

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



UNIVERSITE MOHAMED 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

**Analyse de l'effet du temps sur le comportement  
mécanique du matériau liège**

*Présenté par : Siffour Abdelmounaim  
Kenioua Siyef*

*Les membres du jury :    **Président**    Bounib Hamou  
   **Encadreur**    Saadallah Younès  
   **Examineur**    Deliou Adel*

*Promotion 2020*

*Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel  
Soutenue le/10/2020*

## Remerciements

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

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué dans le cadre 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 respect à : Monsieur **Younès SAAD ALLAH**, maître de conférences de la faculté des sciences et de la technologie, pour son soutien et sa contribution durant la réalisation de ce travail.

Nous tenons à lui exprimer notre profonde gratitude pour ses conseils constructifs, ses instructions qui nous ont beaucoup aidés, sa disponibilité, son sens de responsabilité, sa rigueur scientifique et sa ponctualité.

Nous le remercions vivement pour l'effort, le temps consacrés lors de la réalisation de cette étude malgré ses nombreuses responsabilités, et sans oublier de le remercier pour son comportement professionnel qui s'approprie à un vrai enseignant.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury pour leur évaluation de ce travail et les conseils qui enrichiront, certainement, nos connaissances en la matière.

Nous désirons aussi remercier tous 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 et le soutien pour la réussite dans notre formation.

Nous tenons, enfin, à remercier toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce mémoire. Nous en citons en particulier le personnel de l'unité de production JLE à Bourmel pour leur contribution dans ce travail.

## **Dédicaces**

Louange à **Allah** qui m'a donné la force, la patience et le courage pour achever ce travail.

### **A mes parents**

pour les conseils et l'encouragement qui ne sont jamais arrêtés, de mon enfance jusqu'à ce jour, la solidarité est toujours présente.

### **A mes frères et sœurs**

pour l'amour, le respect, la patience et l'encouragement. Votre joie me plait toujours et dans tous les cas vous êtes mes proches amis

### **A mes collègues**

pour l'encouragement, la disponibilité et l'assistance, je vous remercie pour tous les moments que nous avons passés dans notre chemin et j'espère à vous la réussite dans votre vie.

### **A tous mes amis sans exception**

*Abdelmounaim*

## **Dédicaces**

Louange à **Allah** qui m'a donné la force, la patience et le courage pour achever ce travail.

### **A mes parents**

pour les conseils et l'encouragement et le soutien qu'ils m'ont donné tout au long de ma vie.

### **A mes frères et sœurs**

pour l'amour, le respect, la patience et l'encouragement. Votre joie me plait toujours et dans tous les cas vous êtes mes proches amis

### **A mes camarades**

pour l'encouragement, la disponibilité et l'assistance, je vous remercie pour tous les moments que nous avons passés dans notre chemin et j'espère à vous la réussite dans votre vie.

### **A tous mes amis**

*Siyef*

# Table des matières

## Chapitre I : Identification et propriétés du liège naturel

I.1.Introduction .....	1
I.2.Le liège .....	4
I.2.1.Types de liège .....	6
I.2.1.1. Liège mâle .....	6
I.2.1.2. Second liège .....	6
I.2.1.3. Liège de reproduction .....	7
I.3. Répartition des forêts du chêne-liège .....	7
I.3.1. Répartition des subéraies dans le monde .....	9
I.3.2. Répartition des subéraies en Algérie .....	9
I.3.3. Répartition des subéraies à Jijel .....	10
I.3.4. Production du liège à Jijel .....	10
I.4. Structure du liège .....	10
I.5. Composition chimique du liège .....	13
I.6. Propriétés mécaniques .....	14
I.6.1. Comportement mécanique .....	14
I.6.2. Influence de la densité et des pores sur les propriétés mécaniques .....	16
I.6.3. Influence du temps sur le comportement .....	17
I.7. conclusion .....	17

## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé

II.1. Introduction .....	19
II.2. Le liège expansé ... ..	19
II.2.1. Définition .....	19
II.2.2.Utilisation .....	20
II.3.Production du liège expansé .....	20

II.3.1.L'unité de production .....	20
II.3.2. Importance et objectifs de la JLE .....	21
II.3.3. Structure de la JLE .....	21
II.4. Processus de production du liège expansé .....	21
II.4.1. Stockage du liège vierge .....	22
II.4.2. Broyage du liège .....	22
II.4.3. Séchage .....	23
II.4.4. Agglomération .....	23
II.4.5. Refroidissement .....	26
II.4.6. Débitage et ponçage .....	26
II.4.7.Emballage et stockage .....	26
II.5. Propriétés mécaniques et physiques du liège expansé .....	27
II.5.1. Propriétés physiques .....	27
II.5.2. Propriétés mécaniques .....	28
II.6. Conclusion .....	30

### **Chapitre III : Modélisation du comportement du liège en fluage**

III.1. Introduction .....	32
III.2. Comportement viscoélastique .....	32
III. 3. Modèles rhéologiques viscoélastiques .....	33
III.3.1. Modèle de Maxwell .....	33
III.3.2. Modèle de Kelvin-Voigt .....	35
III.3.3. Modèle de Kelvin-Voigt à élasticité instantanée .....	36
III.4. Essais mécaniques .....	38
III.4.1. Essai de traction .....	38
III.4.2. Essai de compression .....	39

III.4.3. Essai du fluage .....	40
III.4.4. Essai de relaxation de la contrainte .....	41
III.5. Modélisation du fluage du liège naturel .....	42
III.5.1. Fluage du liège naturel .....	42
III.5.2. Modèle pris en compte .....	44
III.5.3. Identification des paramètres .....	44
III.6. Analyse des résultats .....	44
III.6.1. Dépendance des paramètres du chargement .....	45
III.6.2. Comparaison des résultats expérimental / modèle .....	47
III.7. Conclusion .....	50
<b>Chapitre IV : Etude expérimentale de la recouvrance du liège</b>	
IV.1. Introduction .....	52
IV.2. Elaboration des échantillons .....	52
IV.3. Expérimentation .....	53
IV.3.1. Essai de recouvrance .....	53
IV.3.2. Protocole expérimental .....	54
IV.4. Résultats et discussion .....	55
IV .4.1. Recouvrance du liège naturel .....	55
IV.4.2. Recouvrance du liège expansé .....	57
IV.4.3. Recouvrance du liège à 10 jours .....	59
IV.4.4. Conclusion .....	60
Conclusion générale .....	61
Liste des références bibliographiques .....	63
Annexe .....	65

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Chêne-liège. ....	5
<b>Figure I.2.</b> Représentation schématique d'une coupe axiale d'un tronc de chêne-liège[3]. ...	6
<b>Figure I.3.</b> Liège mâle. ....	7
<b>Figure I.4.</b> Liège de reproduction. ....	8
<b>Figure I.5.</b> Surface de distribution du chêne-liège en méditerrané. ....	9
<b>Figure I.6.</b> Répartition du chêne –liège en l'Algérie. ....	10
<b>Figure I.7.</b> Représentation des direction d'un échantillon du liège [8].....	12
<b>Figure I.8.</b> Structure du liège observe par microscopie électronique [10].....	13
<b>Figure I.9.</b> Courbe contrainte-déformation du liège en compression uni-axiale [17]. ....	15
<b>Figure I.10.</b> Influence de la densité sur le comportement du liège en compression dans la direction radiale [20]. ....	16
<b>Figure II.1.</b> Stockage du liège. ....	22
<b>Figure II.2.</b> Broyeur de liège. ....	23
<b>Figure II.3.</b> Chaudière de la vapeur. ....	24
<b>Figure II.4.</b> Blocs du liège. ....	25
<b>Figure II.5.</b> Déchets de résine naturelle. ....	25
<b>Figure II.6.</b> Sciage et brossage des plaques. ....	26
<b>Figure II.7.</b> Plaque finie du liège expansé. ....	27
<b>Figure II.8.</b> Comportement du liège expansé en compression [21]. ....	29
<b>Figure III.1. a.</b> Réponse d'un matériau élastique. ....	33
<b>Figure III.1.b.</b> Réponse d'un matériau visqueux. ....	33
<b>Figure III.2.</b> Modèle de Maxwell. ....	35
<b>Figure III.3.</b> Modèle de Kelvin-Voigt. ....	36
<b>Figure III.4.</b> Solide de Kelvin-Voigt. ....	37
<b>Figure.III.5.</b> Courbes de déformation (à gauche) et de contrainte (à droite) par rapport au temps. ....	37

<b>Figure III.6.</b> Courbe typique contrainte-déformation. ....	39
<b>Figure III.7.</b> Déformation de l'éprouvette en compression. ....	40
<b>Figure III.8.</b> Contrainte et déformation dans un essai de fluage (modèle de Maxwell)[26]. .....	40
<b>Figure III.9.</b> Modes de fluage. ....	41
<b>Figure III.10.</b> Graphes des contrainte et déformation en relaxation[22-24]. ....	42
<b>Figure III.11.</b> Fluage du liège dans les trois direction radiale, tangentielle et axiale pour les contraintes : (a) 0.36 MPa , (b) 0.55 MPa , (c) 0.77 MPa[27]. ....	43
<b>Figure III.12.</b> Dépendance du module de Young du chargement. ....	46
<b>Figure III.13.</b> Dépendance du paramètre $E_k$ du chargement. ....	46
<b>Figure III.14.</b> Dépendance du paramètre $\eta_k$ du chargement. ....	47
<b>Figure III.15.</b> Comparaison des résultats de la déformation modèle/expérimental dans la direction radiale pour les trois chargements : a. (0.33 MPa) ; b. (0.55 MPa) ; c. (0.77 MPa). .....	49
<b>Figure III.16.</b> Comparaison des résultats de la déformation modèle/expérimental dans la direction non radiale pour le chargement b. (0.55 MPa). ....	50
<b>Figure IV.1.</b> Echantillons du liège naturel et expansé. ....	53
<b>Figure. IV.2.</b> Calcul des déplacements des échantillons. ....	54
<b>Figure IV.3.</b> Domaines de la recouvrance du liège naturel. ....	56
<b>Figure IV.4.</b> Courbes comparatives des recouvrances du liège naturel dans les directions radiale/non radiale. ....	56
<b>Figure. IV.5.</b> Courbes comparatives des recouvrances du liège naturel dans les direction radiale/ non radiale et du liège expansé. ....	58
<b>Figure IV.6.</b> Ecart de recouvrance du liège naturel/expansé. ....	59
<b>Figure IV.7.</b> Déformation après 10 jours de recouvrance. ....	59

## Liste des tableaux

<b>Tableau I .1.</b> Répartition des subéraies et quantités de production du liège dans le monde [5]. .....	9
<b>Tableau I.2.</b> Répartition du chêne-liège en Algérie par région principale. ....	10
<b>TableauI.3.</b> Productions du liège à Jijel dans 5 ans successives. ....	11
<b>Tableau I .4.</b> Composition chimique moyenne du liège en pourcentage massique [14]. ....	14
<b>Tableau I.5.</b> Propriétés mécaniques générales du liège [8, 19]. ....	15
<b>Tableau II.1.</b> Propriétés physiques et géométriques des plaques du liège expansé [JLE]. ...	28
<b>Tableau II.2.</b> Confrontation des propriétés mécaniques du liège naturel / expansé[21]. ...	29
<b>Tableau III.1.</b> Paramètres du modèle identifiés. ....	45
<b>Tableau IV.1.</b> Masse volumique et longueur initiale des échantillons. ....	52
<b>Tableau. IV.2.</b> Recouvrance d'échantillon dans la direction radiale et non radiale. ....	56

## Liste des symboles

$E$  module de Young

$\varepsilon$  déformation

$\sigma$  contrainte

$\eta$  paramètre d'amortisseur

$E_K$  paramètre de ressort

R radiale

NR non radiale

$L(t)$  longueur actuelle

$L_0$  longueur initiale

$\varepsilon_r$  recouvrance

# Introduction générale

Le liège est un matériau naturel, renouvelable et durable. Il est extrait de l'écorce du chêne-liège. Le liège est un matériau souple, facile à déformer et capable de recouvrir son état initial après avoir subi de grandes déformations. Il se distingue également par une faible densité et une forte imperméabilité. Ces propriétés uniques font du liège un matériau utilisé dans plusieurs domaines dont l'industrie, les bâtiments et la bouchonnerie.

La motivation de ce travail consiste au fait que l'Algérie occupe la troisième place mondiale en termes de superficie forestière de chêne-liège, en particulier notre wilaya de Jijel est très riche en cette ressource naturelle et précieuse. En effet, dans la wilaya de Jijel, la superficie forestière totale dominée par le chêne-liège avoisine les 79%.

En Algérie, bien que le liège présente une ressource fort abondante qui peut effectuer un grand développement économique, sa production et son exploitation reste encore loin d'être satisfaisante par rapport aux autres pays comme le Portugal et l'Espagne. Notre étude constitue une contribution dans la valorisation de cette ressource locale. Elle s'intéresse principalement à l'analyse de la sensibilité du comportement de ce matériau au temps, précisément à travers le fluage et la recouvrance. Le fluage représente une déformation au cours du temps sous un chargement constant tandis que la recouvrance décrit la déformation au cours du temps après suppression du chargement.

Le présent manuscrit est organisé en quatre chapitre.

Le premier chapitre est dédié à une étude bibliographique sur le liège naturel, son identification, la répartition des forêts du chêne-liège au niveau local et mondial. La structure, la composition chimique et les propriétés mécaniques du liège naturel sont mises en évidence.

Le deuxième chapitre s'intéresse au liège expansé. Suite à un stage effectué au sein de la JLE, les étapes de production du liège expansé sont décrites et ses propriétés physiques et mécaniques sont présentées.

Le troisième chapitre présente une étude du comportement viscoélastique du liège naturel en fluage. D'abord, des modèles rhéologiques viscoélastique sont exposés. La lumière est ensuite jetée sur les essais du fluage et de relaxation. Enfin, une modélisation du comportement du liège

en fluage est effectuée. Les paramètres du modèle sont identifiés sur la base des essais de la littérature.

Le quatrième chapitre fait l'objet d'une étude expérimentale axée sur la recouvrance du liège naturel et expansé. La préparation des échantillons et le protocole expérimental sont ainsi décrits. Les essais étant réalisés, les résultats obtenus sont analysés et discutés.

Le mémoire est clôturé par une section de conclusions.

# **Chapitre I**

## **Identification et propriétés du liège naturel**

## I.1.Introduction

Ce chapitre s'intéresse principalement à l'étude du liège naturel. Ce matériau étant obtenu à partir du chêne-liège, la répartition des zones les plus riches en cette ressource est présentée aussi bien sur le plan local que mondial. Ensuite, la structure et la composition chimique du liège sont identifiées. Enfin la lumière est jetée sur les propriétés mécaniques, aspect le plus important dans ce mémoire. Ainsi le comportement mécanique du liège naturel en traction et en compression et l'influence du temps et de la densité sur le comportement mécanique sont discutés.

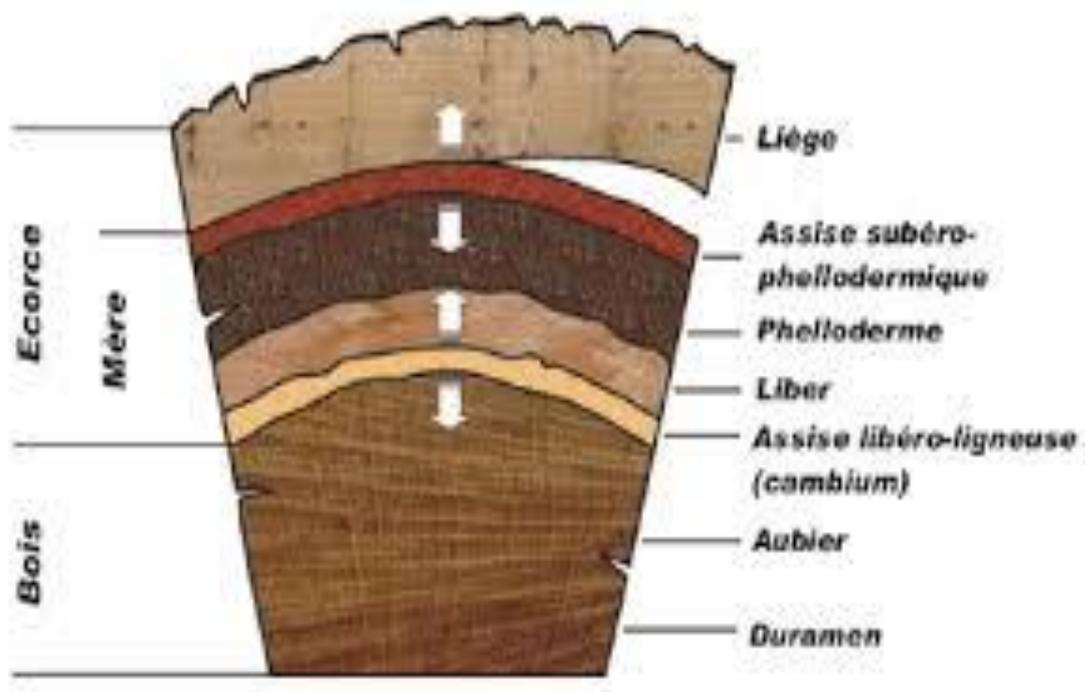
## I.2.Le liège

Le liège est un matériau naturel, renouvelable et durable. Il est souple, flexible, léger, imperméable et capable de répondre aux exigences d'isolation électrique, thermique et phonique [1]. Grâce à ses propriétés, le liège était exploité depuis longtemps dans des régions spécifiques de la Méditerranée occidentale [2]. Le liège est la couche externe de l'écorce de chêne (*Quercus Suber*), qui peut être récolté tous les 9-12 ans. Généralement, le chêne-liège (Figure I.1) exige beaucoup de lumière solaire, une faible précipitation et une haute humidité. De ce fait, l'existence du liège est limitée dans le monde. Il est donc nécessaire de savoir exploiter cette ressource peu abondante.



**Figure I.1.** Chêne-liège

La Figure I.2 illustre une coupe axiale d'un tronc de chêne-liège. On y voit que la couche de liège recouvre différentes couches composant l'écorce du chêne. Il s'agit de l'assise subéro-phellodermique, le phelloderme, le liber et l'assise libéro-ligneuse (cambium).



**Figure I.2.** Représentation schématique d'une coupe axiale d'un tronc de chêne-liège [3]

# Chapitre I : Identification et propriétés du liège naturel

---

## I.2.1. Types de liège

Le liège est récolté du tronc et des branches du chêne-liège, généralement en été. Cette opération est dite « écorçage ». Lorsque le tronc du chêne atteint 70 cm de circonférence à 130 cm du sol, on fait ce qu'on appelle le « démasclage », c'est l'opération qui consiste à enlever le liège mâle[4]. On distingue trois types de liège.

### I.2.1.1. Liège mâle

C'est le liège obtenu après la première récolte (Figure I.3). Le liège récolté alors à une couleur noire, d'une structure très irrégulière et d'une dureté et de densité qui le rendent difficile à travailler. Le liège mâle est un matériau friable (présente des fissures), de mauvaise qualité et donc avec des utilisations très limitées.



**Figure I.3.** Liège mâle

### I.2.1.2. Second liège

C'est un type de liège avec des caractéristiques mieux que celles du liège mâle, mais pas suffisantes pour les exigences de l'industrie. Il peut être utilisé, comme le liège mâle, dans l'isolation, les semelles de chaussures et les joints d'étanchéité. Il est obtenu lors de la deuxième récolte du liège.

### I.2.1.3. Liège de reproduction

## Chapitre I : Identification et propriétés du liège naturel

---

C'est le liège de bonne qualité (Figure I.4) qui peut être utilisé dans l'industrie grâce à sa surface externe, qui présente peu de fractures, ses propriétés mécaniques particulières telles que la légèreté, la souplesse, l'isolation thermique et acoustique et un coefficient de poisson qui vaut presque zéro. Ces qualités justifient son utilisation dans la production des bouchons, les murs isolant (isolation acoustique), les articles de sport, les cannes à pêche, les sièges de voiture (souplesse), ... etc. On l'obtient à partir de la troisième récolte, quand l'épaisseur du liège voulue est atteinte. Le chêne-liège pouvant vivre jusqu'à 150 ans, On peut ainsi obtenir 12 levées par arbre [4].



**Figure I.4.** Liège de reproduction

### I.3. Répartition des forêts du chêne-liège

#### I.3.1. Répartition des subéraies dans le monde

Les forêts de chêne-liège sont localisées dans le bassin Méditerranée, et plus particulièrement dans les régions méridionales de la Péninsule Ibérique. Les subéraies (forêts de chêne-liège) existent seulement dans des régions chaudes et humides. La subéraie mondiale s'étend sur

## Chapitre I : Identification et propriétés du liège naturel

environ 2,28 millions d'hectares répartis sur sept pays : le Portugal, l'Espagne, l'Algérie, la France, le Maroc, l'Italie et la Tunisie.

La Figure I.5 montre la répartition des surfaces des subéraies dans le monde. Le Tableau I.1 présente la répartition des subéraie (en 2006) et les quantités de productions (en 2009) du liège par pays dans le monde.



**Figure I.5.** Surface de distribution du chêne-liège en méditerrané

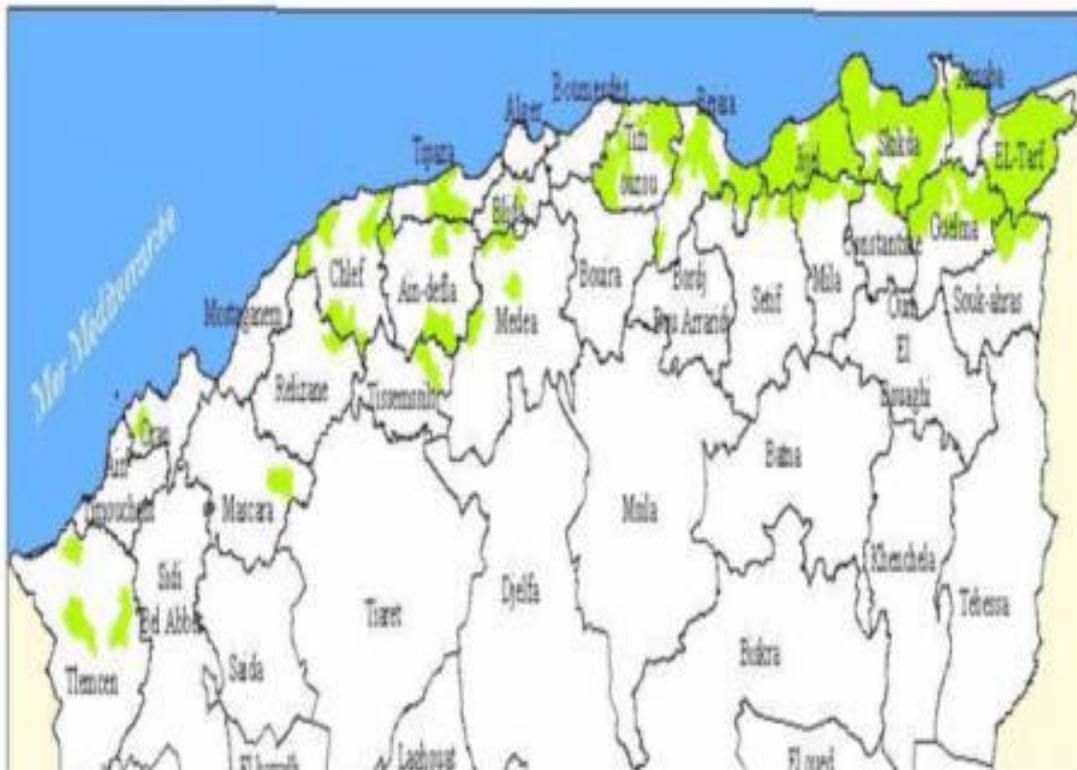
**Tableau I .1.** Répartition des subéraies et quantités de production du liège dans le monde [5].

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

# Chapitre I : Identification et propriétés du liège naturel

## I.3.2. Répartition des subéraies en Algérie

Le chêne-liège est une importante espèce forestière en Algérie sur le double plan superficies occupées et importance économique. Bien qu'il occupe 440 000 ha, il ne constitue de véritables subéraies que 150 000 ha. D'Est en Ouest, ces subéraies s'étendent du littoral méditerranéen aux chaînes telliennes sur une largeur de 100 km environ [6]. Les principales subéraies algériennes sont essentiellement localisées en zone subhumide et humide entre l'algérois et la frontière tunisienne, où elles s'élèvent de la mer jusqu'à 1200 m d'altitude. Ainsi, elles s'étendent, majoritairement à l'Est, d'une façon assez continue le long de la zone du littoral. Elles se répartissent à travers 22 wilayas tel qu'il est illustré sur la Figure I.6.



**Figure I.6.** Répartition du chêne –liège en l'Algérie

La subéraie algérienne couvre une superficie de 440 000 ha, ce qui représente 11 % de la superficie forestière totale algérienne et 18% de la subéraie mondiale. Le tableau I.2 en présente la répartition.

**Tableau I.2.** Répartition du chêne-liège en Algérie par région principale.

Régions principales	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
---------------------	-----------------	-----------------

## Chapitre I : Identification et propriétés du liège naturel

Région constantinoise	392000	89
Région algéroise	41000	10
Région oranaise	7000	1
Total	440000	100

### I.3.3. Répartition des subéraies à Jijel

Dans la wilaya de Jijel, les formations forestières sont distribuées d'une façon irrégulière, et couvrent une grande surface de 137457 ha correspondant à un taux de boisement élevé de 57%. Les forêts occupent une superficie de 99123 ha dont la majorité sont caractérisées par une diversité des essences [7]. Les zones forestières les plus grandes sont : Corniche de Ziama, Massif Côtiers de Ferjouene, Versants nord, Versant sud de Oued Djendjen, Montagne de Seddets, Versants sud de Oued Mechtas, Collines d'El Milia. Dans cette wilaya, le chêne-liège est l'essence dominant qui occupe près de 79% des superficies forestières totales.

### I.3.4. Production du liège à Jijel

La production du liège en l'Algérie n'a jamais pu être stable ; on a des statistiques différentes chaque année. On présente sur le Tableau I.3, à titre d'exemple, quelques statistiques de la production du liège au niveau de la wilaya de Jijel.

**Tableau I.3.** Productions du liège à Jijel dans 5 ans successives.

Année	Production en quintal
2010	6050
2011	9850
2012	5700
2013	12200
2014	12600
2015	11000

## I.4. Structure du liège

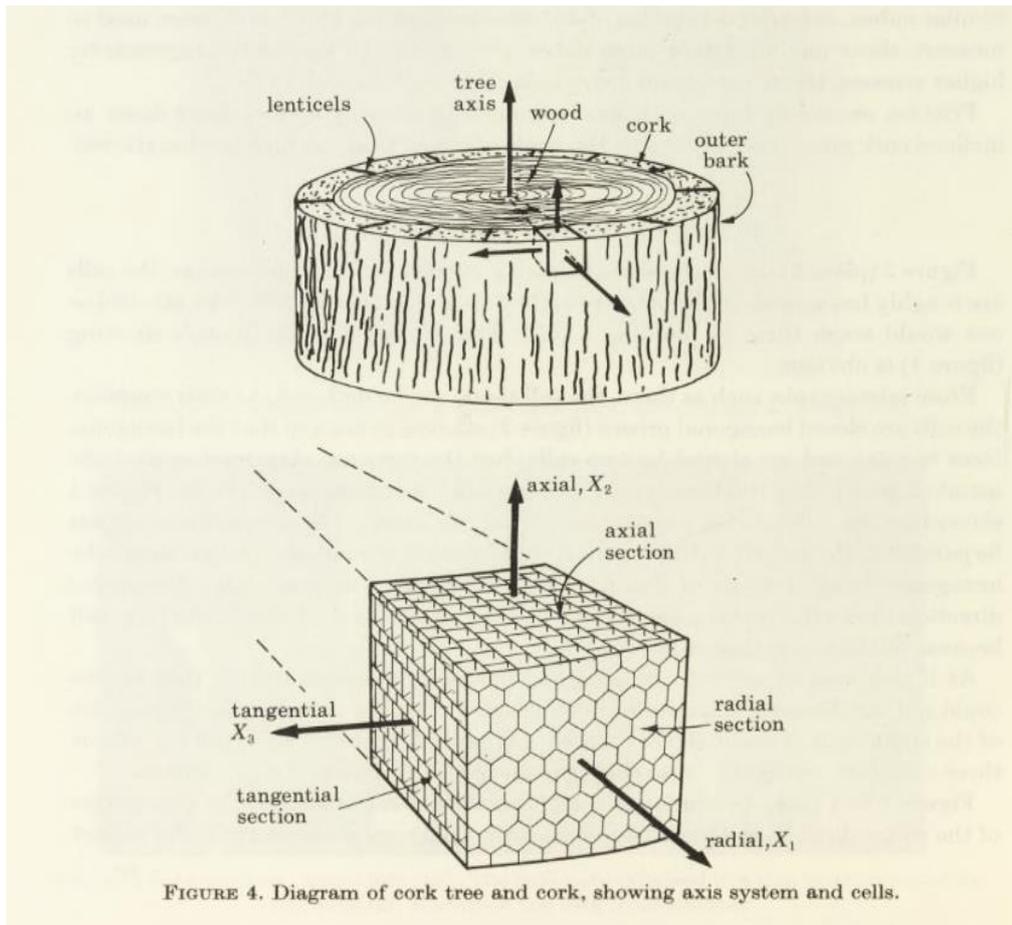
## Chapitre I : Identification et propriétés du liège naturel

---

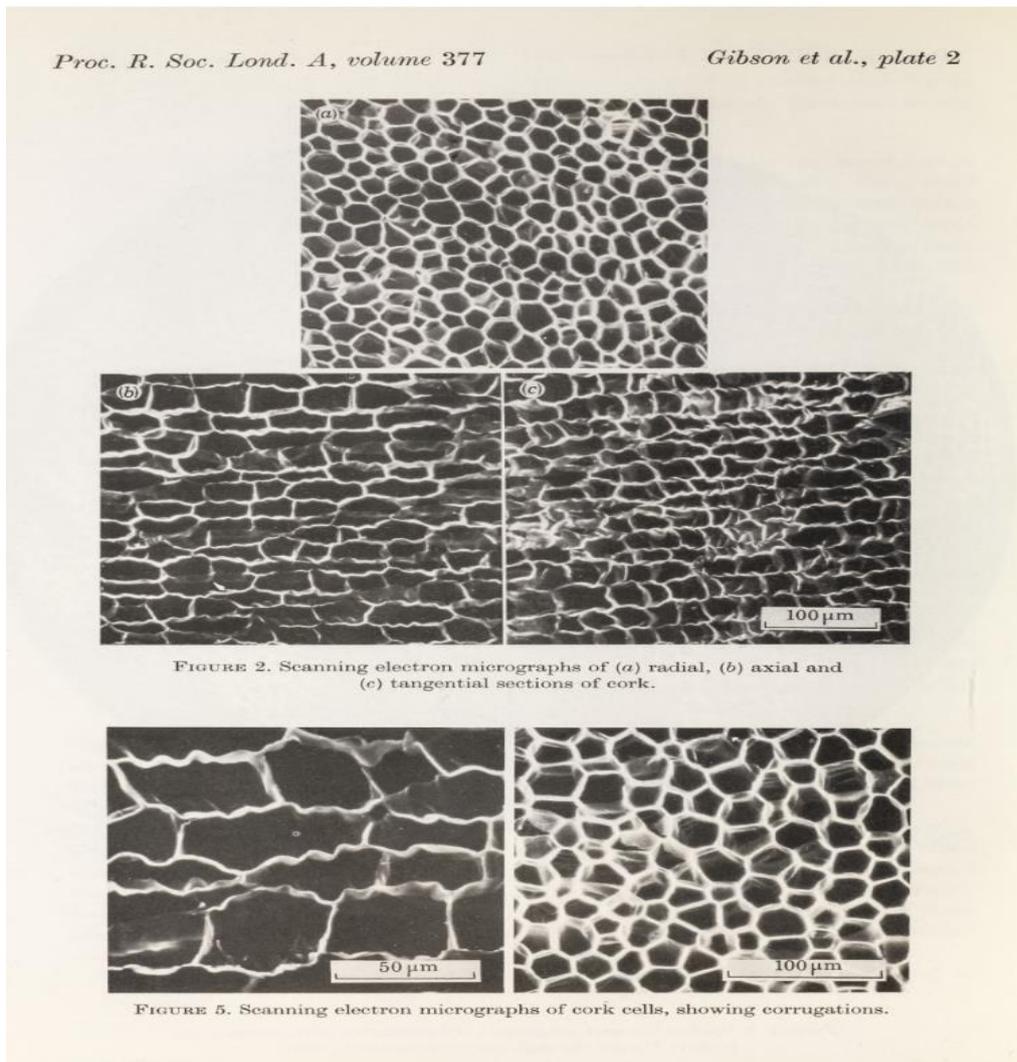
Le liège est un matériau cellulaire à cellules fermées de forme hexagonale. Hooke était le premier qui a observé les cellules de liège au microscope optique en 1664, puis par microscopie électronique à balayage par Gibson en 1981 [8]. Ces derniers ont très bien décrit la forme et l'arrangement des cellules selon les trois directions axiale, radiale, et tangentielle (Figure I.7).

La structure du liège apparaît différemment selon les trois directions. Dans la direction radiale, les cellules ressemblent à un « nid d'abeille » ; dans les deux autres directions axiale et tangentielle, la structure des cellules est la même : elle ressemble à un mur en brique avec des cellules alignées dans des rangées parallèles (Figure I.8). Dans ce dernier cas, les cellules 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 [9]. Enfin, dans toutes les directions, les cellules sont disposées sans espace intercellulaire.

Le liège n'est pas complètement homogène, sa structure cellulaire contient des discontinuités. Ces dernières, qui existent dans tout type de liège avec des quantités différentes, viennent de la biologie naturelle du liège et parfois des sollicitations externes. Ces discontinuités ont une influence sur les performances mécaniques et la qualité macroscopique du liège [4, 8].



**Figure I.7.** Représentation des direction d'un échantillon du liège [8].



**Figure I.8.** structure du liège observe par microscopie électronique [10].

### I.5. Composition chimique du liège

Le liège est considéré comme un matériau alvéolaire, de faible densité entre 120 et 240 kg/m<sup>3</sup>. Il renferme près de 80 % d'air [8, 11]. En termes de composition chimique, pour les parois cellulaires dont la densité est à peu près de 1200 kg/m<sup>3</sup>[12], la subérine en est le composant principal, c'est celui qui est responsable du comportement élastique ; la lignine ; la cellulose ; ainsi que des cires et des tannins.

Les quantités de ces composants varient selon plusieurs facteurs tels que l'origine géographique, le climat, le type du liège et l'âge de l'arbre [13, 14] . Le tableau I.4 présente la composition chimique moyenne du liège en pourcentage massique.

## Chapitre I : Identification et propriétés du liège naturel

**Tableau I .4.** Composition chimique moyenne du liège en pourcentage massique [14].

Références	Subérine (%)	Lignine (%)	Polyosides(%)	Extractibles (%)	Cendres (%)
Liège de mauvaise qualité	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

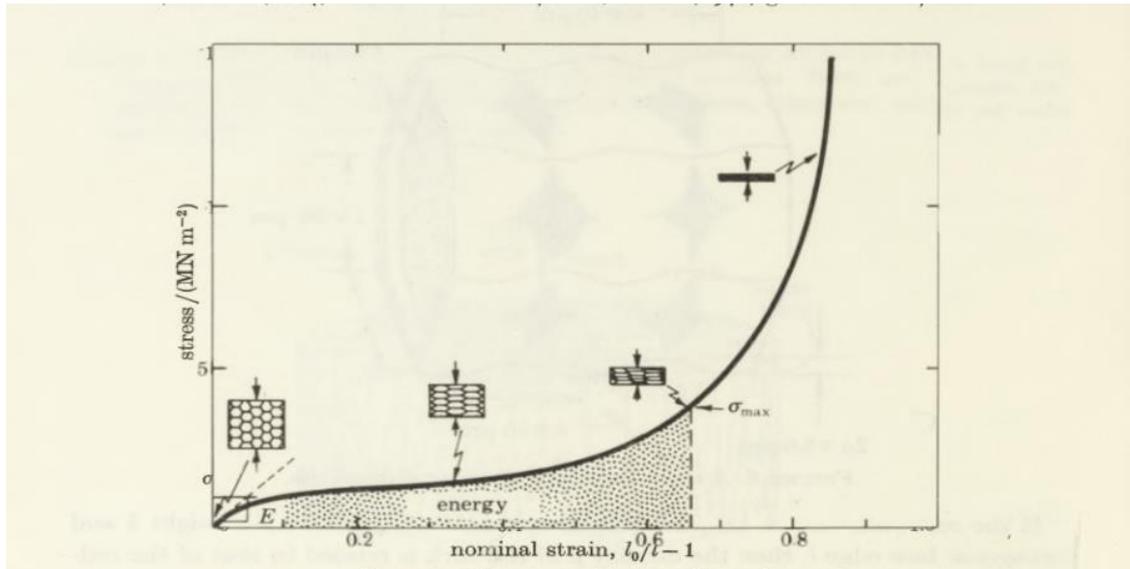
### I.6. Propriétés mécaniques

#### I.6.1. Comportement mécanique

Les propriétés mécaniques du liège sont connues à partir des différents essais mécaniques. Il y a de nombreux articles qui en font référence [8, 15, 16]. En effet la composition du liège est riche en subérine et en lignine. Ces deux polymères expliquent clairement le comportement du liège sous différentes sollicitations.

La Figure I.9 présente la courbe typique contrainte-déformation en compression du liège. On peut la décomposer en trois phases. Dans la première phase, le liège prend un comportement élastique linéaire pour des déformations petites qui peuvent aller jusqu'à 7%. La deuxième phase est caractérisée par un palier presque horizontal, limité en général à 70% de déformation où l'on observe une grande décroissance de la pente (décroissance de la résistance du matériau), le matériau se déforme rapidement pour des contraintes presque constantes, cette phase s'interprète par un effondrement des cellules. Au-delà de ce seuil de déformation, on assiste à une phase où les cellules se densifient d'où l'appellation de cette phase « de densification » [17]. En effet, pour les matériaux cellulaires plusieurs facteurs influent sur le comportement mécanique tel que l'homogénéité de la structure, la présence de défauts (fissure) [18].

En traction, les courbes caractéristiques contrainte-déformation montrent une région élastique linéaire jusqu'à 2% de déformation suivie d'une région de pente décroissante jusqu'à la rupture avec une déformation de 5%. Par rapport à la compression le liège est plus résistant en traction, mais moins élastique [8].



**Figure I.9.** Courbe contrainte-déformation du liège en compression uni-axiale [17].

Le tableau I .5 présente quelques valeurs (dans la direction radiale et non radiale) du module de Young en compression et en traction ainsi que la déformation à la rupture, sous différentes conditions

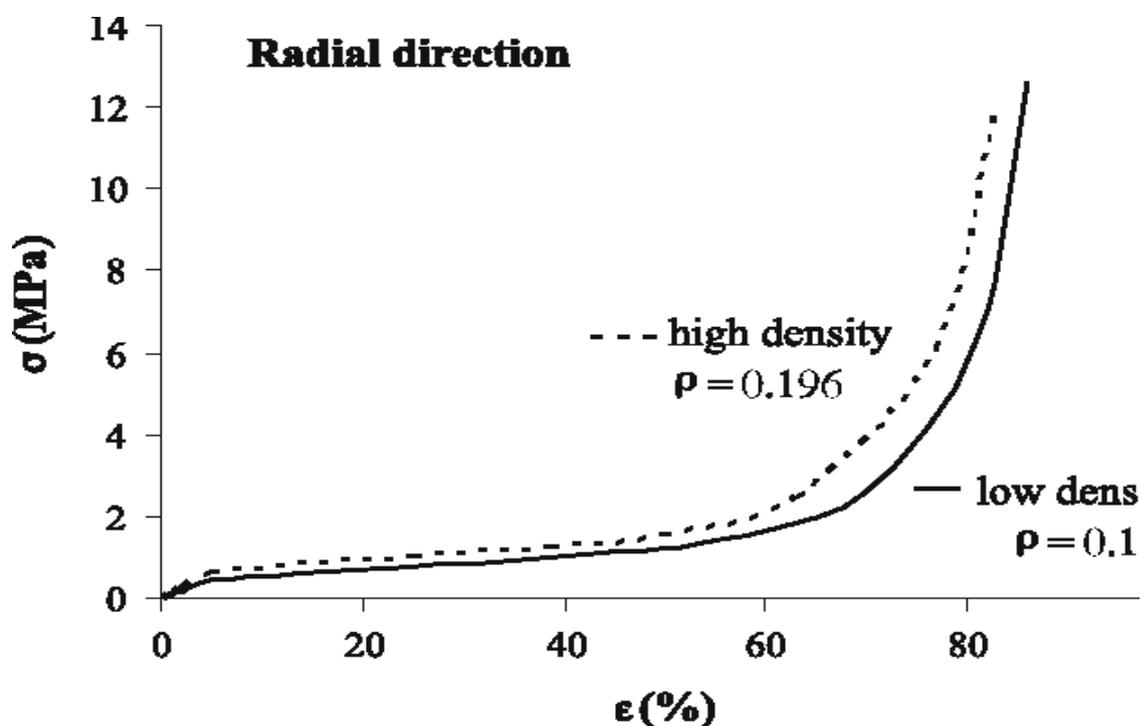
**Tableau I.5.** Propriétés mécaniques générales du liège [8, 19].

Propriétés	Valeur moyenne
Module de Young en (MPa)	20±7 (radial) 13±5(non radial)
Module de cisaillement en (MPa)	4,3±1,5 (radial) 2,5± 1,0 (non radial)
Coefficient de poisson	0.5 ± 0.05 (radial) 0 ± 0.05 (non radial)
Contrainte en (MPa) et déformation à la limite élastique	0.8 ± 0.2, 4% (radial) 0.7±0.2 , 6% (non radial)
Contrainte en (MPa) et déformation à la rupture	1.0 ±0.2 , 5% (radial) 1.1 ±0.2 , 9% (non radial)
Coefficient de perte d'énergie	0.1 à 1% (radial) 0.3 à 20% (non radial)
Module de Young en traction en (MPa)	38 (radial) 24-26 (non radial)

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

Le liège est un matériau cellulaire qui est caractérisé par l'existence des pores. Ces derniers présentent le paramètre principal de la qualité du produit. Ainsi, un liège de bonne qualité contient peu de pores de petite taille tandis qu'un liège de mauvaise qualité contient des lenticelles qui occupent une grande section [20]. Dans les travaux de la référence [20], des essais de compression sur des échantillons de forme cubique pour deux classes différentes du liège naturel: bonne et mauvaise qualité sont réalisés. Les résultats montrent que le module de Young et la résistance à la compression selon les différentes directions sont influencés par la qualité du liège. Par ailleurs, un essai de compression dans différentes directions donne des résultats différents pour des échantillons de densités différentes, qui varient de 0.1 à 0.197 g/cm<sup>3</sup>. L'essai montre que les échantillons à haute densité présentent une rigidité plus élevée en compression dans les trois directions.

La Figure I.10 représente l'influence de la densité sur le comportement du liège en compression dans la direction radiale. On y observe une augmentation de la résistance du matériau avec l'augmentation de la densité dans les trois phases de la courbe contrainte-déformation en compression.



**Figure I.10.** Influence de la densité sur le comportement du liège en compression dans la direction radiale [20].

### **I.6.3. Influence du temps sur le comportement**

Le comportement des matériaux dépend de plusieurs facteurs intrinsèques comme la structure cristallographique, la présence des défauts, les contraintes résiduelles et extrinsèques comme la température, les efforts appliqués et la vitesse de déformation. L'effet de la vitesse de déformation est un aspect prépondérant dans les matériaux polymères dont le liège. En effet, il est évident qu'une augmentation de la vitesse de déformation implique une augmentation de la résistance du matériau. Cet aspect, peu étudié pour le liège constitue notre motivation à nous y intéresser. Ainsi, le but de cette étude est de déterminer l'influence du temps sur le comportement du liège pour une meilleure exploitation de cette ressource naturelle.

### **I.7. conclusion**

Le premier chapitre fait l'objet d'une étude bibliographique sur le liège naturel. Après avoir défini ce matériau et identifié ces différents types, les zones de sa production sont localisées sur le double plan local et mondial. Puis, l'accent est mis sur sa microstructure et sa composition chimique, éléments responsables de sa réponse mécanique. En effet, la subérine et la lignine acquièrent au liège un comportement typique de polymères tandis que sa structure en fait un matériau orthotrope avec une forte résistance dans la direction radiale.

## **Chapitre II**

### **Production et propriétés du liège expansé**

## **Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé**

### **II.1. Introduction**

Ce chapitre a pour objet de définir le processus et les différentes étapes de la production du liège aggloméré expansé en utilisant les informations collectées lors d'un stage effectué au sein de l'unité Jijel Liège Etanchéité (JLE) sise à Jijel. Nous allons d'abord donner une définition du liège expansé Ensuite l'unité de production et présentée en détaillant son organigramme et les différentes étapes du processus de production du liège expansé. Finalement, nous nous aux propriétés physiques et mécaniques du produit fini.

### **II.2. Le liège expansé**

#### **II.2.1. Définition**

Le liège expansé est un produit obtenu principalement à partir du liège naturel. En outre, on peut recycler les déchets et les chutes du liège d'autres applications pour le produire. La production du liège expansé est un processus qui passe par plusieurs étapes. Elle se résume en l'agglomération des grains du liège broyés à température élevée (380 c°) pour former des blocs grâce à l'existence de la subérine (le liège vierge est riche en subérine). L'agglomération ne nécessite aucune résine, ce qui donne finalement un produit fini totalement naturel.

## **Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé**

### **II.2.2.Utilisation**

Le liège expansé, étant principalement obtenu des rebuts du liège naturel, est qualifié d'un liège de qualité moyenne. Il est utilisé dans diverses applications dont :

- l'isolation thermique, électrique ou phonique ;
- les tapis amortissant des salles de sport ;
- les joints de dilatation, semelles de chaussures ;
- le parquet et le revêtement en liège, ponts de bateau en liège.

Par contre le liège de meilleure qualité est principalement destiné à la fabrication des bouchons.

### **II.3.Production du liège expansé**

Nous avons effectué un stage au sein de l'entreprise nationale « Jijel Liège Etanchéité » qui occupe une place importante dans le marché national du liège. Notre stage a un double objectif dont le premier est la découverte du processus de production : nous présenterons dans ce qui suit une description détaillée du processus de production du liège expansé en partant de la matière première jusqu'au produit fini. La seconde finalité est l'obtention des échantillons du produit fini pour faire l'objet de notre étude expérimentale.

#### **II.3.1.L'unité de production**

L'entreprise Jijel Liège Etanchéité (J L E) est une entreprise du secteur public sise à Bouremel au niveau de la wilaya de Jijel. Elle occupe une superficie de 4.60 hectares. Elle se compose de deux ateliers principaux dont l'un est consacré à la production de liège expansé et l'autre est réservé à la production de produit isolants.

L'unité couvre une surface de 10642m<sup>2</sup> répartie comme suit :

- un atelier de production de liège expansé d'une superficie de 5374 m<sup>2</sup> ;
- un atelier de produits d'isolation d'une superficie de 1800 m<sup>2</sup> ;

## **Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé**

- un service de maintenance de 750m<sup>2</sup>de superficie ;
- un stock d'une superficie estimée à 1130m<sup>2</sup> ;
- l'administration et ses accessoires couvrant une superficie de 786m<sup>2</sup>.

D'autre part, l'unité comprend une surface aménagée non convertie de 8350m<sup>2</sup> de superficie utilisée pour le stockage de matière première, d'une grande capacité qui peut atteindre jusqu'à 27000m<sup>2</sup>.

### **II.3.2. Importance et objectifs de la JLE**

La JLE est une entreprise nationale de grande importance sur le double plan national et international. Elle contribue au soutien du secteur public, à la couverture des besoins du marché national en liège et en matériaux isolants et à l'exportation de la plus grande quantité possible de production à l'étranger.

La JLE s'engage dans un projet ambitieux pour l'amélioration de sa production et la promotion de son activité. Ainsi, elle a pour objectifs :

- l'élargissement du champ de son activité en installant de nouveaux points pour la production et la commercialisation de ses produits ;
- la concentration sur une publicité avancée pour commercialiser ses produits ;
- la couverture du marché national en liège expansé et en matériaux isolant ;
- l'ouverture sur un partenariat étranger.

### **II.3.3. Structure de la JLE**

La structure de la JLE s'organise en une direction générale et cinq sous-directions qui lui sont affiliées. Chacune de ces sous-directions est divisée en sections qui facilitent le processus de gestion, d'organisation et de productivité.

## **II.4. Processus de production du liège expansé**

## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé

La production du liège expansé passe par un processus qui comprend des étapes successives présentées dans ce qui suit.

### II.4.1. Stockage du liège vierge

Dans cette phase, le liège vierge est trié en deux classes : le liège de bonne qualité est réservé pour la production des bouchons alors que liège de mauvaise qualité est orienté vers le stock pour l'agglomération et l'expansion (Figure II.1). Il est à mentionner que le liège de mauvaise qualité comprend le liège male, le liège abimé, les rebuts, ...etc.

### II.4.2. Broyage du liège

Cette phase est réalisée au niveau de la meunerie. Son but est de concasser le liège jusqu'à ce qu'il atteigne une taille de grains entre 4 et 16mm, pour qu'il puisse être aggloméré.

Au début, le liège est concassé dans un déchiqueteur comportant des mailles de 45 mm afin d'obtenir un produit d'un calibre de 4 à 50 mm qui se transporte, ensuite, vers un autre broyeur (Figure II.2) qui diminue la taille de ses grains jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur voulue, convenable pour l'agglomération. Celle-ci est entre 4 et 16 mm. Les grains de taille inférieure à 4 mm sont considérés comme poussière de sorte qu'ils sont évacués en dehors du système. Il est à mentionner que cette poussière est inflammable et très dangereuse en cas de contact avec des instruments électriques. Les grains de taille supérieure de 16mm reviennent vers le broyeur pour en diminuer à nouveau la taille jusqu'au calibre voulu.



## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé

**Figure II.1.** Stockage du liège.



**Figure II.2.** Broyeur de liège.

### II.4.3. Séchage

Le séchage des granules humides a pour but de réduire l'humidité du liège, afin d'en faciliter l'agglomération. L'opération se réalise dans un sécheur rotatif. Ce sécheur fonctionne dans une température de 80 °C. On peut laisser les grains du liège plus ou moins longtemps dans le sécheur car le but du séchage est d'en réduire le temps de cuisson.

### II.4.4. Agglomération

L'étape d'agglomération consiste à la formation des blocs du liège en cuisson dans les autoclaves. La cuisson de liège prend 15 min dans une température de 380 °C. La chaleur est d'abord obtenue par une vapeur surchauffée au moyen d'une chaudière (Figure II.3), puis par un surchauffeur.

## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé



**Figure II.3.** Chaudière de la vapeur.

La vapeur transfère la chaleur vers l'autoclave passant par des canaux sous-terrain. Le liège est comprimé pour obtenir la forme de blocs de dimensions  $(320 \times 520 \times 1020) \text{ mm}^3$  tel qu'il est présenté sur la Figure II.4.

L'agglomération s'effectue sans additifs. C'est une auto-agglomération à partir de la résine naturelle présente dans le liège. Cependant, les déchets de cette résine (Figure II.5) présentent vraiment un double problème. Le premier est la pollution de l'air à cause de la fumée chargée de petites particules de la subérine. Le second est technique : en effet, au bout d'un certain temps, la résine s'accumule dans le dispositif d'échappement et finit par en boucher les conduites.

## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé



**Figure II.4.** Blocs du liège.



**Figure II.5.** Déchets de résine naturelle.

## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé

### II.4.5. Refroidissement

Le refroidissement est contrôlé par un dispositif automatique. Le bloc est introduit sous une vanne d'eau chaude (80°C) injectée par des aiguilles minces et sous pression pendant 18 secondes. Ensuite, des plateaux s'écartent, le bloc s'éjecte sur un tapis transporteur où les blocs reçoivent un deuxième refroidissement dans un milieu à température ambiante pendant 72 heures pour éviter l'inflammation des particules qui peut endommager le produit.

### II.4.6. Débitage et ponçage

Le débitage des blocs est semi-automatique. Les blocs sont découpés en plaques par deux scies alternatives à lames horizontales. Les plaques peuvent avoir des épaisseurs différentes suivant le besoin du client ; leur épaisseur est réglable jusqu'à 20mm au minimum (Figure II.6). A la fin de sciage, les plaques sont nettoyées par un procédé de dépoussiérage avec un ponçage par brossage.



**Figure II.6.** Sciage et brossage des plaques.

### II.4.7. Emballage et stockage

L'emballage et le stockage présentent la dernière étape dans la production du liège expansé. Les plaques finies sont emballées, puis elles sont stockées dans des entrepôts avant leur expédition (Figure II.7).

## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé



**Figure II.7.** Plaque finie du liège expansé.

### **II.5. Propriétés mécaniques et physiques du liège expansé**

#### **II.5.1. Propriétés physiques**

Les essais réalisés au niveau du laboratoire de la JLE permettent d'identifier certaines des caractéristiques physiques et géométriques du liège expansé. Le Tableau II.1 les représente.

## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé

Tableau II.1. Propriétés physiques et géométriques des plaques du liège expansé [JLE].

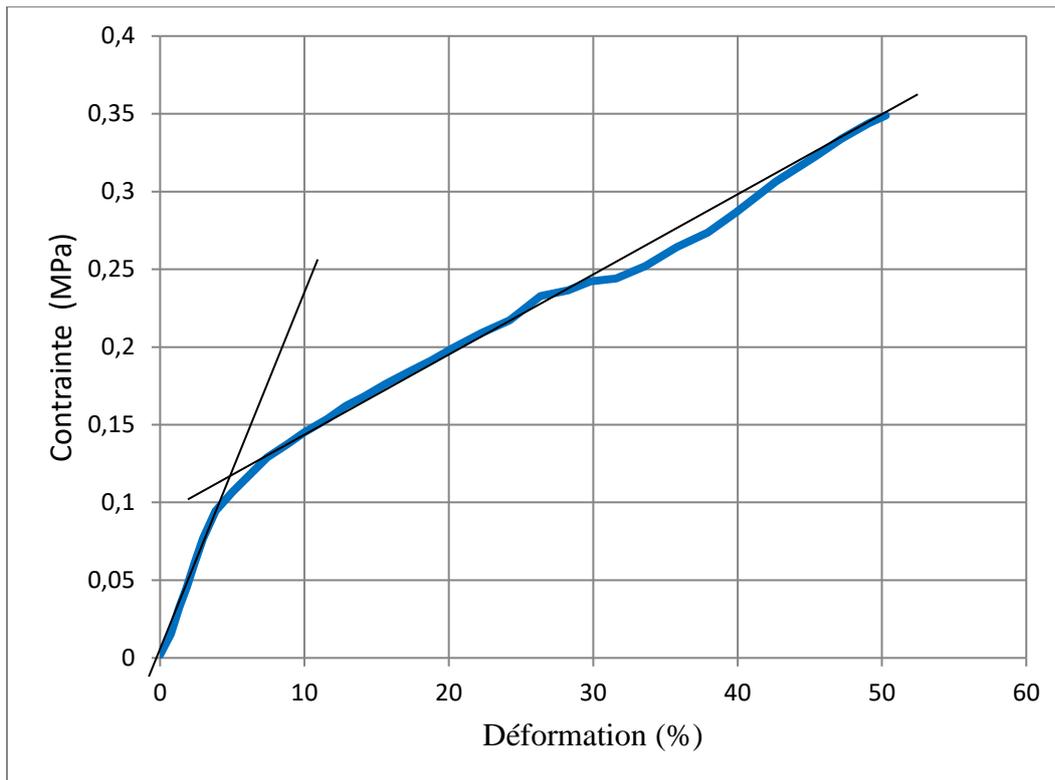
PRODUCTS IDENTIFICATION CARACTERISTIQUES DU PRODUIT		مقاييس المنتج	
Masse volumique apparente	الكتلة الحجمية الظاهرية	Pa	Min= 108 Max= 120 kg/m <sup>3</sup>
Classe de réaction au feu	رد فعل النار	/	E
Classe de tolérance longueur	طول طبقات التسامح	L <sub>1</sub>	±3 mm
Classe de tolérance largeur	عرض طبقات التسامح	W <sub>1</sub>	±2 mm
Classe de tolérance d'épaisseur	سمك طبقات التسامح	T <sub>1</sub>	≤20 mm ≥50 mm ±1 mm
Conductivité thermique	النقلية الحرارية	λ	0.0375 W/(m.k)
Resistance thermique	المقاومة الحرارية	R <sub>D</sub>	1.0667 m <sup>2</sup> .k/w
Compression de sollicitation	ضغط التماس	δ <sub>10</sub>	≥105 k Pa ≈10 k Pa
Absorption d'eau	الإمتصاص المائي	W <sub>v</sub>	Wit<0.45% ≈0.11%
Emission dangereuse des substances	الإنبعاثات الخطيرة للعناصر	/	ABSENCE
Longueur nominale	الطول الرمزي	mm	1000
Largeur nominale	العرض الرمزي	mm	500
Epaisseur nominale	السمك الرمزي	mm	De 20 mm A 300 mm

### II.5.2. Propriétés mécaniques

Il est évident que le liège expansé est un matériau isotrope en raison de l'orientation aléatoire des grains dont il se constitue. De ce fait, les caractéristiques mécaniques sont identiques dans toutes les directions. On peut relever dans le mémoire [21] certaines de ses propriétés mécaniques. Ainsi, suite à des essais de compression réalisés sur des échantillons cubiques du liège expansé produit par l'unité JLE, les résultats obtenus laissent voir des courbes contraintes déformations présentées dans la Figure II.8. On y observe un comportement bilinéaire dans un stade de déformation de 60 %.

Le Tableau II.2 résume les propriétés mécaniques du matériau. Comparées avec les paramètres du liège naturel, le liège expansé possède une faible rigidité. Ceci voit son interprétation dans la faible densité du liège expansé. Or les limites élastiques en déformation sont les mêmes.

## Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé



**Figure II.8.** Comportement du liège expansé en compression [21].

**Tableau II.2.** Confrontation des propriétés mécaniques du liège naturel / expansé [21].

Propriétés	Liège expansé	Liège naturel
Module de Young (MPa)	2.29	20±7 (radial) 13±5 (non radial)
Limite élastique (contrainte MPa)	0.1	0.5 - 0.8
Limite élastique (déformation %)	5	5 - 7

## **Chapitre II : Production et propriétés du liège expansé**

### **II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons jeté la lumière sur le liège expansé. Après sa définition, nous avons présenté l'unité de production du liège expansé. Ensuite, nous avons énuméré les différentes étapes de sa production de la matière première jusqu'à l'emballage et l'expédition du produit. Il s'agit, en effet, d'un matériau industrialisé mais sans aucun additif. Enfin, l'accent est mis sur les propriétés physiques et mécaniques de ce matériau.

## **Chapitre III**

# **Modélisation du comportement du liège en fluage**

### III.1. Introduction

Le présent chapitre est dédié à la modélisation du comportement du liège naturel en fluage. Le modèle rhéologique de Kelvin-Voigt à élasticité instantanée a été privilégié. Les paramètres du modèle ont été identifiés à partir d'un calcul numérique sur Matlab. La dépendance de ces paramètres du chargement a été étudiée. Les résultats du modèle sont comparés avec des résultats expérimentaux dans la littérature.

### III.2. Comportement viscoélastique

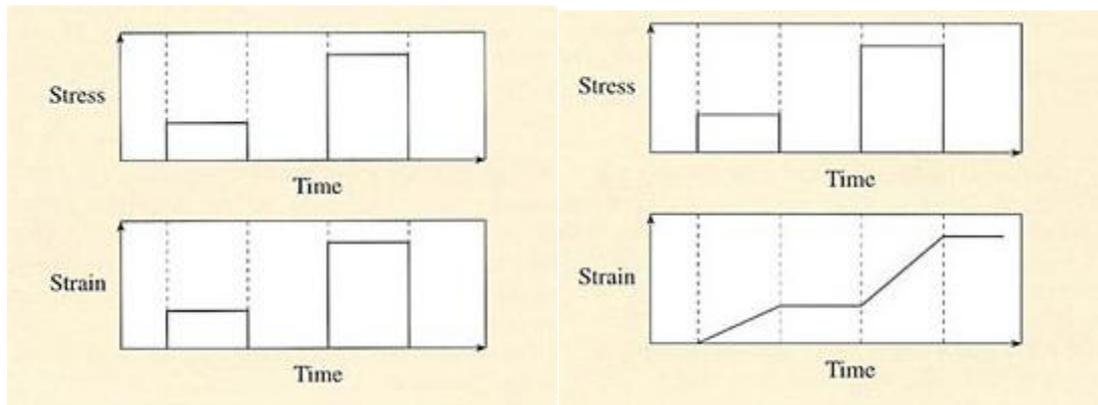
Le comportement viscoélastique est un comportement observé beaucoup plus dans les polymères. Il traduit une réponse élastique (réversible) dépendante du temps. Les polymères étant des matériaux constitués de chaînes macromoléculaires, la dépendance de leur comportement du temps s'explique par le temps nécessaire pour le réarrangement de ces chaînes. Le liège est considéré comme un polymère grâce à sa composition chimique riche en subérine. Les comportements des matériaux élastique (Figure III.1 a) ou visqueux (Figure III.1 b) dépendent de la valeur de la durée de réarrangement des molécules du matériau. On peut utiliser le nombre de Deborah pour identifier si le comportement est élastique ou visqueux. C'est un rapport sans unité du temps de réarrangement des molécules du matériau  $T_{mat}$  et le temps caractéristique de l'essai  $T_{ess}$ .

$$D_c = T_{mat}/T_{ess} \quad (III.1)$$

Dans le cas d'un matériau purement visqueux  $D_c$  tend vers 0 ; pour un  $D_c$  qui tend vers l'infini, le matériau est purement élastique. Pour étudier ce phénomène, le comportement élastique est présenté par un ressort qui subit une contrainte, le ressort va subir une déformation instantanée

## Chapitre III : Modélisation du comportement du liège en fluage

qui est indépendante au temps. Il est à noter que l'énergie de déformation dans ce cas n'est pas dissipée, elle est stockée et permet au ressort de revenir à sa position d'origine. De l'autre côté, le comportement visqueux est modélisé par un dissipateur visqueux tel que la déformation est dépendante du temps, et prend une durée avant de se déformer. Une grande déformation peut être achevée si la contrainte est appliquée lentement de façon à donner une période suffisante aux molécules pour se réarranger. La déformation ne revient pas au point d'origine à cause de la dissipation de l'énergie totale ou partielle généralement sous forme de chaleur[22, 23].



a.

b.

**Figure III.1 a.** Réponse d'un matériau élastique ; b. Réponse d'un matériau visqueux.

### III. 3. Modèles rhéologiques viscoélastiques

Plusieurs modèles sont utilisés pour simuler le phénomène viscoélastique. On en cite les modèles élémentaires de Maxwell et de Kelvin-Voigt, les modèles composés de Zener et de Kelvin-Voigt. Il est à noter que ces modèles sont des modèles idéals avec des niveaux de précision différentes[22, 23]. En enchaînement de ces modèles élémentaires permet d'obtenir des modèles généralisés.

#### III.3.1. Modèle de Maxwell

Le modèle de Maxwell, illustré sur la Figure III.2, simulant la viscoélasticité décrit le matériau comme un ressort (représente le comportement élastique) monté en série avec un amortisseur visqueux (représente le comportement visqueux). Ce modèle impose que la contrainte appliquée sur les deux éléments est la même mais la déformation totale  $\epsilon$  est la somme des deux déformations élastique  $\epsilon_e$  et viscoélastique  $\epsilon_v$ .

### Chapitre III :Modélisation du comportement du liège en fluage

---

Ainsi les contraintes générées respectivement dans le ressort  $\sigma_e$  et l'amortisseur  $\sigma_v$ , sont données par les expressions suivantes :

$$\sigma_e = E \varepsilon_e \quad (\text{III.2})$$

$$\sigma_v = \eta \frac{d\varepsilon_v}{dt} \quad (\text{III.3})$$

$E$  et  $\eta$  représentent respectivement les paramètres du ressort et de l'amortisseur.  $t$  est le temps.

On a d'autre part :

$$\sigma = \sigma_e = \sigma_v \quad (\text{III.4})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_v \quad (\text{III.5})$$

L'équation de la déformation totale est donnée par :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (\text{III.6})$$

La réponse du modèle en contrainte ou en déformation est obtenue après intégration de l'équation (III.6) en respectant les conditions aux limites.

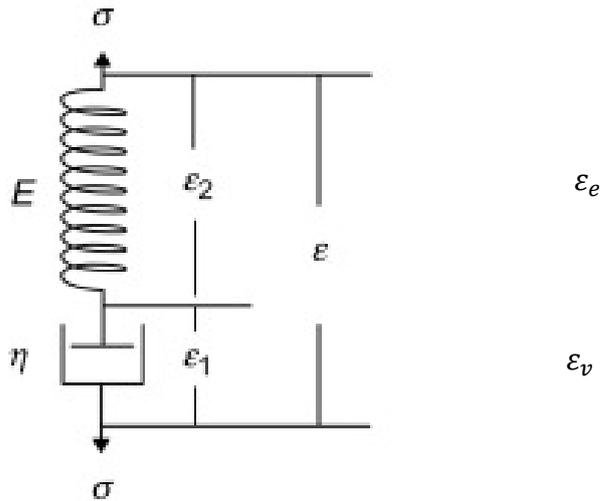
En fluage,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left(1 + \frac{t}{\lambda}\right) \quad (\text{III.7})$$

Avec  $\lambda = \frac{\eta}{E}$

En relaxation :

$$\sigma = \varepsilon \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \quad (\text{III.8})$$



**Figure III.2.** Modèle de Maxwell.

### III.3.2. Modèle de Kelvin-Voigt

C'est un modèle qui décrit le matériau comme un amortisseur visqueux (représente le comportement visqueux) monté en parallèle avec un ressort (représente le comportement élastique) tel qu'il est illustré sur la Figure III.3. Ce modèle impose que la déformation est la même pour les deux éléments tandis que la contrainte totale est la somme des contraintes élémentaires[22-24]. Les contraintes générées respectivement dans le ressort  $\sigma_e$  et  $\sigma_v$  l'amortisseur sont :

$$\sigma_e = E \varepsilon_e \quad (\text{III.9})$$

$$\sigma_v = \eta \frac{d\varepsilon_v}{dt} \quad (\text{III.10})$$

D'autre part,

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (\text{III.11})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e = \varepsilon_v \quad (\text{III.12})$$

L'équation constitutive s'écrit alors :

$$\sigma = E \varepsilon_e + \eta \frac{d\varepsilon_v}{dt} \quad (\text{III.13})$$

En intégrant, on obtient l'équation du modèle en fluage

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) \right) \quad (\text{III.14})$$

Il convient de mentionner que ce modèle présente l'inconvénient de ne pas pouvoir représenter le comportement en relaxation.

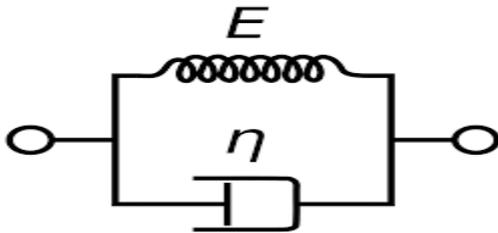


Figure III.3. Modèle de Kelvin-Voigt.

### III.3.3. Modèle de Kelvin-Voigt à élasticité instantanée

Les modèles rhéologiques simples tels que ceux de Maxwell et de Kelvin-Voigt peuvent décrire le comportement viscoélastique des matériaux mais insuffisamment. La nécessité d'autres modèles composés est inévitable. Le solide de Kelvin-Voigt, illustré dans la Figure III.4 est un modèle plus complexe qui consiste à connecter en série un modèle Kelvin-Voigt avec un ressort pour permettre au modèle de subir une déformation élastique instantanée, ce qui est impossible dans le modèle de Kelvin-Voigt (nécessite une force infinie).

La déformation totale est la somme des déformations de chaque élément en série.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{ve} \quad (\text{III.15})$$

D'autre part la contrainte  $\sigma$  dans les deux éléments en série  $\sigma_e$  et  $\sigma_{ve}$  est la même.

$$\sigma = \sigma_e = \sigma_{ve} \quad (\text{III.16})$$

$E_K$

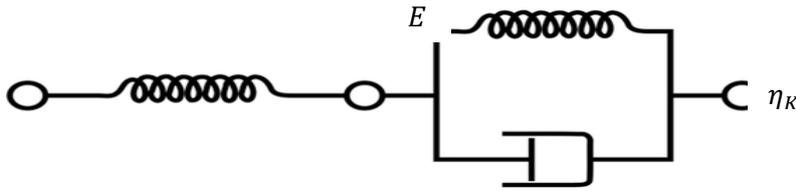


Figure III.4. Solide de Kelvin-Voigt.

L'équation qui relie la contrainte avec la déformation est donnée par l'équation différentielle linéaire suivante :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_K} \left(1 + \frac{E_K}{E}\right) - \frac{E_K}{\eta_K} \varepsilon \quad (\text{III.17})$$

La solution de cette équation différentielle sous une contrainte constante  $\sigma = \sigma_0$  permet de représenter la déformation comme étant une fonction du temps [23].

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t}\right) \quad (\text{III.18})$$

Au moment de l'application de la contrainte, le ressort se déforme immédiatement et quand la contrainte est annulée, le ressort revient à sa position d'origine. Par contre, le deuxième élément (modèle de Kelvin-Voigt) subit une déformation retardée en raison de la présence de l'élément visqueux (amortisseur).

Dans le cas où la contrainte est annulée, la déformation retardée est rétablie exponentiellement jusqu'à l'état initial pour de longues durées (Figure III.5).

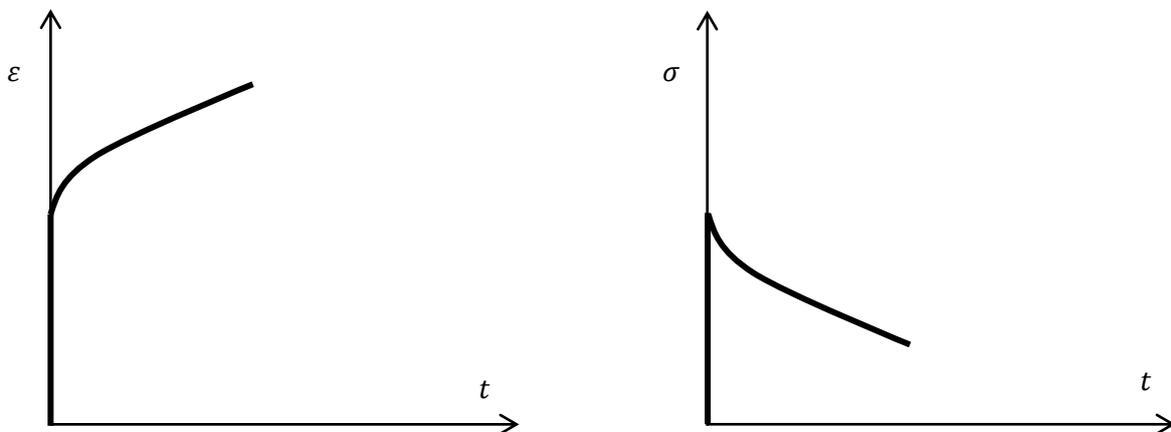


Figure III.5. Courbes de déformation (à gauche) et de contrainte (à droite) par rapport au temps.

## Chapitre III :Modélisation du comportement du liège en fluage

---

Dans l'essai de relaxation, en appliquant une déformation  $\varepsilon_0$  maintenue constante, la contrainte diminue exponentiellement avec le temps jusqu'à une valeur d'équilibre. Elle s'exprime par :

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 \left( \frac{E_K}{E_K + E} + \frac{E}{E_K + E} e^{-\frac{E_K t}{\eta K}} \right) \quad (\text{III.19})$$

Ce modèle donne une bonne représentation du comportement du matériau aussi bien en fluage qu'en relaxation mais avec une recouvrance totale de la déformation, chose qui ne correspond pas aux matériaux réels [23].

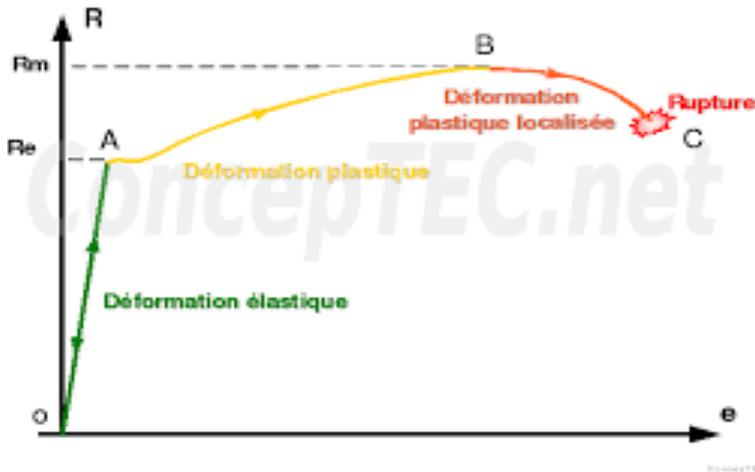
Il est à noter qu'il existe d'autres modèles avec possibilité de connecter une infinité d'éléments mais les modèles à trois ou à quatre éléments sont souvent suffisants pour une bonne prédiction du comportement des matériaux viscoélastiques.

### II.4. Essais mécaniques

Les essais mécaniques ont pour objectif d'identifier le comportement des matériaux dans un souci de dimensionnement et d'utilisation pertinemment dans les machines et les structures. Il existe plusieurs types d'essais mécaniques.

#### III.4.1. Essai de traction

L'essai de traction est l'essai le plus couramment utilisé pour identifier les propriétés mécaniques des matériaux. Il consiste à solliciter des éprouvettes cylindriques à section circulaire ou rectangulaire en traction progressivement jusqu'à la rupture du matériau (Figure III. 6)

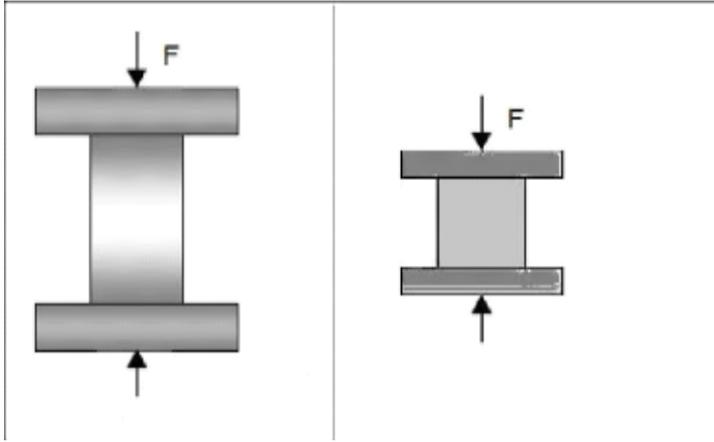


**Figure III.6.** Courbe typique contrainte-déformation.

La courbe typique de traction peut être divisée en différents domaines. Allant du point d'origine jusqu'au point A c'est le domaine élastique ou la déformation est linéaire réversible. Le point A représente la limite d'élasticité du matériau. Le domaine allant de A jusqu'à C est le domaine plastique ou le matériau subit une déformation plastique (permanente) non linéaire. Le point B et C représentent respectivement la contrainte maximale et la contrainte de rupture [25].

### III.4.2. Essai de compression

L'essai de compression mesure la résistance à la compression d'un matériau en respectant les normes de protocole. L'essai de compression est semblable à celui de traction sauf que la charge est appliquée dans le sens inverse. Ainsi, on y observe que le matériau s'élargit latéralement en fonction du module de Poisson du matériau avec une diminution de la longueur de l'échantillon (Figure III.7) [25].

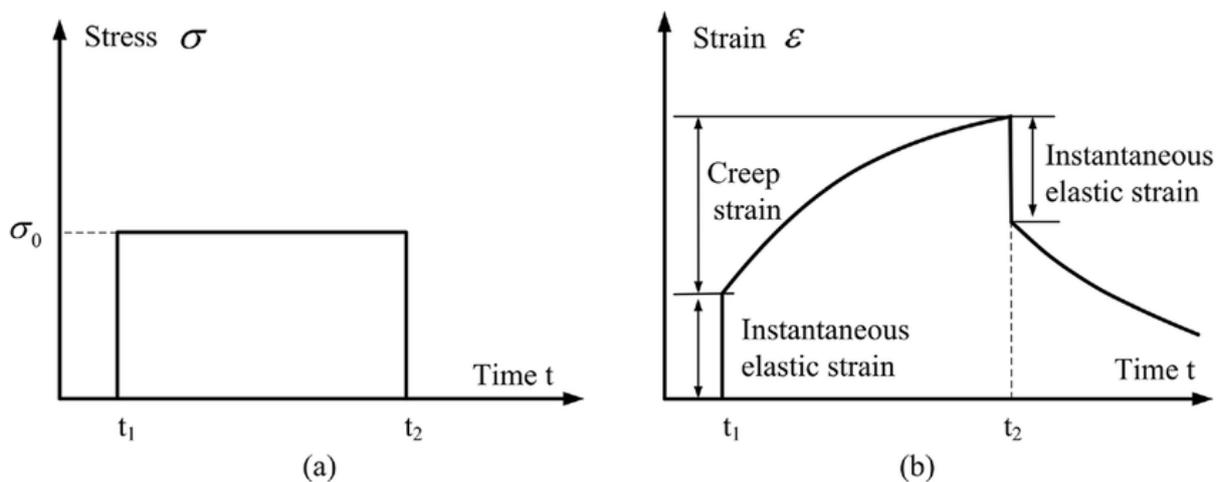


**Figure III.7.** Déformation de l'éprouvette en compression.

L'essai de compression est trop important pour notre travail car le liège est généralement utilisé dans des domaines où il est sollicité en compression tels que la bouchonnerie, les semelles et les tapis.

### III.4.3. Essai du fluage

L'essai de fluage consiste à appliquer une contrainte constante sur le matériau pour une durée de temps finie et calculer la déformation qui évolue au cours du temps. La Figure III.8 représente l'évolution de la déformation d'un matériau viscoélastique qui subit une contrainte constante pour une période finie [26].



**Figure III.8.** Contrainte et déformation dans un essai de fluage (modèle de Maxwell)[26].

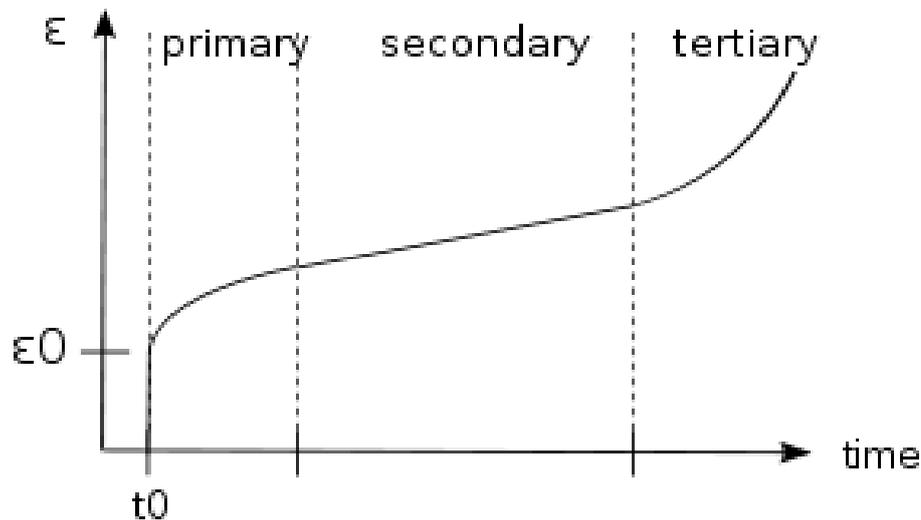
On observe que la déformation augmente rapidement au moment d'application de la contrainte due à la réponse instantanée du ressort puis elle évolue d'une façon non linéaire avec le temps

## Chapitre III :Modélisation du comportement du liège en fluage

(réponse d'amortisseur) jusqu'à l'annulation de la contrainte. Alors, le matériau se recouvre à sa position d'équilibre mais tout en gardant une déformation permanente.

Lors d'un essai mécanique de fluage en traction réalisé avec une éprouvette soumise à une contrainte et une température constantes (Figure III.9), l'allongement est mesuré en fonction du temps. La courbe ainsi obtenue présente trois différentes zones de comportements différents : il s'agit des trois modes de fluage.

- fluage primaire, déformation rapide ;
- fluage secondaire, avec taux (vitesse) de déformation approximativement constant;
- fluage tertiaire, endommagement final de l'éprouvette.

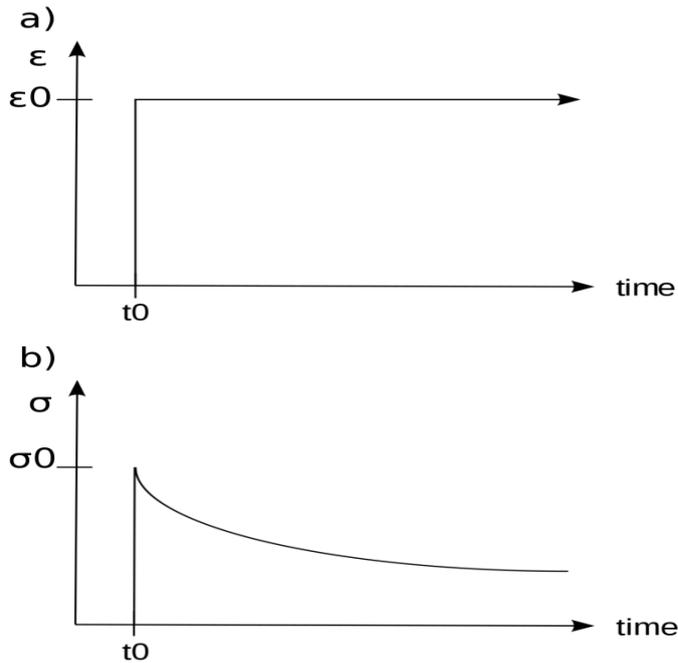


**Figure III.9.** Modes de fluage.

Si la contrainte n'est pas retirée, le matériau se déforme jusqu'à la rupture. Le modèle de Kelvin-Voigt est le plus approprié pour la simulation de l'essai du fluage[26].

### III.4.4. Essai de relaxation de la contrainte

L'essai de relaxation de la contrainte consiste à appliquer une déformation constante instantanément sur un matériau viscoélastique et on calcule la variation de la contrainte nécessaire en maintenant cette déformation constante. Les essais montrent que la contrainte diminue au cours du temps. L'essai de relaxation peut être simulé en utilisant le modèle rhéologique de Maxwell (Figure III.10) [22-24].



**Figure III.10.** Graphes des contrainte et déformation en relaxation[22-24].

### III.5. Modélisation du fluage du liège naturel

Le fluage du liège est un phénomène connu par sa complexité. L'objectif de ce chapitre est d'obtenir un modèle mathématique qui peut représenter le phénomène physique dans un souci de prédire la réponse du matériau en fluage. Il s'agit de minimiser l'écart entre les enregistrements expérimentaux et les résultats du modèle. Le problème mathématique étant compliqué, on fait recours aux calculs numériques. Nous avons privilégié le logiciel Matlab.

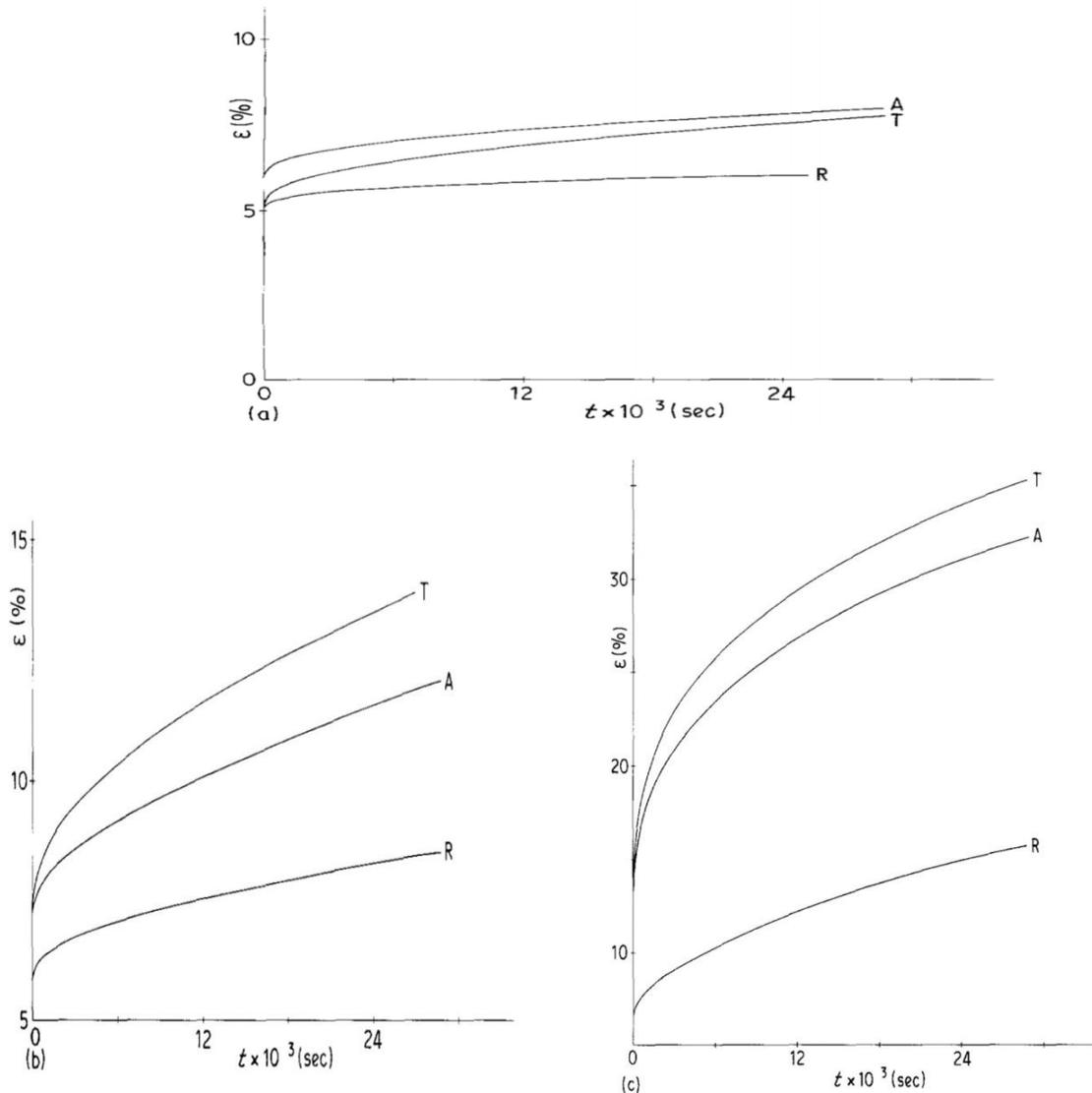
#### III.5.1. Fluage du liège naturel

Les résultats exploités dans ce travail correspondent aux essais de fluage réalisés par l'auteur de l'article [27]. Le matériau utilisé est un liège naturel de bonne qualité. L'essai appliqué est une compression en fluage dans les trois directions sous température ambiante. Les contraintes appliquées sont (0.36, 0.55, 0.77 et 1.72) MPa pendant une durée de 8 heures pour chaque essai de fluage.

Les différentes formes et pentes des courbes obtenues indiquent que le fluage du liège est un phénomène compliqué et ne peut pas être décrit par des équations simples, peut-être à cause

### Chapitre III :Modélisation du comportement du liège en fluage

de la présence de plusieurs mécanismes de déformation. En effet, le liège est un polymère naturel et sa microstructure est fort compliquée. La figure III. 11 représente les résultats des essais de compression en fluage sous différentes contraintes dans les directions orthogonales. Dans notre travail nous sommes intéressés uniquement aux courbes a,,b et c dans la direction radiale et non radiale (tangentielle ou axiale) pour l'analyse. Les résultats graphiques sont transformés en données numériques.



**Figure III.11.** Fluage du liège dans les trois direction radiale, tangentielle et axiale pour les contraintes : (a) 0.36 MPa , (b) 0.55 MPa , (c) 0.77 MPa[27].

### III.5.2. Modèle pris en compte

Les modèles rhéologiques sont nombreux et chacun peut décrire un certain type de phénomènes mieux que les autres. Comme il est question d'un essai de fluage, nous avons proposé le modèle de Kelvin-Voigt à élasticité instantanée. Ce modèle convient aussi bien au fluage qu'à la relaxation. Il est souvent adopté pour représenter le comportement viscoélastique des polymères [23]. Le liège en fait partie.

### III.5.3. Identification des paramètres

Le modèle de Kelvin-Voigt à élasticité instantanée est représenté par un mécanisme à trois paramètres. Pour identifier ces paramètres, on établit une fonction  $F = 0$  qui met l'hypothèse que les deux déformations du modèle et expérimental sont égaux avec  $F$  s'écrit :

$$F = \varepsilon_{exp} - \varepsilon_{mod}$$

Où  $\varepsilon_{exp}$  et  $\varepsilon_{mod}$  représentent respectivement la déformation expérimentale et la déformation donnée par le modèle.

Ainsi, en remplaçant la déformation donnée par le modèle par sa formule, on obtient :

$$F = \varepsilon_{exp} - \left( \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{E_K} \left( 1 - e^{-\frac{E_K t}{\eta_K}} \right) \right) \quad (III.20)$$

$E$ ,  $E_k$  et  $\eta_K$  sont les paramètres à identifier.  $\sigma_0$  est la contrainte appliquée.

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé la fonction *fsolve* sous Matlab. Cette fonction est utilisée pour résoudre ce genre d'équations. Elle permet de résoudre un système de  $N$  (variable) et  $N$  (équations) et cherche toujours la meilleure solution possible (solution optimale).

La structure du programme pour l'identification des paramètres est en Annexe.

### III.6. Analyse des résultats

Les paramètres identifiés pour les trois différents chargements et dans les deux directions radiale et non radiale sont présentés dans le Tableau III.1.

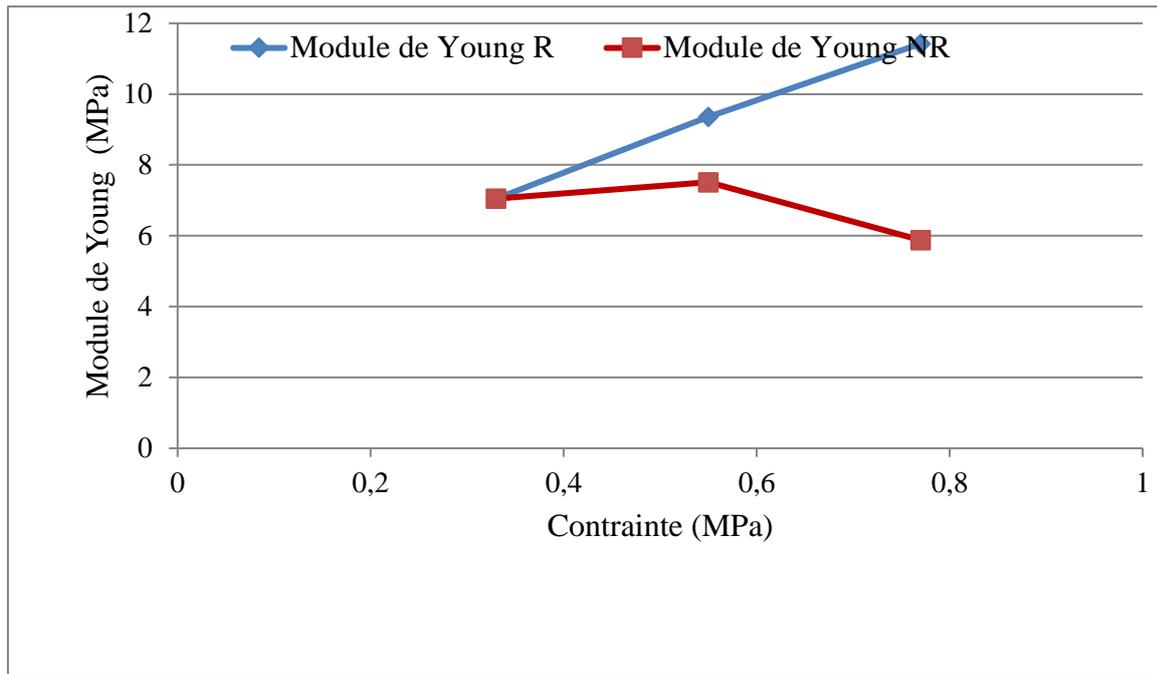
## Chapitre III :Modélisation du comportement du liège en fluage

**Tableau III.1.** Paramètres du modèle identifiés.

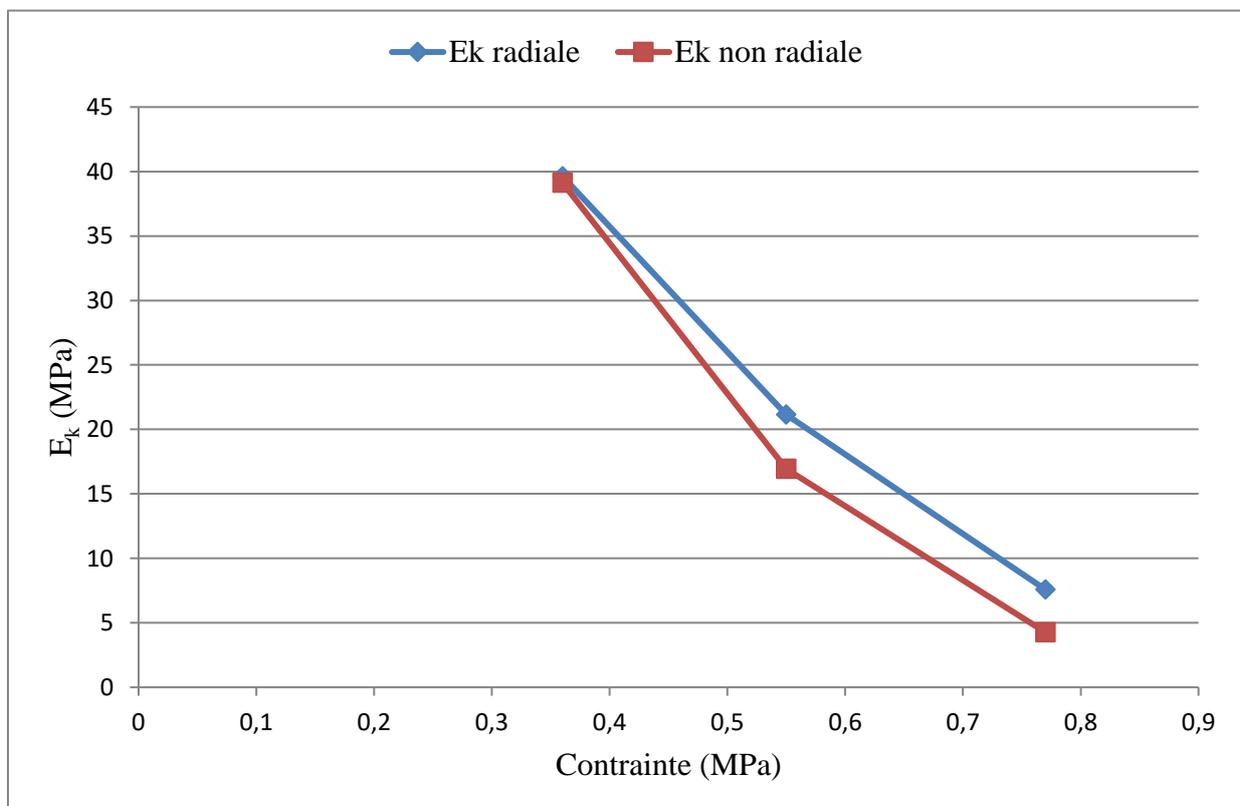
Contrainte (MPa)	Direction	E (MPa)	E <sub>k</sub> (MPa)	η <sub>K</sub> (MPa.min)
0,36	R	7,045	39,623	0,233
	NR	7,045	39,119	0,299
0,55	R	9,353	21,155	0,231
	NR	7,513	16,952	0,1
0,77	R	11,424	7,582	0,11
	NR	5,84	4,271	0,0289

### III.6.1. Dépendance des paramètres du chargement

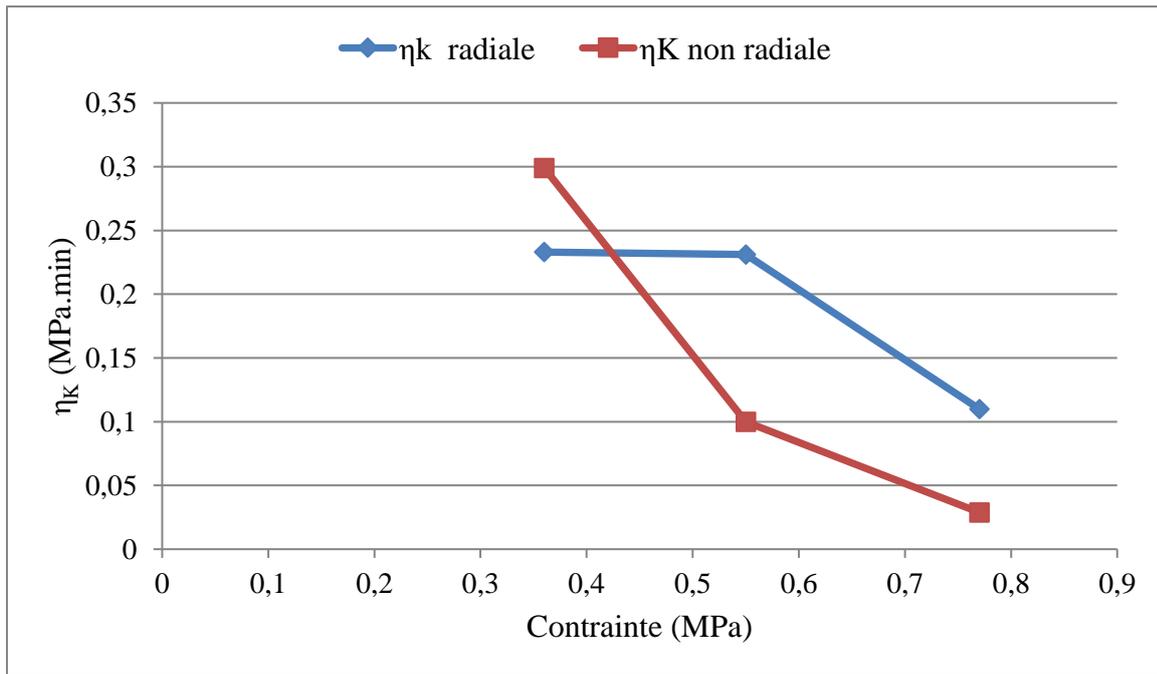
Les figures ci-dessous montrent la dépendance des trois paramètres identifiés de la contrainte appliquée. On remarque sur la Figure III.12 que le module de Young augmente avec l'augmentation de la contrainte dans la direction radiale. Ceci est en parfait accord avec le phénomène d'augmentation de la rigidité des polymères avec l'augmentation de la vitesse de sollicitation. Cependant, on constate une diminution de ce module dans la direction non radiale uniquement au chargement 0,77 MPa. Ceci peut résulter d'un défaut dans le matériau : en effet le liège possède une densité très variable et une porosité irrégulière.



**Figure III.12.** Dépendance du module de Young du chargement. Pour ce qui est des paramètres viscoélastiques  $E_k$  (Figure III. 13) et  $\eta_k$  (Figure III. 14), on peut noter une diminution avec l'augmentation du chargement. Ceci explique que la viscosité du matériau diminue avec l'augmentation de la sollicitation.



**Figure III.13.** Dépendance du paramètre  $E_k$  du chargement.



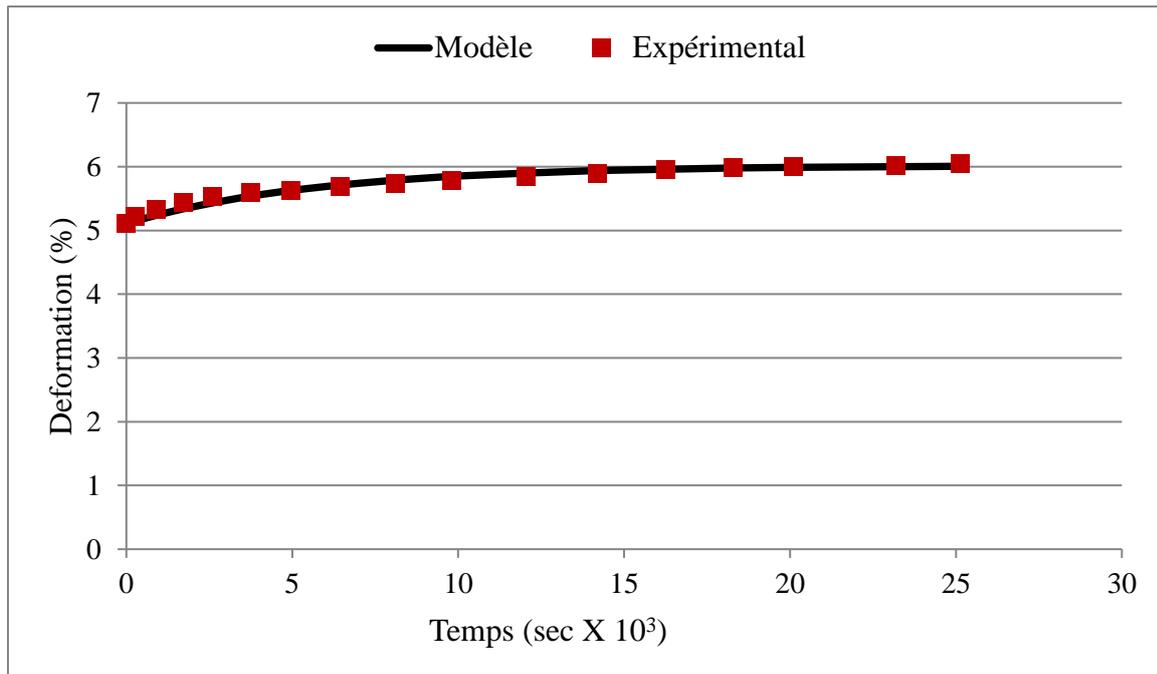
**Figure III.14.** Dépendance du paramètre  $\eta_k$  du chargement.

### III.6.2. Comparaison des résultats expérimental / modèle

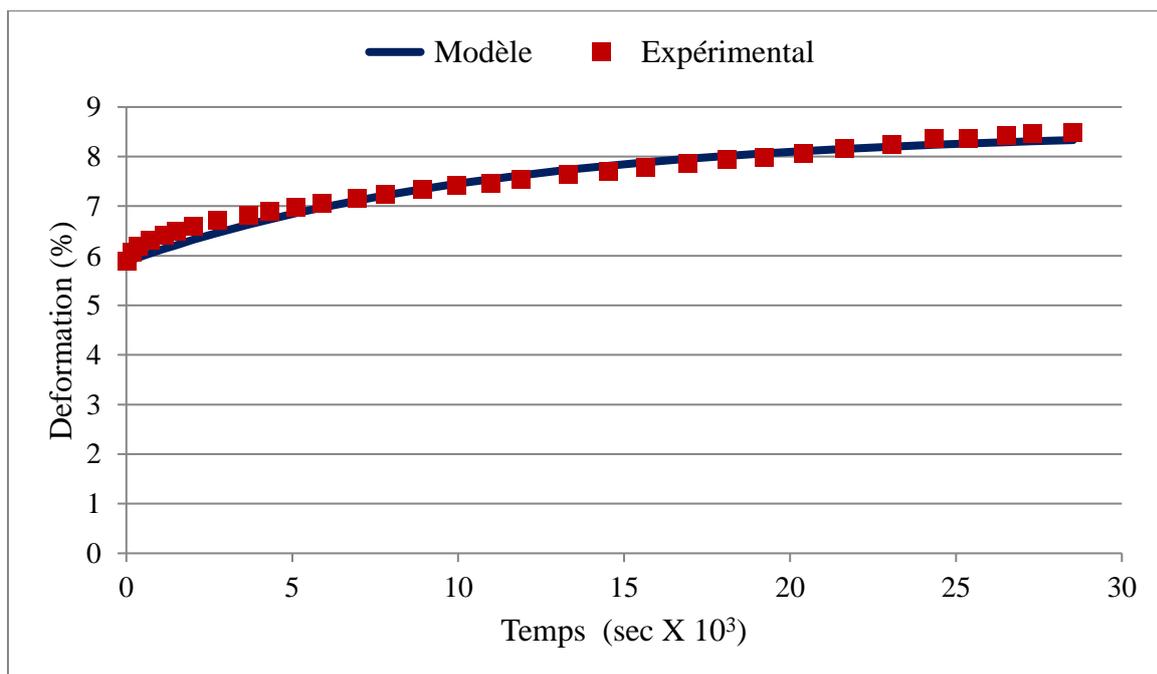
Les paramètres étant identifiés, ceux-ci sont injectés dans l'équation constitutive du modèle de Kelvin-Voigt à élasticité instantanée et les courbes de l'évolution de la déformation en fonction du temps sont tracées et comparées avec celles de l'expérimental.

Dans la direction radiale, nous remarquons sur la Figure III.15 une très bonne cohérence entre les enregistrements expérimentaux et les résultats du modèle dans tous les stades du fluage. Le modèle adopté est donc susceptible de simuler le comportement du liège naturel en fluage.

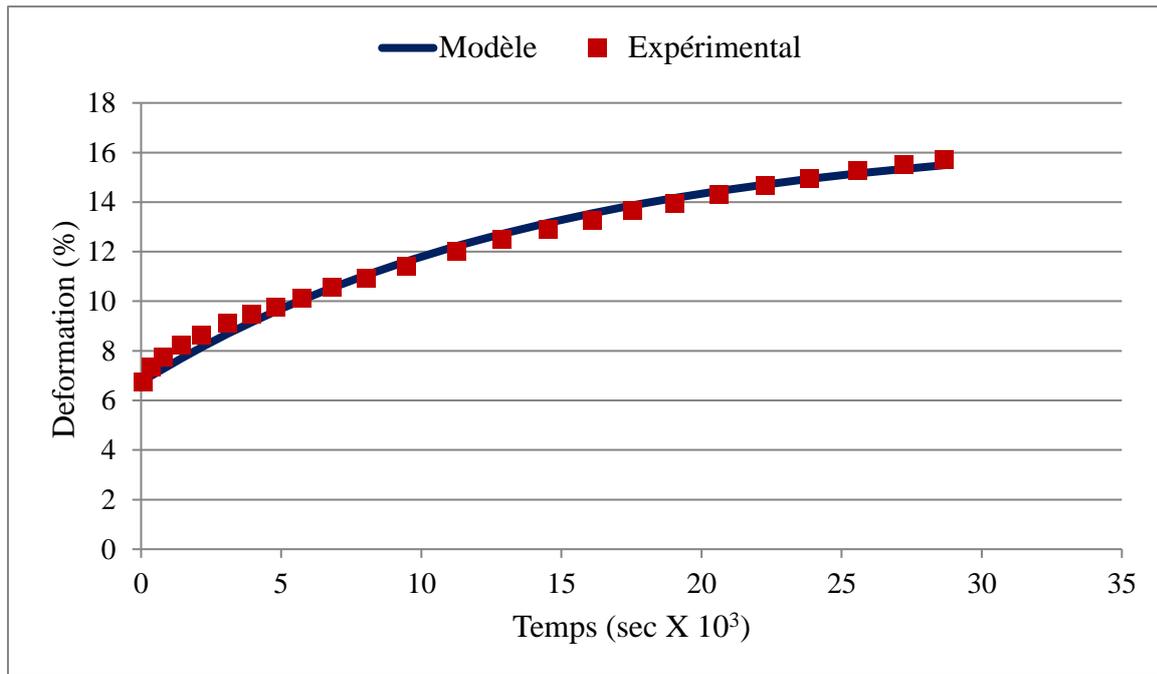
### Chapitre III :Modélisation du comportement du liège en fluage



a.



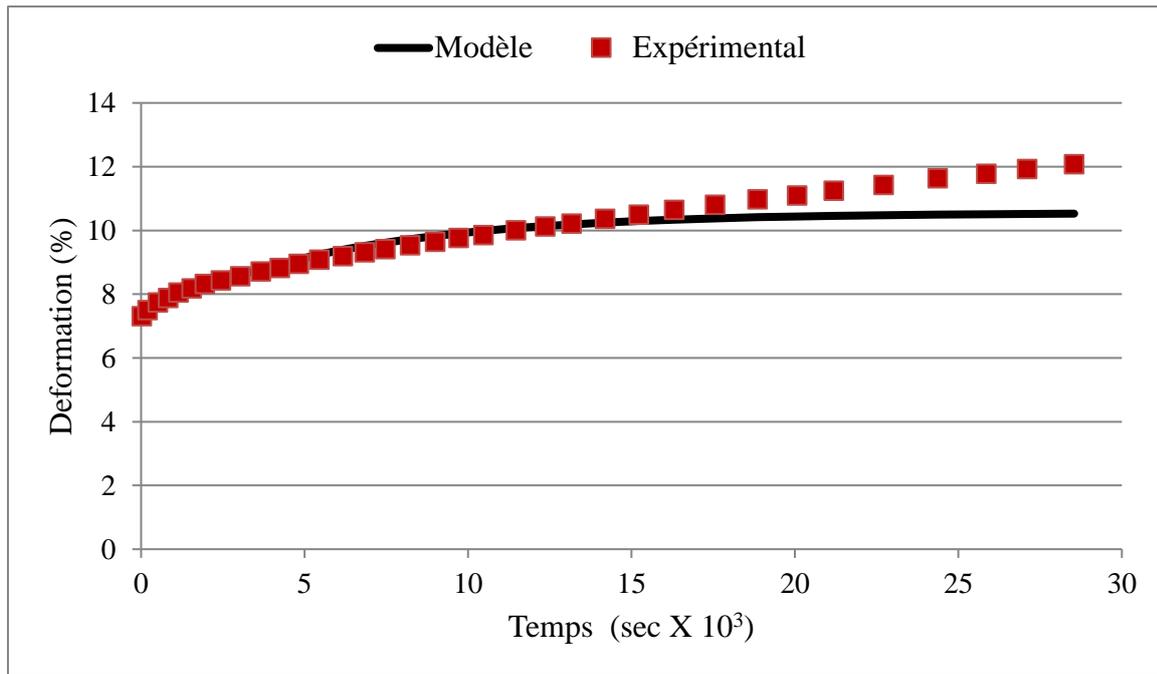
b.



c.

**Figure III.15.** Comparaison des résultats de la déformation modèle/expérimental dans la direction radiale pour les trois chargements : a. (0.33 MPa) ; b. (0.55 MPa) ; c. (0.77 MPa).

Dans la direction non radiale, la confrontation des résultats modèle/expérimental s'avère insatisfaisante pour les trois chargements différents. La Figure III.16 en illustre cette incohérence. Il serait judicieux de prévoir d'autres modèles ou d'ajouter d'autres éléments au modèle adopté dans ce travail.



**Figure III.16.** Comparaison des résultats de la déformation modèle/expérimental dans la direction non radiale pour le chargement b. (0.55 MPa).

### III.7. Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous avons proposé un modèle à trois paramètres pour représenter le comportement du liège naturel en fluage. Le modèle est celui de Kelvin-Voigt à élasticité instantanée dont les paramètres ont été identifiés au moyen d'une minimisation de l'écart entre les données expérimentales repérées dans la littérature et les résultats du modèle. Il a été conclu que les paramètres du modèle dépendent remarquablement de la contrainte appliquée de façon que la rigidité du liège augmente avec l'augmentation de la contrainte appliquée. Enfin, la comparaison des résultats modèle/expérimental révèle une bonne cohérence dans la direction radiale.

## **Chapitre IV**

# **Etude expérimentale de la recouvrance du liège**

### IV.1. Introduction

Ce chapitre s'intéresse à l'étude expérimentale de la recouvrance du liège naturel et du liège expansé. Nous étudierons l'effet du temps sur la recouvrance du liège naturel dans deux directions différentes (radiale et non radiale) et du liège expansé à partir des essais simples réalisés sur des échantillons cubiques de 20 mm de côté. Ainsi, la cinétique de la recouvrance du liège est établie et discutée. Le but de ces essais consiste à la connaissance du comportement du liège en recouvrance suite à une déformation très importante.

### IV.2. Elaboration des échantillons

Les matériaux objets de cette étude (liège naturel et liège expansé) sont obtenus à partir de l'unité de la production du liège expansé JLE sise à Jijel sous formes des plaques. La plaque du liège expansé a été coupée directement en cubes de 20 mm de côté. Par ailleurs, celle du liège naturel est passée d'abord par une étape d'enlèvement de la couche externe (couche rugueuse), puis la plaque est immergée dans de l'eau bouillante pendant 2 heures afin de la débarrasser d'éventuelles impuretés et enfin elle est séchée à l'air sec. A son tour, la plaque du liège naturel est coupée en cubes de 20 mm de côté dans deux directions différentes (radiale et non radiale) (Figure IV.1). Tous les échantillons sont pesés à l'aide d'une balance de haute précision afin d'en déterminer leurs masses volumiques. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau IV.1. On peut y remarquer que le liège naturel possède une masse volumique plus grande que celle du liège expansé.

**Tableau IV.1.** Masse volumique et longueur initiale des échantillons.

Echantillon	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Longueur initiale(mm)
Naturel Radial	0,18 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	20.4 <sup>+0.3</sup> <sub>-0.3</sub>
Naturel Non Radial	0,18 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.02</sub>	20.4 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.3</sub>
Expansé	0,11 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.02</sub>	20,5 <sup>+0.7</sup> <sub>-0.3</sub>



**Figure IV.1.** Échantillons du liège naturel et expansé.

### IV.3. Expérimentation

Les essais mécaniques ont pour objectif d'étudier le comportement et les caractéristiques mécaniques des matériaux. Ils servent donc de fournir des données utiles pour le dimensionnement, la simulation des structures et de comprendre le comportement du matériau sous différentes sollicitations externes. Pour les matériaux viscoélastiques, les essais de fluage et de relaxation sont privilégiés car ils permettent de mettre en évidence l'effet du temps sur le comportement mécanique du matériau. L'essai de fluage consiste à appliquer une contrainte constante sur le matériau pour une durée de temps finie et calculer la déformation qui évolue au cours du temps. Par ailleurs, l'essai de relaxation consiste à appliquer une déformation constante instantanément sur un matériau et calculer la variation de la contrainte nécessaire en maintenant cette déformation constante.

Les essais du fluage et de relaxation sont respectivement complétés par les essais de recouvrance et d'effacement.

#### IV.3.1. Essai de recouvrance

L'essai de recouvrance consiste à imposer une sollicitation bien déterminée suivie d'une décharge instantanée. Ainsi le matériau récupère progressivement sa déformation. La recouvrance peut être totale si la déformation s'annule après un certain temps : il n'y a donc pas

## Chapitre IV : Etude expérimentale de la recouvrance du liège

de déformation permanente dans ce cas. D'après les travaux de la référence [19], la recouvrance du liège naturel n'est totale qu'après 20 jours après une déformation de 30 % tandis qu'elle n'est pas totale pour une déformation de 80 %.

### IV.3.2. Protocole expérimental

Dans cette étude, nous avons privilégié des essais de recouvrance en compression. Ainsi, nous avons imposé un déplacement en compression de 16 mm correspondant à une déformation nominale de 80 % sur les échantillons cubiques du liège naturel et du liège expansé. La sollicitation étant annulée instantanément, des mesures de déplacements sont réalisés au cours du temps pendant 24 heures au moyen d'un pied à coulisse et d'un chronomètre.

Il est à noter que cinq échantillons du liège expansé sont testés dans des directions aléatoires tandis que 10 échantillons du liège naturel sont testés dont cinq dans la direction radiale et cinq autres dans la direction non radiale.



Figure. IV.2. Calcul des déplacements des échantillons.

### IV.4. Résultats et discussion

Dans cette partie nous nous intéressons à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus à partir des essais réalisés sur le liège naturel dans les deux directions précédemment mentionnées et le liège expansé. Les déplacements  $u$  étant mesurés au cours du temps, nous pouvons déterminer la recouvrance de la déformation  $\varepsilon_r$  au cours du temps à partir de l'équation suivante :

$$\varepsilon_r(t) = \frac{L(t) - L_0}{L_0} = \frac{u(t)}{L_0} \quad (\text{IV.1})$$

Où  $L_0$  et  $L$  sont respectivement la longueur initiale (sans déformation) et actuelle (après déformation) de l'échantillon dans la direction du chargement.

Il est évident que la déformation et la recouvrance en compression sont négatives dans la direction du chargement. Cependant, elles sont positives dans les directions orthogonales au chargement avec une très faible déformation et négligeable parfois. En effet, le liège possède un coefficient de poisson très faible.

#### IV .4.1. Recouvrance du liège naturel

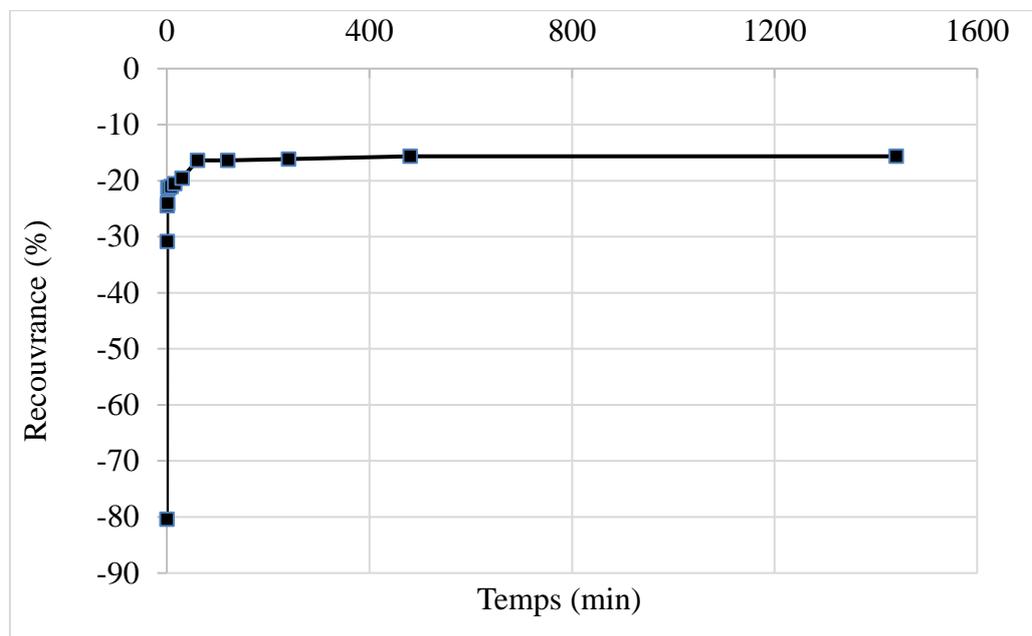
La Figure IV.3 présentent une courbe typique de recouvrance en compression. Les résultats de l'essai montrent que la recouvrance des échantillons du liège naturel comprimés jusqu'à 80 % de déformation peut être divisée en trois domaines principaux.

Le premier domaine présente une recouvrance instantanée juste après la décharge où l'échantillon récupère une partie très importante de sa déformation. Dans le deuxième domaine, le matériau continue à se recouvrir avec une allure transitoire au cours du temps mais plus lentement jusqu'au troisième domaine où le taux de recouvrance est presque nul. La pente de la courbe tend vers zéro (horizontale) dans cette partie et ainsi la recouvrance s'arrête à une valeur limite de -16 % de déformation dans notre étude pour le liège naturel dans les deux directions radiale et non radiale.

Le tableau IV.2 présente une confrontation des recouvrances déterminées en fonction du temps pendant 24 heures à partir des essais réalisés dans les directions radiale et non radiale. On y remarque une recouvrance quasi-indépendante de la direction du chargement si ce n'est celle évaluée à ( $t = 0.25 \text{ min}$ ) où la recouvrance dans la direction non radiale est plus grande que

## Chapitre IV : Etude expérimentale de la recouvrance du liège

celle recouvrée dans la direction radiale. Ceci peut s'expliquer par une certaine résistance dans la direction radiale étant la plus rigide. En outre, une faible augmentation de la recouvrance dans la direction radiale est considérée.



**Figure IV.3.** Domaines de la recouvrance du liège naturel.

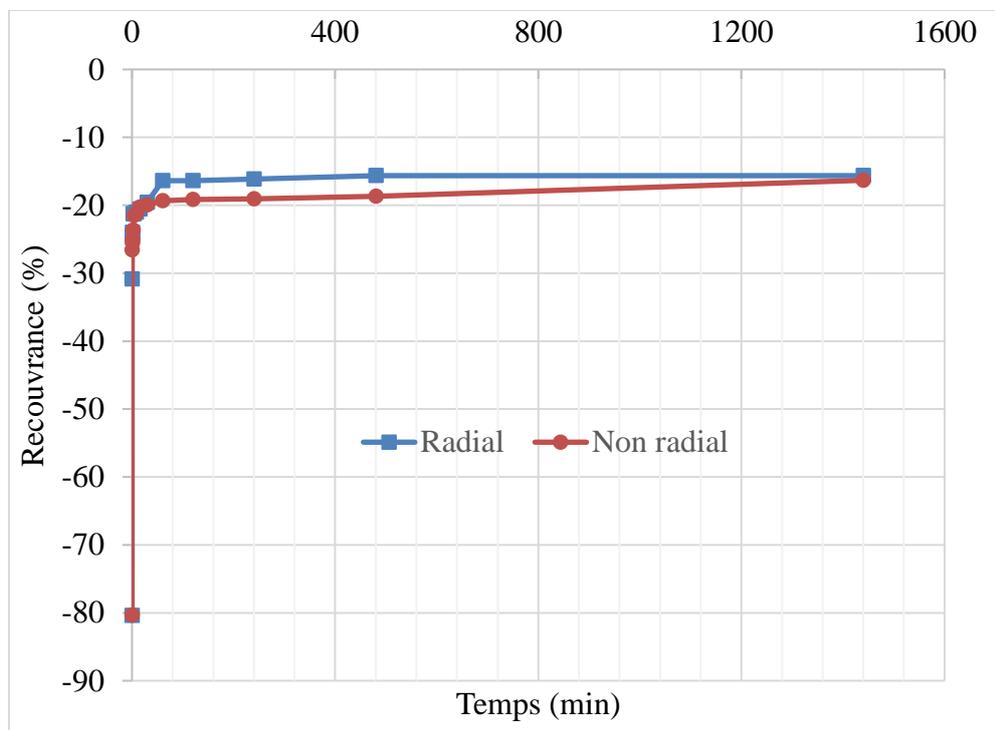
**Tableau. IV.2.** Recouvrance d'échantillon dans la direction radiale et non radiale.

Temps (min)	Recouvrance de déformation (%)	
	Radial	Non radial
0	-80,38254	-80,3343166
0.01	-39.70588	-36.2254
0.25	-30,84845	-26,59783
0.5	-24,47278	-25,56538
1	-23,98234	-25,07374
2	-21,28494	-23,64798
4	-21,28494	-21,48475
8	-21,03972	-21,23893
15	-20,54928	-20,30481
30	-19,56841	-19,96066
60	-16,38057	-19,32153
120	-16,38057	-19,17404

## Chapitre IV : Etude expérimentale de la recouvrance du liège

240	-16,13536	-19,07571
480	-15,64492	-18,68239
1440	-15,64492	-16,32251

La Figure IV.4 présente les courbes comparatives de la recouvrance du liège naturel dans les directions radiale/non radiale. Nous pouvons y repérer une faible augmentation de la recouvrance dans la direction radiale à partir de la fin du palier transitoire jusqu'à la fin de la courbe correspondant à 24 heures de temps où les recouvrances dans les directions radiale/non radiale coïncident.



**Figure IV.4.** Courbes comparatives des recouvrances du liège naturel dans les directions radiale/non radiale.

### IV.4.2. Recouvrance du liège expansé

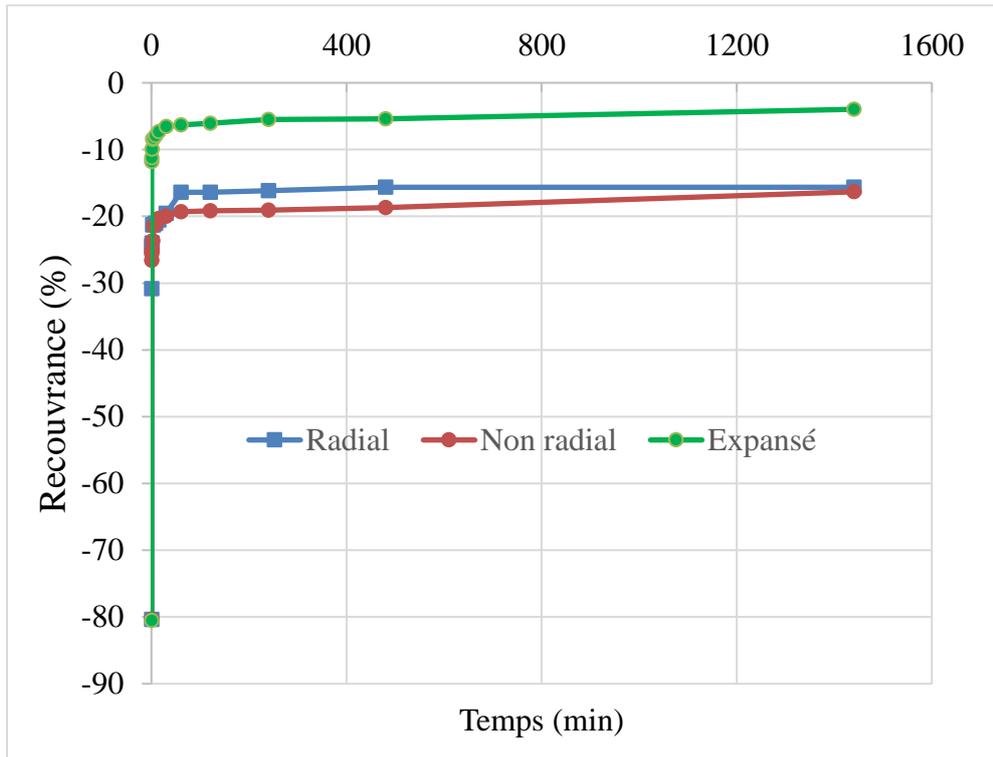
En ce qui concerne le liège expansé, l'allure de la courbe de la recouvrance n'est pas trop différente de celle du liège naturel. Cependant sur le plan quantitatif, la différence est importante. En effet, la recouvrance évaluée à 24 heures de temps est presque totale. Seule une déformation de 3.9 % n'est pas recouvrée après une déformation totale de 80 %.

La Figure IV.5 montre la cinétique de la recouvrance du liège naturel dans les direction radiale/non radiale et du liège expansé. Après une recouvrance instantanée importante du liège expansé,

## Chapitre IV : Etude expérimentale de la recouvrance du liège

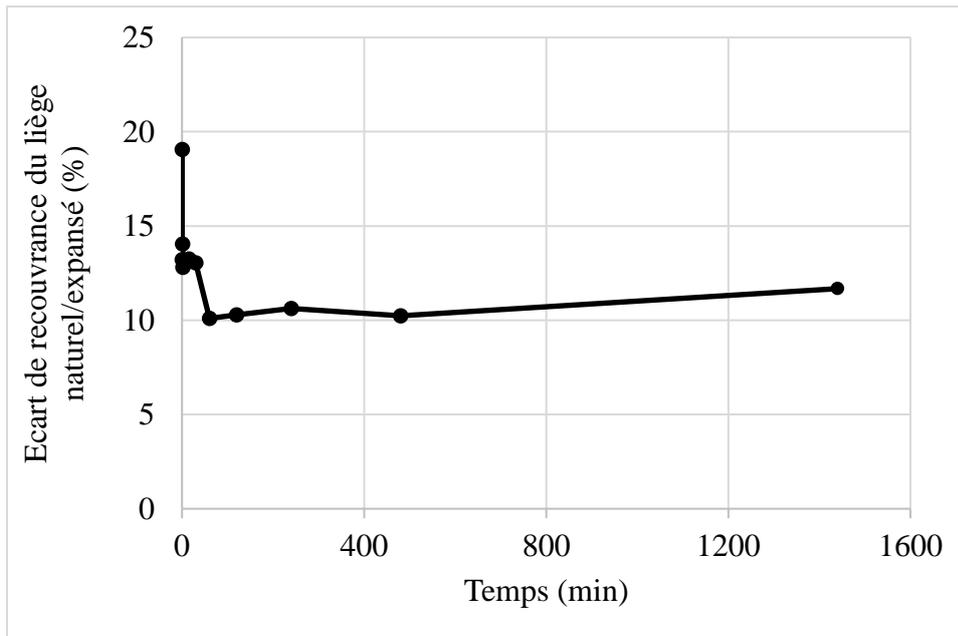
un domaine transitoire apparaît avec une augmentation non linéaire de la vitesse de recouvrance qui finit par un stade linéaire à faible pente.

En effet, le liège expansé subit un traitement thermique et se comprime dans des autoclaves. Ainsi, il perd certains de ses composants et de ses propriétés mécaniques d'où sa faible densité. Son importante recouvrance résulte probablement de la fusion de la subérine qui prend place désormais entre les grains et en assure la liaison.



**Figure. IV.5.** Courbes comparatives des recouvrances du liège naturel dans les direction radiale/ non radiale et du liège expansé.

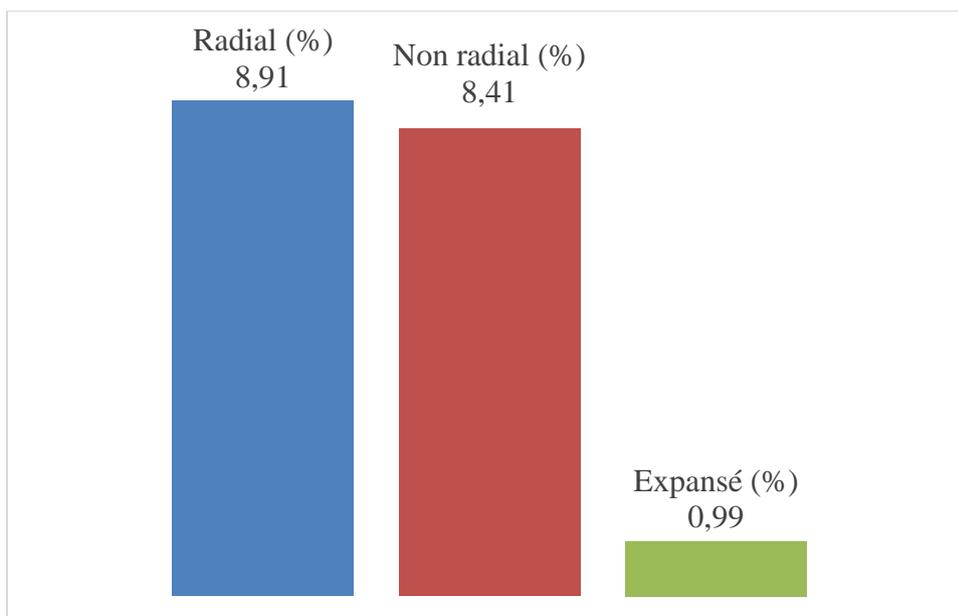
Pour suivre l'écart entre la recouvrance du liège naturel et du liège expansé, on se rapporte à la Figure IV.6. On enregistre un écart important au niveau de 20 % de recouvrance instantanée. Cet écart diminue jusqu'à 15 % environ dans le domaine transitoire puis se stabilise à 10 % dans le palier stationnaire. Il en résulte que le liège expansé se recouvre plus rapidement juste après la décharge.



**Figure IV.6.** Ecart de recouvrance du liège naturel/expansé.

### IV.4.3. Recouvrance du liège à 10 jours

Les échantillons du liège naturel et expansé sont laissés à température ambiante en recouvrance pendant dix jours. Les mesures prélevées montrent que le liège expansé possède une recouvrance totale tandis que le liège naturel, aussi bien dans la direction radiale que non radiale n'est pas totalement recouvrable. La Figure IV.7 en illustre la différence.



**Figure IV.7.** Déformation après 10 jours de recouvrance.

### IV.4.4. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude expérimentale de la recouvrance du liège naturel dans les directions radiale et non radiale et du liège expansé. Les essais de recouvrance réalisés montrent une allure de courbe de recouvrance identique aussi bien pour le liège naturel que le liège expansé. Cependant, l'analyse quantitative indique une recouvrance du liège expansé plus grande que celle du liège naturel. En effet seule une déformation de 3.9 % n'est pas recouvrée après 24 heures pour le liège expansé tandis qu'une déformation de 16 % ne l'est pas pour le liège naturel. Il en résulte que le liège expansé possède une recouvrance aussi bien rapide qu'importante par rapport au liège naturel.

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire fait l'objet d'une étude centrée sur le liège naturel et expansé. Ce matériau naturel est très abondant dans notre pays et se voit être susceptible de faire un apport pour l'économie nationale. L'étude en question porte principalement sur une modélisation du fluage viscoélastique et une expérimentation sur la recouvrance du liège.

Nous avons, d'abord, commencé par une recherche bibliographique axée sur le liège naturel. Ainsi, ce matériau et l'arbre qui le produit, le chêne-liège, ont été identifiés. La répartition des forêts du chêne-liège sur le double plan national et international a été élucidée. La structure et la composition chimique du liège sont passées en revue avant que les propriétés mécaniques soient présentées. Puis, la lumière est jetée sur le liège expansé, produit par l'unité de production Jijel liège étanchéité (JLE). Toutes les étapes du processus de production ont été décrites avant de s'intéresser aux propriétés physiques et mécaniques du produit.

Ensuite, une modélisation du comportement viscoélastique du liège naturel en fluage a été effectuée. Le modèle de kelvin-Voigt à élasticité instantanée a été privilégié. Les trois paramètres du modèle ont été identifiés au moyen d'une minimisation de l'écart entre les déformations obtenues par le modèle et celle des essais relevés dans la littérature. La méthode numérique de résolution est implémentée dans Matlab. Les résultats obtenus laissent voir, d'une part, que le module de Young augmente avec l'augmentation de la contrainte tandis que les deux paramètres de viscosité diminuent. Ceci s'explique par une augmentation de la rigidité accompagnée d'une diminution de la viscosité avec l'augmentation de la sollicitation. D'autre part, la confrontation des résultats modèle/expérimental révèlent une bonne cohérence dans la direction radiale.

Enfin, la recouvrance du liège naturel et expansé a été considérée. Des essais ont été conduits sur des échantillons du liège naturel dans la direction radiale et non radiale et sur d'autres

échantillons du liège expansé dans des directions aléatoires. Les échantillons sont relâchés après avoir subi une déformation nominale de 80 %. La recouvrance est mesurée au cours du temps pendant 24 heures. Les résultats montrent que le liège naturel est capable de se recouvrir jusqu'à 15 % tandis que le liège naturel se recouvre jusqu'à 3 % de déformation dans une durée de 24 heures. Les courbes de recouvrance de tous les échantillons par rapport au temps comportent trois zones dont une recouvrance instantanée, une zone transitoire et un autre stationnaire. Les recouvrances mesurées après 10 jours à température ambiante révèlent une recouvrance totale du liège expansé tandis qu'une déformation permanente de 8.5% est enregistrée dans le liège naturel.

Ce travail étant réalisé, plusieurs projets de recherche se cristallisent en perspective. On en cite la modélisation de relaxation et l'effet de la vitesse de déformation sur le comportement du liège naturel et expansé.

## Liste des références bibliographiques

1. Gil, L. and C. Moiteiro, *Cork* w “Ullmann’s Encyclopedia of Chemical Technology”. 2003, Wiley-VCH Verlag, Germany.
2. Costa, A., H. Pereira, and A. Oliveira, *Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production*. Forest ecology and management, 2003. **175**(1-3): p. 239-246.
3. Yalaoui, M. *La production du liège brute*. in *Colloque de chêne liège*. 2000.
4. Pereira, H., *Cork: biology, production and uses*. 2011: Elsevier.
5. Vilar, P. *L’Espagne et le commerce mondial du liège*. in *Annales de géographie*. 1934. JSTOR.
6. Bouhraoua, R., *Situation sanitaire de quelques forêts de chêne liège de l’Ouest Algérien*. Etude particulière des problèmes posés par les insectes. Dept Forest Fac Sci Univ Tlemcen, 2003.
7. AOUADI, H., *La relance du chêne-liège dans le Plan national de reboisement en Algérie*. Forêt méditerranéenne, 2010.
8. Gibson, L., K. Easterling, and M.F. Ashby, *The structure and mechanics of cork*. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1981. **377**(1769): p. 99-117.
9. Rosner, S. and B. Kartusch, *Structural changes in primary lenticels of Norway spruce over the seasons*. Iawa Journal, 2003. **24**(2): p. 105-116.
10. Pereira, H., *The rationale behind cork properties: a review of structure and chemistry*. BioResources, 2015. **10**(3): p. 6207-6229.

11. Silva, S., et al., *Cork: properties, capabilities and applications*. International Materials Reviews, 2005. **50**(6): p. 345-365.
12. Pintor, A.M., et al., *Use of cork powder and granules for the adsorption of pollutants: a review*. Water research, 2012. **46**(10): p. 3152-3166.
13. Pereira, H., *Chemical composition and variability of cork from Quercus suber L*. Wood science and technology, 1988. **22**(3): p. 211-218.
14. Pereira, H., *Variability of the chemical composition of cork*. BioResources, 2013. **8**(2): p. 2246-2256.
15. Anjos, O., et al., *Effect of density on the compression behaviour of cork*. Materials & Design, 2014. **53**: p. 1089-1096.
16. Pereira, H., J. Graça, and C. Baptista, *The effect of growth rate on the structure and compressive properties of cork*. IAWA Journal, 1992. **13**(4): p. 389-396.
17. Gibson, L.J. and M.F. Ashby, *Cellular solids: structure and properties*. 1999: Cambridge university press.
18. Anjos, O., H. Pereira, and M.E. Rosa, *Tensile properties of cork in the tangential direction: variation with quality, porosity, density and radial position in the cork plank*. Materials & Design, 2010. **31**(4): p. 2085-2090.
19. Rosa, M.E. and M. Fortes, *Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork*. Journal of materials science, 1988. **23**(3): p. 879-885.
20. Anjos, O., H. Pereira, and M.E. Rosa, *Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork*. Holz als Roh-und Werkstoff, 2008. **66**(4): p. 295.
21. Zemour, I., F. Boulemnakher, and Y.E. Saadallah, *Exploration des propriétés mécaniques du liège local*. 2019, Université de Jijel.
22. Brinson, H.F. and L.C. Brinson, *Polymer engineering science and viscoelasticity*. An introduction, 2008.
23. Pipkin, A.C., *Lectures on viscoelasticity theory*. Vol. 7. 2012: Springer Science & Business Media.
24. Findley, W.N. and F.A. Davis, *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*. 2013: Courier Corporation.
25. Timoshenko, S.P., *Résistance des matériaux*. 1968.
26. Betten, J., *Creep mechanics*. 2008: Springer Science & Business Media.
27. Rosa, M.E. and M. Fortes, *Stress relaxation and creep of cork*. Journal of materials science, 1988. **23**(1): p. 35-42.

## Annexe

### Structure du programme

1<sup>ère</sup> étape : Création d'une fonction

Function [F] = F(x)

$$eq_i = \varepsilon(t_i)_{exp} - \left( \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{E_K} \left( 1 - e^{\frac{E_K}{\eta_K} t_i} \right) \right)$$

i=1, 2,3, ...n

2<sup>ème</sup> étape : Introduction de n fonctions

F=[eq<sub>1</sub> ;eq<sub>2</sub> ;...eq<sub>n</sub>]

3<sup>ème</sup> étape : Désignation des variables

E<sub>k</sub> est désigné par x(1)

η<sub>k</sub> est désigné par x(2)

4<sup>ème</sup> étape : Introduction du vecteur des valeurs initiales

X<sub>0</sub>=[1 1]

5<sup>ème</sup> étape : Résolution de la fonction F

Utilisation de la commande ***fsolve***

[x,fval]=fsolve(@F,X<sub>0</sub>)

Le vecteur x représente le vecteur des inconnues [x(1) x(2)]

Fval représente la valeur de la fonction F pour x(1) et x(2)

6<sup>ème</sup> étape : Détermination des paramètres

Les paramètres x(1) et x(2) sont évalués pour que fval soit minimale.

**Résumé :** Le but de ce travail consiste en l'étude du comportement viscoélastique du liège à travers deux aspects différents : le fluage et la recouvrance. D'abord, une modélisation du fluage viscoélastique du liège naturel est réalisée. Le modèle de Kelvin-Voigt à élasticité instantané est favorisé. Les trois paramètres du modèle sont identifiés au moyen d'une minimisation de l'écart entre les résultats du modèle et des résultats des essais de la littérature. La confrontation des résultats expérimentaux et ceux du modèle montrent une bonne cohérence, particulièrement dans la direction radiale. Puis, la dépendance des paramètres du modèle est analysée. Il en résulte qu'à l'augmentation du chargement, le module de Young augmente alors que les paramètres viscoélastiques diminuent. Ensuite, des essais de recouvrance sont conduits sur des échantillons du liège naturel et expansé. La recouvrance du liège est déterminée suite à une déformation de compression de 80 % appliquée sur des échantillons cubiques. Les résultats révèlent que, dans les deux directions radiale et non radiale, le liège naturel est capable de se recouvrir jusqu'à 15 % de déformation dans une durée de 24 heures. De l'autre côté, le liège expansé se recouvre jusqu'à 4 % pour la même durée et présente une recouvrance instantanée plus importante. Enfin, la recouvrance mesurée après 10 jours de l'essai montre que le liège expansé subit une recouvrance totale tandis que la recouvrance du liège naturel s'arrête à 8.5 % de déformation.

**Mots clés :** liège ; recouvrance ; fluage ; compression ; viscoélastique, modèle rhéologique.

**Abstract :** the purpose of This research is to study the viscoelastic behavior of cork through two different aspects : the creep and recovery. First a modelisation of viscoelastic creep of natural cork is achieved. The Kelvin-Voigt with instantaneous deformation model was favorised. The three parameters of the model were identified by minimising the error between the results of the model and those of the experiment of the literature. The confrontation of the experimental results and those of the model shows a good coherence especially for the radial direction. Then the dependence of the parameters was analyzed. It results for the increase of the stress the Young modulus increases, and the viscoelastic parameters decreases. Then experiments of recovery were realised on specimens of naturel cork and expanded cork. The recovery of the cork was determined after a compression deformation of 80 % applied on cubic specimens. The results reveals that in the two directions radial and non radial the naturel cork is capable of recovering until 15 % of deformation in a periode of 24 hours. In the other hand, the expanded cork recovers until 4 % for the same duration and present a more important instantaneous recovery. In the end,

the recovery measured after 10 days of the experiment shows that the expanded cork achieves a total recovery while natural cork stops at 8.5 % of deformation

**Keywords :** cork ; recovery ; creep ; compression ; viscoelastic ; rheological model

**المخلص.** الغرض من هذا البحث هو دراسة السلوك المرن-المانع للفلين على قسمين الاجهاد الثابت و الاسترجاع. أولاً تمت عملية نمذجة السلوك المرن اللزج. نموذج كيلفن- فويغ دو التشوه الفوري كان هو المختار. المعاملات الثلاثة للنموذج تم تعيينهم بحيث تم تقليل الخطأ النسبي لأدنى قيمة ممكنة بين نتائج النموذج و نتائج التجربة المبينة في المرجع. المقارنة بين نتائج النموذج و نتائج التجربة اظهرت تقارب جيد خاصة في الاتجاه القطري. بعد ذلك تم تحليل علاقة المعاملات بالاجهاد حيث اظهرت النتائج ان معامل يونغ يرتفع مع ارتفاع الاجهاد المطبق بينما معاملات اللزوجة تنخفض. بعد ذلك تمت تجارب استرجاع التشوه على عينات من الفلين الطبيعي و المجمع تحت الضغط. تم تحديد مقدار الاسترجاع للفلين بعد عملية ضغط العينات المكعبة ل 80 بالمائة من الحجم الاصلي . النتائج اظهرت ان الفلين الطبيعي في الاتجاهين القطري و غير القطري قادر على استرجاع التشوه حتى 15 بالمائة في مدة زمنية تقدر ب 24 ساعة في حين أن الفلين المجمع تحت الضغط استرجع الى حد 4 بالمائة من التشوه في نفس المدة الزمنية و كذلك اظهر استرجاع فوري اعلى. في النهاية الاسترجاع لمدة 10 أيام بعد التجربة أظهر أن الفلين المجمع تحت الضغط حقق استرجاع كلي للتشوه في حين توقف استرجاع الفلين الطبيعي عند 8.5 بالمائة من التشوه

**الكلمات المفتاحية .** نموذج انسيابي ;الضغط مرن-مائع ; الضغط الثابت ; استرجاع; الفلين