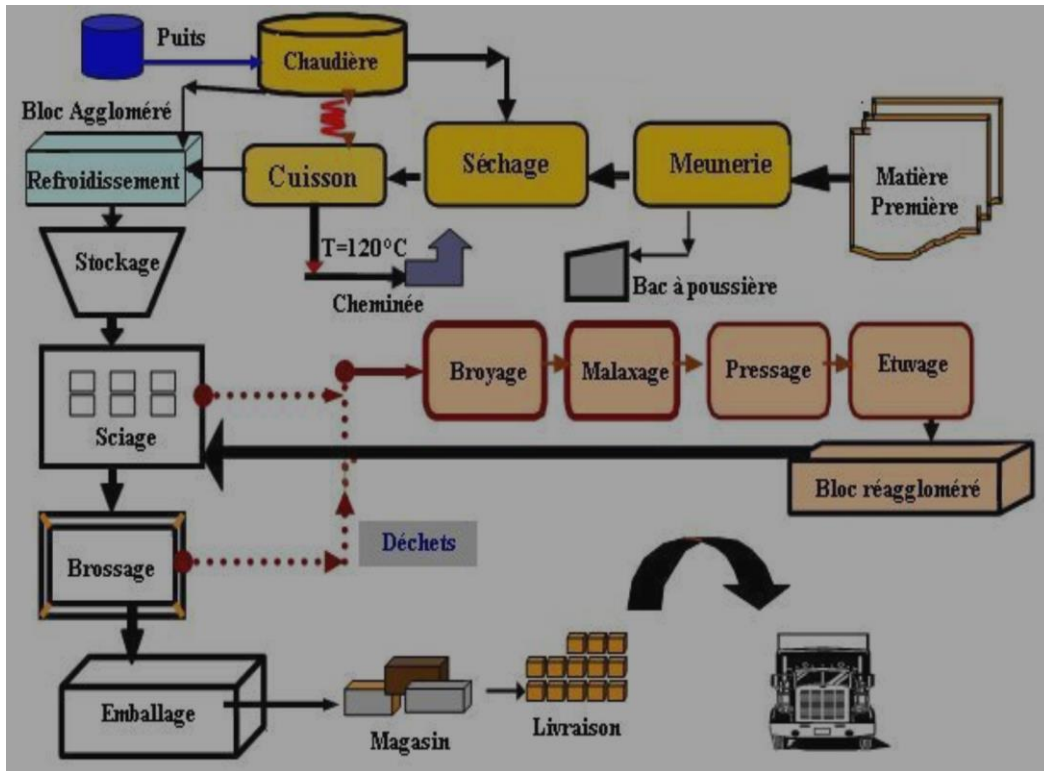


Figure II.10. Chaînes de fabrication du liège à l'entreprise 'JLE' [25].

II.5. Propriétés mécaniques et physiques du produit fini

En conformité à la référence [26], différents essais de caractérisation ont été conduits sur le liège aggloméré expansé. Les essais sont réalisés au sein du laboratoire attaché à l'unité de production Jijel Liège Etanchéité et portent sur des échantillons du liège expansé produits par l'unité elle-même.

Les essais mécaniques de flexion montrent que le liège expansé a un module de Young évalué à 1.5 MPa, une valeur qui dépasse largement les normes exigées pour le produit. Cette qualité permet donc son utilisation dans d'autres applications telles que les couche anti-vibratile pour machines industrielles, les gaines, la décoration (revêtement muraux, faux plafonds de locaux).

Pour ce qui est de la conductivité thermique, les normes exigées pour le liège aggloméré expansé doivent être comprises entre un minimum de 0,036 W/m.K et un maximum de 0,042 W/m.K (I.S.0, 1978). Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la conductivité thermique mesurées se situent dans les normes sans jamais les dépasser. Ainsi, les plaques de liège aggloméré expansé produites présentent une bonne isolation thermique vis-à-vis de la conductivité thermique, ce qui permet leur utilisation dans les chambres et les tunnels de

Chapitre II : Production et caractéristiques du liège expansé

congélation, la tuyauterie et les appareils de chauffage, eau chaude, air chaud, et conditionnement d'air.

Enfin, les mesures de la densité du produit donnent des résultats dans les normes. En effet, la densité du liège aggloméré expansé, d'après les normes, est comprise entre 0.0988 et 0.1240 g/cm³.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté l'unité de production JLE, nous avons décrit toutes les étapes de la production de liège expansé, à partir de la trituration jusqu'à l'emballage et le stockage. En suivant les étapes de production, nous avons constaté que le produit n'est soumis à aucun additif chimique. Ainsi le produit fini est 100 % naturel et non toxique. De plus il constitue un élément important sur le plan économique vu sa cherté et sa forte demande surtout à l'étranger.

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1. Introduction

Ce chapitre fait l'objet d'une étude expérimentale appliquée sur des échantillons de liège naturel et de liège expansé. Il s'agit principalement des essais de compression conduits dans des directions différentes dans un souci de mettre en évidence l'aspect orthotropique du liège naturel et l'aspect isotropique du liège expansé. Ces essais permettent d'identifier plusieurs paramètres à la lumière desquelles des comparaisons entre le liège naturel et le liège expansé sont établies.

III.2. Elaboration des échantillons

III.2.1. Liège naturel

Les échantillons de liège naturel utilisés sont prélevés du chêne liège de la zone de production de Jijel. La planche dont sont coupés les échantillons est immergée dans l'eau bouillie pendant une heure environ puis séchée à l'air. C'est, en effet, le procédé utilisé dans l'industrie du liège. Les éprouvettes d'essai sont coupées en géométrie cubique de 20 mm de côté tel qu'il est illustré sur la Figure III.1. Ces dimensions ont été choisies dans un souci de comparaison de nos résultats avec les résultats obtenus dans les références [27,28]. Les directions radiales et non radiales sont mentionnées sur les faces des échantillons.



Figure III.1. Echantillon en liège naturel.

III.2.2 Liège expansé

Les échantillons de liège aggloméré expansé utilisés sont produits à l'usine industrielle "JIJEL Liège Etanchéité " sise à Bouremel (Jijel, Algérie). La plaque de dimensions $(1020 \times 520 \times 320)$ mm³ a été coupée en échantillons cubiques de 20 mm de côté tel qu'il est illustré sur la Figure III.2.



Figure III.2. Echantillon en liège expansé.

III.3 Masse volumique

Les côtés des échantillons cubiques du liège sont d'abord mesurés en se servant d'un pied à coulisse. Ces dimensions sont de $(20 \times 20 \times 20)$ mm³ environ. Puis les cubes sont pesés en utilisant une balance électronique (Figure III.3). Enfin les masses volumiques des échantillons sont calculées.

Les mesures de la masse volumiques sont présentées dans le tableau (III.1). La masse volumique moyenne du liège naturel est $(0,2397g/cm^3)$ tandis que la masse volumique du liège expansé est de $(0,1115g/cm^3)$. Les résultats obtenus montrent que le liège naturel est environ deux fois plus dense que le liège expansé. En effet ceci s'explique par la purification du liège naturel des éventuelles impuretés au début du processus de production, la fusion de la subérine lors du chauffage et la forte présence des bulles d'air dans le produit fini.



(a)



(b)



(c)

Figure III.3. Détermination de la masse volumique : (a) mesure des dimensions, (b) et (c) pesée des échantillons de liège naturel et expansé.

Chapitre III : Etude expérimentale

Tableau III.1. Masses volumiques des échantillons en liège expansé.

N° d'échantillon	Masse volumique en (g/cm ³)
1	0,1175
2	0,1210
3	0,1138
4	0,1133
5	0,1154
6	0,1009
7	0,1067
8	0,1039

Tableau III.2. Masses volumiques des échantillons en liège naturel.

N° d'échantillon	Masse volumique en (g/cm ³)
1	0,2192
2	0,2442
3	0,2251
4	0,2534
5	0,2477
6	0,2340
7	0,2489
8	0,2417

III.4. Protocol expérimental

Les essais mécaniques ont pour objectif d'étudier les caractéristiques mécaniques des matériaux. Ils servent donc de fournir des données utiles pour le dimensionnement et la simulation des composants et des structures. Différents types d'essais mécaniques peuvent être conduits.

III.4.1. Essai de traction

La méthode la plus courante de recherche des propriétés mécaniques des matériaux repose sur l'essai de traction. Dans cet essai on utilise des éprouvettes cylindriques de section circulaire et parfois de section rectangulaire [29]. Il consiste à solliciter l'éprouvette

Chapitre III : Etude expérimentale

par une force croissante ou une déformation constante qui la déforme progressivement jusqu'à la rupture (Figure III.4). Sur un diagramme contrainte-déformation, on observe les phases successives comme le montre la Figure III.5.

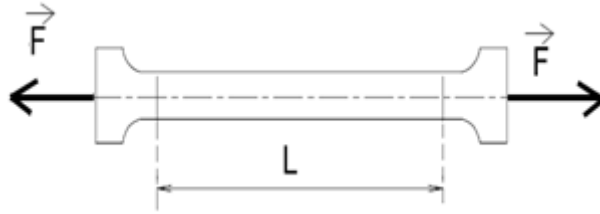


Figure III.4. Exemple d'une éprouvette d'essai de traction [30].

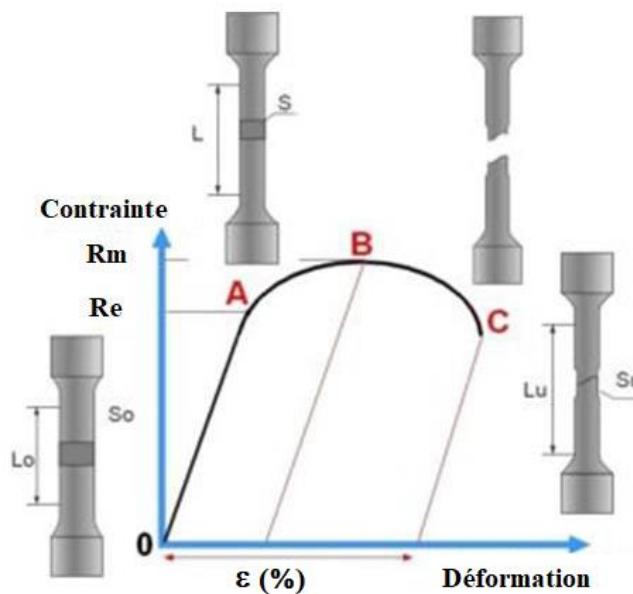


Figure III.5. Diagramme contrainte-déformation d'une éprouvette en traction.

Le domaine allant de l'origine au point A représente la phase élastique où la déformation est réversible. Le point A est la limite d'élasticité apparente. Le domaine allant de A à C représente le domaine plastique. Le point B correspond à la charge maximale. Dans la phase de B à C, la déformation plastique se localise dans une portion de l'éprouvette, c'est la striction et on aboutit à la rupture en C.

III.4.2. Essai de flexion

Tel qu'il est illustré sur la Figure III.6, l'essai de flexion trois points est le plus utilisé pour la détermination de la rigidité et la résistance en flexion des matériaux. Cet essai est simple à mettre en œuvre et d'une bonne reproductibilité. L'assemblage comporte une machine de flexion statique, instrumentée d'un capteur de déplacement, situé dans le

prolongement de la panne centrale et d'un capteur d'effort à jauges de déformation. Le dépouillement de la courbure effort – déplacement, assuré par un système d'acquisition informatisé, permet une évaluation des principales caractéristiques du matériau [32].

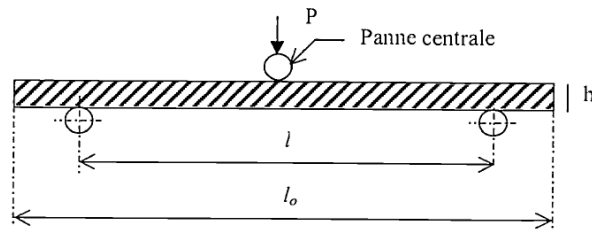


Figure III.6. Flexion trois points.

III.4.3. Essai de compression

Un essai de compression mesure la résistance à la compression d'un matériau sur une machine d'essais mécaniques suivant un protocole normalisé. Les essais de compression se font souvent sur le même appareil que l'essai de traction mais en appliquant la charge en compression au lieu de l'appliquer en traction. Pendant l'essai de compression, l'échantillon se raccourcit et s'élargit (Figure III.7). La déformation relative est « négative » en ce sens que la longueur de l'échantillon diminue.

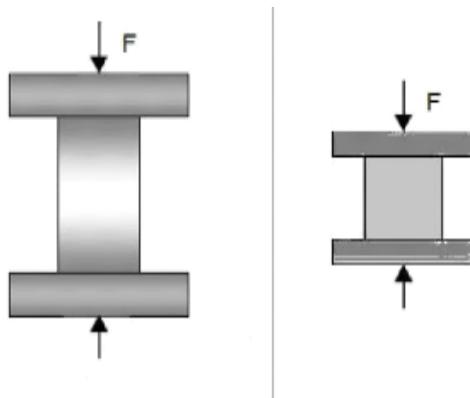


Figure III.7. Essai de compression.

III.4.4. Choix de l'essai de compression

Le choix de l'essai de compression dans cette étude est justifié par les domaines d'utilisation du liège. Parmi ces domaines, on en cite la bouchonnerie pour le liège naturel et le revêtement pour le liège aggloméré expansé.

Les essais mécaniques de ce mémoire ont été conduits au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Sidérurgie Métallurgie URASM à El Hadjar, Annaba. Il s'agit des essais de compression réalisés sur les échantillons cubiques du liège naturel et expansé. Pour

Chapitre III : Etude expérimentale

le liège naturel, trois essais ont été menés dans la direction radiale et trois autres dans la direction non radiale. Quant au liège expansé, étant isotrope, trois essais ont été appliqués dans des directions aléatoires.

Tous les essais ont été conduits à une vitesse de déplacement constante de 2 mm/min correspondant à une vitesse de déformation de 0.1 min^{-1} . Les conditions d'essai se résument en une température de 26 °C et une humidité de 30 %.

III.4.5. Machine d'essai

Il s'agit d'une machine d'essai universelle de marque Zwick 1476 (Figure III.8.) avec des cellules de force de 10 KN à 100 KN. La machine est pilotée par un logiciel Zwick Z1011 adapté pour ordinateur et permettant le contrôle de l'essai, l'affichage et l'impression des résultats.



Figure III.8. Machine d'essai Zwick 1476.

III.5. Méthodes de calcul

La plage des déformations s'étale de 0 à 70 % environs. Le module de Young E est calculé par la machine à partir des courbes nominales contrainte-déformation dans un domaine de déformation allant de 0.01 à 0.2 %. Il s'obtient à partir de la loi de comportement élastique :

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$

où σ et ε représentent respectivement les échelons de contrainte et de déformation dans le domaine susmentionné.

Le coefficient de Poisson est déterminé à partir de la relation :

$$\nu = -\varepsilon_y / \varepsilon_x$$

Les autres paramètres, les contraintes correspondant respectivement aux déformations 20 et 30 % sont manuellement déterminés directement à partir des courbes contraintes-déformation.

La recouvrance ε_r du matériau est calculée aux quatrième et dixième jours après la réalisation des essais de compression. Elle est calculée selon la formule suivante :

$$\varepsilon_r = \frac{l_f - l_i}{l_i}$$

où l_i et l_f sont respectivement la longueur initiale et finale (pendant la recouvrance).

III.6. Conclusion

Ce chapitre était consacré à une étude expérimentale sur le liège naturel et expansé. Nous avons, d'abord, décrit le procédé de préparation des échantillons et la mesure de la densité. La machine d'essai et le mode expérimental sont ensuite présentés. Il s'agissait des essais de compression à vitesse de déformation constante. Enfin, les méthodes utilisées pour la détermination des paramètres ont été explicitées.

Chapitre IV

Discussion des résultats

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. A partir des courbes contrainte-déformation du liège naturel dans les directions radiale et non radiale et du liège expansé, plusieurs paramètres sont identifiés. Le module de Young, le coefficient de Poisson et la limite élastique sont d'abord déterminés. L'influence de la masse volumique sur ces paramètres est discutée. Ensuite, des comparaisons de nos résultats avec d'autres résultats de la littérature sont présentées. Enfin la recouvrance du liège naturel dans la direction radiale est analysée.

IV.2. Allure des courbes de déformations

IV.2.1. Liège naturel

La Figure IV.1 illustre le comportement mécanique du liège naturel en compression dans les directions radiale et non radiale. Dans tous les essais, nous avons obtenus la même allure. Ainsi, les courbes contrainte-déformation montre une allure en trois phases. Une phase linéaire représentant le domaine élastique et s'étale jusqu'à 5-6 % correspondant à des valeurs de contrainte de 0.5 à 0.8 MPa. Cette phase est suivie d'un palier qui correspond au flambement des cellules et qui s'étale jusqu'à 50 % de déformation environ. Enfin, il y a lieu d'un domaine où le matériau se condense en montrant ainsi une forte rigidité face aux contraintes appliquées. Dans un souci de ne pas endommager le matériau, les essais sont arrêtés à 68 % de déformation.

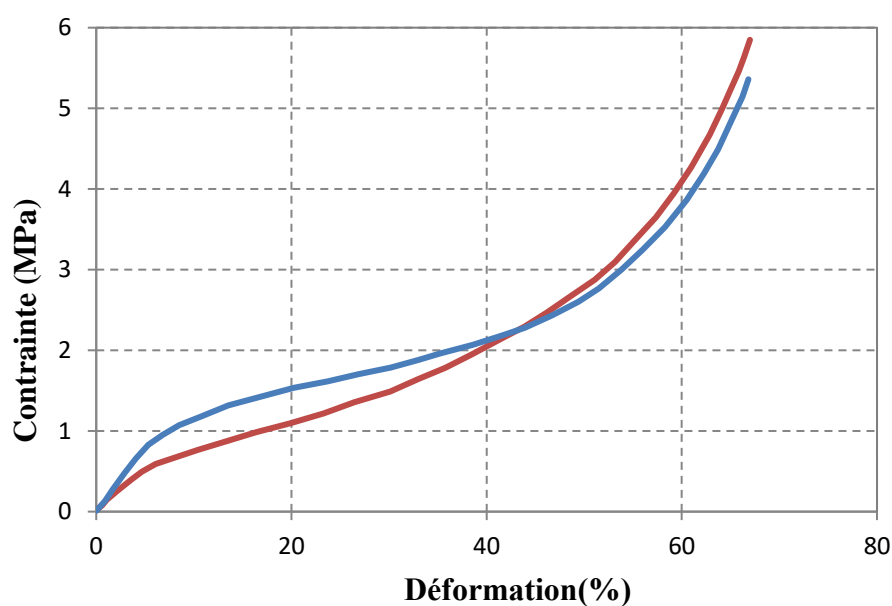


Figure IV.1. Courbes contrainte-déformation du liège naturel en compression.

IV.2.2. Liège expansé

En ce qui concerne le liège expansé, les courbes comportent les deux premiers domaines sans l'apparition du troisième. Ainsi qu'il est illustré sur la Figure IV.2, nous observons une zone élastique jusqu'à une valeur de déformation de 4% environ et correspondant à une valeur de contrainte de 0.1 MPa. S'ensuit un important palier qui se prolonge jusqu'à 50% de déformation. Il est à souligner qu'à la différence du liège naturel, le liège expansé n'est pas chargé plus de 50 % de déformation de crainte d'endommagement du matériau. En effet, il fallait éviter l'écrasement des échantillons afin d'avoir la possibilité d'évaluer la recouvrance du matériau après la suppression du chargement.

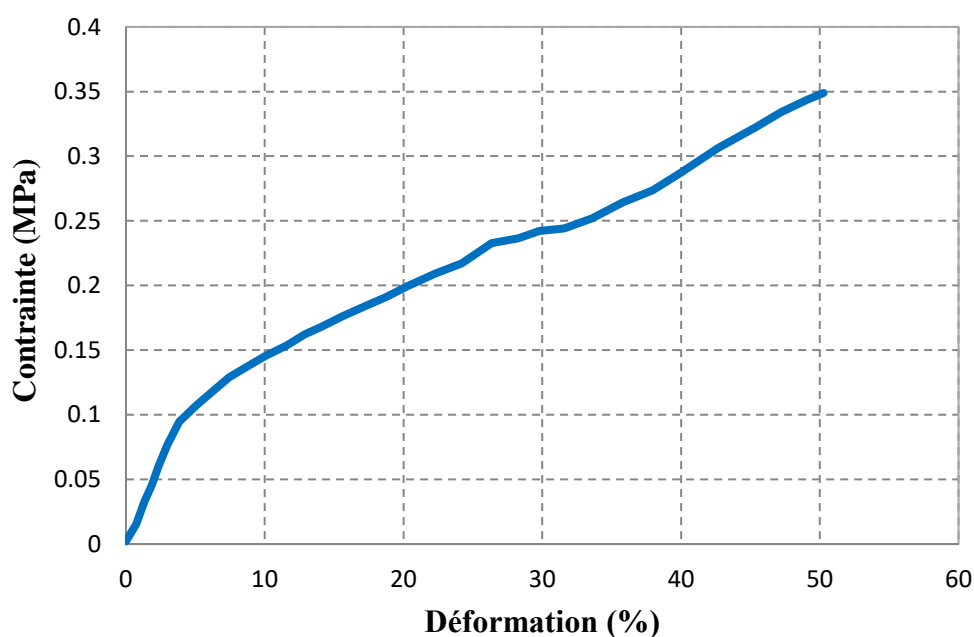


Figure IV.2. Courbes contrainte-déformation du liège expansé en compression.

IV.3. Paramètres élastiques

Le module de Young ou module d'élasticité longitudinal, noté E , caractérise la rigidité du matériau. Il représente le rapport entre la contrainte engendrée dans une éprouvette et la déformation qui en résulte. Par ailleurs, le coefficient de Poisson

IV.3.1. Module de Young du liège naturel

Pour le liège naturel, le module de Young a été déterminé dans un domaine entre (1-5%) de déformation. Les essais effectués montrent clairement l'aspect orthotropique du liège. Le module de Young moyen dans la direction radiale est de 16,21 MPa tandis que celui calculé dans la direction non-radiale est de 10,54 MPa. Ceci permet d'affirmer que le liège naturel est

beaucoup plus rigide dans la direction radiale. Ce constat a été approuvé par plusieurs auteurs dont [7, 17, 19]. Il est à mentionner que la direction non-radiale comprend aussi bien la direction tangentielle que la direction axiale.

La Figure IV.3 illustre l'effet de la masse volumique sur le module de Young du liège dans les directions radiale et non-radiale. On y remarque que le module de Young augmente avec l'augmentation de la masse volumique.

IV.3.2. Coefficient du Poisson du liège naturel

Dans cette étude, le coefficient de Poisson a été évalué uniquement dans la direction radiale après la recouvrance du liège naturel. Les résultats obtenus suite à trois essais de compression donnent un coefficient de Poisson moyen de 0.19. Nous remarquons que ce coefficient est plus petit en le comparant avec le coefficient de Poisson des métaux qui à l'ordre de 0.3 en général. Ce ci s'explique par le fait que le liège est un matériau poreux. En effet, lorsque le liège est comprimé, les pores se remplissent par la matière, et par conséquent, nous enregistrons un très petit agrandissement dans la direction transversale.

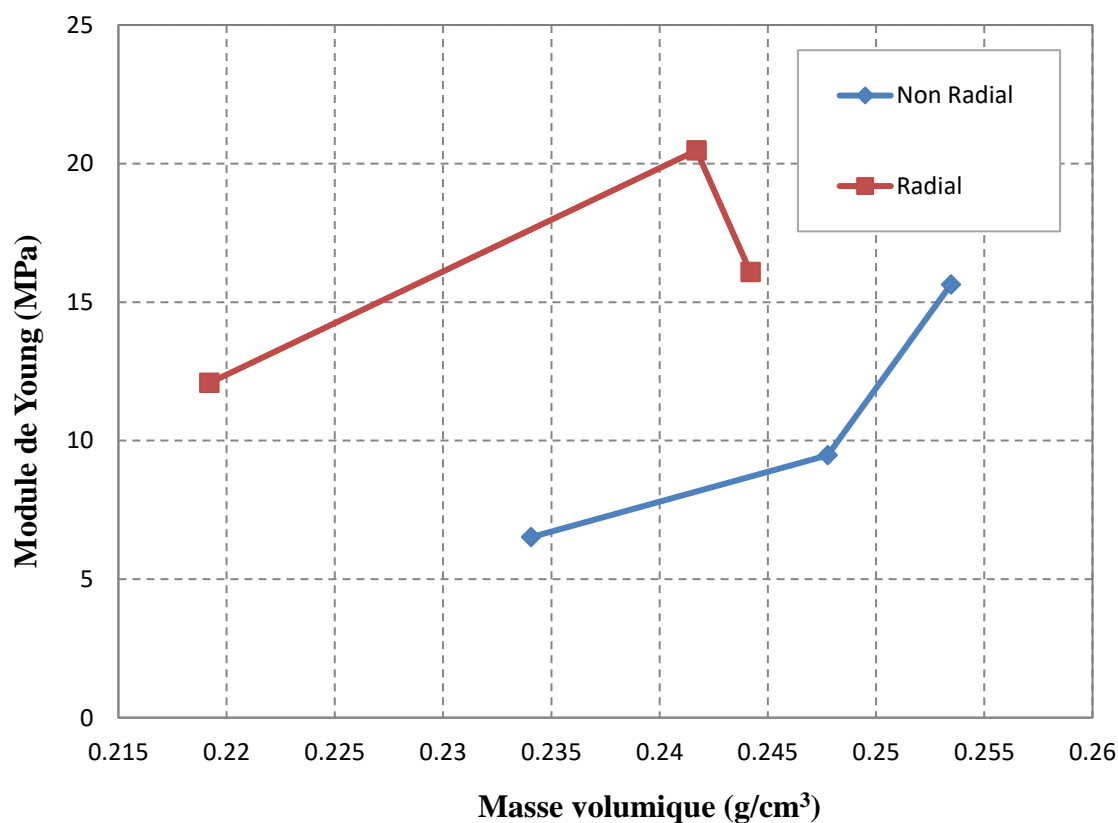


Figure IV.3. Effet de la masse volumique sur le module de Young du liège naturel.

IV.3.3. Module de Young du liège expansé

Pour le liège expansé, les résultats de l'essai nous donnent un module moyen de Young égal à 2,29 MPa. Cette valeur montre que ce produit a une bonne rigidité. Il est à rappeler que liège expansé est un matériau isotrope en raison de l'orientation aléatoire des grains dont il se constitue. La masse volumique influence également la rigidité du liège expansé. La Figure IV.4 illustre cette influence. Ainsi, plus la masse volumique est élevée, plus le module de Young est élevé.

Enfin, le liège naturel présente un module de Young plus grand par rapport liège expansé. En effet, le liège naturel étant plus dense, il est naturel que sa rigidité soit plus grande.

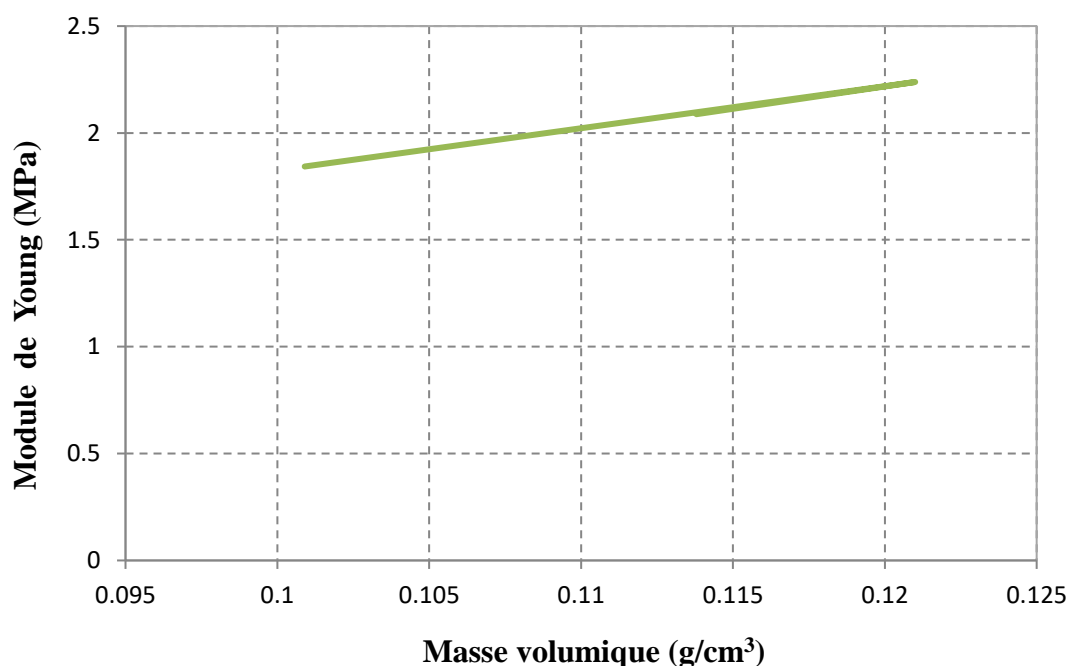


Figure IV.4. Effet de la masse volumique sur le module de Young du liège expansé.

VI.4. Limite élastique

La limite élastique marque la fin du domaine élastique. Elle est généralement représentée par un seuil de contrainte à partir duquel la courbe contrainte-déformation change de pente. Pour le liège naturel, on remarque sur la Figure IV.5 que cette limite correspond à 5% de déformation et à des valeurs de contrainte de 0.5 à 0.8 MPa.

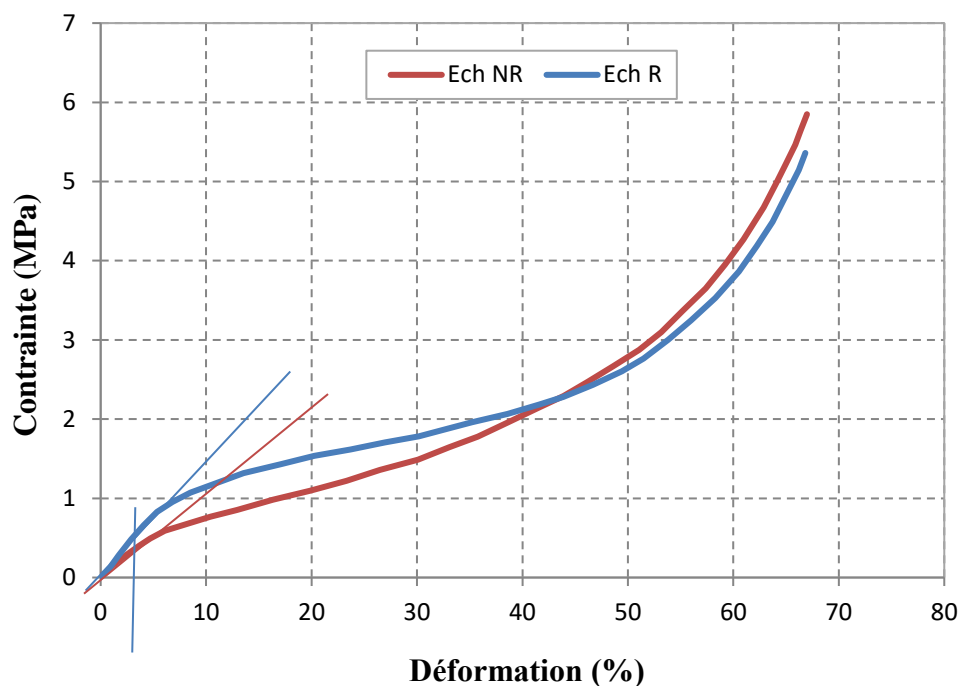


Figure IV.5. Comportement du liège naturel en compression.

Quant au liège expansé, la limite élastique correspond également à 5 % de déformation mais avec une contrainte plus petite par rapport au liège naturel. Ainsi tel que l'on remarque sur la Figure IV.6, la contrainte qui correspond à la limite élastique n'est que de 0.1 MPa.

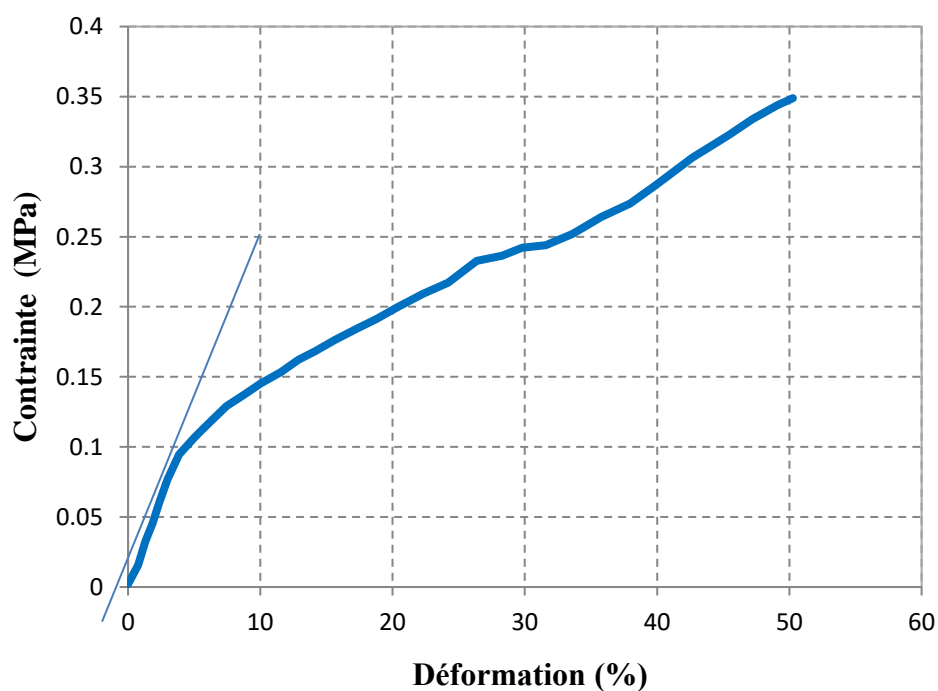


Figure IV.6. Comportement du liège expansé en compression.

Chapitre IV : Discussion des résultats

Nous remarquons que le liège, qu'il soit naturel ou expansé à une importante limite élastique en matière de déformation en le comparant avec les métaux ou même quelques polymères. En effet la limite élastique des métaux est généralement prise à une déformation de 0.2 % tandis que celle de plusieurs polymères correspond à 1 %. Le liège est donc un matériau qui possède une grande déformabilité élastique en compression.

IV.5. Confrontation avec des travaux antérieurs

Le Tableau présente une confrontation des résultats de quelques paramètres du liège naturel obtenus dans cette étude avec ceux des travaux de références [28, 17]. Il convient de mentionner que nous avons pris les valeurs correspondant au liège de bonne qualité et de forte masse volumique comprise entre (0.19 - 0.25) g/cm³.

Les résultats concernent le module de Young E et les contraintes σ_{30} et σ_{50} , correspondantes respectivement aux déformations 30 % et 50 % dans les directions radiale et non radiale. On y remarque que le module de Young n'est pas trop différent des résultats de la référence [17] mais supérieur à ceux de la référence [28]. Pour ce qui est des contraintes, on voit qu'à petites déformations, nos résultats présentent des contraintes plus grandes dans la direction non radiale. Par contre, à des déformations élevées, les contraintes les plus grandes sont celles dans la direction radiale, mais aussi elles sont plus grandes que celles enregistrées dans les résultats de la référence [17]. Ainsi, nous concluons que notre liège est plus résistant à des déformations élevées.

Tableau IV.1. Confrontation des résultats avec ceux de la littérature.

Paramètres	Radial			Non-radial		
	Présente étude	Anjos [17]	Oliveira [28]	Présente étude	Anjos [17]	Oliveira [28]
E (MPa)	16,21	18.6±3.31	10.4	10,54	11.2±1.73	9.2
σ_{30} (Mpa)	1.59		1.5	1.88		1.3
σ_{50} (Mpa)	3,13	1.81±0.37		2,66	1.47±0.52	

IV.6. Recouvrance

Une fois l'essai est achevé, la contrainte de compression est supprimée. Alors l'échantillon du liège commence à reprendre sa forme initiale, il se recouvre. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la recouvrance uniquement dans la direction radiale.

Ainsi qu'il est illustré sur la Figure IV.7, nous avons constaté qu'une déformation de 67 % diminue significativement jusqu'à 9.5 % environ quatre jours après l'essai. La recouvrance moyenne après quatre jours de l'essai est évaluée à un taux important de 85 % environ. La recouvrance augmente faiblement jusqu'au 10^{ème} où elle prend sa valeur maximale de 87 %. Du 10^{ème} au 15^{ème} jour, la recouvrance s'annule.

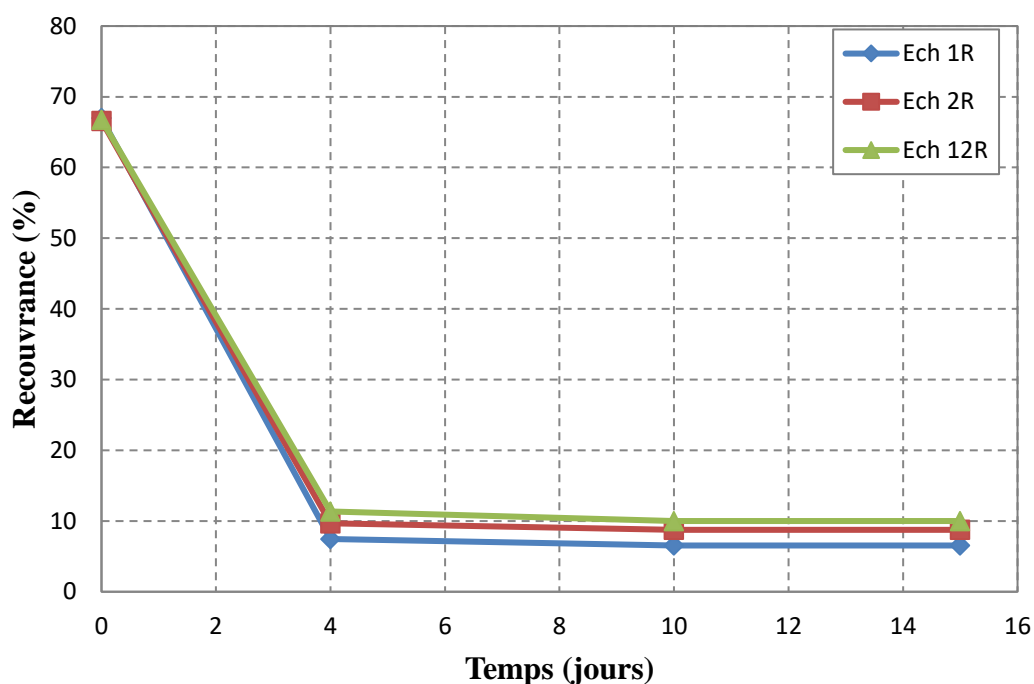


Figure IV.7. Recouvrance du liège naturel.

IV.7. Confrontation liège naturel/expansé

La figure IV.8 illustre la comparaison des courbes contraintes-déformations du liège naturel et expansé. Les graphes montrent presque la même allure des courbes. Le liège naturel présente 3 domaines (élastique, flambage et condensation) tandis que le liège expansé exprime deux domaines (élastique et flambage). En effet sa structure en grains collés par la subérine peut connaître des glissements à des contraintes élevées.

Sur la base des modules de Young et des limites élastiques, les graphes montrent que le liège naturel s'avère plus rigides par rapport au liège expansé. Ceci s'explique par la plus forte masse volumique du liège naturel face au liège expansé.

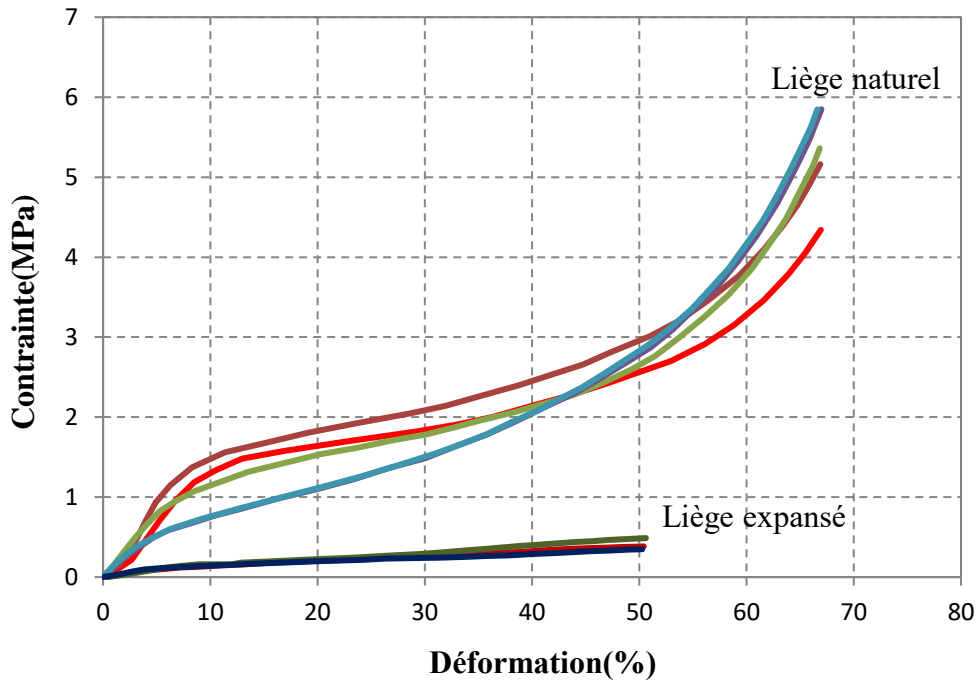


Figure IV.8. Courbes contrainte-déformation des échantillons du liège naturel/expansé en compression.

IV.8. Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous avons analysé les résultats obtenus suite à notre étude expérimentale. Les courbes de comportement du liège naturel et expansé en compression ont permis de déterminer les modules de Young du liège naturel et expansé, leurs coefficients de Poisson et leurs limites élastiques. Le liège naturel a montré une plus grande résistance en le comparant avec le liège expansé. L'effet de la masse volumique sur ces propriétés a été discuté. Celle-ci améliore la résistance du liège. Enfin, la recouvrance du liège naturel dans la direction radiale a été explicitée où un taux important de recouvrance a été enregistré.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'est principalement intéressé à une étude expérimentale sur un matériau écologique dans ses deux formes naturelle et expansée. Les échantillons sont prélevés dans la zone de Jijel.

Nous avons commencé par une revue bibliographique axée sur le liège naturel, qui est un produit naturel, durable, renouvelable et fort intéressant sur le plan économique. Sa morphologie, sa structure, sa composition chimique et ses propriétés mécaniques ont été mises en évidence.

Ensuite, la lumière est jetée sur le liège expansé produit par l'unité JLE sise à Jijel. Il s'agit d'un produit très léger, 100% naturel, non toxique, très cher et fort demandé à l'étranger. Il est souvent utilisé comme isolant thermique et phonique. Après la présentation de l'unité JLE, toutes les étapes de production ont été décrites.

Puis, une étude expérimentale a été réalisée. Des essais de compression dans des directions différentes ont été conduits sur le liège naturel dans un souci de mettre en évidence l'aspect orthotrope du matériau. Le liège expansé étant isotrope, la direction n'a aucune influence sur les propriétés. Sur la base des essais menés, les méthodes d'identification des propriétés du matériau sont explicitées.

Enfin, les résultats sont présentés et interprétés. Il est conclu que le liège naturel est plus dense et plus résistant que le liège expansé. Pour le liège naturel, il présente une forte résistance dans la direction radiale que dans la direction non radiale. La densité a un effet important sur le module de Young et le coefficient de Poisson dans toutes les directions. En effet, plus elle est grande plus ces paramètres sont grands. En outre, le liège présente une très bonne recouvrance.

Références bibliographiques

- [1] Gil L., Cortiça: produção, tecnologia e aplicação , Lisbon, INETI, (1998).
- [2] Costa A., Pereira H., Oliveira A., Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production . *For. Ecol. Manage.* 175: 239–246, (2003).
- [3] Gil L., Moiteiro C., Cork, In Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology, 6th ed.; Wiley- VCH: Verlag, Germany, (2003).
- [4] APCOR, Le liège. Culture, nature, futur. Le liège en chiffre, (2010).
- [5] Yalaoui M., La production du liège brute. Colloque de chêne liège, France (2000).
- [6] Pereira H., Cork: biology, production and uses. Elsevier, (2011).
- [7] Gibson L.J., Easterling K. E., Ashby M. F., The structure and mechanics of cork. *Proceeding of the Royal Society of London A*, 377: 99-117, (1981).
- [8] Rosner S., Kartusch B., Structural change in primary lenticels of Norway spruce over the seasons. *International Association of Wood Anatomists*, 24: 105-116, (2003).
- [9] Helena Pereira, The Rationale behind Cork Properties: A Review of Structure and chemistry, bioresources, (2015).
- [10] Silva S. P., Sabino M. A., Fernandes E. M., Correlo V. M., Boesel L. F. and Reis R. L., Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Reviews* 50: 345-365, (2005).
- [11] Pintor A. M. A., Ferreira C. I. A., Pereira J. C., Correia P., Silva S. P., Vilar V. J. P., Botelho C. M. S. and Boaventura R. A. R., Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: A review. *Water Research* 46(10): 3152-3166, (2012).
- [12] Pereira H., Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. *Wood Science and Technology* 22(3): 211-218, (1988).
- [13] Conde E., Cadahia E., Garcia-Vallejo M. C. and Gonzalez-Adrados J. R., Chemical characterization of reproduction cork from Spanish *Quercus suber*. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 18(4): 447-469, (1998).
- [14] Bento M. F. S., Pereira H., Cunha M. A., Moutinho A. M. C., van den Berg K. J. and Boon J. J., A study of variability of suberin composition in cork from *Quercus suber* L. using thermally assisted transmethylation GC-MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 57(1): 45-55, (2001).

- [15] Pereira H., Variability of the chemical composition of cork, *Bioresources* 8(2): 2246-2256, (2013).
- [16] Pereira H., Graca J. and Baptista C., The effect of growth-rate on the structure and compressive properties of cork. *IAWA Bull.* 13(4): 389-396, (1992).
- [17] Anjos O., Pereira H. and Rosa M. E., Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork. *European Journal of Wood and Wood Products* 66(4): 295-301, (2008).
- [18] Giunchi A., Versari A., Parpinello G. P. and Galassi S., Analysis of mechanical properties of cork stoppers and synthetic closures used for wine bottling. *Journal of Food Engineering* 88(4): 576-580, (2008).
- [19] Anjos, O., Rodrigues, C., Morais, J., Pereira, H., Effect of density on the compression behaviour of cork. *Materials & Design* 53, 1089-1096 (2014).
- [20] Gibson, L. J. and Ashby, M. F., Eds. *Cellular solids: structure and properties*, 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, (1997).
- [21] Anjos O., Pereira H., Rosa M.E., Tensile properties of cork in the tangential direction: variation with quality, porosity, density and radial position in the cork plank. *Materials & Design* 31(4), 2085-2090 (2010).
- [22] Rosa M.E., Pereira H., *International Journal of the Biology Chemistry Physics and Technology of Wood*. Volume 48(3): 226-232; (1994).
- [23] Rosa M.E., Pereira H., Fortes M.A., Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork. *Wood and Fiber Science*;22(2):149–64; (1990).
- [24] Rosa M.E., Fortes M.A., Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork. *Journal of Materials Science*;23(3):879–85, (1988).
- [25] Hamouda C., Benamira A. et Malek A., Exemple d'un audit énergétique dans le secteur des matériaux de construction, La formation de conseillers en maîtrise d'énergie et protection de l'environnement à l'université de Batna, Université de Batna, Algérie, 25 Juin 2007.
- [26] Ouali M., Contribution à l'étude des caractéristiques technologiques du liège aggloméré expansé pur noir, Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-harrache-Alger, Algérie, juin 2010.

- [27] García Á., Anjos O., Iglesias C., Pereira, H., Martínez, J., Taboada, J.: Prediction of mechanical strength of cork under compression using machine learning techniques. *Materials & Design* 82, 304-311 (2015).
- [28] Oliveira, V., Rosa, M.E., Pereira H., Variability of the compression properties of cork. *Wood science and technology* 48(5), 937-948 (2014).
- [29] Timoshenko S., *Résistance des Matériaux (Tome 2)*, Dunod, Paris, France, 356, 1968.
- [30] Jean-Claud D., *Résistance des Matériaux-cours et exercices corrigés*, Eyrolles, France, 39, 2010.
- [31] <https://www.cvm-france.com/ressources-techniques/lessai-de-traction>.
- [32] Kallel-Kamouni I., *Analyse mécanique de l'essai de flexion par flambement post-critique*, Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon, Lyon, France, Juin 1999.

Résumé. Le but de cette recherche est de connaître les comportements mécaniques en compression du liège naturel et expansé. Pour ce faire, des essais de compression sur des échantillons cubique ont été conduits selon différentes directions dans un souci de mettre en évidence l'aspect orthotropique du liège naturel. Les résultats obtenus révèlent un comportement typique des matériaux cellulaire. Un domaine élastique, suivi par un palier de flambage des cellules, finit par une zone de condensation. Le liège possède un module de Young et un coefficient de Poisson très faibles tout en ayant une grande résistance dans la direction radiale. Le liège naturel est deux fois plus dense que le liège expansé ; la densité influence toutes leurs propriétés. En effet, plus la densité est élevée, plus liège est résistant. Enfin, le liège présente la particularité d'avoir un taux de recouvrance très élevé.

Mots clés. Liège naturel ; Expansé ; Élastique ; Compression ; Densité ; Recouvrance ; Cellule.

Abstract. The purpose of this research is to know the mechanical behavior in compression of natural and expanded cork. To do this, compression tests on cubic samples were conducted in different directions in order to highlight the orthotropic appearance of natural cork. The results obtained reveal a typical behavior of cellular materials. An elastic domain, followed by a buckling stage of the cells, ends with a zone of condensation. Cork has a very low Young's modulus and Poisson's ratio while having a high resistance in the radial direction. Natural cork is twice as dense as expanded cork; density influences all their properties. Indeed, the higher the density, the more cork is resistant. Finally, cork has the distinction of having a very high recovery rate.

Keywords. Natural cork ; Expanded ; Elastic ; Compression Density ; Recouvrance ; Cell.

المخلص. الغرض من هذا البحث هو معرفة السلوك الميكانيكي للفلين الطبيعي و المجمع تحت تأثير الضغط. للقيام بذلك أجريت اختبارات الضغط على عينات مكعبة في اتجاهات مختلفة من أجل تسليط الضوء على إختلاف سلوك الفلين الطبيعي حسب الإتجاه. النتائج التي تم الحصول عليها أظهرت سلوك نموذجي للمواد الخلوية. مجال مرن، تليها مرحلة إنحناء الخلايا ، وينتهي مع مرحلة التكتيف. يحتوي الفلين على معامل يونغ ونسبة بواسون منخفضين جداً مع وجود مقاومة عالية في الإتجاه القطري. وجدنا أن كثافة الفلين الطبيعي ضعف كثافة الفلين المجمع حيث أن الكثافة تؤثر على جميع خصائص هذه المواد. كلما زادت الكثافة زادت مقاومة الفلين. أخيراً يتميز الفلين بمعدل إسترداد مرتفع للغاية.

الكلمات المفتاحية. الفلين الطبيعي ; المجمع ; مرن ; ضغط ; كثافة ; إسترداد ; خلية.