

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

Thèse de Doctorat

Présentée par : LAKREB NADIA

En vue de l'obtention du diplôme de **Doctorat**

Filière : Génie des Matériaux

Option : Sciences et Techniques du Bois et des Eco-matériaux

**Élaboration, caractérisation thermomécanique et
hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à
base de liège et bois de déroulage**

Devant le Jury composé de:

Mr. BENMOUNAH	Abdelbaki	Prof.	UMBB	Président de Jury
Mr. BEZZAZI	Boudjema	Prof.	UMBB	Directeur de thèse
Mr. GHOMARI	Abdelhamid	Prof.	UABM	Examineur
Mr. RECHAK	Saïd	Prof.	ENP	Examineur
Mr. MIR	Abdallah	MCA	UMBB	Examineur
Mme. PEREIRA	Helena	Prof.	ISA(Portugal)	Invitée

Année Universitaire 2014/2015

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein de l'Entreprise **TRANSBOIS** (Bejaia, Alger), à l'Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (**URMPE**) de l'UMBB et au Centre de Recherche de la Forêt, de l'Institut Supérieur d'Agronomie (**ISA**) de l'Université de Lisbonne.

La première personne que je veux remercier est bien évidemment mon directeur de thèse Monsieur **Boudjema BEZZAZI**, Professeur à Université de Boumerdès, d'avoir accepté de diriger cette thèse, ainsi que pour ses conseils, son aide, ses encouragements, sa disponibilité et son expertise qui nous ont été très précieuses.

Un grand merci à Madame **Helena PEREIRA**, Professeur à l'Institut Supérieur d'Agronomie (ISA) de l'Université de Lisbonne, pour son accueil, sa sympathie, ses conseils avisés et son soutien chaleureux.

Je remercie Monsieur **Abdellatif ZERIZER**, Professeur et responsable de Doctorat pour ses encouragements durant mes démarches pour la réalisation de ce travail.

Je remercie tous les membres de l'entreprise « **TRANSBOIS** » et le laboratoire URMPE qui contribué aussi, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. Je tiens à remercier particulièrement Monsieur **Aribi CHOUAIB** pour sa serviabilité. Je n'oublie pas, surtout, mes collègues de travail au sein de l'entreprise **TRANSUB TECHNIRAIL** « TTR » dans le projet THETO-modernisation de la ligne ferroviaire THENIA-TIZI OUZOU.

Je tiens tout naturellement à remercier les membres du jury, Monsieur **BENMOUNAH Abdelbaki** pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de mon travail de Doctorat.

Un très grand merci également à Messieurs **RECHAK Said**, **GHOMARI Abdelhamid** et **Mir Abdallah** pour avoir accepté d'examiner ce travail de Doctorat.

Enfin, que tous ceux que nous n'avons pas nommés, trouvent ici l'expression de notre gratitude.

Dédicaces

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

À mes frères et mes sœurs

À mes Beaux-frères

À mes Nièces (Liliane et Sérine)

À mes oncles et mes tantes

Nadia LAKREB

Résumé :

Cette étude a montré que les panneaux sandwichs multicouches innovants avec une empreinte écologique favorable pourraient être produits avec procédure et des équipements de production industrielle standard de contreplaquer. Les panneaux sandwichs ont été produits à l'aide de placages du bois de pin d'Alep comme feuilles de surface et deux types de lièges agglomérés (liège expansé et liège aggloméré composite) comme âme, y compris les modèles multicouches, pour une utilisation dans la construction. L'adhérence entre le bois et le liège était bonne dans tous les cas des structures sandwichs multicouches d'après l'analyse au MEB.

Le comportement mécanique des panneaux a été testé à la compression, traction perpendiculaire, compression longitudinale, flexion trois et quatre points, et le cisaillement. Les courbes de charge-déplacement et les modes de rupture ont été analysés et discutés. Le noyau de liège aggloméré (expansé et composite) a donné une très bonne performance en compression, tandis que les couches de bois qui renforcent les panneaux résistent à la traction. L'augmentation du nombre de couches de bois à donner un impact positif sur la performance mécanique de la structure sandwich. Des analyses hygrothermiques sont effectuées pour déterminer l'influence de la température sur la variation de la masse du sandwich, ainsi que son pouvoir d'absorption d'eau, en fonction du type et de l'épaisseur du liège et de la structure sandwich multicouches. Enfin, plusieurs essais du type thermiques sont effectués pour déterminer l'influence de la nature et de l'épaisseur du liège sur les caractéristiques thermiques des panneaux sandwichs multicouches.

Ces panneaux sandwichs peuvent être utilisés comme matériaux de construction non structuraux dans la construction, comme cloisons et panneaux de séparation dans le bâtiment.

Mots clés : Liège, bois, sandwich, propriétés mécaniques, propriétés thermiques, propriétés hygrothermiques.

Abstract:

This study showed that innovative multilayer sandwich panels with a favorable ecological footprint could be produced with standard procedures and equipment of industrial plywood production. Sandwich panels were produced using Aleppo pine veneer sheets as surface and two types of agglomerated cork (expanded cork and cork composite agglomerate) as the core, including multilayer models for use in construction. The adhesion between the wood and cork

was good in all the cases of the multilayer sandwich structures as observed by scanning electron microscopy.

The mechanical behavior of the panels was tested by perpendicular compression and tensile, longitudinal compression, three and four point bending, and shear. Load-displacement curves and failure modes were analyzed and discussed. The agglomerated cork core (expanded and composite cork) gave a very good compression performance, while the wood layers which reinforce the panels offered traction resistance. Increasing the number of layers of wood gave a positive impact on the mechanical performance of the sandwich structure. Hygrothermal analyses were performed to determine the influence of temperature on the mass stability of the sandwich, and on its water absorption capacity, depending on the type and thickness of the cork and multi-layer sandwich structure. Finally, several thermal tests were carried out to determine the influence of the type and thickness of cork on the thermal characteristics of the multilayer sandwich panels.

These sandwich panels can be used as non-structural building materials in construction, such as bulkheads and partition panels in buildings.

Keywords : Cork, wood, sandwich, mechanical properties, thermal properties, hygrothermal properties.

المخلص :

أظهرت هذه الدراسة أن الألواح متعددة الطبقات مبتكرة مع الأثر الإيكولوجي ملائمة يمكن أن يتم إنتاجها مع إجراءات موحدة والصناعية المعدات لإنتاج الخشب الرقائقي. وقد تم إنتاج الألواح باستخدام القشرة الخشبية على النحو صحائف سطح الصنوبر حطب ونوعين من الفلين المكنث (الفلين الرغوة والفلين المجمع مكنث)، وروح، بما في ذلك نماذج متعددة الطبقات للاستخدام في البناء. وكان التصاق بين الخشب والفلين جيد في جميع الحالات الطبقات الهياكل شظيرة وفقا لاختبارات (المسح الإلكتروني المجهرية).

تم اختبار السلوك الميكانيكي للوحات من ضغط عمودي السحب، وضغط الطولي، وثلاث وأربع نقاط الانحناء، والقص. وقد تم تحليل منحنيات التحميل النزوح وأوضاع الفشل ومناقشتها. جوهر الفلين المكنث (موسع أو مركب) لديه أداء جيد جدا في ضغط بينما طبقات الخشبية عززت لوحة بالنسبة إلى الضغوط الشد. زيادة عدد الطبقات كان لها أثر إيجابي على الأداء الميكانيكي للهيكل ساندويتش. يتم تنفيذ الرطوبة الحرارية من التحليلات لتحديد تأثير درجة الحرارة على تغير في كتلة من الساندويتش والقدرة على الاستيعاب المياه وفقا لنوع وسمك الهيكل الفلين ومتعدد الطبقات ساندويتش. وأخيرا، يتم تنفيذ عدة اختبارات النوع الحراري لتحديد تأثير طبيعة وسمك الفلين على الخصائص الحرارية من الألواح متعددة الطبقات عموما، هذه الألواح يمكن استخدامها في مواد البناء غير الهيكلية في البناء، مثل الجدران والألواح التقسيم في المبنى.

كلمات البحث: فلين، والخشب، ساندويتش الخواص الميكانيكية والحرارية، والخصائص الرطوبة الحرارية

Sommaire

SOMMAIRE

Résumé.....	i
Sommaire.....	iii
Introduction générale.....	01

Chapitre I : Etude des différentes caractéristiques du bois de pin d'Alep

I.1. Introduction.....	02
I.2. Zone à pin d'Alep, en Algérie.....	02
I.3. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de pin d'Alep.....	03
I.4. Caractérisation physiques et mécaniques du bois de pin d'Alep.....	04
I.4.1. Caractéristiques physiques.....	04
I.4.1.1. Densité.....	05
I.4.1.2. Humidité.....	06
I.4.1.3. Retraits.....	06
I.4.1.4. Gonflement.....	07
I.4.1.5. Conductivité thermique.....	08
I.4.2. Caractéristiques mécaniques.....	08
I.5. Valorisation industrielle du bois de pin d'Alep.....	09
I.5.1. Utilisations diverses.....	09
I.5.2. Industrie des panneaux.....	10
I.5.3. Industrie papetière.....	11
I.6. Caractéristiques techniques du déroulage.....	11

Chapitre II : Etude des caractéristiques du liège aggloméré

II.1. Introduction.....	13
II.2. Chêne liège (<i>Quercus suber</i> L) en Algérie.....	13
II.3. Anatomie du liège.....	15
II.4. Densité.....	19
II.5. Propriétés mécaniques du liège.....	19
II.6. Utilité du liège.....	22
II.6.1. Bouchons en liège naturel.....	22
II.6.2. Isolation du liège.....	22
II.6.3. Autres applications.....	23

II.6.4. Tendances futures.....	24
--------------------------------	----

Chapitre III : Etude théorique sur les composites à base de liège

III.1. Introduction.....	26
III.2. Composites à base du liège actuel, sur le marché.....	26
III.3. Nouveaux composites à base de liège.....	28
III.3.1. Composites sandwiches à base de liège.....	28
III.3.2. Composite des déchets de carton : liège / boisson.....	34
III.3.3. Agglomérats liège/thermoplastiques.....	35
III.3.4. Composites hydroxypropyl-cellulose /liège.....	36
III.3.5. Composite de la poudre de liège à base de la pré-polymérisation de la subérine et la polymérisation des composants de subérine.....	36
III.3.6. Matériau résine synthétique / liège.....	37
III.3.7. Composite liège-plâtre.....	37
III.3.8. Panneau de liège / charbon.....	38
III.3.9. Mortier polymère léger avec granulés de liège.....	38
III.3.10. Composites liège-ciment.....	38
III.3.11. Matériau élastomère de polyuréthane avec une charge de liège.....	39

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux utilisés

IV.1. Milieu d'étude (localisation et superficie).....	40
IV.1.2. Domaines d'activité.....	40
IV.2. Matériel expérimental.....	40
IV.2.1. Bois de pin d'Alep.....	40
IV.2.1.1. Essai physique sur le bois de pin d'Alep.....	41
IV.2.1.1.1. Cartographie d'humidité.....	41
IV.2.1.1.2. Détermination de la masse volumique.....	42
IV.2.1.1.3. Détermination du gonflement longitudinal, radial et transversal.....	42
IV.2.1.1.4. Détermination du retrait longitudinal, radial et transversal.....	42
IV.2.1.2. Essais mécaniques effectués sur le bois du pin d'Alep.....	42
IV.2.1.2.1. Essai de flexion.....	42
IV.2.1.2.2. Essai de cisaillement.....	43
IV.2.1.3. Résultats et discussions des caractérisations physico-mécaniques du bois de pin d'Alep.....	43

IV.2.1.3.1. Cartographie d'humidité.....	43
IV.2.1.3.2. Détermination de la masse volumique.....	44
IV.2.1.3.3. Détermination du gonflement longitudinal, radial et transversal	45
IV.2.1.3.4. Détermination du retrait longitudinal, radial et transversal	49
IV.2.1.3.5. Essais de flexion 3 points.....	51
IV.2.1.3.5.1. Calcul de module d'Young.....	52
IV.2.1.3.6. Essais de cisaillement.....	52
IV.2.1.4. Déroulage du bois de pin d'Alep.....	53
IV.2.1.4.1. Classement et contrôle de qualité des grumes.....	53
IV.2.1.4.2. Déroulage du bois de pin d'Alep.....	54
IV.2.1.4.3. Caractérisation industrielle des placages.....	55
IV.2.1.4.3.1. Tendance au tuilage moyen.....	55
IV.2.1.4.3.2. Massicotage des placages de pin d'Alep.....	55
IV.2.1.4.3.3. Aspect pelucheux.....	55
IV.2.1.4.3.4. Irrégularité d'épaisseur.....	56
IV.2.2. Liège aggloméré.....	56
IV.2.2.1. Liège expansé.....	56
IV.2.2.2. Liège aggloméré blanc.....	56
Chapitre V : Elaboration et caractérisation des panneaux sandwiches	
V.1. Production des panneaux sandwiches.....	58
V.2. Caractérisation mécaniques des panneaux sandwiches.....	59
V.2.1. Essai de la compression perpendiculaire.....	60
V.2.2. Essai de traction perpendiculaire.....	61
V.2.3. Essai de compression longitudinale sans ou avec flambage.....	62
V.2.4. Essai de flexion trois et quatre points.....	62
V.2.5. Essai de cisaillement.....	63
V.3. Analyse hygrothermique.....	64
V.3.1. Chauffage en étuve.....	65
V.3.2. Analyse du pouvoir d'absorption d'eau des panneaux sandwiches multicouches.....	65
V.4. Analyse thermique.....	66
V.4.1. CT mètre.....	66
V.4.2. Maquette thermique.....	67

V.4.2.1. Grandeurs à déterminer.....	67
V.4.2.2. Mise en place et procédure.....	68
V.4.2.3. Pendant la phase échauffement.....	68
V.4.2.4. Théorie et évaluation.....	69
V.5. Analyse par Microscopie électronique à balayage (MEB).....	71
V.6. Résultats et discussions.....	71
V.6.1. Essais mécaniques.....	71
V.6.1.1. Panneaux sandwichs à base de liège expansé.....	71
V.6.1.1.1. Compression perpendiculaire.....	72
V.6.1.1.2. Traction dans la direction perpendiculaire.....	74
V.6.1.1.3. Compression avec et sans flambage.....	76
V.6.1.1.4. Essai de flexion 3 et 4 points.....	78
V.6.1.1.5. Essai de cisaillement.....	79
V.6.1.2. Panneaux sandwichs à base de liège aggloméré blanc.....	82
V.6.1.2.1. Compression pure.....	82
V.6.1.2.2. Essai de traction.....	85
V.6.1.2.3. Compression sans (pure) ou avec flambage.....	86
V.6.1.2.4. Flexion 3 et 4 points.....	89
V.6.1.2.5. Essai de cisaillement.....	92
V.6.2. Analyse hygrothermique.....	94
V.6.2.1. Analyse de la variation de la masse après séchage en étuve, pour les panneaux sandwichs.....	94
V.6.2.2. Analyse du pouvoir d'absorption d'eau des panneaux sandwichs multicouches.....	96
V.6.3. Analyse thermique.....	98
V.6.3.1. CT mètre.....	98
V.6.3.2. Maquette.....	99
V.6.3.2.1. Exploitation des résultats.....	100
V.6.4. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB).....	101
V.6.4.1. MEB pour les panneaux sandwichs à base de liège expansé (noir).....	102
V.6.4.2. MEB pour les panneaux sandwich à base de liège aggloméré (blanc).....	103
Conclusion et perspectives.....	104

Références bibliographiques.....	106
Bilan des communications et articles publiés dans le cadre de cette thèse.....	118

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Une structure sandwich combine généralement deux feuilles de surface avec de très bonnes propriétés mécaniques, collées à une couche de base constituée d'un matériau léger. Notre objectif est d'utiliser des matériaux naturels avec une empreinte écologique favorable à la production des panneaux sandwichs qui sont légers et de bonnes propriétés d'isolation, avec un faible coût, pour une utilisation dans la construction, comme cloison ou murs de séparation.

Cette étude porte sur l'élaboration, caractérisations mécanique et hygrothermique d'un composite sandwich, à base de feuilles de placage du bois de pin d'Alep, comme peaux, et deux types de liège (expansé et composite), comme âme. Les sandwichs élaborés présentent différentes architectures multicouches.

Ce travail se compose de cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons une étude bibliographique sur le bois de pin d'Alep algérien, principalement, sur les propriétés physiques et mécaniques du bois de pin d'Alep, afin de savoir si ce bois peut être valorisé à l'échelle industrielle. Cette étude est nécessaire du fait de la très faible exploitation de cette espèce dans notre pays et, afin de mieux exploiter et valoriser industriellement le bois de pin d'Alep, encourager la production interne du bois à de multiples utilisations et diminuer l'importation du bois.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique sur la caractérisation physico-mécanique des différents types de liège agglomérés, afin de résumer les avantages de l'utilisation du liège aggloméré, comme âme dans les structures sandwichs.

Le troisième chapitre présente une étude bibliographique sur les différents types de matériaux composites fabriqués à base d'aggloméré de liège.

Le quatrième chapitre a trait la caractérisation physico-mécanique du bois de pin d'Alep, et des différents types de lièges agglomérés utilisés.

Le cinquième chapitre a consisté à l'élaboration, la caractérisation thermomécanique et hygrothermique des panneaux sandwichs, dans le but de voir l'influence des différentes couches sur leur comportement.

Une conclusion générale résume ce travail.

Chapitre I :

Etude des différentes caractéristiques du bois de Pin d'Alep

I.1. Introduction

En Algérie, le pin d'Alep constitue l'essence principale des formations forestières. Il occupe plus de 35% de la superficie forestière globale du pays.

Le pin d'Alep est l'essence résineuse, qui supporte le découvert dès sa naissance ; ses faibles exigences en eau et l'abondance de ses grains lui permettent d'occuper rapidement les stations les plus variées ; on trouve cet arbre à l'état spontané surtout le pourtour du bassin méditerranéen, sauf en Egypte.

En 2007, l'Algérie comptait près de 881 000 ha de pin d'Alep (document fourni par Direction générale des forêts en Algérie), grâce au reboisement (généralement, depuis l'époque coloniale) ou trouvé à l'état naturel qui ne cesse plus de régresser suite à des incendies répétés ou des passages non contrôlés.

La croissance, le volume et le traitement sylvicole de cette essence ont été sollicités par les recherches scientifiques préalables, mais les caractéristiques de son bois n'ont été que très peu analysées. Malgré la richesse du patrimoine forestier algérien en cette espèce, les caractéristiques technologiques restent toujours défavorables pour une exploitation industrielle (Dilem, 1992) [1].

Notre travail a pour but d'étudier quelques propriétés physiques et mécaniques du bois de pin d'Alep algérien, afin de savoir si celui-ci accepte une valorisation à l'échelle industrielle.

I.2. Zone à pin d'Alep, en Algérie

Le pin d'Alep est largement répandu sur l'ensemble du pourtour du bassin méditerranéen [2]. C'est une espèce fréquente, sur tout en région méditerranéenne occidentale ; elle se rencontre également en divers endroits du bassin méditerranéen oriental. Au total, ses forêts occupent sans doute plus de 3.5 millions d'hectares [3].

En Algérie, le pin d'Alep est présent dans toutes les variantes bioclimatiques, avec une prédominance dans l'étage semi-aride. Sa plasticité et sa rusticité lui confèrent un tempérament d'essence, possédant un grand pouvoir d'expansion, formant ainsi de vastes massifs forestiers.

Le pin d'Alep avec ses 35% de couverture reste bien l'espèce qui occupe la première place de la surface boisée en l'Algérie [4].

Selon Boudy [5], le pin d'Alep occupe une surface de 852.000 hectares, Mezali [6] dans un rapport sur le Forum des Nations Unis sur les Forêts (FNUF) avance un chiffre de 800.000

hectares, alors que Seigue (1985), donne une surface de 855.000 hectares. Il est présent partout, d'Est en Ouest, allant du niveau de la mer aux grands massifs montagneux du Tell littoral et de L'Atlas Saharien.

Selon Leutrech (1982) [3], le pin d'Alep est localisé principalement dans les régions suivantes :

- la région Est : les grands massifs de Tébessa, avec 90.000 hectares et celui des Aurès à plus de 100.000 hectares,
- la région du Centre : les forêts de l'Ouarsenis,
- la région Ouest : les forêts des monts de Saida, de Mascara, de Sidi Bel Abbès et de Telagh,
- l'Atlas saharien : les forêts des monts d'Ouled Nail, près de Djelfa et du Djebel Amour près d'Aflou.

I.3. Caractéristiques macroscopiques et microscopiques de pin d'Alep

La structure microscopique de pin d'Alep se caractérise par la présence de 1 à 4 ponctuations pseudo aréoles, rondes ou ovales, d'une taille moyenne dans chaque champ de croisement des cellules du parenchyme des rayons avec les trachéides verticales. De plus, les rayons ligneux comportent, surtout dans le bois fin, des trachéides transversales à parois minces, mais parfois faiblement dentées [7].

Les canaux résinifères sont assez gros, colorés par une résine rouge brune. Ils sont isolés groupés par 2 à 5 répartis dans toute la largeur du cerne, mais souvent alignés dans toute la zone de transition, entre bois initial et final [8].

L'aspect anatomique du bois de pin d'Alep a été décrit par Jacquiot, 1955 [9] de la manière suivante :

- absence de parenchyme vertical,
- des rayons ligneux unisériés, hauts de 8 à 10 cellules environ, hétérogènes, avec 1 à 4 ponctuations pinoïdes moyennes par champ de croisement,
- des canaux verticaux sont disséminés dans le bois initial et le bois final, et des canaux horizontaux plus petits contenus dans certains rayons,
- les parois des trachéides transversales sont minces, irrégulièrement épaissies et peu dentées ; les propriétés de la fibre, en particulier l'indice feutrage (82 en moyenne), sont très favorables dans l'industrie de la papeterie, ceci doit être tempéré par la forte teneur en résine du bois de pin d'Alep [3].

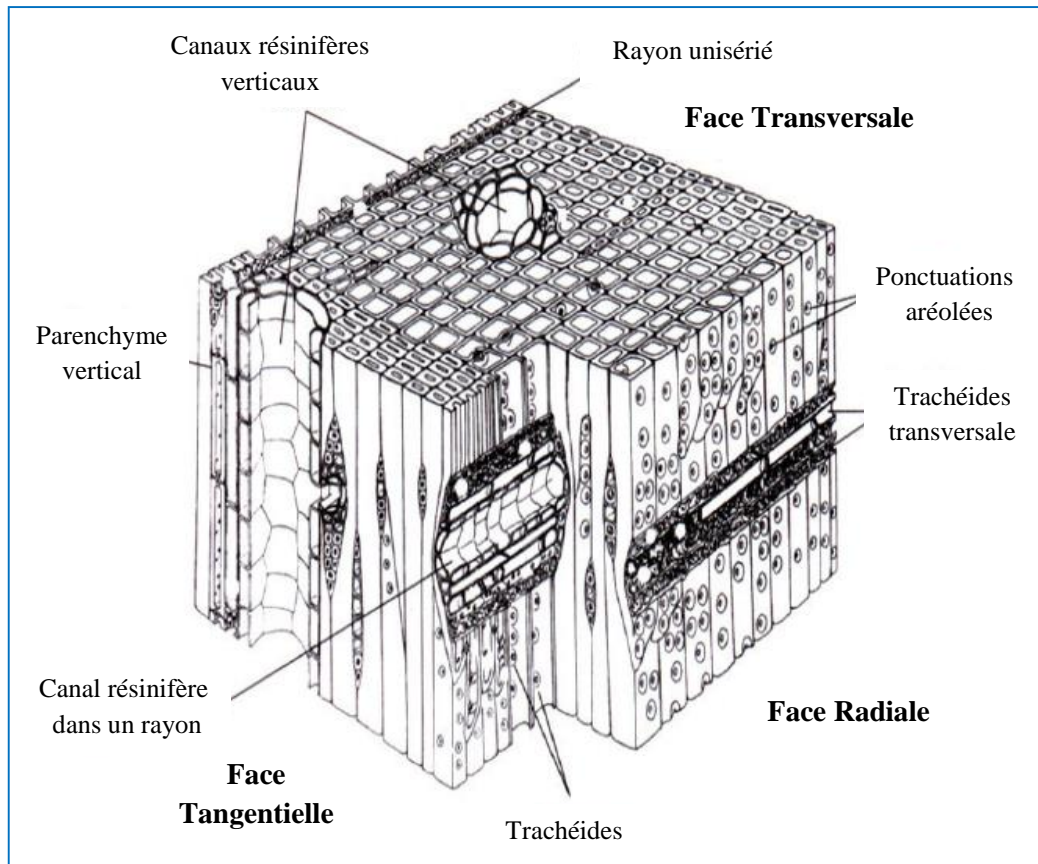


Figure I. 1. Description microscopique des bois résineux. Coupe transversale ; coupe radiale ; coupe tangentielle [10].

À l'échelle macroscopique, le bois peut être considéré comme un milieu continu anisotrope ayant des hétérogénéités locales. Lors de la découpe d'un billon, trois directions sont mises en évidence : longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Ces trois directions constituent les axes d'orthotropie du bois. Les diverses propriétés de ce matériau sont différentes selon ces trois axes [11].

I.4. Caractérisation physiques et mécaniques du bois de pin d'Alep

I.4.1. Caractéristiques physiques

Le bois de pin d'Alep qui a été décrit par Nahal 1962 [2], est composé d'un aubier blanc jaunâtre et d'un cœur brun rouge ; il se dessèche rapidement, travaille peu et dure longtemps s'il est protégé des intempéries.

Le centre technique du bois (CTB, 1983) [13] décrit le bois de pin d'Alep, comme étant hétérogène, mi-lourd, mi-dur à dur, peu nerveux, avec des accroissements larges et irréguliers, un aubier blanc mal délimité et un duramen fauve clair, assez durable.

I.4.1.1. Densité

La densité du bois est un facteur de qualité essentiel qui explique la plupart de ses autres propriétés. Quiquandon en 1966 [14] travaillant sur 2 pins d'Alep de forêt naturelle et 2 de plantations, ayant fourni au total 9 billons, trouve une infra- densité 0.53 (correspondant à une densité anhydre de 0.61 et à une densité de 12 % d'humidité de 0.66).

Le centre technique du bois et de l'ameublement (C.T.B.A, 1988) [15] a établi une échelle (tableau I.1) permettant de classer les types de bois, en fonction de leur masse volumique.

Tableau I.1. Échelle de comparaison et classement des essences, en fonction de leur masse volumique [15].

Type de bois	Masse volumique (Kg/m ³) à H=12 % d'humidité	Densité équivalente à H= 12 % d'humidité
Légers	350 à 500	0.35 à 0.5
Mi-lourds	500 à 650	0.50 à 0.65
lourds	650 à 800	0.65 à 0.8

Selmi, en 1976 [16] a travaillé sur le bois de pin d'Alep provenant des forêts naturelles de la dorsale tunisienne, il a noté les densités à différents pourcentages d'humidité (tableau I.2).

Tableau I.2. Densité du bois de pin d'Alep à différents pourcentages d'humidité [16].

Densité		
Densité basale	Poids anhydre	0.55
	Volume à l'état saturé	
Densité anhydre	Poids anhydre	0.58
	Volume anhydre	
Densité à 15 % d'humidité	Poids à 15 % d'humidité	0.65
	Volume à 15 % d'humidité	
Densité à 12 % d'humidité	Poids à 12 % d'humidité	0.66
	Volume à 12 % d'humidité	
Densité à l'état vert	Poids à l'état vert	1.08
	Volume a l'état vert	

Le bois de pin d'Alep se classe à la limite, entre les bois classés mi-lourds et lourds, comme le montrent les résultats de la littérature :

Nahal (1962) [12] a qualifié le bois de pin d'Alep comme un matériau assez léger et avance une densité (sans préciser le degré d'humidité) qui varie entre 0.532 et 0.866 ; Tischler, en 1971 [17], mentionne, tirée de la littérature, des densités anhydres de 0.57 pour le pin d'Alep, contre 0.49 pour le pin sylvestre, et 0.53 pour le pin brutia, et des densités à 12 % d'humidité, variant de 0.52 en Tunisie à 0.62 en Italie, en passant par 0.54, en Espagne et 0.61, en Israël,

pour le premier ; El Abid en 1981 [18] trouve au Maroc une infra-densité de 0.38 g/dm^3 pour le pin maritime, contre 0.45 pour le pin d'Alep ; le C. T. B. A (1983) [19] donne une densité de pin d'Alep variant de 0.40 à 0.80.

Enfin, Collardet et Besset (1988) [3] mentionnent une masse volumique moyenne à 12% d'humidité, de 550 kg/m^3 , pour le pin maritime, et de 450 seulement, pour le pin d'Alep.

I.4.1.2. Humidité

Le bois est un matériau hygroscopique ; il est susceptible de perdre ou reprendre de l'humidité en fonction de la température et surtout de l'humidité relative de l'air ambiant.

En général, la teneur en eau est maximale dans les racines, moindre dans les branches et minimale dans le tronc. Le tableau suivant représente les taux d'humidité

Bois saturé	30 %
Bois mi -sec	23 – 30 %
Bois commercial	18 – 22 %
Bois sec à l'air	13 – 17 %
Bois desséché	13 %

I.4.1.3. Retraits

Le retrait du bois est le phénomène selon lequel les dimensions d'une pièce de bois varient avec son taux d'humidité. On parle de retrait car le bois frais a des dimensions maximales.

Selmi (1976) [16] cite une rétractibilité volumique totale pour le pin d'Alep, d'environ 11.7% ; il ajoute que cette rétractibilité augmente du cœur vers l'écorce, mais cette augmentation perd de son importance avec la hauteur, tandis que le coefficient de rétractibilité, pour cette même essence, est de l'ordre de 0.4 %. Ceci montre, conclut-il, que le bois de pin d'Alep est moyennement nerveux et convient bien comme bois de service et de construction. Polge [19] et Killer (1970) ont également étudié la stabilité dimensionnelle de pin d'Alep et de pin maritime de Tunisie, sur carotte de sondage. Ils trouvent des valeurs peu différentes entre les deux espèces. Tischler [17] et Rahme en 1972 [20] ont comparé la rétractibilité de pin d'Alep avec celle des autres pins, et montrent que celle-ci est légèrement inférieure à la rétractibilité des autres espèces. Cela semble d'être dû, souligne Tischler [17], à la haute teneur en résine de pin d'Alep.

Tischler (1971) [17] fait état d'une rétractibilité volumétrique totale plus faible pour le pin d'Alep que pour le pin sylvestre (11.7% contre 12.1%), et également une anisotropie de retrait plus satisfaisante (7.2 % / 4.4 % contre 7.4 % / 4.0 %) ; Collardet et Besset [3], enfin donnent

pour le coefficient de rétractibilité volumétrique totale, une fourchette de 0.35 à 0.45%, pour le pin d'Alep, et de 0.4 à 0.5%, pour le pin maritime.

Du point de vue de la stabilité dimensionnelle, comme pour les caractéristiques précédentes, on doit observer que le pin d'Alep supporte plutôt avantageusement la comparaison avec les autres pins auxquels il a été confronté.

Tableau I.3. Résultats des retraits mesurés à différents pourcentages d'humidités du bois de pin d'Alep et du bois de pin maritime [20].

	Essences	A	B	C	D
Retrait radial, état saturé à sec à l'air	Pin d'Alep	3.42	3.14	3.29	3.43
Retrait radial, état saturé à anhydre	Pin d'Alep	5.38	4.73	5.11	5.19
Retrait tangentiel, état saturé à sec à l'air	Pin d'Alep	5.63	4.37	5.19	5.09
Retrait tangentiel, état saturé à anhydre	Pin d'Alep	8.42	7.06	7.93	7.43

A, B, C, D : ce sont les quatre stations d'échantillonnage

La rétractibilité, rappelons-le, est un défaut important du bois, qui s'exprime d'une façon différentielle, suivant les trois axes d'anisotropie : l'axe longitudinal ou axial, l'axe tangentiel et l'axe radial.

Les retraits ont été mesurés entre deux états :

- un état d'humidité supérieure à 30% : il a été obtenu par immersion des échantillons dans l'eau pendant 24 heures.
- l'état sec à l'air : obtenu par un séjour des échantillons dans une salle à température constante, dans laquelle des témoins (des tronçons de carottes) ont été pesés régulièrement jusqu'à la stabilité de leur poids, puis mis à l'étuve pendant 24 heures à 102.5°C, pour déterminer leur humidité ; celle-ci était de l'ordre de 11 % (de 10.5 % à 11.5 %).

1.4.1.4. Gonflement

Le gonflement est en principe le phénomène inverse du retrait. Lorsque le bois absorbe de l'eau, sa teneur en humidité augmente et le bois a tendance à augmenter de volume. Tout comme le retrait, le gonflement est proportionnel au gain d'humidité jusqu'au point de saturation des fibres. Lorsque la teneur en humidité se trouve supérieure à ce dernier ($TH \geq 30\%$), le bois subit peu ou pas de changements dimensionnels.

I.4.1.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction notée, λ . Cette constante apparaît, par exemple, dans la loi de Fourier.

À densité et humidité égales, le bois résineux est plus conducteur que le bois feuillu. Plus un bois est dense, plus il est humide et plus il est conducteur.

Le bois a une structure fibreuse non homogène qui lui confère une certaine porosité en emprisonnant de l'air, ce qui lui permet de faire partie des matériaux isolants, même à l'état brut. Pour la plupart des bois, la conductivité est comprise entre 0.10 et 0.21 W/Km, à 12% d'humidité, selon le Wood Handbook [21]. La valeur de la conductivité est fortement dépendante de la nature du bois : densité et taux d'humidité.

I.4.2. Caractéristiques mécaniques

Le bois est un matériau anisotropie ; sa résistance est très forte dans le sens longitudinal et peut se fendre aisément dans le sens radial ; ses propriétés permettent de choisir le type de découpe selon l'utilisation souhaitée.

Giordano (1976) [22] a donné les principales caractéristiques mécaniques de pin d'Alep :

- ✓ Une résistance à la compression axiale de 3 à 6 daN,
- ✓ Une résistance à la flexion de 5.80 à 14 daN,
- ✓ Un module d'élasticité en flexion de 950 à 1800 daN,
- ✓ Une résistance au choc peu élevée,
- ✓ Une fossilité moyenne et enfin une dureté peu élevée,

Ticshler (1971) [17] a soumis deux lots d'échantillons de pin d'Alep (provenant de Palestine) aux essais mécaniques, l'un à l'état vert, le second à l'état sec, à l'air, avec une humidité de 12%. L'ensemble des essais mécaniques étudiés par cet auteur sont récapitulés ci-dessus :

- ✓ résistance à la rupture du bois augmente le long du rayon, du centre de la grume vers l'écorce mais diminue du pied au sommet de la tige,
- ✓ La résistance à la flexion dynamique du bois vert est supérieure à celle du bois à l'état sec à l'air,
- ✓ L'augmentation de la résilience est de 1.6% lorsque l'humidité augmente de 1%,
- ✓ Les différences entre le cisaillement appliqué en direction radiale et celui en direction tangentielle ne sont pas significatives. Il en est de même pour la résistance à la traction perpendiculaire aux fibres. Ainsi, la contrainte de la rupture à l'état sec à l'air est de

23.4 kg/cm² lorsque la force est appliquée en direction radiale et de 24.8 kg/cm² quand elle est agi en direction tangentielle,

- ✓ Lorsque le bois à l'état vert, la résistance au fendage augmente du centre de la tige vers l'écorce,
- ✓ La dureté du bois vert n'est que de 60% de celle du bois à l'état sec à l'air,

Les travaux comparatifs entre différentes essences résineuses montrent que le bois de pin d'Alep est le plus performant et classé en premier par rapport à d'autres, car il présente les meilleurs résultats pour la dureté, résistance au fendage, adhérence des fibres, et des résultats assez semblables pour la compression axiale et la flexion avec le Mélèze et le pin d'Autriche [23].

Tableau I .4. Récapitulatif des caractéristiques mécaniques du bois de pin d'Alep ([17], [24], [25]).

Caractéristiques mécaniques	Auteurs		
	Tischler [17]	Thibaut et al [25]	Berrichi [24]
Densité à 12 %	0,57	0,57	0,60
Dureté de Flan	2,4	2,86	3 à 5
Résistance à flexion statique [MPa]	107	104,6	157,1
Module de Young en flexion [MPa]	10750	11450	-
Résistance à la compression axiale [MPa]	53,2	47,3	41,5
Traction perpendiculaire aux fibres [MPa]	2,49	2,46	2,625
Fissibilité [Kg /cm]	13,6	-	14,76
Résilience [Kg.m]	2,1	1,77	
Résistance au cisaillement [MPa]	4,5	7,92	9,32

Cependant, Thibaut et al. (1992) [25] ont montré sur un large échantillonnage réalisé en France que, finalement, ses caractéristiques ne rendaient pas ce bois « pire » que celui de pin maritime des Landes (*Pinus pinaster*) dont il est en tout point très proche.

I.5. Valorisation industrielle du bois de pin d'Alep

I.5.1. Utilisations diverses

Pour des échantillons sans défaut, le pin d'Alep se comporte d'une manière très voisine de celle des pins sylvestres ou maritimes, et pourrait donc a priori convenir aux mêmes usages, c'est à- dire : éléments d'ossature pour la construction, petite charpente, palette, coffrage, menuiserie d'intérieur ébénisterie bas de gamme et produits du déroulage (caisserie, panneaux contreplaqués pour la construction).

En raison de la flexuosité et de la décroissance de sa tige, de l'excentricité fréquente de la moelle, de la présence de branches abondantes et relativement grosses, le pin d'Alep doit être débité en petites longueurs et purgé de ses défauts les plus graves ; il ne connaît par suite, en France, que des emplois peu rémunérateurs en petite charpente, menuiserie ordinaire, palettes, coffrage, caisserie et emballage.

En Algérie, des utilisations en bois de mine, et également en traverses ou poteaux de lignes (après injection) ou même en allumetière ont été signalées (Dilem, 1 988) [1].

Des emplois dans la petite construction navale ont été mentionnés, aussi bien en Italie Giordano [22] qu'en Tunisie (Selmi, 1 976) [16].

Plaisance (1976) [26] affirme qu'on faisait du charbon à partir du bois de pin d'Alep, qui était utilisé pour le travail des métaux.

En Algérie, le pin d'Alep de «race noble» (Djelfa) fut utilisé dans la fabrication des allumettes (Simonet, 1970) [27] ; on en faisait également des traverses après injection, des poteaux télégraphiques et de mine. Actuellement, le bois de cette essence est largement utilisé dans la fabrication des chalets. Au Maroc, on l'utilise pour le même usage et comme bois de mine. Ainsi, le bois de pin d'Alep peut avoir de grandes possibilités d'emplois. Il faut également souligner sa valeur décorative, et le rôle qu'il joue dans la protection des bassins versants et dans la lutte contre la désertification c'est le cas du barrage vert en Algérie où il est choisi comme essence de première importance dans les compagnes de reboisement [1].

I.5.2. Industrie des panneaux

En Italie Giordano [22], deux types des panneaux de particules stratifiés sont fabriqués avec le pin d'Alep, l'un (Stratipan) pour des emplois en l'intérieur, l'autre (Stratimex), pour des emplois à extérieur.

Le pin d'Alep était utilisé par les scieurs pour faire de la palette et notamment les carrelets, pièces d'assemblage, utilisant largement du bois déroulé, cependant, cet usage a tendance à disparaître, souligne Badel (1986) [28].

En Algérie, des unités de fabrication des panneaux de particules ont été créés à proximité des massifs forestiers importants. Parmi ces unités, il y a Bejaia, Khenchela, Télagh et Djelfa dont la capacité de production annuelle avoisine le 92500 m³/an.

D'après les études menées par [29], [30] et [31] dans les trois usines, respectivement Télagh, Khenchela et Djelfa, sur les caractérisations physiques et mécaniques des panneaux de particules, sachant que la matière utilisée par ces unités est composée essentiellement de 70% du bois de pin d'Alep et de 30% du bois d'Eucalyptus, il a été montré que ces panneaux

présentent une bonne résistance perpendiculaire aux faces, à la flexion statique et une bonne rétention d'eau.

I.5.3. Industrie papetière

Le pin d'Alep est utilisé dans la papeterie, dans les mêmes conditions que les autres résineux français et il est fortement consommé en Italie. Il produit une pâte à fibres longues, qui donne, notamment, de bons résultats par le procédé Kraft.

L'âge des arbres a une influence sur les caractéristiques papetières du bois de pin d'Alep plus l'arbre est vieux, plus le rendement chute, a remarqué Abes (1987) [32] en testant par, le procédé Pomilio, les aptitudes papetières de trois arbres de pin d'Alep (d'Algérie) d'âges différents (20, 40 et 60 ans) ; le rendement optimal en fibres (45.2%) et les meilleures propriétés mécaniques (longueur de rupture, résistance à la déchirure, à l'éclatement et pliage) ont été obtenues avec la pâte du bois de pin d'Alep de 20 ans.

Quiquandon [14] signale, par ailleurs, que les propriétés de la fibre, en particulier l'indice de feutrage (82 en moyenne), sont très favorables à l'emploi en papeterie. Cela doit être tempéré par la forte teneur en résine du bois de pin d'Alep. Cette teneur semble cependant fort variable (de 1.6 f %, comme celle du pin sylvestre, à 5.8% dans les essais de Quiquandon).

I.6. Caractéristiques techniques du déroulage

Le déroulage est la combinaison simultanée d'une rotation de la grume sur elle-même suivant sa longueur par rapport au bâti et d'une translation du couteau par rapport au bâti et perpendiculaire à l'axe de rotation de la grume.

Le bois se déroule toujours à l'état vert. On a souvent recours à un traitement hygrothermique préalable durant 12 à 72 h, à des températures comprises entre 50 à 90 °C, suivant les essences du bois. Ce traitement, appelé étuvage, se fait le plus souvent par immersion totale du bois vert dans de l'eau portée à une température. Pour une essence donnée, cette température est souvent déterminée de manière empirique. L'étuvage permet de plastifier la lignine, et donc, de conférer au bois une déformabilité qui améliore la qualité du copeau (le placage) tout en réduisant les efforts de coupe. Ce traitement permet, en outre, de plastifier les nœuds, de fluidifier la résine, d'atténuer les différences entre bois de printemps et bois d'été (Marchal et al. 1993) [33], pour diminuer les efforts de coupe et la fissuration des placages. Le milieu chauffant est dans la plupart des cas de l'eau liquide ou de la vapeur d'eau. Un étuvage est caractérisé par une température et une durée de traitement.

La teneur en eau du bois déroulé est donc toujours largement supérieure au point de saturation des fibres.

Pour ce qui est du hêtre, il peut se dérouler à l'état frais, sans étuvage, jusqu'à des épaisseurs de 1.5 à 2 mm environ. Cependant, l'état de surface est amélioré par l'étuvage pour les épaisseurs considérées et indispensables pour les épaisseurs supérieures à 2 mm [34].

De nombreuses études ont démontré que le type de la barre de pression peut influencer la qualité du placage. Feihl (1986) [35] a noté que pour le placage de 1.6 mm et plus, la qualité du placage ne semble pas varier selon le type de barre ; par contre, en cas de placage plus mince, la barre statique donne une meilleure qualité. Toutefois, la barre statique peut provoquer l'arrachement des fibres de bois tendre, ce qui crée des débris qui s'accumulent entre la barre et le billon qui peuvent nuire à l'état de surface du placage, la barre de pression ne permet pas d'éviter la fissuration mais peut même la favoriser, d'après Thibaut, 1988 [36].

Pour les bois homogènes, (Thibaut, 1988) [36] et (Movassaghi, 1985) [37] ont noté que, plus le placage est épais, plus les fissures sont profondes et espacées. Les variations de l'épaisseur du placage augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur nominale (Lutz, 1973 in Movassaghi, 1985). Cependant, les déformations du placage s'atténuent avec l'augmentation de l'épaisseur (Kivamaa, 1956 in Movassaghi, 1985).

Movassaghi, 1985 [37] constate que la profondeur des fissurations et leur probabilité d'apparition sont nettement moins grandes à faible vitesse. Le même auteur a signalé que l'irrégularité d'épaisseur est deux fois plus importante à faible vitesse qu'à forte vitesse. D'après (Lutz, 1967), la rugosité du placage diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse.

Chapitre II:

Etude des caractéristiques du liège aggloméré

II. 1. Introduction

Le liège est un produit naturel, renouvelable, durable en matières premières, qui a été utilisé pendant de nombreux siècles. Le liège est l'écorce du chêne (*Quercus suber* L.), qui est périodiquement récolté de l'arbre, généralement tous les 9-12 ans, en fonction de la région de culture. *Quercus suber* L, est le nom botanique d'une croissance lente, le chêne à feuilles persistantes, qui ne s'épanouit que dans des régions spécifiques de la Méditerranée occidentale (Portugal, Espagne, sud de la France, une partie de l'Italie, l'Afrique du Nord) et la Chine [38-39]. Cet arbre exige beaucoup de lumière solaire et une combinaison très inhabituelle de faibles précipitations et l'humidité assez élevées.

L'Europe dispose d'environ 60% de la superficie totale de production (forêts de liège) et produit plus de 80% de liège au monde [40]. La qualité et l'épaisseur de l'écorce varient selon les conditions d'un arbre de croissance spécifique [39-41].

Le liège est des plus souples matériaux naturels connus. C'est un matériau léger, élastique, flexible et imperméable aux gaz et liquides, impérissable, bon isolateur électrique et thermique, isolateur phonique [42] et diélectrique.

La faible conductivité thermique du liège combinée à une raisonnable compression, font de ce matériau un excellent isolateur thermique lorsque des charges compressives sont présentes. Sa propriété de frottement (anti-glissement) le rend également bon pour des revêtements de sol ou dans les poignées. Aujourd'hui, les produits en liège sont utilisés pour isolation thermique des réfrigérateurs et des fusées, pour l'isolation acoustique des sous-marins et les studios d'enregistrement, tels des joints dans les instruments en bois et les chambres de combustion, et en tant qu'absorbeur d'énergie dans les planchers, les chaussures et l'emballage, et naturellement comme taquets [42].

II.2. Chêne liège (*Quercus suber* L) en Algérie

Benamirouche S et al [43] ont caractérisé géographiquement et donné quelques descriptions des peuplements porte-graines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia (Nord-est algérien). Ils ont constaté que 22 peuplements occupant une superficie totale de 1025 hectares ont été retenus. Au centre de chaque peuplement un point GPS, a été pris, puis utilisé pour établir les cartes de localisation par wilaya. Dans un deuxième temps, les peuplements en question sont en cours pour description détaillée permettant leur délimitation plus précise possible, leur caractérisation éco-dendrométrique et le renseignement de fiche signalétique pour chaque peuplement. En parallèle, les données

recueillies sont transcrites au fur et à mesure dans la base de données géographique préalablement élaborée.

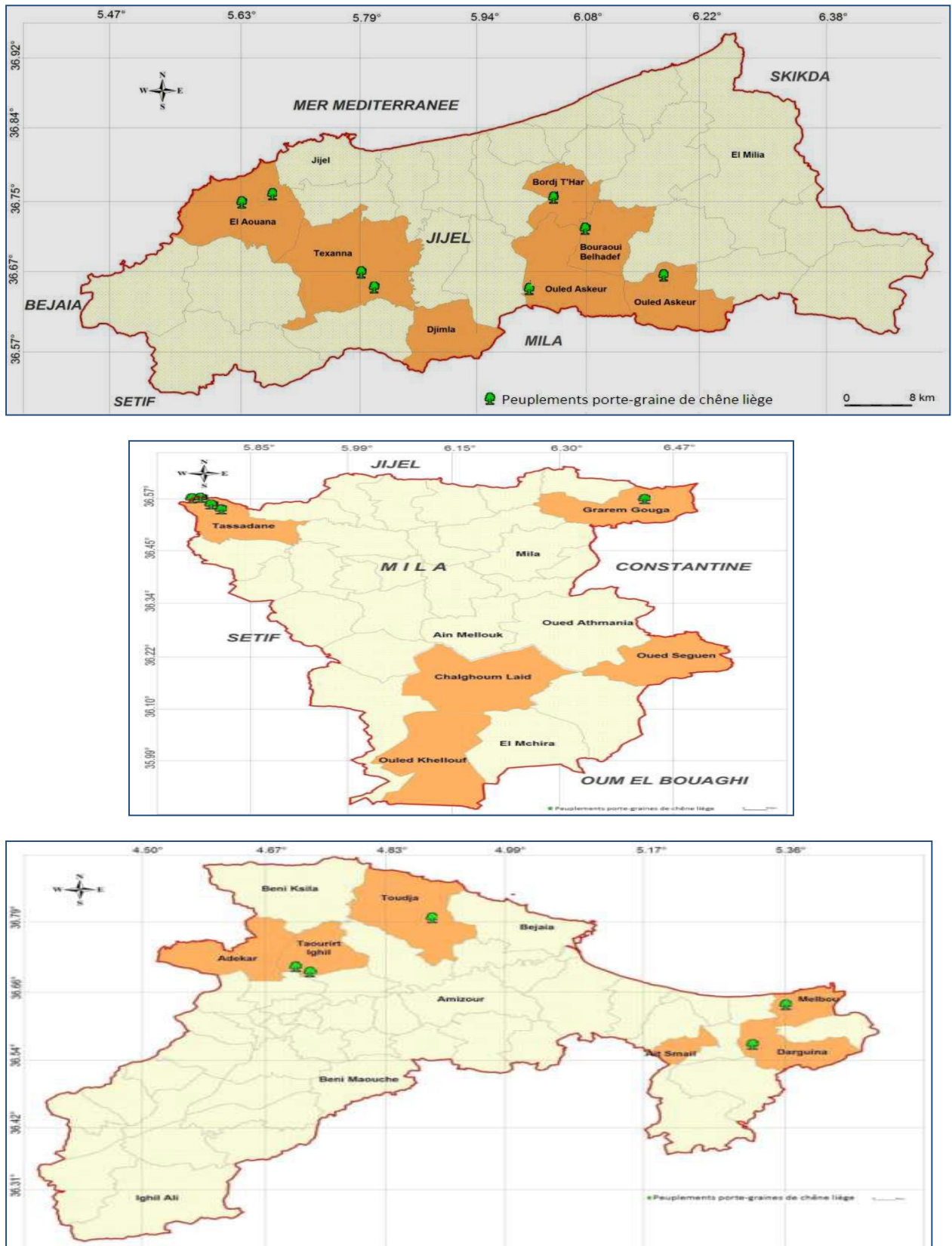


Figure II.1. Cartographie et description des peuplements porte-graines de chêne liège [43].

II.3. Anatomie du liège

Les cellules du liège ont été étudiées au microscope optique, la première fois par Hooke en 1664, puis par microscopie électronique à balayage par Gibson et al. en 1981[44]. Ces auteurs ont très bien décrit la forme et l'arrangement des cellules du liège selon les trois sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle (Figure II.2).

Dans la section radiale, les cellules sont disposées en «nid d'abeilles» et ont une forme principalement hexagonale. Certaines peuvent avoir cinq, sept ou huit côtés. Cette disposition des cellules permet de considérer que le liège est un matériau isotrope dans le sens radial, impliquant que les directions axiale et tangentielle sont presque équivalentes.

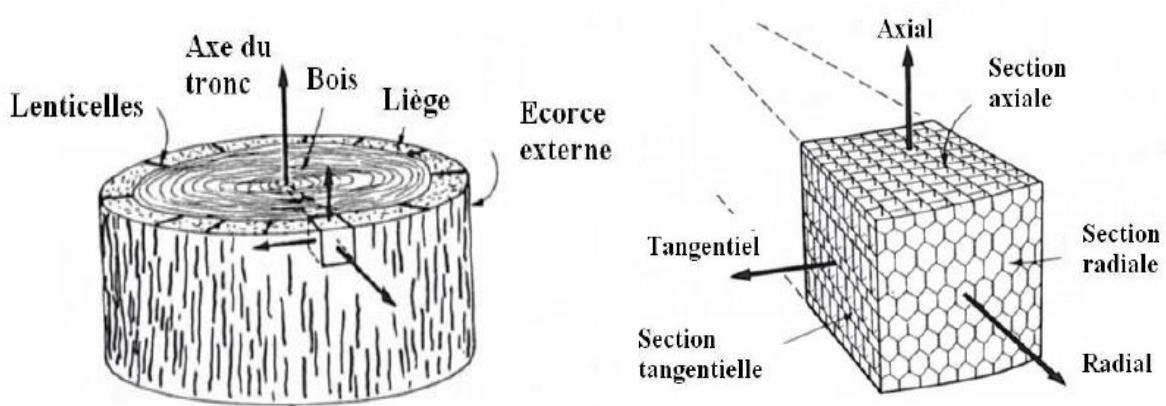


Figure II.2. Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle [44].

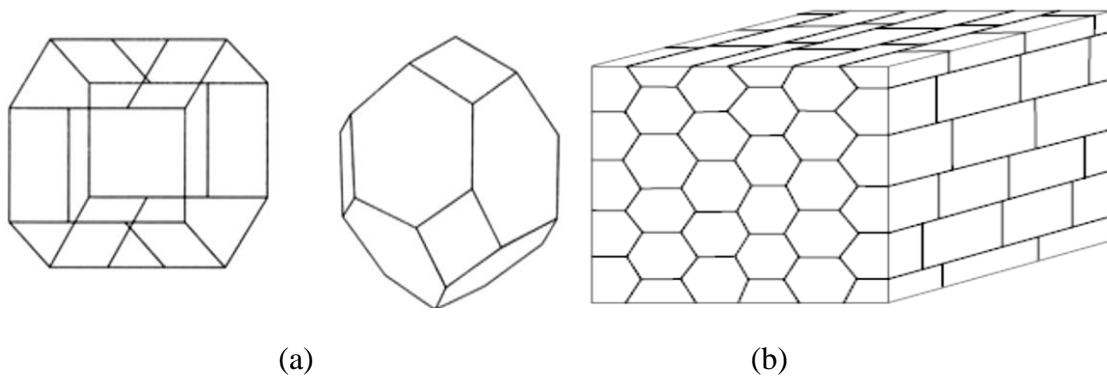
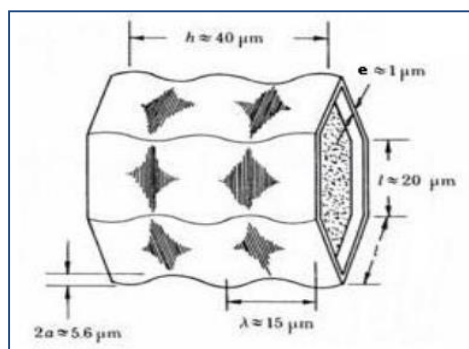


Figure II.3. Modèle de la cellule de liège et de l'organisation des tissus : (a) cellule individuelle (à gauche) et Kelvin polyèdre (à droite) et (b) l'organisation des tissus [58].

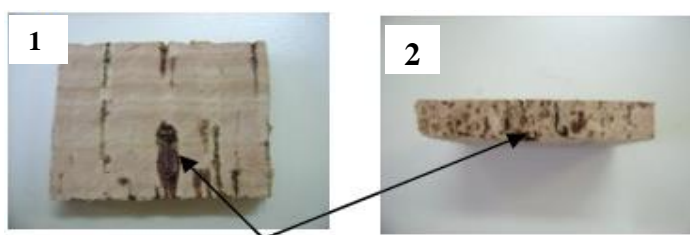
Gibson et al, ont également déterminé les dimensions d'une cellule et ont observé que chaque cellule possède deux ou trois ondulations complètes (Figure II.4).



- Epaisseur de la paroi (μm) : $1 \pm 0,5$
- Hauteur de la cellule h (μm) : 43 ± 4
- Longueur d'un côté de la face hexagonale l (μm) : 21 ± 4
- Volume de la cellule (μm^3) $(3\sqrt{3}/2) \cdot l^2 \cdot h$: 5×10^4
- Nombre de cellules N/mm^3 : 2×10^4
- Longueur de l'ondulation λ (μm) : $15 \pm 2,3$
- Amplitude de l'ondulation a (μm) : $2,8 \pm 1$

Figure II.4. Ondulation d'une cellule et ses dimensions [44].

Ces dimensions peuvent varier légèrement selon les périodes de croissance du liège. C'est également dans cette direction radiale que s'effectue la croissance des lenticelles. Les lenticelles sont des portions du périderme parcourues par de nombreux espaces intercellulaires ou encore décrits comme des canaux cylindriques ou coniques macroscopiques présents à la surface des tiges, des racines et de certains fruits et légumes.



Lenticelle

Figure II.5. Lenticelles. 1- planche section axiale, 2- planche section radiale [46].

Sonia Lequin et al [46] ont caractérisé morphologique (observations microscopiques) le liège brut issu du chêne-liège *Quercus suber* L., de la région de Mora au Portugal. C'est un liège haut de gamme qui n'a subi aucun traitement (ni lavage, ni traitement de surface avec de la paraffine ou de la silicone). Il a été fourni sous forme de plaques et de bouchons par la société Trescases (Boulou, France).

La structure cellulaire du liège, observée par microscopie électronique à balayage, dans les trois plans : axial, radial et tangentiel est donnée dans la figure II.6.

Dans les sections axiale et tangentielle, les cellules sont agencées comme dans un « mur de briques » et dans la section radiale comme dans « un nid d'abeilles ». Les cellules sont disposées sans espace intercellulaire d'après Rosner et al [49]. Les dimensions d'une cellule sont proches de celles décrites par Gibson et al. (1981) [44] (Figure II.3) avec une hauteur de cellule d'environ $40 \mu\text{m}$, une épaisseur de paroi d'environ $1 \mu\text{m}$ et un côté de la face

hexagonale de la cellule d'environ 20 μm . Une étude sur les dimensions et la topologie des cellules de la section tangentielle a été réalisée en 1996 par Pina et al [47].

Les cellules des lenticelles sont complètement vidées de leur air. Au plus fort grossissement, des filaments sont visibles. Ces filaments sont, en fait, des microorganismes. Cette microflore a été récemment observée par Prak et al. (2007) [48] qui ont montré qu'elle serait principalement constituée de moisissures, les plus présentes dans les lenticelles étant les conidies.

Les caractéristiques structurales des lenticelles telles que la porosité, le diamètre et la continuité des espaces intercellulaires, contribuent à leurs fonctions physiologiques (Rosner et al, 2003) [49] comme la réalisation des échanges gazeux entre l'arbre et l'environnement. Les lenticelles commencent à se former au cours du développement du périderme (dans son prolongement) et apparaissent généralement sous un stomate ou un groupe de stomates pour les remplacer (Esau, 1966) [50]. La fonction de ceux-ci est peu à peu transférée aux lenticelles à la différence près que les échanges de gaz et de vapeur d'eau avec l'environnement ne sont plus contrôlés. Groh et al. [51] ont ainsi comparé, en 2002, la perméabilité à la vapeur d'eau et à l'oxygène, des lenticelles et des stomates. Cette perméabilité s'avère plus importante avec les stomates.

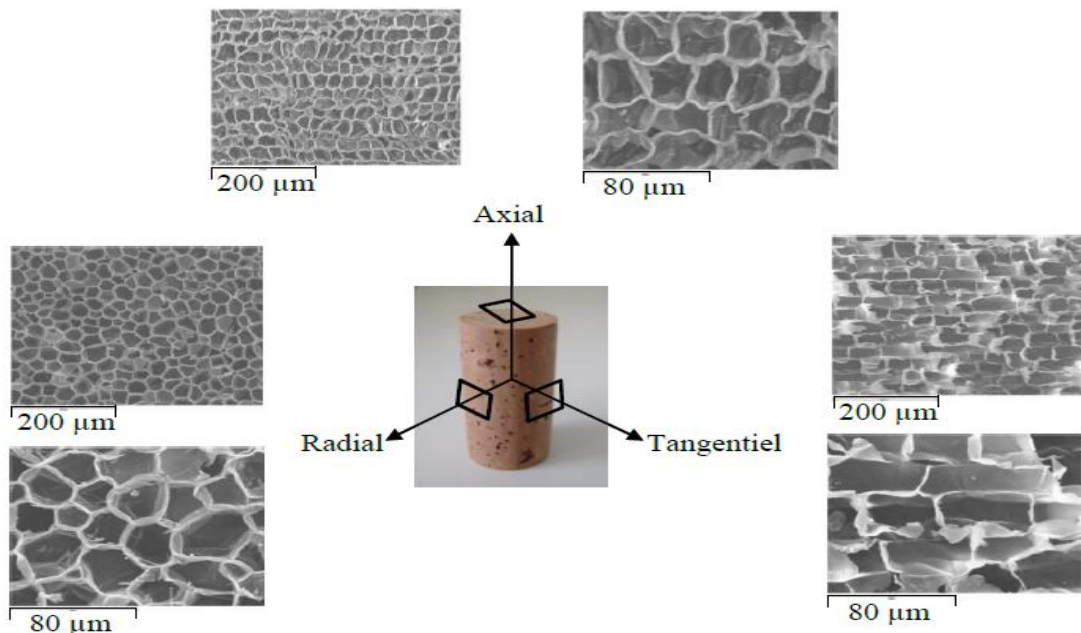


Figure II.6. Structure cellulaire du liège dans les trois plans (axial, radial et tangential) observée par microscopie électronique à balayage [46].

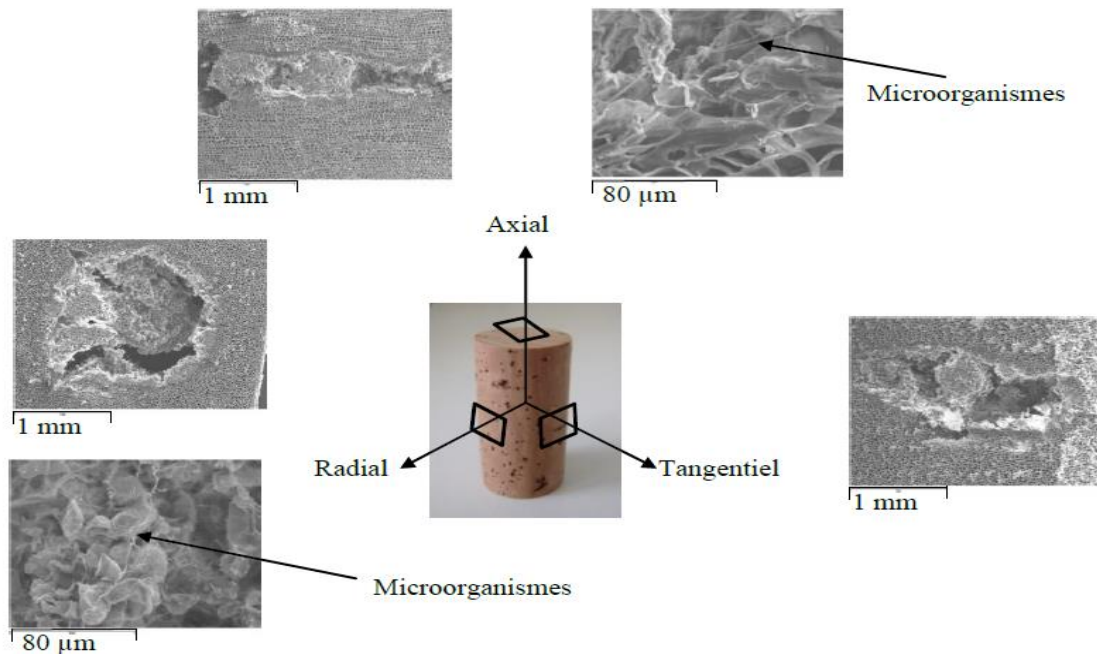


Figure II.7. Observation microscopique des lenticelles dans les trois plans du liège (LRT) [46].

L'observation microscopique de la poudre de liège (diamètre $\leq 500 \mu\text{m}$) est présentée dans la figure II.8.

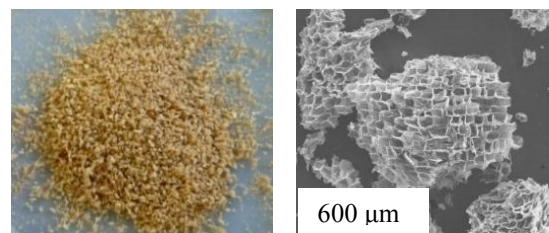


Figure II.8. Structure cellulaire de la poudre de liège observée par microscopie électronique à balayage [46].

Comme le montre la figure II.8, les cellules peuvent être détériorées par la mise en poudre du matériau. L'observation des cellules du liège par microscopie électronique à transmission, réalisée par Teixeira et al [52]. En 2009, montre que des canaux microscopiques d'environ $0.1 \mu\text{m}$, appelés plasmodesmes, sont présents durant la subérisation des premières couches de cellules. Ainsi, une communication intercellulaire est maintenue à ce niveau jusqu'à ce que la cellule meure et que ses canaux soient obstrués par l'accumulation de subérine, démontrant alors que le processus de subérisation est rapide (Teixeira et al, 2009) [52].

Au cours de leur différenciation, les cellules du liège se tapissent de lamelles de subérine sur la face interne des parois. Ces lamelles sont composées de couches superposées de subérine et de cire qui rendent le tissu imperméable à l'eau et aux gaz (Esau [50], 1966 ; Raven et al,

1999 [53]). Les parois de ces cellules peuvent, en outre, se lignifier. Les cellules sont remplies d'air (Pereira, 2007b [45]).

II.4. Densité

Gil, 1997 [54] ; Silva et al, 2005 [55] ; Pereira, 2007 [56] ont trouvé que la densité du liège peut varier entre 110 et 300 Kg.m^{-3} selon l'âge, les traitements subis par le liège et la proportion de lenticelles. Cette variation serait liée également aux dimensions des cellules. En effet, une densité élevée correspondrait à des parois épaisses et lourdes, d'après Gibson et al, 1981 [44] et à des cellules de petite hauteur (15 μm). D'après Pereira, 2007e [56], cette densité peut atteindre 1250 Kg.m^{-3} sous l'effet d'une forte compression (55 Mpa). Cette faible densité fait du liège un bon isolant thermique et acoustique. Cela permet également au liège de pouvoir être utilisé pour amortir les vibrations (chocs).

II.5. Propriétés mécaniques du liège

Le liège présente plutôt des propriétés mécaniques particulières. La courbe de compression (contrainte-déformation) présente trois régions liées aux trois mécanismes responsables pour les propriétés des matériaux alvéolaires flexibles [57, 44, 38].

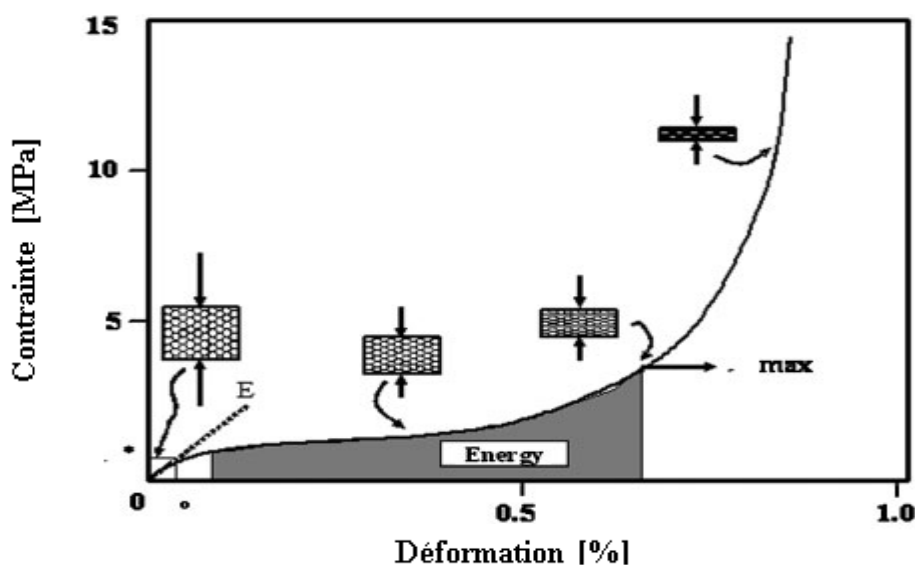


Figure II.9. Typique de compression courbe contrainte-déformation pour le liège [44,58], (tiré à part de Réf. [58]).

D'après la figure II.9, la première région, jusqu'à une déformation d'environ 7%, correspond à une flexion élastique des parois des cellules ; le second plateau est presque horizontal, qui s'étend à une déformation d'environ 70%, provoquée par le flambage progressif des parois

cellulaires ; Enfin, l'écrasement des parois cellulaires et l'effondrement complet des cellules provoque la courbe à la hausse raide [58, 59, 60]. La contrainte de l'effondrement et de la déformation de liège correspondant à l'extrémité de la région du plateau, sont résumées dans le tableau II.1.

Lorsque la compression est dans la direction NR, la paroi cellulaire de courbure latérale, à redresser et à des contraintes élevées, inverser la tendance d'ondulation, ce qui conduit au rétrécissement dans la direction R et, par conséquent, à un rapport de Poisson négatif à des contraintes élevées [61].

L'épaisseur des planches de liège, à un effet important sur les propriétés mécaniques [62, 63]. La plus faible résistance à la compression dans les trois directions principales et le module d'Young inférieure de liège avec le calibre supérieur peuvent largement s'expliquer par les différences dans les dimensions de la cellule et à l'ondulation motif ; dans les directions tangentielles et axiales, l'effet des pores devrait également être inclus dans les modèles de compression [64].

Tableau II.1. Propriétés mécaniques générales de liège.

propriétés	valeur	Références
Module de compression, liège naturel, non bouillie [MPa]	8–20 (R) 13–15 (NR)	[65, 66, 67] [66]
Module de compression, bouilli [MPa]	6 (R) 8–9 (NR)	[66] [66]
Module de la compression à 100°C, 28 jours [MPa]	11(R) 11 (NR) 15 (R)	[65] [65]
Module de la compression, à 150°C, 28 jours [MPa]	14 (NR) 38 (R)	[65] [65]
Module de traction, bouilli [Mpa]	24–26 (NR)	[57] [57]
Réduire (flambage) déformation [%]	4 (R) 6 (NR)	[44] [44]
Contrainte de rupture en traction [MPa]	1.0 (R)	[44]
Ténacité à la rupture, bouillie [MPa m ^{1/2}]	1.1 (NR) 9 (NR) 60–130	[44] [44] [57,44]
Le coefficient de Poisson, bouillis	0– 0.097(NR/NR)	[44, 61] [44, 61]
Coefficient de perte à 0,01 Hz	0–0.064(NR/R) 0.26– 0.5(NR/NR) 0.1–0.3	[44, 61] [44, 62]

R, mesurée dans la direction radiale ; NR, mesurée dans des directions non radiales.

Le traitement thermique dans l'air affecte les propriétés de compression de liège de reproduction. Rosa et Fortes [67] ont rapporté que le traitement à 100-300°C réduit considérablement la force de liège.

Le traitement thermique avec de l'eau (le processus industriel d'ébullition [68]) affecte également les propriétés mécaniques du liège. L'absorption d'eau pendant la cuisson ramollit les parois des cellules, tandis que les différences de pression entre les cellules adjacentes induisent des contraintes de traction suffisante pour redresser les murs [66]. Cela provoque trois principaux changements dans les propriétés mécaniques : la réduction de la force et de l'anisotropie (en particulier dans la région élastique) et l'apparition d'une limite d'élasticité plus forte au cours de la compression dans la direction R. Le dernier effet est fortement lié à la réduction de l'amplitude des ondulations, comme avec des amplitudes plus élevées, le rendement de la transition devient moins fort et la région de plateau moins bien définie.

Les courbes moyennes 'contrainte-déformation' tractions sont présentées sur la figure II. 10 [57]. Les propriétés obtenues sont résumées dans le tableau II.1. Les courbes pour les deux directions NR (A et T) sont tout à fait différentes de celui de la direction R qui représente une zone intermédiaire avec des dentelures. Cette région intermédiaire a été expliquée en termes d'apparition de microfissures successives qui se propagent à travers quelques cellules environnantes, avant que la croissance soit arrêtée [57].

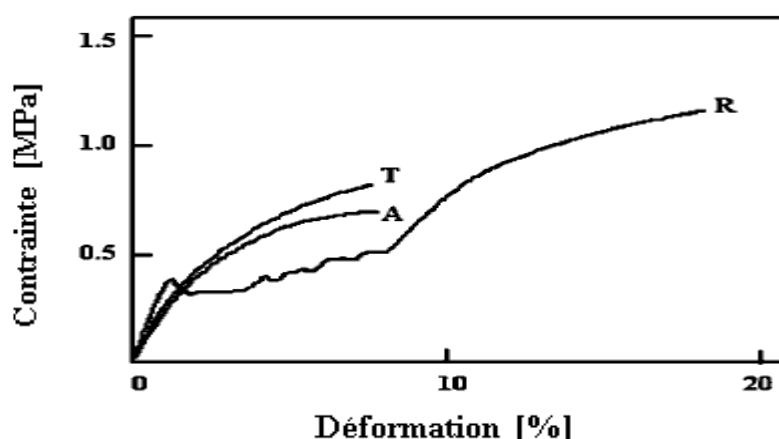


Figure II.10. Comportement mécanique en traction pour le liège, dans toutes les directions (LRT) [57].

En général, le liège présente un comportement différent en traction et en compression. Rosa et Fortes [57] ont rapporté que le module d'Young en compression est sensiblement inférieur à celle de la traction. Le plus grand module de traction peut être expliqué en termes de rigidité des plaques ondulées (parois cellulaires) qui augmente à mesure que l'amplitude des

ondulations diminue : la compression augmente l'amplitude, alors que la traction diminue [57, 38]

II.6. Utilité du liège

II.6.1. Bouchons en liège naturel

Pendant plusieurs siècles, le liège s'est avéré être la fermeture la plus efficace pour le vin, la protection de ses qualités et lui permettait de développer et d'améliorer au fil du temps. La technique d'arrêt des bouteilles de vin au nettoyage, le liège non scellé a été perfectionné par les moines bénédictins au VIIe siècle [44, 57] puis, en 1680, la première utilisation de liège pour fermer champagne par Don Pierre Perignon, a été le précurseur commencé d'une révolution dans le vin en bouteille [38, 69, 70], l'imperméabilité du liège aux liquides et aux gaz, provenant du fait que ses parois cellulaires fermées sont principalement constituées de subérine, et sa grande compressibilité et la flexibilité. Il est idéal pour étanchéité des bouteilles [38, 69, 70]. Le liège est recommandé pour les bouteilles de vin de réserve et des vins qui ont besoin de l'âge dans la bouteille. Les bouchons en liège naturel sont perforés directement de la meilleure écorce de liège de qualité.

II.6.2. Isolation du liège

Pour les applications d'isolation, des agglomérats de granulés de liège (noir), sont employés. Ils sont fabriqués dans un autoclave fermé à une température élevée (environ 300°C) et de pression (environ 40 KPa), sans l'utilisation de colle [71, 72]. Ce processus industriel induit la dégradation thermo-chimique de la paroi cellulaire du liège [64], avant l'expansion de ces granulés, comme discuté ailleurs [66]. Les sous-produits de dégradation agissent comme des adhésifs naturels entre les granules à former le liège [64, 67, 73]. Ces agglomérats expansés de noir sont produits à partir des bouchons de qualité résiduelle et plus faible, impropres à d'autres applications ou à partir de déchets de liège et les résidus provenant d'autres procédés industriels [42, 74, 75]. Isolation du liège aggloméré à trois applications principales : isolation thermique [71], absorption acoustique et amortissement des vibrations. Ainsi, les agglomérés de liège sont utilisés pour diverses applications de construction ; les murs intérieurs ou extérieurs, des bâtiments et des plafonds, pour fournir une isolation thermique et acoustique et l'isolation de sous-revêtement pour minimiser la transmission des bruits de répercussion [76, 77].

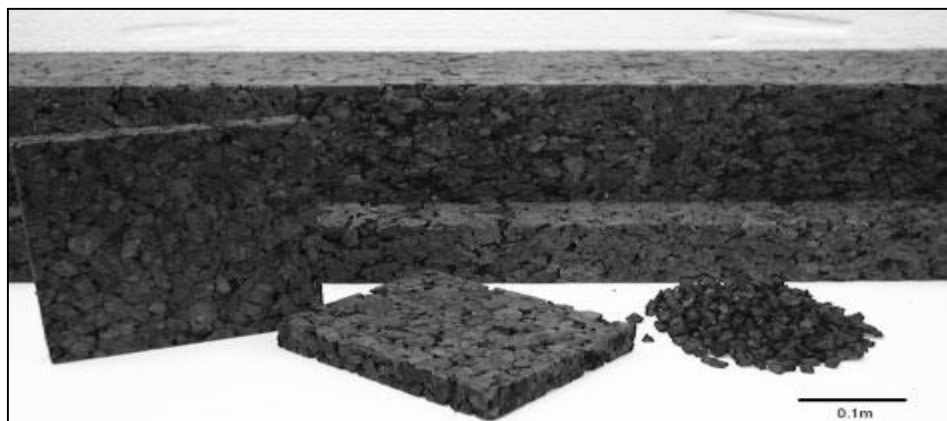


Figure II.11. Différentes formes de panneaux isolants en liège [108].

Tableau II.2. Propriétés d'isolation en liège aggloméré [71, 76].

Propriété	Intervalle de valeurs
Densité [Kg m^{-3}]	100-130
Température de fonctionnement [K]	97–383
Conductivité thermique (20°C) [$\text{KJ m}^{-1} \text{S}^{-1} \text{K}^{-1}$]	4.1×10^5
Chaleur spécifique (20°C) [$\text{KJ Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	1.7-2.1
Coefficient de dilatation thermique [W/C°]	40×10^{-6}
Perméabilité à la vapeur [$\text{Kg Pa}^{-1} \text{S}^{-1} \text{m}^{-1}$]	4.2×10^{12} à 12×10^{12}
Résistance à la traction [MPa]	0.05
Résistance à la compression à 10 % [MPa]	0.25
Flexion traction* [KN m^{-2}]	1.6×10^4

* Force pour matériau de flexion avec une surface transversale.

II.6.3. Autres applications

Au cours de la production de bouchon, une grande quantité de liège n'est pas utilisée car elle ne convient pas ou est éliminée au cours de la production. Ce matériau est granulé et utilisé dans une variété d'applications, principalement pour la production de composites de liège/caoutchouc à usage général aggloméré [78] et agglomérats de paroi [79] et revêtements de sol.

Pour la fabrication d'agglomérés, des granulés de liège sont mélangés avec un liant polymère et compressés à chaud, sous pression. Les variables les plus importantes dans ce processus sont la taille et la fraction de granulés de liège dans le mélange (aussi élevé que 90% en

poinds) ; le type de liant polymère (des polyuréthanes, des résines phénol-formaldéhyde, etc.) et de la densité de tassement. Les blocs obtenus sont stratifiés, en forme de dimensions finales et terminés. Des articles tels que des semelles de chaussures, [80] tableaux d'affichage, des cadeaux et des panneaux sont produits de cette manière. Les agglomérats de panneaux de sol décoratifs sont réalisés d'une manière similaire, mais plus rigide et plus solide. Ceci est habituellement accompli en changeant la pression de remplissage ou à l'aide d'un liant différent. Dans certains cas, une couche polymère de protection est utilisée pour augmenter la résistance à l'usure. Ces agglomérats peuvent être utilisés seuls ou en produits multicouches (ensemble avec les panneaux de fibres de bois à haute densité, polymère et des couches adhésives). Les propriétés les plus importantes du liège pour cette application sont sa haute résistance et d'absorption d'énergie, près de coefficient de Poisson zéro (pour plus de confort lors de la marche) et coefficient de friction élevé. Composites liège / caoutchouc sont produites par addition de granulés de liège pour une formulation de caoutchouc ; le mélange est ensuite aggloméré, vulcanisé et façonné. Presque tous les types de caoutchoucs peuvent être mélangés avec du liège [81]. La principale application de ces composites est : les joints [82] pour les voitures et les contenons d'huile. En plus ils sont imperméables aux liquides, le faible ratio de Poisson de liège signifie que ces joints ne souffrent pas d'extension latérale excessive [61].

II.6.4.Tendances futures

Le liège possède des propriétés spécifiques (physiques, chimiques et mécaniques) qui lui confèrent un grand potentiel pour de nouvelles applications. Par exemple, le liège a été choisi pour une application aérospatiale en raison de ses propriétés thermiques, la vitesse de combustion lente et l'absorption des chocs capacités [83].

Sur les figures II.12 et II.13 sont les applications mentionnées ci-dessus, respectivement :



Figure II.12. Bouchons agglomérés, panneau d'affichage, des semelles de chaussures et des revêtements de sol [84].



Figure II.13. Isolation de la toiture, isolation des murs creux et des toitures et des combles isolés [84].

Chapitre III :

Etude théorique sur les composites à base du liège

III.1. Introduction

Le liège est un matériau qui a été utilisé par homme durant les 5000 dernières années. C'est un matériau stratégique utilisé pour de multiples applications. Beaucoup de matériaux de liège actuels sont en composites, en particulier des matériaux de liège pour revêtements des sols et murs et plusieurs autres bâtiments et les applications industrielles. Les développements récents dans la recherche du liège sont passés de la relation liège vin classique de qualité et les questions environnementales, l'exploitation des résidus de l'industrie du liège et de nouveaux matériaux à base de liège. Au cours des dernières années un certain nombre de matériaux composites à base de liège nouveau ont été élaborés [85].

III.2. Composites à base du liège actuel, sur le marché

Les agglomérats de liège sont divisés en deux catégories : liège composite (liège aggloméré) et liège expansé (liège isolation). La deuxième catégorie est constituée seulement de liège naturel sans agents de liaison externes ou toute autre matière ajoutée et, donc, il ne peut être considéré comme un vrai matériau composite, qui ne sera pas discuté dans ce chapitre.

Le liège composite est formé par la liaison de granulats de liège avec différents liants (polyuréthane, la mélamine, le caoutchouc, etc.), transféré des produits tels que des bouchons agglomérés de liège, revêtements de sol, joints, etc. Les caractéristiques physiques et chimiques des liants déterminent la force de s'agglomérer et, donc, ses applications [86]. L'industrie de déchets du bouchon, le liège de faible qualité (de déchets) et enfin liège mâle sont tous utilisés pour produire des granulés de liège. Ceux-ci sont séparés et classifiés selon la densité et la taille des grains. Ces granulés de liège peuvent être utilisés comme produits finals dans plusieurs applications ou utilisés comme matière première pour la production de liège de composition [42]. En conséquence, liège composite est fait de granules qui ont été assemblés à l'aide de synthèse différente ou des agents de liaison naturels (habituellement d'uréthane, à base de mélamine et les résines phénoliques).

La production de caoutchouc de liège est similaire à la production d'autres produits caoutchouc [42]. Les matériaux en caoutchouc de lièges plus courants utilisent des granulés de liège de 60-70 kg/m³, dans 15 à 260% en poids par rapport au caoutchouc. Les matériaux en caoutchouc de liège sont principalement utilisés dans les joints (moteurs à combustion, etc.), l'isolation des vibrations et les revêtements lourds.

La plupart des autres produits en liège sont fabriqués par des procédés similaires à la chaussée et revêtement mural en produits liège [85] comme, par exemple, de charge et de joints de dilatation.

Dans les bâtiments et autres ouvrages de construction civile, les produits en liège peuvent être utilisés pour l'isolation thermique, l'isolation des vibrations, la correction acoustique, le revêtement des sols, le revêtement mural, faux-plafonds, et les joints de dilatation. Certains de ces produits en liège peuvent être composés avec d'autres matériaux de construction : par exemple, la composition de liège et de MDF ou HDF (panneau de fibres à haute densité) et de placage de bois. Certaines applications spécifiques de liège dans l'environnement industriel sont : dalles et feuilles de liège, isolation des tuyaux, moule de revêtement de batterie, isolation frigorifique, machines feuilles anti vibrations, isolation etc., caoutchouc de stockage de liège résistant à l'usure, antidérapant et insonorisant, résistant à la graisse de l'huile et des sels qui le rend approprié à des fins industrielles et plancher du véhicule. Dans les applications de chaussures, les matériaux de liège sont idéaux pour les exigences techniques de l'industrie de la chaussure et peuvent être utilisés dans la première de propreté / semelles, talons, unique et charges fondent, milieu semelles, revêtements, semelles moulées (applications).

Outre les applications automobiles et industrielles, les industries aéronautiques et militaires sont aussi de grands consommateurs de produits dérivés de liège. Le liège aggloméré, ignifuge, est utilisé dans les navires de guerre, et le revêtement interne des sous-marins [42,87]. Certains matériaux multicouches ont également été développés, par exemple, pour les sous-couches de systèmes de revêtements de sol d'après [88]. Les mesures des isothermes chargent et de décharge à partir du liège aggloméré sont disponibles d'après [89].



Figure III.1. Bâton de liège aggloméré pour la production des bouchons [85].

III.3. Nouveaux composites à base de liège

Dans ce chapitre, de nouveaux matériaux composites de liège, développés dans les dernières années et qui ne sont pas encore sur le marché sont examinées [85].

III.3.1. Composites sandwiches à base de liège

Le liège aggloméré est un noyau idéal pour les matériaux composites pour des structures sandwich légères, pour différentes utilisations telles que dans les applications aérospatiales, automobiles et dans la construction en raison de leur très haute performance mécanique et de leur faible poids [90].

Les études de Castro et Silva [90] ont été basées sur les sandwiches constitués de carbone/époxy comme peau et de trois types de matériaux de bases différentes : Nomex, Rohacell 71 WF rigides, mousse et liège aggloméré. Dans un premier temps, trois types d'agglomérés de liège commercial (avec différentes tailles de granulés) ont été testés confirmant le faible rendement mécanique par rapport à des matériaux d'âme, classiques. Pour améliorer le comportement mécanique du liège en tant que matériau de cœur, trois nouveaux types d'agglomérés de liège ont été fabriqués avec du liège granulé classique, avec une résine époxy. Les essais de flexion statiques et charges dynamiques ont été réalisés afin de caractériser les résistances mécaniques des différents types d'agglomérés de liège qui ont été obtenus en considérant distinctes les variables de production. Les résultats des essais expérimentaux ont montré que la performance des agglomérés de liège dépend essentiellement de la taille du granulat de liège, de sa densité et de la procédure de collage, utilisé pour la cohésion des granulés et ces paramètres peuvent être ajustés.



Figure III.2. Schéma du procédé de fabrication utilisé pour obtenir les agglomérats de liège époxy.

L'analyse expérimentale et la modélisation par MATLAB intégrés par le code FE d'un ensemble de plaques sandwiches avec des noyaux composés de liège avec différentes propriétés (densité, granulométrie et épaisseur) à l'intérieur de deux faces en aluminium est

effectuée par Santos Silva et Dias rodrigues [91] pour une meilleure compréhension de l'influence de composé de liège sur les propriétés dynamiques d'une structure sandwich.

Les résultats montrent que la méthode de caractérisation des propriétés des composés de liège dépendant de la fréquence, permet une identification précise des fonctions d'extension de module de stockage et du facteur de perte qui peuvent être inclus dans le modèle FE pour une évaluation de l'analyse directe de la fréquence FRF.

Les études de Mir et al [92] ont été basées sur la caractérisation mécanique et hygrothermique des panneaux sandwichs à base de liège aggloméré blanc (moyenne et basse densité), élaborés par une méthode simple et économique (méthode d'infusion). Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence du procédé de fabrication sur les panneaux sandwichs à base de liège en processus d'infusion qui aide les concepteurs à simuler les panneaux de liège lors de la conception de structures. Cette étude a pris en compte l'influence de la présence de résine à l'intérieur du liège agglomère dans le panneau sandwich ; il est à noter que la variation de la densité du liège aggloméré et la présence de résine influencent les caractéristiques mécaniques et hygrothermiques des panneaux sandwichs.



Figure III.3. Échantillons de sandwich à base de liège aggloméré élaboré par la méthode infusion [92].

Le travail de Sousa-Martins et al [93] a été concentrée sur le composite sandwich avec deux micro-agglomérés de liège composés (MAC) de différentes densités qui sont incorporées comme noyaux dans des structures sandwichs avec des feuilles de surface en alliage d'aluminium 5754-H22. Les échantillons ayant une épaisseur constante des feuilles de surface et différentes épaisseurs de noyau sont testés. Ces structures sont fixées sur un pendule balistique 4-câble et soumises à un souffle ondes et proviennent de la détonation de 30 g d'explosif brisant (C₄) à une distance de séparation fixe (300 mm). Après avoir atteint la limite d'élasticité, le liège présente une région de tension pratiquement constante jusqu'à ce que la

densification croissante des déformations soit atteinte, ce qui lui permet d'absorber des quantités considérables d'énergie.

La flexion des feuilles de surface devant et derrière, ont été mesurées, ainsi que la transmission d'impulsion et le mouvement du balancier. Les effets sur la réponse de la structure des épaisseurs et des densités de noyau de base ont été déterminés. Une relation linéaire entre la réduction de l'épaisseur du noyau par rapport à l'épaisseur et de la base initiale est déterminée pour les deux composés MAC.

En général, une diminution de l'impulsion transmise à la structure avec l'augmentation de l'épaisseur de l'âme du sandwich, a été observée. Cependant, ce comportement global n'était pas clair pour tous les échantillons testés. Les valeurs ont été comparées avec l'épaisseur du noyau et de la densité initiale (pour les deux composés de NL20 et TB40) de façon à déduire le comportement de chaque composé. La plupart des spécimens de faible densité des noyaux ont présenté des valeurs de déviation (à la fois pour les feuilles de la face avant et arrière) plus élevées que celles des échantillons de densité plus élevée.



Figure III.4. Vue d'une composée structure sandwich NL20 MAC : (a) l'ensemble et (b) épaisseur (transversale) [93].

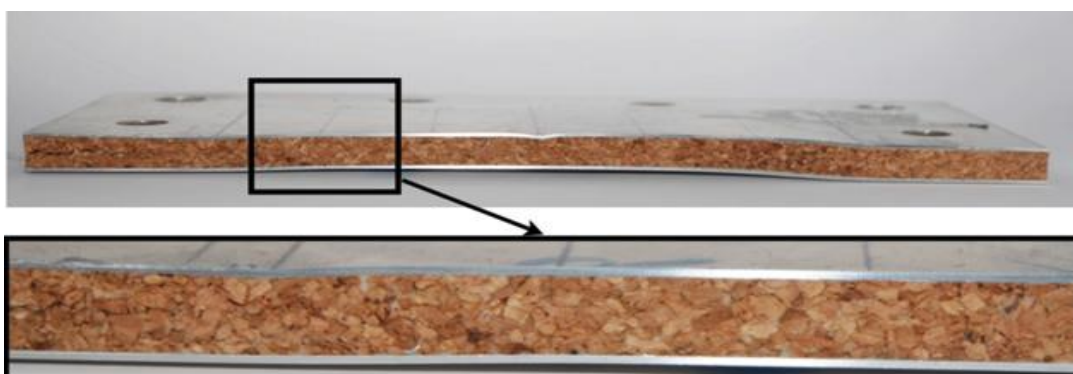


Figure III.5. Profil déformé (section transversale) du composé en plaque sandwich NL20-10 MAC [93].

Une relation linéaire de dépendance a été déterminée entre la réduction relative de l'épaisseur du noyau initial et l'épaisseur des deux composés. À partir du résultant des modes de déformation, il a été possible d'observer que la flexion est probablement la principale déformation du mécanisme possible qui peut être négligée.

Une solution de la structure sandwich-bruit pour le problème du rayonnement réalisé par James Sargianis et al [94], assure un effet synergique qui donne une structure composite sandwich sans bruit, sans sacrifier la performance mécanique ou poids, a été obtenue par couplage de surface des feuilles de fibres de carbone, l'un des matériaux plus résistants qui n'a jamais été fait, avec du liège aggloméré naturel en tant que matériau de base qui, conçu de façon optimale, fournit une performance inégalée dans l'acoustique et les vibrations, sans la nécessité de matériel supplémentaire. En outre, le liège aggloméré montre des propriétés thermiques analogues à des mousses synthétiques, ce qui est important dans certaines applications en industrie aéronautique, aérospatiale. Ceci a un impact fort et large dans diverses applications d'ingénierie, comme l'énergie éolienne, l'aéronautique ou automobile, qui peuvent tous sensiblement bénéficier d'une telle solution.

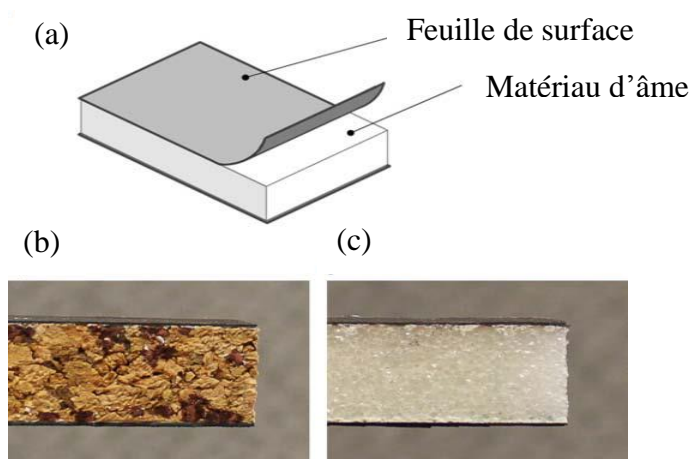


Figure III. 6. (a) Schéma de la poutre sandwich. Notez le matériau d'âme en épaisseur entre les deux, face avant minces. (b) Photographie de la poutre composite sandwich avec la fibre de carbone-époxy comme peau et du liège aggloméré naturel, comme âme. (c) Photo de la poutre composite sandwich avec fibre de carbone-époxy comme peau et avec Rohacell 110 WF comme noyau.

L'étude de La Rosa et al [95] a été concentrée sur l'analyse de la conductivité thermique et l'analyse de l'environnement pour différents matériaux qui sont destinés à être utilisés comme parois externes des bâtiments. L'analyse du Cycle de Vie (ACV) méthodologie a été appliquée pour évaluer les impacts environnementaux de quatre différents systèmes proposés. Un matériau éco-sandwich contenant liège, fibres de lin et résine époxy à base de

biomatériaux naturels, a été fabriqué et testé afin d'évaluer la conductivité thermique. Les résultats de l'ACV montrent que lorsque l'éco-sandwich est utilisé, la performance environnementale est plus faible, comparée à d'autres matériaux traditionnels, dans la phase de fabrication. Néanmoins, les impacts dus aux transports du matériel et de l'installation pourraient être réduits en raison de la légèreté et de la manipulation de l'éco-sandwich.

D'après les résultats trouvés, il a été constaté :

- Une faible conductivité thermique permet d'appliquer des enveloppes relativement minces de construction à haute résistance thermique ($m^2 K / W$) et à faible coefficient de transmission thermique U (W / m^2K).
- Un faible coefficient de transmission thermique permet d'utiliser moins de matériaux pour la construction du mur, mais les impacts environnementaux évalués dans la phase de fabrication dépendent plus du type de matériel que de leur poids.

Néanmoins, les murs et les toitures légères ont l'avantage d'être faciles à monter. L'installation rapide de structures légères peut réduire le temps de cycle de construction à quatre semaines [96].

Les études de Sanchez-Saez et al [97] ont été examinées le comportement d'impact à grande vitesse de structures sandwiches à base de liège aggloméré comme âme. La performance balistique a été étudiée par des tests impact perforation. Trois types d'échantillons différents ont été testés : liège aggloméré espacé de deux fines plaques d'aluminium, et une paire de plaques minces en aluminium séparées par liège aggloméré comme une âme. Le comportement du liège aggloméré et les effets de l'âme de liège ont été analysés en termes de limite balistique, de vitesse résiduelle, et absorption d'énergie. La limite balistique de structures de liège fourré a légèrement augmenté, tandis que l'énergie absorbée a été fortement augmentée par la présence de l'âme de liège.

Dans ce travail, le comportement balistique de liège aggloméré et son influence dans le comportement de plaques minces en aluminium soumis à grande vitesse les impacts d'un projectile de faible masse ont été étudiés. La limite balistique du liège aggloméré est faible, étant environ la moitié de la limite balistique des plaques minces d'aluminium. L'énergie absorbée par le liège aggloméré diminue rapidement une fois la perforation complète de la plaque est produite. En revanche, l'énergie absorbée pour les plaques d'aluminium diminue plus lentement lorsque l'énergie de choc augmente. L'ajout d'une âme de liège à une structure composée de deux plaques minces d'aluminium ne modifie pas les mécanismes de rupture des plaques. Une augmentation de la limite balistique, et, en

particulier, de l'énergie absorbée à vitesses d'impact qui causent perforation est observée lorsque le noyau de liège est inclus.

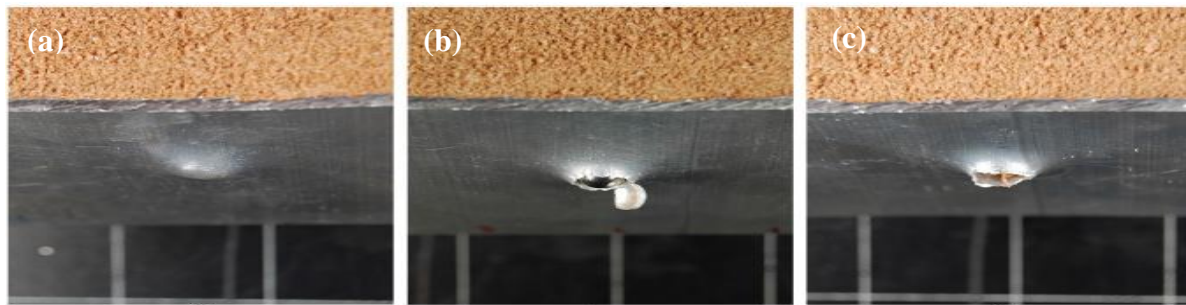


Figure III. 7. Retour de la surface des plaques d'aluminium touchées avec noyau de liège : a) vitesse d'impact inférieure à la limite balistique, b) vitesse d'impact à la limite balistique, et c) vitesse d'impact supérieure à la limite balistique.

L'objectif de l'étude de Reis et Silva [98] a été focalisée sur l'analyse de la viabilité et le comportement mécanique des différents échantillons en sandwich, avec des faces carbone/époxy et de différents types de liège aggloméré comme des noyaux, et les résultats obtenus ont été comparés avec des échantillons similaires en utilisant les noyaux des matériaux courants. Les essais expérimentaux de cisaillement et les essais de flexion trois points ont été menés et les évolutions de la charge-déplacement des courbes des différents agglomérats de liège/sandwiches ont été analysés et discutés. Les résultats obtenus montrent que des améliorations importantes existent encore dans l'utilisation des matériaux d'âme à base de liège aggloméré.

Dans tous les résultats obtenus, les charges maximales, les contraintes de cisaillement et le module de cisaillement, il existe une relation entre la taille des grains/densité et le comportement des échantillons de liège aggloméré.

Dans tous les essais, les noyaux obtenus, le nid d'abeilles et ROHACELL, beaucoup de valeurs plus élevées que les échantillons de liège aggloméré, indiquent que les noyaux de liège aggloméré doivent être améliorés pour devenir compétitifs en ce qui concerne leurs propriétés mécaniques.

Les résultats montrent que les noyaux à base de liège sont adaptés pour une application comme des matériaux de base de type sandwich, mais ils ne sont pas tous optimisés comme les matériaux utilisés pour la comparaison. En général, la défaillance se produit dans le matériau utilisé pour coller les granulés de liège dans les agglomérés de liège, ce qui signifie qu'il est possible, en développant de nouvelles techniques et de matériaux liants, à améliorer le comportement des noyaux à base de liège aggloméré.



Figure III.8. Échantillons sandwichs avec des noyaux de : (a) agglomérés de liège et (b) Rohacell et la CEA en nid d'abeille.

III.3.2. Composite des déchets de carton : liège / boisson

Un procédé breveté pour la production d'agglomérats composites comprenant un groupe fibres et de particules à partir de la fragmentation et / ou de broyage de déchets, par exemple, des déchets d'emballage constitués par des couches de feuilles en matière plastique / carton / aluminium (briques de boisson) et des particules de liège sans ajout de liants externes ; par pressage et de chauffage pendant une période de temps suffisant pour réaliser l'agglomération et la résistance mécanique, a été mis au point (voir la figure III.9).

Ce processus est utilisé, de préférence, avec des déchets d'emballage (par exemple des cartons de boissons, bouchons de liège), mais il peut aussi être utilisé par des déchets industriels. Il a été noté qu'il était possible de produire des matériaux composites intéressants basés sur les déchets urbains ou industriels sans utilisation de liants supplémentaires qui ont un large éventail des caractéristiques avec intérêt pour plusieurs applications. Les nouveaux matériaux composites ont un comportement physicomécanique qui est similaire à ceux des autres matériaux appropriés pour une large gamme d'applications et permettant de prévoir des utilisations comme revêtements de sol, panneaux de séparation, des meubles et d'autres applications similaires. De nouvelles études sur ces composites sont également prévues, notamment, pour des applications comme matériaux anti-électrostatiques (par exemple, les revêtements de sol pour les salles informatiques) en raison de la présence d'un conducteur électrique (aluminium) et, également, des applications comme matériaux intelligents. Les mesures de la charge isotherme et courants de décharge de cartons liège / boissons composites ont été faites. Les caractéristiques actuelles isothermes et la conductivité des échantillons ont été étudiés dans des conditions de champ électrique, la température et l'environnement (vide et dans l'air à une humidité relative ambiante). Les nouvelles propriétés mécaniques et acoustiques des composites ont également été étudiées afin de comparer avec d'autres

matériaux disponibles dans le commerce, également basés dans les composites de liège [89-105].



Figure III.9. Liège, cartons à boissons et des échantillons composites [85].

III.3.3. Agglomérats liège/thermoplastiques

Un agglomérat des particules de liège avec des agents de liaison thermoplastiques a été développé pour utiliser la plupart du temps la poudre de liège, les principaux déchets de liège industriel (voir la figure III.10).



Figure III.10. Échantillons de composites de liège / thermoplastiques [85].

Des essais ont été effectués en utilisant poudre de polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), avec de la poudre de liège : rapports volumiques thermoplastiques de 04/01 et 05/01. Faible indice de fusion thermoplastique a été choisi en raison de leurs avantages par rapport aux colles classiques, à savoir, l'absence de solvants et de non-toxicité. Dans le cas de certaines matières thermoplastiques, par exemple, le polyéthylène, le collage des feuilles de revêtement de surface, approprié est possible dans une opération d'agglomération unique. Ces nouveaux composites sont raides et durs et non élastiques, contrairement aux agglomérés de liège, et peuvent être utilisés pour les panneaux dans de multiples applications. L'utilisation d'autres composants a également été prévue (par exemple les pailles) ; ces techniques et ces produits ont été brevetés [86, 100, 101, 106-110]. Une autre étude de mélanges PP-liège [108] a été

réalisée. Une modification de la surface du liège est réalisée afin d'améliorer l'adhérence matrice-bouchon, sur la base d'un traitement d'eau chaude à la température ambiante pendant 1-3 heures, puis séchage (70°C, 3h). La densité diminue en fonction du temps de traitement de l'eau. Les essais de traction de la matrice PP renforcés avec du liège traité, montrent l'importance de cette modification de surface.

III.3.4. Composites hydroxypropyl-cellulose /liège

Composites de l'hydroxypropyl-cellulose (HPC), d'un polymère biocompatible, de la poudre de liège, le déchet le plus important dans la transformation du liège, offre une nouvelle classe de matériaux d'intérêt. Films solides étaient préparés avec différentes quantités de poudre de liège (particules <50 pm) (0.0 ; 0.5 ; 1.0 et 10% en poids / poids) et avec HPC et d'un acide, le 1,4-diisocyanato-butane (BDI) (7.0% p / p). Les films solides ont également été caractérisés par microscopie électronique à balayage (MEB) et une partie nucléation points (~ 0,3 um) ont été trouvés [86, 109-111].

L'étude de l'agglomération de granulés de liège à l'aide de plusieurs liants écologiques extérieurs, fondé sur la lignine modifiée, par les conditions de fonctionnement (pression, chaleur et temps), qui ne suffit pas pour accomplir une bonne agglomération, a été réalisée par [112, 113]. Certains des liants utilisés dans la composition de liège peuvent provoquer des problèmes toxicologiques (par exemple formaldéhyde) et outre cela, la production de liège aggloméré à base de poudre de liège est difficile, voire impossible, en raison de son énorme surface ; la découverte d'une technique d'agglomération pour pallier ces inconvénients serait très importante.

III.3.5. Composite de la poudre de liège à base de la pré-polymérisation de la subérine et la polymérisation des composants de subérine

Les travaux scientifiques [110, 114] ont été basés sur des traitements préalables de la poudre de liège pour la subérine, polymérisation a été réalisée en utilisant en alternance les solutions alcalines et acidification suivies d'un processus d'élimination de la phase liquide jusqu'à un degré suffisant de siccité sont obtenus. Par la suite, un pressage à chaud de cette matière séchée a été effectuée à l'aide de plusieurs moyens de remplacement et des conditions de fonctionnement, pour la polymérisation des constituants chimiques de liège qui fonctionnent comme des agents de liaison, afin d'avoir un produit de liège aggloméré à base de poudre de liège.

Le traitement de la poudre de liège peut être obtenu par hydrolyse alcaline dans l'eau ou dans l'alcool qui peut être aussi mélangé avec d'autres composants, avant l'étape de pressage. Les matériaux issus sont rigides et ont une masse volumique d'environ 1000 kg.m^{-3} .

III.3.6. Matériau résine synthétique / liège

Une étude japonaise [115] est basée sur l'affirmation d'un matériau résine synthétique avec du liège. Ce matériau est formé par l'empilement d'une couche de résine oléfinique de synthèse contenant de la poudre de liège, une couche de corps en mousse de résine synthétique oléfinique et une couche de résine à l'intérieur ou sur la surface inférieure de la couche de corps de mousse. Au moins, un copolymère d'éthylène-oléfine en C_{4-12} est compris dans la couche de résine oléfinique de synthèse contenant de la poudre de liège et dans la couche de résine synthétique du corps de mousse oléfinique.

D'autres matériaux peuvent être mentionnés d'après [116]. Une couche de mousse de résine de polyoléfine, une couche adhésive et une couche fibreuse sont successivement stratifiées sur une couche de résine contenant une résine de polyoléfine. La poudre de liège contenant du stratifié de résine de polyoléfine peut être utilisée comme un élément de construction avec d'excellentes propriétés physiques, propriétés antitaches, propriétés d'amortissement, propriétés isolantes et une bonne adhérence à un matériau de base en bois.

III.3.7. Composite liège-plâtre

Les travaux d'Hernandez-Olivares [117] ont été basés sur une analyse expérimentale sur un nouveau matériau composite liège/gypse, ils ont montré que le liège et le plâtre sont compatibles entre eux, et que beaucoup de nouveaux matériaux de construction peuvent être élaborés en mélangeant les matériaux dans différentes fractions volumiques. Il existe une bonne interaction entre la matrice de gypse et de granulés de liège. Néanmoins, il apparaît que les propriétés mécaniques de ce nouveau matériau composite sont pauvres, en règle générale, et d'autres agents de renforcement (par exemple fibres de verre) sont nécessaires pour augmenter les résistances à la flexion et à la compression de ces composites ; les propriétés d'isolation sont très bonnes, suite à des essais de conductivité thermique. Ce nouveau matériau composite est suggéré pour l'utilisation dans la création d'application, comme cloisons.

En ce qui concerne les caractéristiques d'isolation acoustique, ce composite est un matériau non absorbant le bruit, mais c'est un réfléchissant. Il est semblable à des plaques de plâtre

pour plafonds et murs des cloisons, et il faut un certain type de perforation pour se comporter comme un matériau de construction absorbant du son et du bruit.

III.3.8. Panneau de liège / charbon

Un brevet japonais [118] a été basé sur un développement d'un panneau de liège / charbon. Le matériau sol en liège est moulé en une feuille comme la forme d'un liant à base de résine et poudre de charbon de bois ou de particules et incorporé dans la feuille de liège. Ce matériau présente non seulement d'excellentes propriétés d'isolation thermique, les propriétés élastiques, les propriétés antimites, sonores propriétés absorbantes et perméabilité à l'air, mais aussi des effets comme une action de déshumidification, une action désodorisante, et un ion négatif dont la libération améliorer la santé des utilisateurs.

III.3.9. Mortier polymère léger avec granulés de liège

Les travaux de [119] ont été étudiés deux types de formulations de mortier, avec différents rapports de poids, résine / sable (c. liant / agrégat fin). Dans chaque série, le liège varie de 0% à 45% du volume total cumulé. Les essais de flexion et de compression ont été effectués. À la fois, l'influence de la fraction volumique de liège et le rapport pondéral résine / sable ont été considérés par rapport à la tenue mécanique des mortiers de polymère modifié de liège. Une diminution linéaire a été observée dans les propriétés en fonction de la teneur en volume de liège. La faible densité de liège modifie les mortiers et conduit à une perte lisse des propriétés spécifiques. Les résultats conduisent à des bétons légers de polymères modifiés, avec une ductilité améliorée de compression.

III.3.10. Composites liège-ciment

Des essais en laboratoire ont été effectués [120] sur deux mélanges bitumineux contenant du caoutchouc ou du liège granulé et ont été comparés à celle d'un mélange classique.

Les mélanges ont été conçus pour intégrer une partie des déchets d'autres industries, en réduisant leur élimination dans les décharges, en modifiant les propriétés mécaniques des mélanges, ils pourraient contribuer à réduire le bruit d'interaction pneu-route et, donc favoriser la durabilité des revêtements. Des résultats mécaniques plus durables en comparaison avec d'autres mélanges étudiés ont été trouvés et, d'autre part, une meilleure adhérence entre les particules de liège et le bitume en raison de la structure alvéolaire des particules de liège, a été observé sur les images MEB.

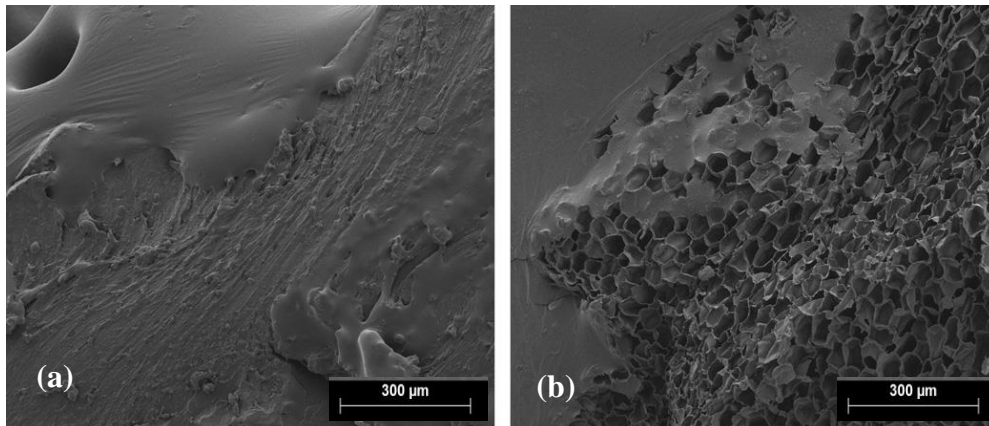


Figure III.11. Images MEB de l'interface granulaire : (a) entre le bitume et le caoutchouc (b), et entre le bitume et le liège.

III.3.11. Matériau élastomère de polyuréthane avec une charge de liège

Une étude [121] sur les effets des charges, à base des matériaux, notamment, du liège, de la résine de polyuréthane pour l'isolation passive roulement, a été réalisée. Une série de remplissages de liège constituée, réticulé, polyuréthane moulé (PU) de base de polyéthylène, a été synthétisée. Les propriétés mécaniques et thermiques ont été examinées dans les matériaux composites qui ont entre 1 et 15% de liège.

Les propriétés mécaniques des composites ont été trouvés, elles dépendent principalement de la quantité de la charge. L'addition de la charge de liège dans des composites de polyuréthane donne une augmentation du module d'Young et une diminution de l'allongement à la rupture. Ce nouveau matériau composite polyuréthane liège avec de meilleures propriétés d'amortissement, peut être utilisé comme un tampon d'appui pour l'isolation acoustique et vibration, pour les lignes de chemin de fer / métro.

Chapitre IV:

Caractérisation des matériaux utilisés

IV.1. Milieu d'étude (localisation et superficie)

L'entreprise TRANSBOIS est située à l'est du port de Bejaia, à proximité des réseaux d'approvisionnements et de distributions.

L'unité TRANSBOIS s'étend sur une superficie de 14.5 ha dont la majeure partie est occupée par le parc de réception du bois, les premières transformations des grumes et les routes pour la libre circulation des engins. Le reste est constitué de :

- Atelier de production
- Atelier de maintenance
- Locaux administratifs
- Magasins de stockage (produits finis)
- Deux hangars pour les chaudières

IV.1.2. Domaines d'activité

La société par actions TRANSBOIS est la principale société de transformation du bois en divers produits finis comme : le contreplaqué, le panneau latté, le panneau de particules, placage de tranchage et sciage de bois.

IV.2. Matériaux d'expérimentation

IV.2.1. Bois de pin d'Alep

La technique de prélèvement du matériel expérimental, adoptée dans ce travail correspond, à celle prescrite par les normes françaises NF B51-003 [122] et internationales ISO 3129 [123]. Celles-ci représentent les méthodes normalisées de prélèvement des échantillons de bois, pour effectuer des essais de propriétés physico-mécaniques. La méthode implique l'abattage des arbres échantillonnés et leur transformation, pour évaluer directement les propriétés du bois.

Ces essais sont réalisés sur du bois d'essence de pin d'Alep issu du forêt de DARGUINA, est une commune de Kabylie (en Algérie), située à 45 km, à l'est de la wilaya de Bejaïa.

Le climat de la wilaya est du type continental, avec un hiver frais et un été chaud, mais supportable.

Un total de 5 arbres de la région de DARGUINA (Bejaïa), bien conformés, exempts de tout défaut d'altération externe et ayant atteint l'âge d'exploitation (diamètre à hauteur de poitrine (1.30 m), compris entre 45 et 55 cm. Le diamètre maximum fixé à 55 cm s'explique par le fait qu'au-delà de cette valeur, les individus présentaient des défauts importants au niveau du cœur (cadratures). En revanche, le minimum a été fixé à 45 cm, en vue de réduire le risque

d'obtention d'une proportion importante de bois juvénile. Les arbres coupés de pin d'Alep sont coupés sous forme de grumeaux, et mise à l'air libre pendant une semaine, afin d'éliminer une certaine humidité naturelle.

Les grumeaux ont été ensuite débités à la chaîne en scie, en deux, d'une façon longitudinale, puis raboté en raboteuse pour obtenir des surfaces améliorées.

Les plateaux ont été sciés dans la meilleure direction, de manière à éviter la présence de défauts majeurs.



Figure IV.1. Étapes de préparation des éprouvettes (coupe et rabotage), pour la caractérisation physico-mécanique.

IV.2.1.1. Essai physique sur le bois de pin d'Alep

IV.2.1.1.1. Cartographie d'humidité

La teneur en eau est définie comme la proportion en masse d'eau (libre et liée) par rapport à la masse anhydre de l'échantillon selon la norme (NF B 51-004) [124].

Une rondelle de 2 cm a été prélevée et immédiatement découpée en petits cubes de 4 cm de côté, numérotés suivant leur position dans la rondelle (figure IV.2).

Chaque cube a ensuite été pesé à l'aide d'une balance ayant une certitude de 10^{-3} g, pour avoir le poids humide, puis séché dans une étuve à 103 ± 2 °C. Une fois le poids des cubes stabilisé, ils sont pesés à nouveau pour avoir la masse anhydre. On déduit le taux d'humidité de chaque cube suivant la formule (IV.1).

$$H\% = \frac{M_h - M_0}{M_0} \times 100 \quad (\text{IV.1})$$

Avec M_h , la masse du cube humide et M_0 est la masse du cube anhydre.



Figure IV.2. Caractérisation d'humidité du bois de pin d'Alep : (1) disque de pin d'Alep découpé en cubes, (2) séchage des cubes et (3) pesée des cubes.

IV.2.1.1.2. Détermination de la masse volumique

Les éprouvettes de l'essence de pin d'Alep étudiées, ont les dimensions (20x20x20 mm³) et sont d'abord pesées en utilisant une balance électronique, puis mesurées par un pied à coulisse numérique, à une humidité de 12%, comme l'exige la norme française NF B 51-005 (1985) [125].

IV.2.1.1.3. Détermination du gonflement longitudinal, radial et transversal

Les éprouvettes sont mises dans l'eau après avoir été mesurées et pesées ainsi, qu'un marquage dans les trois directions (longitudinal, radial et transversale) a été effectué pour faciliter la poursuite de l'essai et, on a suivi l'évolution des dimensions longitudinal, radial et transversale et leur poids pendant 12 jours.

Les éprouvettes mises dans l'eau sont, chaque jour, repêchées, pesées et mesurées, pendant 12 jours (jusqu'à l'obtention d'une masse constante).

IV.2.1.1.4. Détermination du retrait longitudinal, radial et transversal

Les éprouvettes (20×20×20 mm³) sont mises dans une étuve de séchage à 103 °C. On a suivi l'évolution massique et dimensionnelle des éprouvettes après chaque jour de séchage, jusqu'à l'obtention de masses constantes. La mesure des dimensions des carottes s'effectue à l'aide d'un pied à coulisse à affichage digital (certitude de 0.01mm).

IV.2.1.2. Essais mécaniques sur le bois de pin d'Alep

IV.2.1.2.1. Essai de flexion

L'essai de flexion réalisé par la norme européenne (NF B51 009) [126], est destiné, en premier lieu à évaluer les caractéristiques de rupture et non les caractéristiques élastiques.

L'éprouvette utilisée est de 300 mm de long, à section droite, carrée (20x20 mm²) placée sur deux appuis cylindriques à axes parallèles (30 mm de diamètre) (Figure IV.3).

L'enregistrement de la courbe caractéristique force-déplacement permet de calculer à l'intérieur de la zone de rigidité, le module d'élasticité.

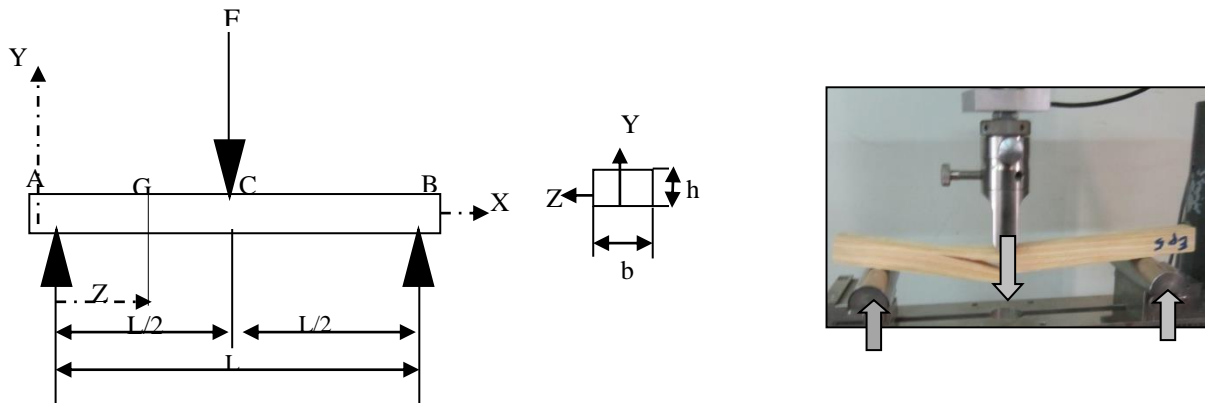


Figure IV.3. Schéma et photo, essai de flexion trois points.

IV.2.1.2.2. Essai de cisaillement

Les essais de cisaillement sont effectués suivant la norme (EN 314-1) [127], sur la machine universelle du type Zwick 250 kN, avec une vitesse de 2 mm/mn.



Figure IV.4. Éprouvette normalisée pour les essais de cisaillement.

IV.2.1.3. Résultats et discussions des caractérisations physico-mécaniques du bois de pin d'Alep

IV.2.1.3.1. Cartographie d'humidité

Une cartographie d'humidité a été établie grâce à un programme réalisé sous Visual Basic. Ayant repéré la position que chaque cube occupe dans la rondelle. À partir de 2 diamètres des rondelles et de la côte des cubes et de leur taux d'humidité, ce programme reconstitue la rondelle et affecte un taux d'humidité à chaque cube, puis estime le taux d'humidité

correspondant à chaque point dans la rondelle via l'utilisation de fonction de forme. Ainsi, il a été fait d'établir une cartographie d'humidité pour chaque rondelle. Nous avons aussi estimé les taux d'humidité moyens de l'aubier et du faux cœur reconnaissables par leur différence de couleur verticale horizontale.

Une première lecture des résultats obtenus (figure. IV.5) indique un taux d'humidité moyen de 96% conforme au taux d'humidité constaté généralement dans les arbres après abattage et, particulièrement dans le pin d'Alep.

La cartographie réalisée (Figure IV.5) indique que la répartition de la teneur en eau n'est pas homogène, ni dans l'aubier, ni dans le faux cœur, mais a tendance à être plus variable dans l'aubier. On note aussi que l'humidité augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de la grume.

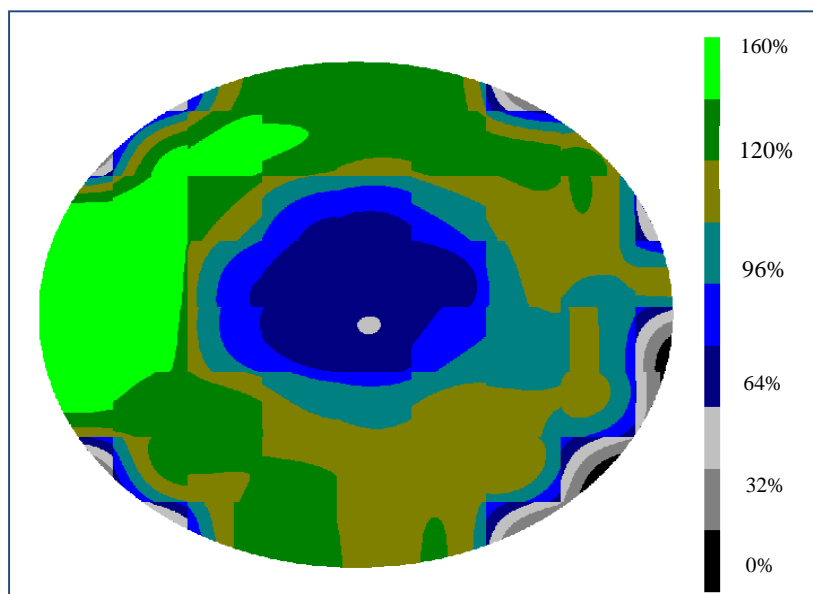


Figure IV.5. Cartographie d'humidité d'une rondelle du bois de pin d'Alep [133].

Nous retenons que la teneur en eau a tendance à être maximale dans la zone de l'aubier qui est très humide (entre 60 et 100%) et un duramen moins humide (entre 30 et 60%), presque proche du point de saturation des fibres. Ces résultats et ordres de grandeur sont confirmés par ceux obtenus sur l'arbre échantillonné à Juvignac (France) et le pin d'Alep (Algérie) [12].

IV.2.1.3.2. Détermination de la masse volumique

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant (tableau IV.1) :

Tableau IV.1. Masse volumique et densité du bois de pin d'Alep étudiée, à 12 % d'humidité [133].

Espaces de bois	Masse volumique [g/cm ³]	densité
Pin d'Alep	0.54	0.54

La valeur moyenne trouvée de la densité du bois de pin d'Alep a été de 0.54. Le bois de pin d'Alep se classe à la limite, entre les bois classés mi-lourds et lourds comme le montrent les résultats de la littérature, indiqués ci-dessus :

- NAHAL (1962) [12] a qualifié le bois de pin d'Alep, le matériau assez léger et donne une densité (sans préciser le degré d'humidité) qui varie entre 0.532 et 0.866.
- Le C.T.B.A (1983) [13], donne une densité au pin d'Alep variant de 0.40 à 0.80.
- Quiquandon (1966) [14] travaillant sur 2 pins d'Alep de forêt naturelle et 2 des plantations, ayant fourni aux totaux 9 billons, trouve une infra-densité 0.53 (correspondant à une densité anhydre de 0.61 et à une densité de 12 % d'humidité de 0.66).
- Tischler (1971) [17] mentionne, tirée de la littérature, des densités anhydres de 0.57 pour le pin d'Alep contre 0.49 pour le pin Sylvestre et 0.53 pour le pin brutia, et des densités à 12 % d'humidité variante de 0.52 en Tunisie à 0.62 en Italie, en passant par 0.54 en Espagne et 0.61 en Israël, pour le premier.
- El Abid (1981) [18] trouve, au Maroc, une infra-densité de 0.38 g/cm³ pour le pin maritime contre 0.45 pour le pin d'Alep.
- Enfin, Collardet et Basset (1988) [128] mentionnent une masse volumique moyenne à 12 % d'humidité de 550 kg/m³ pour le pin maritime et de 450 seulement pour le pin d'Alep.

IV.2.1.3.3. Détermination du gonflement longitudinal, radial et transversal

Le tableau suivant (Tableau IV.2) représente la variation dimensionnelle dans les trois directions principales LRT (Longitudinale, radiale et tangentielle) de pin d'Alep en fonction du temps de séjour dans l'eau.

Le graphe suivant (figure IV.6) présente la variation massique en fonction du temps en jours (séjours dans l'eau).

Tableau IV.2. Évolution massique et variations dimensionnelles du bois de pin d'Alep étudiées en fonction du temps [133].

Temps [jours]	Masse de pin d'Alep [g]	D _L [mm]	D _R [mm]	D _T [mm]
01	6.10	20.12	20.3	20.00
02	7.658	20.13	20.37	20.20
03	8.062	20.13	20.49	20.80
04	8.614	20.14	20.54	20.81
05	8.742	20.15	20.58	20.82
06	8.954	20.15	20.60	20.82
07	9.022	20.16	20.61	20.83
08	9.118	20.17	20.61	20.84
09	9.162	20.17	20.62	20.90
10	9.260	20.18	20.62	20.90
11	9.282	20.18	20.62	21.00
12	9.38	20.18	20.62	21.00

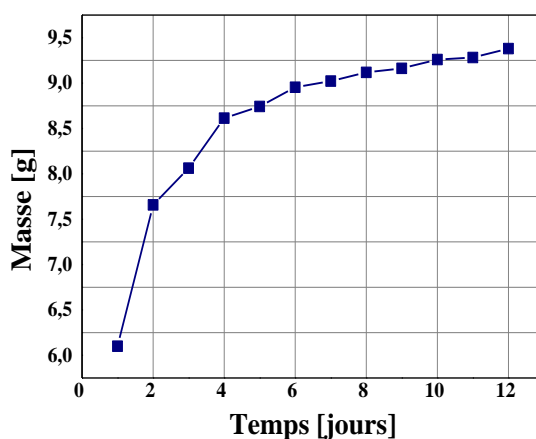


Figure IV.6. Évaluation de la masse de pin d'Alep en fonction du temps (absorption) [133].

La figure suivante (figure IV.7) représente la variation dimensionnelle dans les trois directions principales LRT (longitudinal, radial et transversal) du bois de pin d'Alep en fonction du temps de séjour dans l'eau.

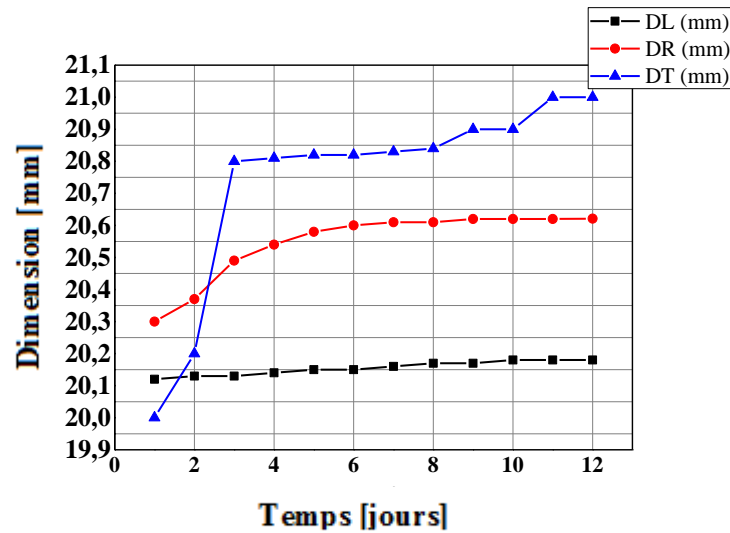


Figure IV.7. Variation dimensionnelle (D_L , D_R , D_T) du bois de pin d'Alep en fonction du temps de séjour dans l'eau [133].

Les différents gonflements sont donnés par les relations suivantes :

$$\alpha_V = \frac{V_f - V_0}{V_0} \times 100 \quad (\text{IV.2}) ; \quad \alpha_T = \frac{T_f - T_0}{T_0} \times 100 \quad (\text{IV.3})$$

$$\alpha_r = \frac{R_r - R_0}{R_0} \times 100 \quad (\text{IV.4}) ; \quad \alpha_l = \frac{L_r - L_0}{L_0} \times 100 \quad (\text{IV.5})$$

Dont α_V , α_T , α_r et α_l sont respectivement le gonflement maximale volumique tangentiel, radial et longitudinal (en pourcentage) de la dimension initiale au cours de la variation de la teneur en eau du bois entre l'état anhydre et l'état de saturation des fibres (PSF). Ou V_0 , T_0 , R_0 et L_0 sont respectivement le volume, les dimensions tangentielle, radiale et longitudinale d'une éprouvette à l'état anhydre et V_f , T_f , R_r et L_r son volume et ses dimensions à l'état saturé (PSF).

Le gonflement volumique d'une éprouvette rectangulaire de bois peut être exprimé en fonction de α_T , α_r et α_l .

$$\alpha_V = \alpha_R + \alpha_T + \alpha_L + 0,01(\alpha_R\alpha_T + \alpha_R\alpha_L + \alpha_T\alpha_L) + 0,0001(\alpha_R\alpha_T\alpha_L) \quad (\text{IV.6})$$

Après l'élimination des éléments négligeables l'expression devient :

$$\alpha_V = \alpha_R + \alpha_T + \alpha_L \quad (\text{IV.7})$$

Le tableau IV.4 représente les résultats longitudinal, radiale et transversal du bois de pin d'Alep.

Tableau IV.3. Résultats de gonflement longitudinal, radial et transversal du bois de pin d'Alep étudié [133].

Bois	α_l (%)	α_r (%)	α_T (%)	α_V (%)
Pin d'Alep	0.291	1.582	5.001	6.873

D'après ces résultats, on remarque que :

- Le bois de pin d'Alep augmente en poids et en dimensions dans les trois directions (longitudinal, radial et transversal).
- La variation massique et dimensionnelle est importante au début et s'affaiblit vers la fin de l'essai de gonflement.
- En dessous du PSF, il existe une relation quasi linéaire entre la teneur en eau et la variation dimensionnelle du bois.
- Des données expérimentales montrent que la variation hydrique du bois n'est pas la même dans ces trois directions principales. On peut écrire la relation suivante pour toutes les espèces de bois.

$$\alpha_V > \alpha_T > \alpha_r \gg \alpha_l$$

- Le gonflement tangentiel du bois est à peu près le double du gonflement radial, tandis que le gonflement longitudinal est très faible, est souvent négligeable par rapport aux gonflements, tangentiel et radial.

Ces résultats peuvent s'expliquer :

- L'augmentation du poids des éprouvettes du bois de pin d'Alep est due à l'absorption de l'eau où elles ont été immergées, car le bois est un matériau hygroscopique, qui a la capacité d'absorber l'eau présente dans l'air ambiant d'après Parviz et Heger [129]. Cela est relié directement à la masse volumique et à la densité du bois.
- La variation dimensionnelle dans les trois directions est expliquée par le caractère orthotrope (anisotrope) du matériau bois, d'après Nepveu [130], car le bois est un matériau fibreux qui est un ensemble de fibres naturelles tissées dans les trois directions à une autre. Ceci se produit sous l'influence des propriétés physiques telle que la masse volumique.
- Pour l'allure qui est rapide en début de l'essai, elle est due à une absorption rapide de l'eau à travers les pores du matériau et, par la suite, une diminution de cette allure jusqu'à arriver à une stabilité de masse et de dimension, ceci est expliqué par la saturation du matériau en eau.

IV.2.1.3.4. Détermination du retrait longitudinal, radial et transversal

Le tableau IV.4 présente les évolutions massiques de bois de pin d'Alep en fonction du temps, au cours du séchage.

Tableau IV.4. Évolution massique du bois de pin d'Alep en fonction du temps, au cours du séchage [133].

Temps [jours]	Masse de pin d'Alep [g]	D _L [mm]	D _R [mm]	D _T [mm]
01	8.36	21.00	21.00	21.00
02	5.51	20.84	20.35	20.05
03	5.50	20.83	20.30	20.05
04	5.50	20.82	20.30	20.03
05	5.48	20.81	20.26	20.03
06	5.47	20.81	20.27	20.04
07	5.46	20.80	20.25	20.03
08	5.46	20.78	20.25	20.05
09	5.45	20.76	20.23	20.04
10	5.45	20.76	20.21	20.00
11	5.45	20.77	20.20	20.00
12	5.45	20.76	20.21	20.00

Le graphe suivant (figure IV.8) présente la variation massique en fonction du temps, en jours lors, du séchage (séjour dans l'étuve à 103°C).

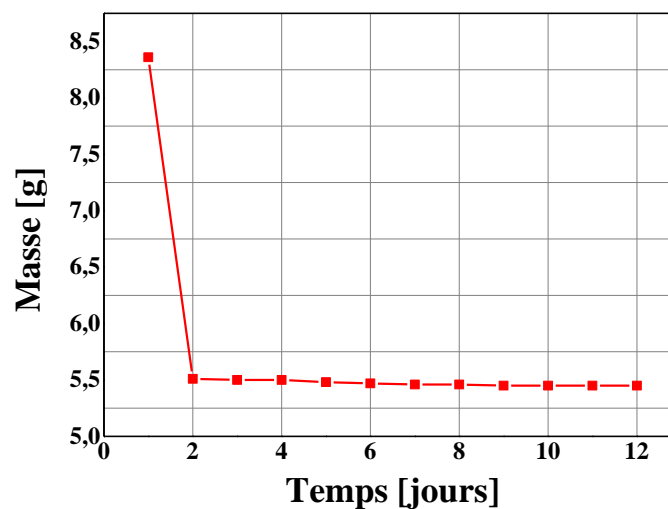


Figure IV.8. Évolution massique en fonction du temps (lors de séchage) [133].

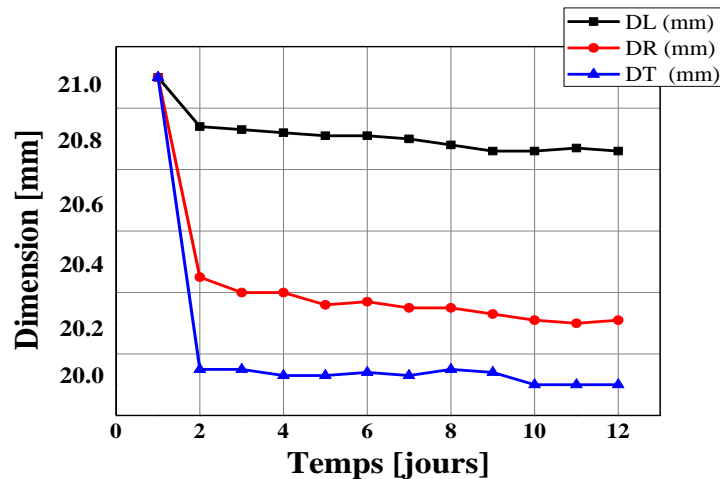


Figure IV.9. Variations dimensionnelles (D_L , D_R , D_T) de pin d'Alep au cours du séchage [133].

Le tableau IV.5 représente les résultats du retrait longitudinal, radial et transversal, volumique et le coefficient de l'anisotropie du bois étudié.

Tableau IV.5. Résultats du retrait longitudinal, radial et transversal, volumique et le coefficient de l'anisotropie du bois de pin d'Alep [133].

Bois	R_L [%]	R_R [%]	R_T [%]	R_V [%]	A [%]
Pin d'Alep	1.15	3.90	5	10.05	1.28

D'après ces résultats, on remarque que :

- Une perte de masse pour le bois de pin d'Alep est importante dans le premier jour d'essai et s'affaiblit vers la fin de l'essai de retrait.
- Le retrait du bois de pin d'Alep n'est pas le même dans les trois directions ; il est plus important dans la direction tangentielle et radiale que dans la direction longitudinale.
- L'anisotropie A est proche de 1.

Les retraits, radial et tangentiels, sont de 3.9 % et 5% respectivement ; ces résultats sont presque similaires aux travaux cités dans le littérature telle que : les travaux de [129] réalisés sur le bois de pin d'Alep Tunisie le retrait radial est de 4.9 % à 6.0 % et, pour le retrait tangentiels, il est de 6.9 % à 7.5 % ;

Le retrait volumétrique total est de 10.05% et, également l'anisotropie de retrait est de 1.28, ces résultats sont proches aux travaux de Tischler (1971) [17] qui est de 11.7% et 1.63 respectivement. Ces résultats peuvent s'expliquer :

Le retrait est un caractère physique lié étroitement à la structure anatomique du bois, il varie considérablement d'une espèce à l'autre, au sein d'une même espèce, et même à l'intérieur de chaque individu.

Lorsque le bois sèche, c'est l'eau libre qui est éliminée la première ; elle se déplace vers la surface où elle s'évapore, généralement sans effet nuisible pour le bois. Quand les cellules ne contiennent plus d'eau libre, on dit que le bois est au point de saturation des fibres. Si le processus de séchage continue au-delà de ce point, commence alors le retrait, approximativement en proportion avec la quantité d'eau liée perdue. Cela explique la perte de masse pour le pin d'Alep.

En termes de teneur en eau, le point de saturation des fibres (P.S.F) diffère selon les essences, mais se situe entre 26 et 32%, pour la grande majorité des bois.

Le retrait du bois de pin d'Alep est plus important dans la direction tangentielle, radiale que dans la direction longitudinale, ceci est expliqué par l'anisotropie du matériau bois qui n'a pas les mêmes propriétés dans les trois directions (la direction des fibres de bois, la distance entre les fibres).

L'anisotropie (A) du retrait nous informe sur la stabilité dimensionnelle du bois et elle est calculée par le rapport entre le retrait tangentiel et radial. Selon DAKAK (2002), plus que l'anisotropie A est proche de 1 plus les déformations sont isotropes.

IV.2.1.3.5. Essai de flexion 3 points

Les résultats obtenus à partir des essais de flexion trois points sur le bois de pin d'Alep sont représentés sur le graphe suivant.

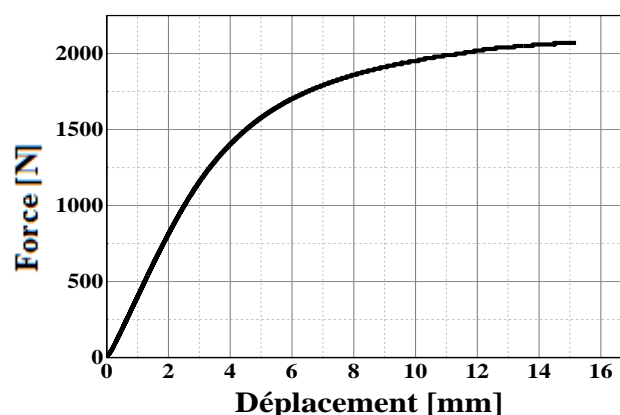


Figure IV.10. Courbe flexion trois points, force en fonction du déplacement du bois de pin d'Alep [133].

IV.2.1.3.5.1. Calcul du module d'Young, selon la norme (ISO14125 : 1988) [131]

Pour la mesure du module d'Young en flexion, on calcule les flèches S_1 et S_2 exprimées en millimètres, de la poutre en dans le milieu correspondant aux valeurs données de déformation en flexion $\varepsilon_{f1}=0.0005$ et $\varepsilon_{f2}=0.0025$, à l'aide des équations suivantes :

$$S_1 = \frac{\varepsilon_{f1} L^2}{Gh} \quad (\text{IV.8}); \quad S_2 = \frac{\varepsilon_{f2} L^2}{Gh} \quad (\text{IV.9})$$

Où : S_1 et S_2 sont les flèches de la poutre en son milieu [mm], ε_{f1} et ε_{f2} sont les déformations en flexion, dont les valeurs sont données ci-dessus [N].

Calculer le module d'élasticité en flexion E_f , exprime en méga pascals [MPa], à l'aide de l'équation suivante.

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta S} \right) \quad (\text{IV.10})$$

Où : L est la distance entre les appuis (mm) ; b l'épaisseur de l'éprouvette (mm) ; H la hauteur de l'éprouvette (mm) ; ΔS la variation de flèche (mm) ; ΔF la variation de la force entre F_2 pour la flèche S_2 et F_1 pour S_1 (N).

En exploitant les courbes force-déplacement, obtenus de l'essai flexion trois points des éprouvettes.

Tableau IV.6. Résultats de l'essai de la flexion.

	F_{\max} [N]	ε_{\max} [mm]	σ_{\max} [MPa]	S_1 [mm]	S_2 [mm]	F_1 [mm]	F_2 [N]	E_F [MPa]
σ_{\max}	2076.87	15.20	0.017	0.77	2.18	300.75	877.00	17241.18

Les valeurs moyennes des résultats de l'essai de flexion 3 points sont données dans le tableau IV.6. La valeur de module d'Young pour le bois de pin d'Alep est de 17241.18 [MPa], cette valeur est un peu plus élevée que les résultats obtenus par les études du Tischler [17] et Thibaut et al [25], qui varient entre 10750 et 11450 MPa, respectivement.

On constate que les valeurs diffèrent fortement d'un plateau à l'autre. Ce résultat illustre la variabilité inter arbre qui apporte un facteur supplémentaire d'hétérogénéité. Le pin d'Alep est donc un bois de qualité mécanique moyenne.

IV.2.1.3.6. Essai de cisaillement

La figure IV.11 présente l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement durant les essais de cisaillement. On note que ces échantillons présentent un

comportement identique du début de chargement (zone élastique) jusqu'à la rupture totale des échantillons. La valeur du module de cisaillement calculée est de 5.25 MPa.

Le module de cisaillement est calculé selon la relation suivante (11).

$$G = \frac{d \times \tan \alpha}{A} \quad (\text{IV.11})$$

Avec : G module de cisaillement (MPa) ; d : largeur (mm) de la plaque ; A : aire de la section de l'éprouvette (mm²) ; $\tan \alpha$: $\Delta F / \Delta e$ (différence des forces sur la différence de leurs déplacements dans la zone élastique).

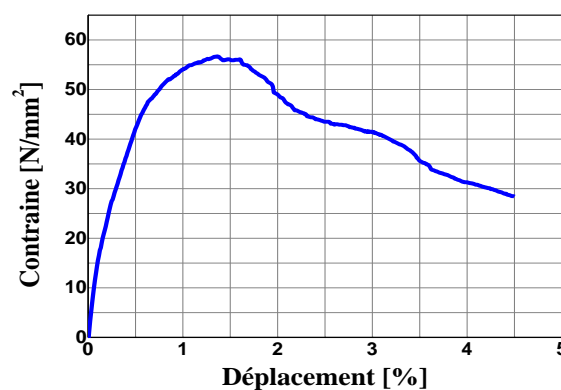


Figure IV.11. Comportement en cisaillement « contrainte-déformation » de pin d'Alep.

Les valeurs moyennes trouvées pour la contrainte à la rupture et le module de cisaillement sont respectivement 435 MPa et 5.25 MPa, ces résultats sont cohérents avec les résultats de la littérature, Tischler [17] et Berrichi [132] obtiennent des modules de cisaillement qui sont 4.5 Kg/cm² et 9.032 Kg/cm² respectivement, et la valeur de la contrainte à la rupture de cisaillement trouvé par Thibaut [25] qui est de 79.2 Kg/cm².

IV.2.1.4. Déroulage du bois de pin d'Alep

IV.2.1.4.1. Classement et contrôle de qualité des grumes

Le contrôle commence par une sélection rigoureuse des grumes, basée sur les critères suivants : sinuosité, présence de fentes, présence de nœuds, excentricité de la moelle, coloration, proportion du faux cœur.

Une fois la sélection et le contrôle des grumes du bois de pin d'Alep effectués, les grumes sont d'abord écorcées, puis tronçonnées en billons généralement du 1.5 m, les billons sont soumis à un étuvage dont la température peut varier entre 40 et 60°C, pour rendre le bois apte au déroulage.

IV.2.1.4.2. Déroulage du bois de pin d'Alep

Le déroulage des 20 billons avec 150 cm de longueur a été fait dans les conditions usuelles de l'usine Transbois « Bejaia-Algérie », sur une seule dérouleuse contrôlée par le même opérateur. Elle permet d'avoir un placage de 1 à 6 mm d'épaisseur, à partir de billons de 150 cm de longueur et de diamètre compris entre 180 et 500 mm. Comme toute autre dérouleuse industrielle.

Toutes les grumes du bois de pin d'Alep ont été déroulées en 1.5 mm. Le choix de l'épaisseur est basé sur le fait que, d'une part, le placage utilisé pour l'emballage léger est souvent de 1.4 mm et, d'autre part le placage, utilisé pour la fabrication des semelles des panneaux sandwiches ne dépasse pas 2 mm. Nous avons fixé par ailleurs les paramètres de coupe pour toutes les grumes en utilisant des réglages conventionnels. Ainsi, le déroulage s'est effectué à une vitesse de 1.5 m/s jusqu'à un diamètre résiduel de 10 cm. La barre de pression est réglée à un taux de compression de 10%. Les placages déroulés sortis de la dérouleuse, sont enroulés sous forme de bobine qui passe directement à séchoir à rouleau à 150°C, environ 1h de stabilisation des placages en milieu ambiant.



1. Grume du bois de pin d'Alep



2. Placage déroulé



3. Bobine des placages du bois pour le séchage



4. Placages déroulés et séchés

Figure IV.12. Photographies illustrant les opérations de déroulage du bois de pin d'Alep.

IV.2.1.4.3. Caractérisation industrielle des placages

La notion de qualité du placage ne faisant l'objet d'aucune norme, la tâche n'est pas facilitée. De différentes recherches menées à ce sujet (Marchal, 1983 [134] ; Movassaghi, 1985 [37] ; Mothe, 1990 [135]), font ressortir un certain nombre de critères : l'homogénéité de l'épaisseur, la planéité, l'état de surface, la fissuration mais aussi la couleur et la nodosité. Dans le cas de pin d'Alep, un contrôle des placages est basé sur un tri visuel qui est basé sur les critères suivants :

IV.2.1.4.3.1. Tendance au tuilage moyen

La tendance au tuilage se reconnaît par des ondulations et des gondolements apparaissant sur le placage, juste après déroulage. Lorsqu'elle est très prononcée, elle se traduit avant séchage par des phénomènes d'auto-enroulement du placage en fin de déroulage, rendant l'opération de massicotage difficile.

IV.2.1.4.3.2. Massicotage des placages de pin d'Alep

Après l'évaluation du tuilage, la totalité des rubans de placages sont ensuite massicotés manuellement en feuilles de 50 cm de largeur et de 100 cm de la longueur, ce qui nous a permis de purger les gros nœuds sans trop perdre de matière.

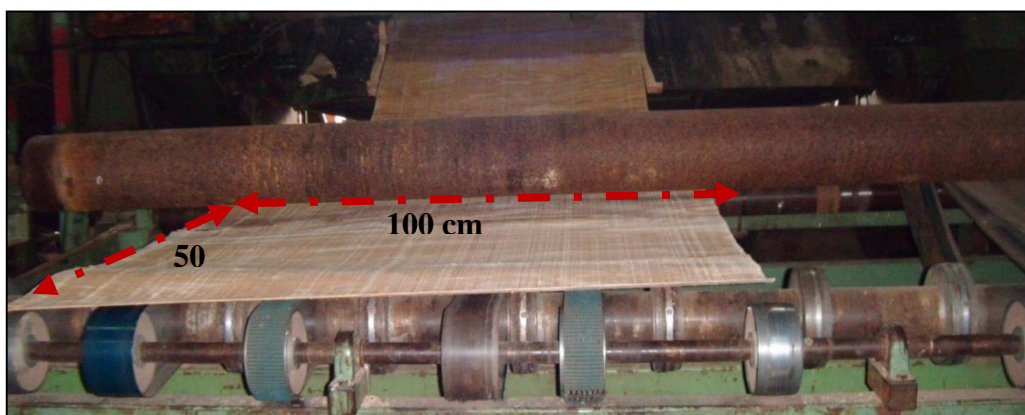


Figure IV.13. Massicotage des placages du bois de pin d'Alep.

IV.2.1.4.3.3. Aspect pelucheux

Afin d'apprécier ce défaut, nous avons effectué un tri visuel à l'œil nu en passant en revue l'ensemble des feuilles massicotées, suivant leur aspect pelucheux (figure IV.14) ou non pelucheux (figure IV.15).



Figure IV.14. Placage pelucheux



Figure IV.15. Placage non pelucheux

IV.2.1.4.3.4. Irrégularité d'épaisseur

Quelle que soit l'épaisseur nominale du placage, celui-ci présente toujours une irrégularité d'épaisseur plus au moins importante. Rappelons que les grandes variations entraînent une consommation excessive de colle, diminuent la résistance des joints de colle et nécessitent la mise en œuvre d'une pression accrue pendant le pressage. Cette hétérogénéité pourrait imposer aussi une post-opération de ponçage qui engendre une perte de matière non négligeable.

IV.2.2. Liège aggloméré

Deux types de liège aggloméré sont utilisés comme âme dans la fabrication des panneaux sandwich multicouches.

IV.2.2.1. Liège expansé

Les plaques de liège expansé (liège aggloméré noir) avec 20 et 40 mm d'épaisseur ont été utilisées comme âmes dans la fabrication des panneaux sandwichs.

Le liège brut a été obtenu à partir de la forêt de Jijel (Algérie) et a été traité comme le liège aggloméré expansé à l'usine industrielle "EPE JIJEL liège étanchéité SPA" à Ziam Mansouriah (Jijel, Algérie). Les planches de liège expansé ont été produites avec une longueur et une largeur respectivement de 1000 et 500 mm et une densité de 120 ; elles ont été caractérisées par une conductivité thermique (λ) de $0.0375 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, une résistance thermique (R) de $1.0667 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ et l'absorption d'eau de 0.45% (d'après la fiche technique).

IV.2.2.2. Liège aggloméré blanc

Les plaques des agglomérés de liège composite (aggloméré blanc) avec des épaisseurs 10 mm, 15 mm, 20 mm et 40 mm ont été utilisées comme matériau de base dans les panneaux sandwichs.

Le liège brut a été obtenu à partir de la forêt de Jijel (Skikda, en Algérie) et a été traité comme aggloméré de liège à l'usine industrielle "Taleza de liège" à Skikda, en Algérie. Les

agglomérés de liège ont été produits avec des granulés de liège avec des fractions granulométriques 2.1 mm, 3.2 mm et 5.3 mm, à l'aide de l'adhésif comme une résine de polyuréthane de qualité alimentaire, et en tant que panneaux rectangulaires coupés avec une longueur et une largeur respectivement de 1000 mm et 500 mm, les agglomérats de liège ont une densité de 280 et une conductibilité thermique (λ) de $0.0375 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

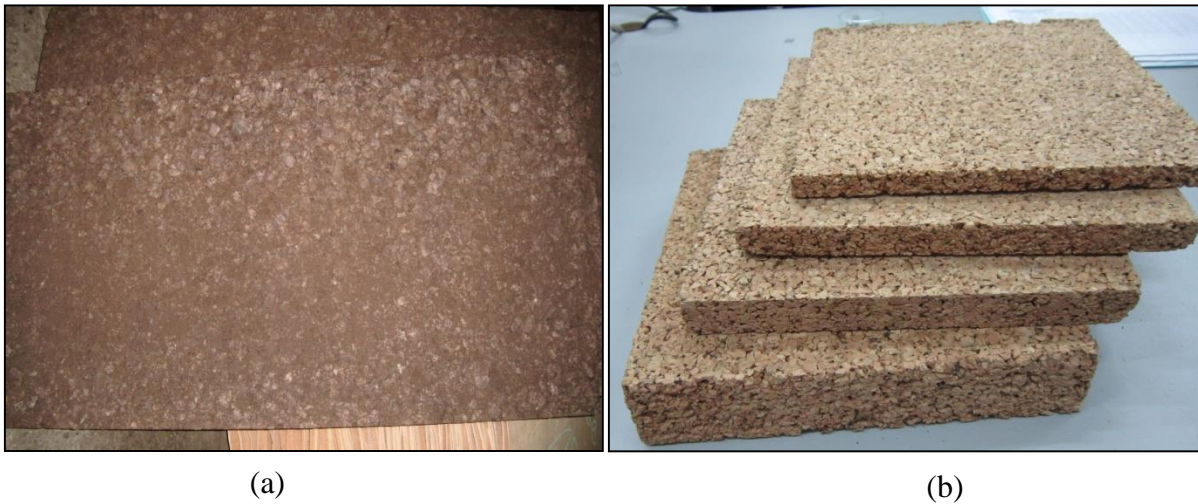


Figure IV.16. Lièges agglomérés utilisés : (a) liège expansé, (b) liège aggloméré blanc.

Chapitre V :

Elaboration et caractérisation des panneaux sandwichs

V.1. Production des panneaux sandwiches

Le présent travail est axé sur la réalisation des panneaux sandwiches multicouches à base du bois de pin d'Alep et de liège (aggloméré et expansé), se baser sur les perspectives de valorisation et de transformation des bois de pin d'Alep (*Pinus Halepensis*) avec le liège aggloméré en matériau de structure. Deux types de panneaux sandwiches ont été fabriqués, vingt à base de liège aggloméré noir et vingt à base de liège aggloméré blanc, comme le montre la figure V.1.

- ✓ SN40 : une âme de 40 mm d'épaisseur en liège aggloméré expansé noir entre deux couches extérieures de placage de bois d'épaisseur de 1.5 mm.
- ✓ SN20 : un noyau de deux couches de liège aggloméré noir d'épaisseur de 20 mm séparé par une couche intermédiaire de placage de bois, entre deux couches externes de placage de bois.
- ✓ SB40 : une âme de 40 mm d'épaisseur en liège aggloméré entre deux couches extérieures de placage de bois.
- ✓ SB20 : un noyau de deux couches de 20 mm d'épaisseur de liège aggloméré blanc séparé par une couche intermédiaire de placage de bois, entre deux couches externes de placage de bois.
- ✓ SB15 : un noyau de deux couches de 15 mm d'épaisseur de liège aggloméré blanc et une couche de 10 mm d'épaisseur en liège aggloméré blanc dans le milieu, séparé par deux couches de placage de bois et de deux couches extérieures de placage de bois.
- ✓ SB10 : un noyau de quatre couches de 10 mm d'épaisseur de liège aggloméré séparé par trois couches de placage de bois et de deux couches extérieures de placage de bois.

La production des panneaux sandwiches a été faite à l'aide d'une presse hydraulique de la plaque chaude (SIMI). La température a été réglée à 80 °C, la pression à 40 bars et le temps de pressage à 10 min. L'adhésif utilisé pour le collage du bois et des couches de liège aggloméré était une colle urée-formaldéhyde utilisée dans l'industrie du contreplaqué. Les panneaux ont été stabilisés à l'air libre dans des conditions ambiantes pendant 24 h. Les couches de placage des feuilles de surface ont été orientées dans le panneau sandwich avec le grain parallèle à la plus grande dimension, ici appelée longueur. Les couches internes de placage en bois ont été orientées avec le grain perpendiculaire à l'orientation des grains de la couche de placage de bois adjacent. Vingt panneaux sandwiches de chaque type ont été préparés.

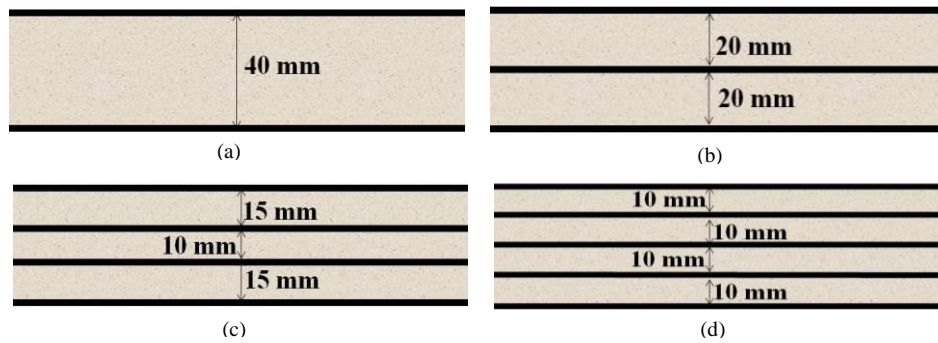


Figure V.1. Représentation schématique des assemblages des panneaux sandwiches : (a) SN40 ou SB40, (b) SN20 ou SB20, (c) SB15 ou SN15 et (d) SB10 ou SN10 [136].



Figure V.2. Encollage (encolleuse à rouleaux).



Figure V.3. Elaboration des panneaux sandwiches.



Figure V.4. Chargement des panneaux sandwiches dans la presse à chaud.



(a)



(b)

Figure V.5. Représentation photographique des panneaux sandwichs finis : (a) panneaux sandwichs à base de liège aggloméré blanc, (b) panneaux sandwichs à base de liège expansé.

V.2. Caractérisation mécanique des panneaux sandwichs

Les essais mécaniques des panneaux sandwichs ont été effectués à l'Unité de recherche Matériaux, Procédés et Environnement (UR-MPE) de l'Université de Boumerdès, Algérie. Les tests ont été effectués sur une machine universelle du type Zwick 250, pilotée par ordinateur avec le logiciel d'acquisition TestXpert V9.0, dotée d'un capteur de force de 250

KN. Les tests suivants ont été effectués : compression perpendiculaire [137], traction perpendiculaire [138], compression pure et avec flambage [139], flexion trois et quatre points [140] et essai de cisaillement [141], selon les normes françaises, respectivement, NF T54-602 (1983) [137], NF T 54-603 (1983) [138], NF T54-604 (1986) [139], NF T54-606 (1987) [140] et NF T 54-605 (1983) [141]. Dans ce contexte la confection des éprouvettes dans la direction longitudinale parallèle au fil des feuilles de surface de placage de bois (appelée ici la longueur des échantillons), et la direction perpendiculaire signifie à 90° à la couche de placage. Figure V.6 représente schématiquement les différents tests mécaniques qui ont été effectués sur les panneaux sandwiches multicouches.

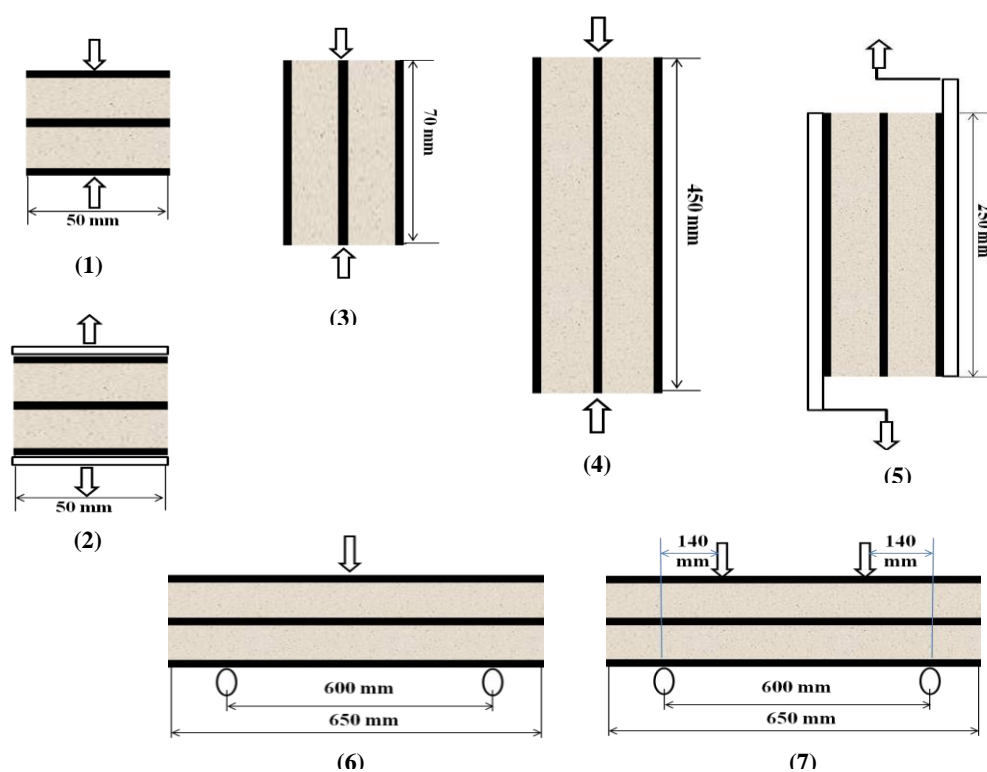


Figure V.6. Représentation schématique des essais mécaniques effectués sur les panneaux multicouches, illustrés avec le panneau sandwich SB20 : (1) compression perpendiculaire, (2) traction perpendiculaire, (3) compression pure, (4) compression avec flambage, (5) cisaillement, (6) flexion 3 points, (7) flexion 4 points [136].

V.2.1. Essai de la compression perpendiculaire

L'essai de la compression dans la direction perpendiculaire a été effectué avec des échantillons de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ (longueur \times largeur) à une vitesse de traverse constante de 4 mm min^{-1} . Le module d'élasticité a été déterminé entre déformations 2.5% (ϵ_1) et 7.5% (ϵ_2). La contrainte à 10% (σ_{10}) a également été calculée correspondant à $\epsilon = 10\%$. La contrainte

maximale (σ_{\max}) atteinte au cours de l'essai, était d'environ 1 MPa et la valeur d'écrasement (Δh_{\max}) pour cette charge correspondent à une déformation maximale d'environ 70% (ε_{\max}). Après l'essai, les échantillons ont été conservés dans l'environnement du laboratoire pendant 14 jours, après, l'épaisseur du panneau a été mesurée pour calculer le taux de relaxation (η). Les propriétés mécaniques suivantes ont été calculées à partir des courbes contrainte-déformation :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta h_{\max}}{h_0} \times 100 \quad (\text{V.1}), \quad E_a = \frac{F_2 - F_1}{\Delta h_2 - \Delta h_1} \times \frac{h_0}{S_0} \quad (\text{V.2}) \text{ et}$$

$$\eta = \frac{h_{f2} - h_{f1}}{h_{f1}} \times 100 \quad (\text{V.3})$$

V.2.2. Essai de traction perpendiculaire

L'essai porté sur la détermination de la résistance en traction perpendiculaire d'une structure sandwich ; conformément à la norme NF T 54-603 (Novembre 1983) [138]. L'essai consiste à soumettre l'éprouvette, à un effort de traction normal aux semelles du sandwich, transmis à l'éprouvette par l'intermédiaire de dispositifs d'attache constitués par des blocs d'attaches épaisses indéformables, collés sur ces semelles avec une résine époxy.

Les spécimens de traction de dimensions 50 x 50 mm² (longueur x largeurs) ont été fabriqués selon la norme.

Les tests ont été effectués sur une machine universelle du type Zwick, avec une vitesse de déplacement de la charge constante, fixée à 1.2 mm/min selon la norme en vigueur.

La contrainte à la rupture en traction perpendiculaire, est calculée à l'aide de la formule

$$\text{suivante : } \sigma_p = \frac{F_R}{S_0} \quad (\text{V.4})$$

Où F_R est la force à la rupture (N) de la structure sandwich ; F_M est la force maximale (N) ; S_0 est l'aire initiale de la section droite de l'éprouvette (mm²).



Figure V.7. Éprouvettes de l'essai de traction selon la norme (NF T 54-603).

V.2.3. Essai de compression longitudinale sans ou avec flambage

Les essais de compression longitudinaux, avec ou sans flambage ont été réalisés afin de déterminer la résistance à la compression pour les deux cas ont été spécifiés dans la norme (NF T 54-604, 1986) [139] :

- ✓ compression pure, si la longueur de l'échantillon est jusqu'à deux fois l'épaisseur totale de la structure en sandwich ;
- ✓ compression avec flambage si la longueur de l'échantillon est comprise entre 10 à 12 fois l'épaisseur totale de la structure sandwich.

Les échantillons ont été coupés avec une largeur de 50 mm et une longueur de 70 mm et 450 mm respectivement pour la compression pure et compression avec flambage. Les deux extrémités de section rectangulaire des échantillons ont été soigneusement usinés pour être plats, parallèles entre elles et perpendiculaires à la charge. Les essais ont été réalisés à une vitesse de traverse constante de 0.21 mm min⁻¹ et 1.35 mm min⁻¹ respectivement pour la compression pure et la compression avec flambage respectivement. La contrainte maximale à la compression où déformation de la structure en sandwich est exprimée en Mpa telle que :

$$\sigma_M = \frac{F_M}{S_0} \quad (V.5)$$

Où F_M est la force maximale (N), et S_0 est la section initiale de l'éprouvette (mm²).

V.2.4. Essai de flexion trois et quatre points

Les essais ont porté sur la détermination des modules de rigidité en flexion (D), cisaillement en flexion (N) et cisaillement de l'âme (Ga).

Les dimensions des éprouvettes sont découpées conformément à la norme NF T 54-606 (Octobre 1987) [140]. Elles sont ensuite posées en appui simple sur des rouleaux cylindriques

pour subir les essais de flexion 3 et 4 points, avec une vitesse de 2.25 mm/min selon la norme citée ci-dessus.

Les contraintes de cisaillement et de flexion des panneaux sandwiches sont déterminées selon les expressions suivantes :

$$\sigma_3 = \frac{P_1 d_1}{2.es.(h+ea).b} \quad (V.6); \quad \sigma_4 = \frac{P_2 d_2}{4.es.(h+ea).b} \quad (V.7)$$

$$D = \frac{P_1 \cdot d_1^3 [1 - (11d_2^2 / 8 d_1^2)]}{48.W_1 \cdot [1 - (2.P_1 \cdot d_1 \cdot W_2 / P_2 \cdot d_2 \cdot W_1)]} \quad (V.8); \quad N = \frac{P_1 \cdot d_1 \left(\frac{8d_1^2}{11.d_2^2} - 1 \right)}{4.W_1 \cdot \left(\frac{16.P_1 \cdot d_1^3 \cdot W_2}{11.P_2 \cdot d_2^3 \cdot W_1} - 1 \right)} \quad (V.9)$$

$$G_a = N \cdot \frac{4.e_a}{(h+e_a)^2 \cdot b} \quad (V.10)$$

Où P_1 est la contrainte maximale de flexion trois points (N) ; P_2 est la contrainte maximale de flexion quatre points (N) ; h est l'épaisseur du sandwich (mm) ; e_a est l'épaisseur de l'âme (mm) ; b est la largeur du sandwich (mm) ; σ_3 est la contrainte de flexion 3 points (MPa) ; σ_4 est la contrainte de flexion 4 points (MPa) ; d_1 est la distance entre les supports de flexion 3 points (mm) ; d_2 est la distance entre les supports de flexion 4 points ; e_s est l'épaisseur des semelles (mm) ; p est la charges de rupture par cisaillement (N) ; W_1 est la flèche mesurée à mi-portée sous la charge P_1 (mm) ; W_2 est la flèche mesurée à mi- portées sous la charge totale P_2 (mm) ; N est la rigidités en cisaillement de la structure sandwich (N) et D est la rigidité en flexion de la structure sandwich ($N \cdot mm^2$).

V.2.5. Essai de cisaillement

La méthode d'essai de cisaillement utilise les lignes directrices de la norme NF T 54-605 [141] qui permettent la détermination des propriétés de cisaillement des structures sandwiches. L'essai consiste à soumettre une éprouvette d'essai avec des dimensions 250 x 50 x 45 mm³ à un effort de cisaillement transmis par l'intermédiaire du support métallique indéformable collé sur les semelles de l'éprouvette avec une résine époxy.

L'échantillon est fixé aux mors mécaniques de la machine grâce aux deux supports métalliques indéformables. La vitesse de déplacement du mors mobile est de 1mm/min, puis on établit la courbe force-déplacement correspondante. Les figures V.8 et V.9 montrent le montage que nous avons réalisé pour effectuer les essais de cisaillement.



Figure V.8. Panneaux sandwiches fixés sur deux supports métalliques indéformables.



Figure V.9. Banc d'essai utilisé dans les essais expérimentaux de cisaillement (SB40) [136].

La contrainte maximale de cisaillement et le module de cisaillement sont calculés selon les deux relations suivantes :

$$\delta_m = \frac{F_m}{L \times b} \quad (\text{V.11}); \quad G = \frac{F_2 - F_1}{d_2 - d_1} \times \frac{h}{Lb} \quad (\text{V.12})$$

Avec δ_m est la contrainte maximale de cisaillement (Mpa) ; F_m est la force maximale appliquée à l'éprouvette au cours de l'essai (N) ; L est la longueur initiale de l'éprouvette (mm) ; b est la largeur initiale de l'éprouvette (mm), G est le module de cisaillement (MPa) ; F_1 est la force relevée à l'extrémité basse de la partie linéaire de la courbe force-déformation (N) ; F_2 est la force relevée à l'extrémité haute de la partie linéaire de la courbe force-déformation (N) ; d_1 est le déplacement relatif des supports métalliques collés sur les semelles de l'éprouvette, correspond à F_1 (N) ; d_2 est le déplacement relatif des supports métalliques collés sur les semelles de l'éprouvette, correspond à F_2 (N) ; h est l'épaisseur initiale de l'éprouvette (mm).

V.3. Analyse hygrothermique

L'analyse hygrothermique des panneaux sandwiches multicouches avec différentes séries, est effectuée suivant deux volets distincts. Le premier volet concerne l'analyse de l'influence de la température et du temps de chauffage sur la masse des sandwiches. Le second volet concerne l'analyse du pouvoir d'absorption d'eau des différents panneaux sandwiches multicouches pour une durée de 24 heures suivant la norme NF EN 1609 [143].

V.3.1. Chauffage en étuve

L'analyse de la variation de la masse des panneaux sandwiches en fonction du temps, pour une température de 100°C en étuve pour une durée de 24 heures est, effectuée (figure V.11). Les échantillons de sandwich testés se caractérisent par les dimensions suivantes 250 x 250 x 45 mm³. Ces derniers sont pesés avant l'essai ; par la suite, des pesées sont effectuées chaque heure, pendant 24 heures pour quantifier la perte de masse.



Figure V.11. Échantillons des panneaux sandwiches portés à 100°C pendant 24 heures.

V.3.2. Analyse du pouvoir d'absorption d'eau des panneaux sandwiches multicouches

Les essais consistent à peser les échantillons avant de les mettre en contact avec l'eau. Ensuite, mettre la partie inférieure des éprouvettes en contact avec l'eau pendant une période de 24 heures selon la norme NF EN 1609 Juillet 1997 [143]. Ces éprouvettes de dimensions 200 x 200 mm² sont maintenues dans un bac à eau par un poids pour ne pas flotter voir la (figure V.12). Les essais sont effectués dans une salle à température contrôlée (23°C). Après 24 heures, les éprouvettes sont retirées et placées à 45° dans un support pour être égouttées pendant 10 minutes (figure V.12). Une fois égouttés, les échantillons sont pesés.

Le pouvoir d'absorption d'eau de ces échantillons est donné par l'équation suivante.

$$W_P = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad (V.14)$$

Avec W_p , le pouvoir d'absorption (kg/m²), M_0 la masse initiale (kg), m_{24} la masse après 24h (kg) et A_p l'aire (m²)

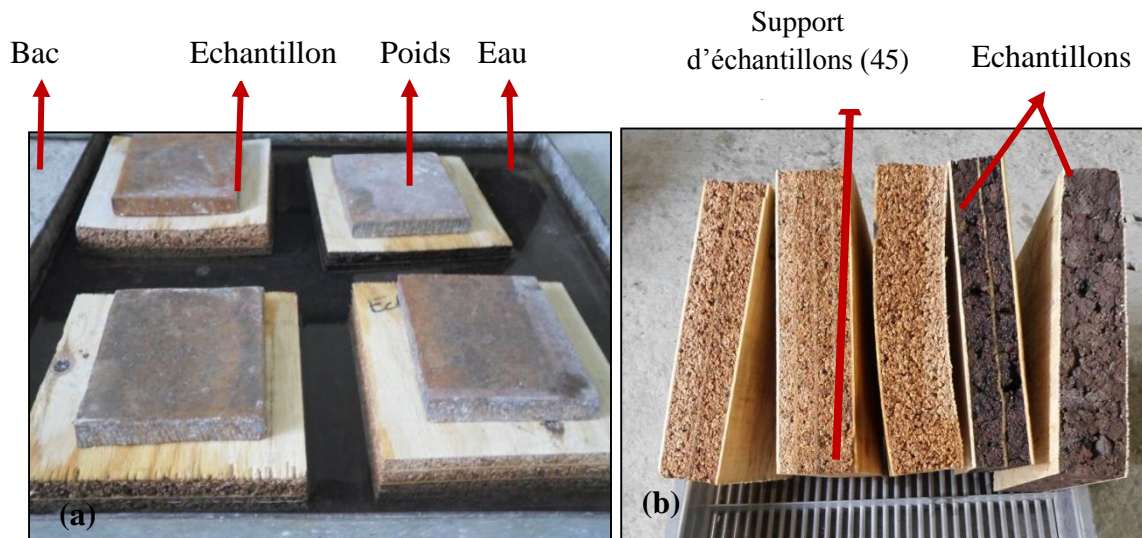


Figure V.12. Méthode de détermination de l'absorption d'eau à court terme en immersion partielle (a) : échantillons dans le bac à eau maintenus par un poids, (b) : équipement pour égouttage.

V.4. Analyse thermique

L'analyse thermique des différents échantillons de liège aggloméré et les plaquages en bois, sont effectués à travers deux méthodes distinctes ; à l'aide d'un CT mètre et par la méthode de maquette thermique.

V.4.1. CT mètre

Le CT mètre est un nouvel appareil de mesure rapide, ayant les caractéristiques thermiques des matériaux homogènes et isotropes. Le principe de fonctionnement consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée.

Une sonde fil est placée entre deux échantillons de liège (figure V.13). Cette sonde est disposée dans une membrane en kapton montée en série avec un voltmètre et un générateur de courant qui contrôle, grâce à la loi de joule, la chaleur émise à la surface du liège. Après acquisition des données, la conductivité thermique est mesurée.



Figure V.13. Mesure des propriétés liées aux transferts thermiques d'un échantillon à l'aide d'un CT mètre.

Deux échantillons de liège agglomérés de mêmes dimensions



Figure V.14. Sonde fil utilisée.

Avec le CT mètre, nous avons effectué 3 analyses thermiques pour chaque type de matériaux utilisés (liège aggloméré, liège expansé et placage de bois).

V.4.2. Maquette thermique

Un modèle de maison (une boîte) avec des murs latéraux remplaçables, est utilisé pour déterminer les coefficients de transition de chaleur (valeurs k) de divers murs et établir les conductivités thermiques de différents matériaux. À cet effet, les températures à l'intérieur et à l'extérieur des parois sont mesurées à une température de l'air intérieur et extérieur constante (à l'état stationnaire). Cette boîte peut tester des échantillons d'une dimension de $25 \times 25 \text{ cm}^2$ et d'une épaisseur jusqu'à 7 cm.

Nous allons donc faire 3 essais différents :

- Un essai sur le liège expansé ;
- Un essai sur le liège aggloméré blanc ;
- Un essai sur le plaquage du bois de pin d'Alep.

V.4.2.1. Grandeurs à déterminer

1. Mesure et interprétation des températures de paroi pendant le chauffage et l'éclairage temporaire des parois extérieur.
2. Détermination des conductivités thermiques du bois et du liège.
3. Détermination des valeurs de k du bois et de murs en liège aggloméré et liège expansé de différentes épaisseurs, calculer aussi les valeurs k équivalentes pour les panneaux sandwiches multicouches.

V.4.2.2. Mise en place et procédure

Étant données que les différences de températures mesurées jouent un rôle dans l'évaluation des résultats expérimentaux, l'accord des thermocouples doit être vérifié et tout écart prit en compte dans l'évaluation. Les murs différents (bois et liège) sont examinés dans plusieurs séries de mesures d'une durée d'environ 1.5 heures. Les températures de la paroi et l'air interne et externe doivent être mesurées dans chaque cas. Comme il y aura un gradient de température de haut en bas dans toute la maison (boîte), toutes les mesures de températures doivent être enregistrées à la même hauteur. Des trous dans les poteaux d'angle de la maison de modèle sont utilisés pour l'insertion des thermocouples pour mesurer les températures des murs intérieurs et à l'extérieurs. Le thermocouple utilisé pour la mesure de la température des projets d'intérieur est d'environ 5 cm dans la maison.

Pour la mesure des températures de la paroi, l'extrémité du thermocouple doit être bien fixée au niveau des trous latéraux et le plus près possible de l'axe perpendiculaire de la paroi.

Une lampe à incandescence de 100 W avec un capuchon de recouvrement est utilisée à des fins de chauffage, la température intérieure étant maintenue pratiquement constante par un thermostat de chauffage. Le capteur de température du thermostat est fixé sur le capot de recouvrement de la lampe à incandescence et connecté au thermostat par l'intermédiaire d'une prise à 5 points sur le sol et sur le côté de la maison. L'alimentation électrique de chauffage est introduite par l'intermédiaire de la prise du thermostat. Le commutateur de température est réglé sur la quatrième division graduée, produisant ainsi à l'état stationnaire, une température interne dans la salle d'environ 60 °C.

V.4.2.3. Pendant la phase échauffement

La mesure des températures de la paroi à l'intérieur et à l'extérieur sur les murs (bois et liège aggloméré) avec différentes épaisseurs à des intervalles d'environ 5 min. Après 30 min, éclairer successivement les murs en bois, liège aggloméré pendant 5 minutes avec une lampe à incandescence de 150 W à une distance d'environ 15 cm, en laissant à chaque fois un intervalle de 5 minutes entre les phases d'éclairage. Les mesures de températures doivent être enregistrées à des intervalles entre les minutes.

Après environ 1h30 min (état d'équilibre) de chauffage, les températures aux quatre points de la paroi sont maintenus en observation et mesurées sur une période de quelques minutes, puis on peut appliquer nos formules thermiques.

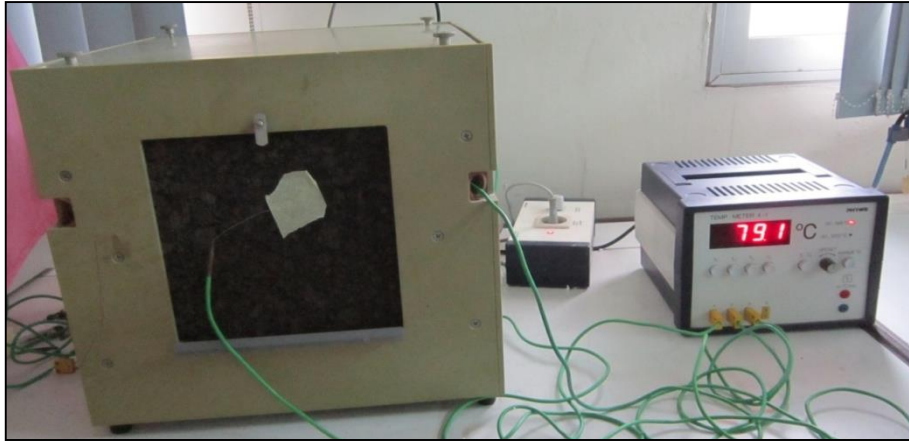


Figure V.15. Montage expérimental : Isolation thermique/conduction thermique.

V.4.2.4. Théorie et évaluation

Le flux d'énergie thermique par P, un mur plat homogène est déterminé à l'état d'équilibre (état permanent) au moyen du transfert de chaleur air-paroi et la conduction de chaleur dans le mur. Le flux d'énergie est régi par la surface spécifique de la paroi et les différences de température particulières :

Transfert de chaleur air-paroi, interne, (α_i = coefficient de transfert de chaleur interne)

$$P = \alpha_i \cdot A \cdot (\phi_{Li} - \phi_{Wi}) \quad (V.15)$$

Transmission de chaleur mur-air, externe, (α_a = coefficient de transfert de chaleur externe)

$$P = \alpha_a \cdot A \cdot (\phi_{Wa} - \phi_{La}) \quad (V.16)$$

La conduction de la chaleur dans la paroi, (d = épaisseur, λ = conductivité thermique)

$$P = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (\phi_{Wi} - \phi_{Wa}) \quad (V.17)$$

Les restructurations et la somme de ces trois équations rendements

$$P = K \cdot A (\phi_{Li} - \phi_{La}) \quad (V.18)$$

Dans laquelle le coefficient de transmission thermique ou valeur de k. La formule suivante s'applique alors :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (V.19)$$

Le paramètre

$$\Lambda = \frac{\lambda}{d} \quad (V.20)$$

Qui est régi uniquement par le matériau et l'épaisseur de la paroi que l'on appelle le coefficient de transmission thermique. Les inverses de K et A sont des valeurs de résistance thermique qui sont désignées par la résistance de transfert de chaleur, la résistance à la transmission

thermique et la résistance à la transmission de chaleur. Dans une paroi constituée de couches successives, l'équation (18) s'applique, le cas échéant à toutes les couches, de sorte que la somme de la résistance de transmission de chaleur doit être insérée dans l'équation (19).

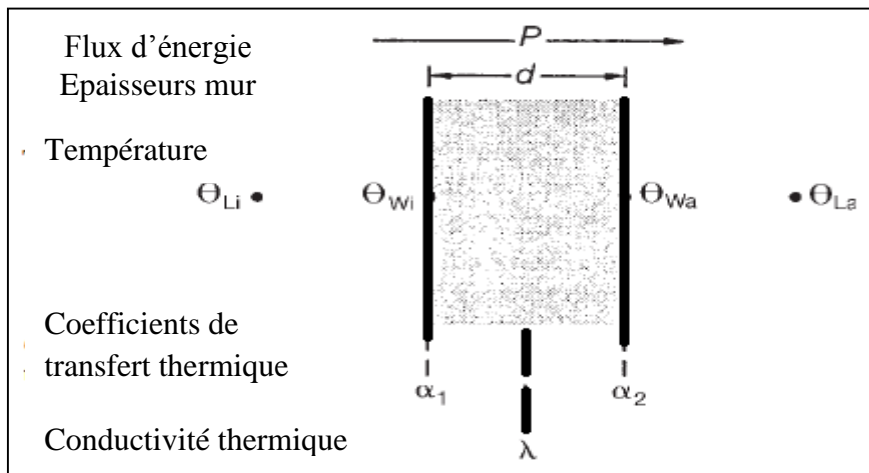


Figure V.16. Flux d'énergie thermique à travers un mur. Températures internes et externes air de mur : Θ_{La} , Θ_{La} , Θ_{Wi} , Θ_{Wa} .

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda_1} + \frac{1}{\Lambda_2} + \dots + \frac{1}{\Lambda_n} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (21)$$

Les phénomènes qui participent au transfert de chaleur à travers une couche d'air, sont la conduction, la convection et le rayonnement. L'équation (V20) donne une valeur approximative du coefficient de transmission de chaleur d'une couche d'air verticale entre murs non métalliques que dans le cas de faibles épaisseurs ($d < 5$ mm). Avec une augmentation de l'épaisseur est principalement déterminée par la fraction de rayonnement qui, dans le cas de surfaces parallèles, est indépendante de la distance entre eux. Avec des épaisseurs de couche de plus de 5 cm du processus de convection provoquent une réduction dans la résistance.

Le flux d'énergie thermique à travers une paroi est déterminé à partir de la différence entre la paroi extérieure et la température de l'air extérieur. Le coefficient de transfert de chaleur dans le cas de la circulation d'air naturel dans des locaux fermés est, pour tous les matériaux des parois rencontrées dans pratique. $\alpha = 8.1 \text{ W/Km}^2$

Cours du calcul :

L'équation (V.16), on obtient P/A , l'équation (V.18), on obtient k et l'équation (V.17) les rendements λ

V.5. Analyse par Microscopie électronique à balayage (MEB)

Des échantillons des panneaux sandwichs ont été coupés avec un couteau bien aiguisé. Les échantillons ont été séchés sous vide, la vapeur pulvérisée constituant un 450 A environ revêtement épais. Les surfaces ont été observées au microscope électronique à balayage Hitachi S-2400 à des grossissements allant de 50 à 1000, et les images ont été enregistrées au format numérique. Observation MEB a été faite à la Microlab- IST, Université de Lisbonne (Portugal).

IV.6. Résultats et discussions

IV.6.1. Essais mécaniques

IV.6.1.1. Panneaux sandwichs à base de liège expansé

L'utilisation du liège aggloméré expansé en tant que matériau de cœur (âme) dans des panneaux sandwichs ou d'autres structures en couches n'a pas encore été étudiée malgré leurs excellentes propriétés d'isolation. De plus, leur coût est faible par rapport à d'autres matériaux de base, car ils sont fabriqués avec des matériaux de liège moins valorisés et sous-produits (Pereira et Baptista, 1993) [144]. Au contraire les panneaux à base de liège aggloméré composite ont été étudiés dans quelques cas : (Castro et al, 2010) [145] un sandwich carbone-liège, un sandwich avec des feuilles carbone / époxy et des noyaux de différents agglomérés de liège (Reis et Silva, 2009) [98], une combinaison de liège granulaire avec une résine époxy (Alcantara et al, 2013 [146], Fernandes et al, 2014) [147], les structures sandwichs avec deux noyaux de liège micro-agglomérés et feuilles de surface en alliage d'aluminium (Sousa-Martins et al, 2013) [93].



Figure V.17. Configurations des panneaux sandwichs à base de liège expansé :

(a) SN40 et (b) SN 20.

Bien que les deux agglomérats composites de liège et agglomérés de liège expansé sont basées sur le liège naturel et conservent la plupart de ses propriétés particulières, elles

diffèrent sensiblement dans les fonctions qui sont liées aux conditions spécifiques de leur production, comme c'est le cas des agglomérés de liège expansé. Ces agglomérats sont des matériaux en en grappe auto-liée après traitement à haute température avec 300-350°C, la vapeur surchauffée et d'environ 40 kPa, dans des autoclaves fermés (Pereira, 2007) [45]. Dans ces conditions, il existe une augmentation substantielle du volume cellulaire, la dégradation thermochimique de la paroi cellulaire et la perte de masse conduisant à un matériau de couleur sombre (Pereira et Ferreira, 1989, Pereira, 1992) [71, 64]. C'est la raison pour laquelle le liège expansé est également appelé liège aggloméré noir.

V.6.1.1.1. Compression perpendiculaire

La figure V.18 montre les courbes contrainte-déformation de compression dans la direction perpendiculaire des panneaux sandwiches SN20 et SN40, et le tableau V.1 résume les propriétés de compression.

Tableau V.1. Propriétés principales des panneaux sandwiches SN20 et SN40 en compression perpendiculaire : module d'élasticité apparent (E_a), déformation au $\varepsilon = 10\%$ (σ_{10}), déformation maximale (ε_{\max}) et le taux de relaxation η [%], [159].

Panneaux Sandwiches	E_a [MPa]	σ_{10} [MPa]	ε_{\max} [%]	η [%]
SN20	0.91	0.08	70.4	75%
SN40	0.62	0.06	65.66	85%

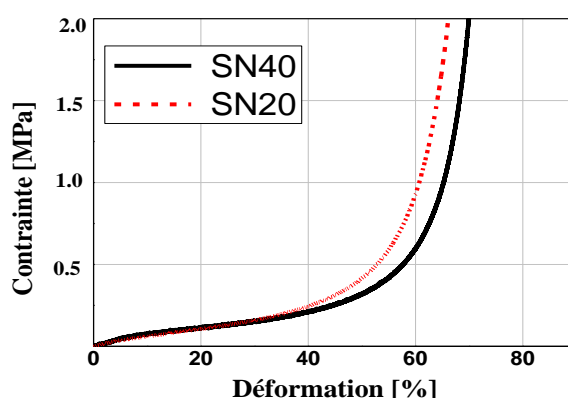


Figure V.18. Courbe contrainte-déformation des panneaux sandwiches (SN20 et SN40) lors de la compression dans la direction perpendiculaire [159].

Dans tous les cas, les courbes ont suivi la même tendance : une région élastique jusqu'à des valeurs des déformations d'environ 6.2% et 5.0% pour SN20 et SN40, respectivement, correspondant à des valeurs de contrainte de 0.078 MPa et 0.069 MPa, respectivement, suivis par un grand plateau avec une pente faible pour les déformations de 40% à 50%, avec une forte augmentation subséquente de contraintes plus élevées pour les déformations avec l'écrasement et à l'effondrement des cellules. L'essai a été arrêté à une contrainte de 1.08 MPa et 0.84 MPa, qui correspondent à une déformation de 61 à 64% (tableau V.1), pour SN20 et SN40, respectivement.

L'effet de cette contrainte de compression maximale dans l'agglomérat de liège expansé de l'âme du sandwich est représenté sur la figure V.19, avec une diminution des dimensions des particules de liège dans le sens de la compression, ce qui donne un aspect plus aplati. Le comportement de la compression de deux panneaux sandwiches a montré quelques différences. Bien que les courbes de contrainte-déformation soient en général tout à fait similaires, les panneaux sandwiches SN20 ont montré un module de plus grande que les panneaux sandwiches SN40 (0.9 par rapport à 0.6 MPa) et la phase de densification démarrée plus tard (figure V.18). Le taux de relaxation après 14 jours était inférieur pour les panneaux SN20 par rapport aux panneaux SN40 (75% et 85% respectivement).

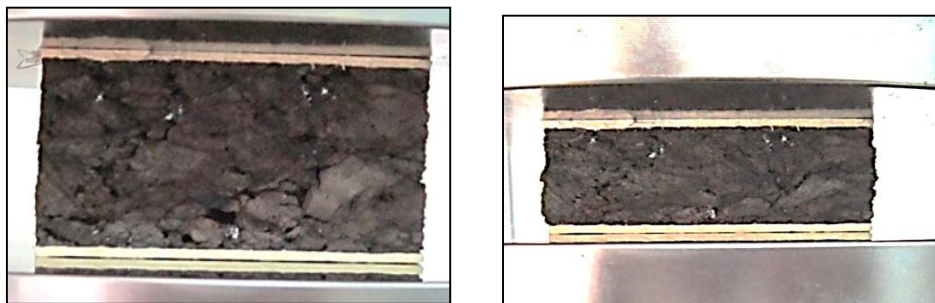


Figure V.19. Photos de liège aggloméré expansé dans le panneau sandwich SN20 avant et après compression dans la direction perpendiculaire.

Le comportement à la compression des panneaux sandwiches, lorsqu'ils sont chargés dans la direction perpendiculaire (figure V.18) était similaire pour toutes les études portant sur la compression d'échantillons de liège, montrant un comportement élastique linéaire initiale, suivie d'une déformation plastique et une phase de densification finale (Rosa et Fortes, 1988b ; Gibson et al, 1981 ; Anjos et al, 2008) [59, 44, 148]. Les paramètres de compression correspondants (tableau V.1) sont cependant beaucoup plus faibles que ceux obtenus pour les bouchons en liège ou les matériaux composites. Par exemple, pour le panneau sandwich SN40, le module d'Young est de 0.6 MPa et la contrainte d'une déformation à 10% est de 0.06

MPa, tandis que, pour le liège naturel, les valeurs sont 8-20 MPa et 0.25 MPa (Rosa et Pereira, 1994 ; Vaz et Fortes, 1988) [65, 149]. Cette faible résistance à la compression du panneau sandwich est liée directement à des propriétés de compression de l'agglomérat de liège expansé. En fait, la résistance à la compression de liège aggloméré expansé est inférieure à celle du liège, en raison des changements cellulaires d'origine thermique qui se produisent au cours de sa production, comme elle montre dans plusieurs études portant sur l'effet de la température sur les propriétés du liège (Pereira 1992 ; Rosa et Pereira, 1994 ; Sen et al, 2012 ; Sen et al, 2014) [64, 65, 150, 151].

La déformation sous des contraintes élevées est prise par les granules de liège qui réduisent sensiblement leurs dimensions, comme illustré sur la figure V.19 pour une compression à une pression de l'ordre de 60% qui est située au début de la zone de densification. Lors du déchargement, la récupération atteint 85% après 15 jours, ce qui est presque comparable à la pleine récupération du liège, après un effort de contrainte pour 50% (Anjos et al, 2014) [152]. Le panneau réalisé avec une couche intermédiaire en bois de placage (SN20) a eu un comportement similaire, bien que présentant une rigidité un peu plus élevée (Tableau V.1).

V.6.1.1.2. Traction dans la direction perpendiculaire

La figure V.20 montre les courbes force-déplacement pour les panneaux sandwiches SN20 et SN40 sous charge appliquées de traction dans la direction perpendiculaire. Les valeurs moyennes des propriétés mécaniques en traction sont présentées dans le tableau V.2.

Le comportement mécanique en traction des panneaux sandwiches présente trois phases essentielles : d'abord une augmentation linéaire de la charge appliquée jusqu'à une force de 31.31 N et un déplacement de 0.54 mm, suivie d'un comportement non linéaire jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte et, enfin, une diminution de la force à la rupture totale. La rupture est produite à 61.6 et 30.9 N qui correspondent à des déplacements de 3.16 et 2.10 mm pour SN20 et SN40, respectivement (tableau V.2).

La déformation des éprouvettes est irréversible, une rupture totale est située toujours dans la zone de l'âme (liège expansé), attestant d'une bonne qualité de réalisation des éprouvettes et d'une bonne adhésion de la colle entre la peau et l'âme.

Tous les panneaux sandwiches testés ont montré le même comportement avec une progression similaire de fracture dans le matériau de base de liège aggloméré expansé : la première fissure apparaît lorsque la charge maximale est atteinte pour tous les agglomérats de liège. Les fissures initiées se propagent préférentiellement suivant la direction du plan médian et en se dirigeant vers les extrémités de l'échantillon (Figure V.21). Le comportement à la traction

des deux types de panneaux sandwiches était similaire, bien que les panneaux SN20 aient la contrainte un peu plus élevée à la traction maximale par rapport aux panneaux SN40 (0.032 MPa et 0.024 MPa, respectivement), et des valeurs contraintes et de déformation à la rupture (tableau V.2).

Tableau V.2. Contrainte à la rupture des panneaux sandwiches de SN20 et SN40 (σ_b) sous traction appliquée dans la direction perpendiculaire [159].

Panneaux sandwiches	F_b [MPa]	D_b [mm]	σ_b [MPa]
SN20	61,56	3.16	0.024
SN40	30,90	2.10	0.012

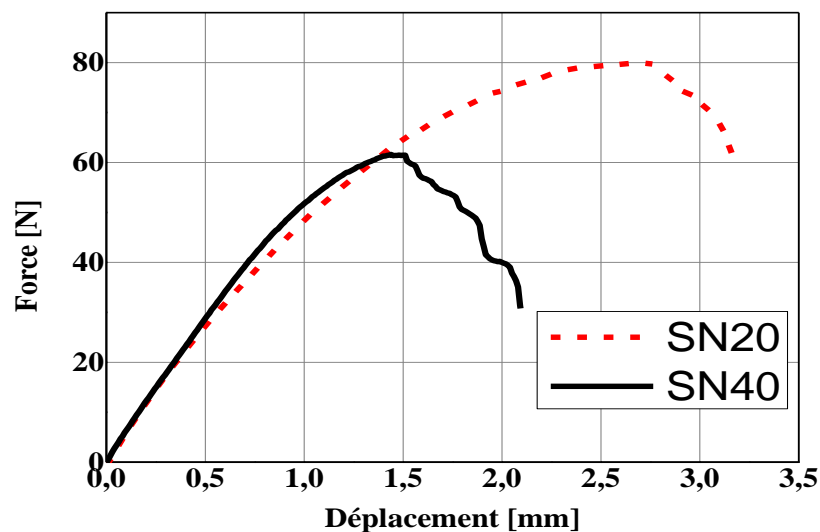


Figure V.20. Courbes force-déplacement de panneaux sandwiches SN20 et SN40 sous contrainte de traction appliquée dans la direction perpendiculaire [159].

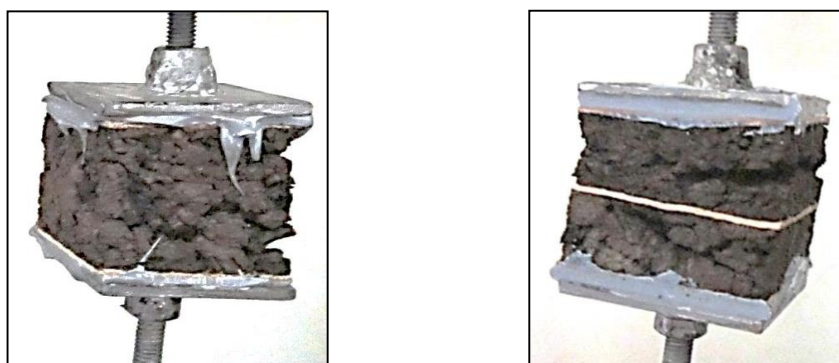


Figure V.21. Ouverture de la fissuration des panneaux sandwiches lors des essais de traction dans la direction perpendiculaire : SN40 (à gauche) et SN20 (à droite).

La résistance à la traction dans la direction perpendiculaire (tableau V.2) est faible par rapport aux valeurs trouvées pour le liège : environ 0.024 MPa par rapport à 0.6 MPa pour liège et assez similaires à la valeur de 0.05 MPa ramenée par rapport au liège aggloméré expansé (Pereira et Ferreira, 1989) [71]. La rupture s'est produite toujours entre les granulés de liège, se propageant rapidement, plus ou moins perpendiculairement à la contrainte (Figure V.21). Ceci est le résultat de la mauvaise adhérence entre les grains, à savoir, la faible résistance de l'auto-adhérence induite par des granulés thermiques. L'auto-adhésive qui se produit dans les agglomérés de liège expansé est suffisante pour que leur usinage, par exemple, en planches, ainsi que pour les applications statiques, par exemple, en tant que couches d'isolation. Toutefois, il ne peut pas être comparé à la résistance à la traction de composites de liège agglomérés qui présentent 17.4MPa (Moreira et al, 2010) [153]. Il y avait une différence entre les panneaux SN20 et SN40 par rapport à la contrainte de fracture, avec SN20 montrant la double résistance (tableau V.2). Ce doit être le résultat d'une zone de liaison inter granulaire relativement faible, ce qui est la région la plus faible dans la matière, étant donné que ce panneau sandwich de liège de 20 mm qui ont été renforcés par collage à une couche intermédiaire en placage de bois.

V.6.1.1.3. Compression avec et sans flambage

La figure V.22 montre les résultats obtenus en compression dans la direction longitudinale des panneaux sandwiches SN20 et SN40, et le tableau IV.10 présente les valeurs calculées des caractéristiques de compression. Les courbes montrent une première phase donne l'augmentation linéaire de la charge appliquée, correspondant à de petites déformations, suivie également d'une phase non linéaire courte jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte, puis on observe une diminution de la charge appliquée à une rupture totale. Les essais de compression pure ont montré qu'il y avait une combinaison de flexion entre les semelles et l'âme pour les deux panneaux sandwiches (SN20 et SN40), sans séparation entre le noyau et les feuilles de surface, comme le montre la figure V.23, La majorité des essais de compression avec flambage ont été réalisés aussi sans séparation de l'âme et les feuilles de surface. Dans le cas de panneaux sandwiches multicouches SN20, la rupture s'est produite, par cisaillement de semelle ou d'ampoules. Les résultats montrent que les panneaux sandwiches SN20 ont une résistance mécanique plus élevée en compression longitudinale que les panneaux sandwiches SN40, bien que la différence est faible (tableau V.3).

Tableau V.3. Force (F_M) et contrainte maximales (σ_M) en compression, dans la direction longitudinale des panneaux sandwiches SN20 et SN40 [159].

Panneaux sandwiches	Compression avec flambage		Compression pure	
	F_M [N]	σ_M [MPa]	F_M [N]	σ_M [MPa]
SN20	2543.713	0.113	3047.87	0.87
SN40	1999.51	0.088	2489.60	0.71

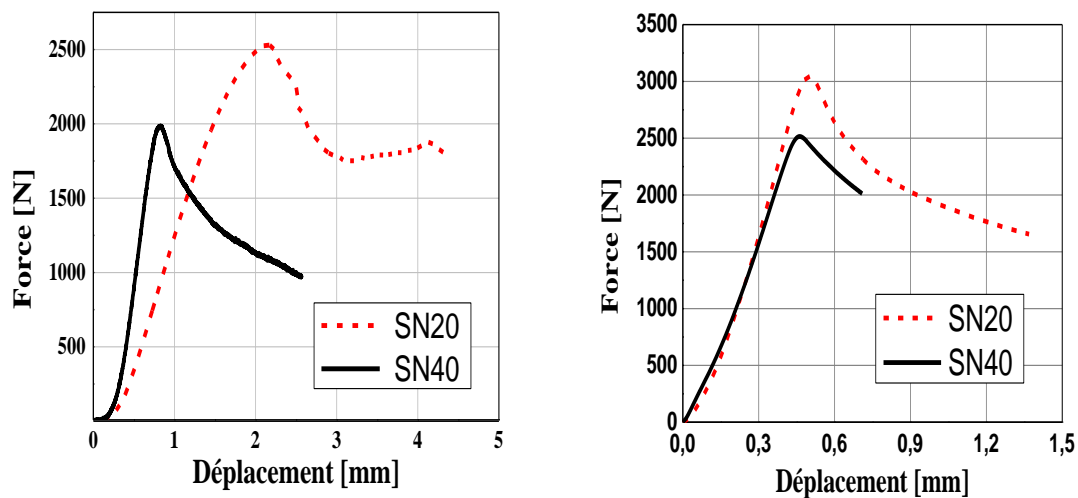


Figure V.22. Comportement en compression, des panneaux sandwiches dans la direction longitudinale SN20 et SN40, (b) : compression pure (a) : compression avec flambage [159].

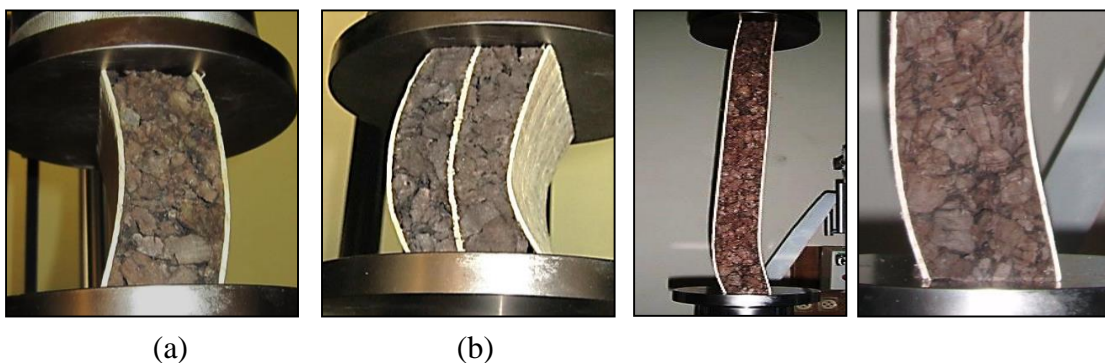


Figure V.23. Différents modes de défaillance de pliage à la semelle des échantillons en compression pure, dans la direction longitudinale : (a) SN20 et (b) SN40.

Figure V.24. Défaut des échantillons soumis à la déformation de compression SN40.

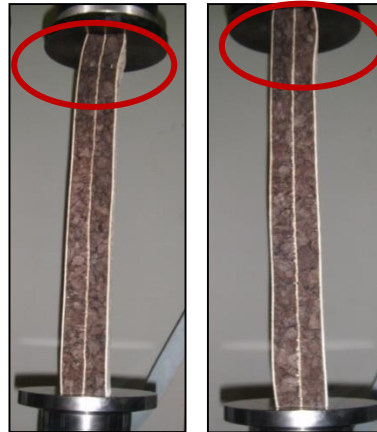


Figure V.25. Défaut des échantillons SN20 soumis à la compression avec flambage : cisaillement des semelles (à gauche) et des cloques (à droite).

Sous compression longitudinale (figure V.22), les valeurs maximales de contrainte étaient 0.87 MPa et 0.71 MPa pour les panneaux SN40 et SN20, respectivement, tandis que la contrainte de flambage est de 0.11 MPa et 0.09 MPa (tableau V.3). Comme la montre la figure V.23, n'y avait pas de séparation entre le noyau et les feuilles de surface, flexion de noyau accompagné de la flexion de placage de bois, bien que le cisaillement et des cloques dans la région d'application de la charge également aient lieu. Ces résultats montrent une très bonne performance, en comparaison avec les résultats obtenus pour d'autres matériaux de base, par exemple, face à la feuille microflambage et la séparation de l'âme. Le délaminage et flambage ont été signalés pour un panneau sandwich (Shivakumar et Chen, 2009) [154].

V.6.1.1.4. Essai de flexion 3 et 4 points

La figure V.26 montre les courbes force-déplacement sous l'essai de flexion 3 et 4 points pour les deux types de panneaux sandwiches (SN20 et SN40). Le tableau V.4 récapitule les valeurs correspondantes de la contrainte de flexion trois et quatre points (σ_3 , σ_4), la rigidité à la flexion (D), la rigidité de cisaillement (N) et le module de coulomb de l'âme (G_a). Le comportement en flexion était similaire et peut se décomposer en 3 phases principales, à savoir, une première phase correspondant à une augmentation linéaire de la charge appliquée avec le déplacement, suivie d'une seconde phase où le comportement est non linéaire et où la charge maximale est atteinte, et une diminution de la dernière charge jusqu'à la rupture de l'échantillon. L'intégration d'une couche intermédiaire de matériau en bois dans la structure composite (SN20) ne modifie pas le comportement général en flexion par rapport à une monocouche du matériau de base (SN40), bien qu'elle augmente la rigidité et la résistance à la

flexion. Les résultats ont montré que les panneaux sandwiches SN20 étaient beaucoup plus forts que les panneaux sandwiches SN40 (tableau V.4).

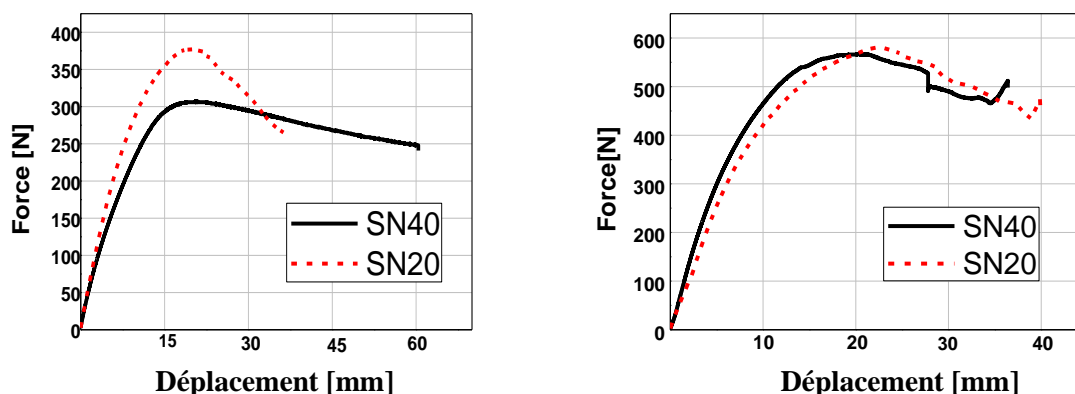


Figure V.26. Courbes force-déplacement de panneaux sandwiches SN20 et SN40 sous : flexion 3 points (à gauche) et flexion 4 points (à droite) [159].

Tableau V.4. Caractéristiques mécaniques des panneaux sandwiches SN20 et SN40 sous (a) flexion 3 points et (b) flexion 4 points [159].

Panneaux sandwiches	σ_3 [MPa]	σ_4 [MPa]	D [N/mm ²]	N [kN]	G _a [N/mm ²]
SN20	14.85	12.99	58.2 x 10 ⁹	173.5	41.15
SN40	6.71	6.16	77.3 x 10 ⁹	51.2	13.98

Dans presque tous les tests, le mode de rupture des éprouvettes par flexion a lieu par cisaillement de l'âme. Toutes les âmes en liège expansé, ont montré les mêmes apparences et progressions des fissures. Les exceptions sont les panneaux sandwiches SN40 qui ont montré une défaillance localisée dans la région de forte concentration de contraintes sous l'essai de flexion 3 points, produite par le contact entre l'actionneur de chargement et la matière. Ensuite, retour à l'état initial, après suppression de la charge appliquée (Figure V.27).

Les dommages affectant les panneaux sandwiches SN20 sous l'essai de flexion 4 points commencent par une petite fente de cisaillement qui se propage à partir de la zone de charge, suivant la direction du plan médian vers les extrémités de l'éprouvette (figure V.28).



Figure V.27. Panneau sandwich SN40 sous la compression maximale en flexion 3 points (à gauche) et récupération après l'élimination de contraintes (à droite).

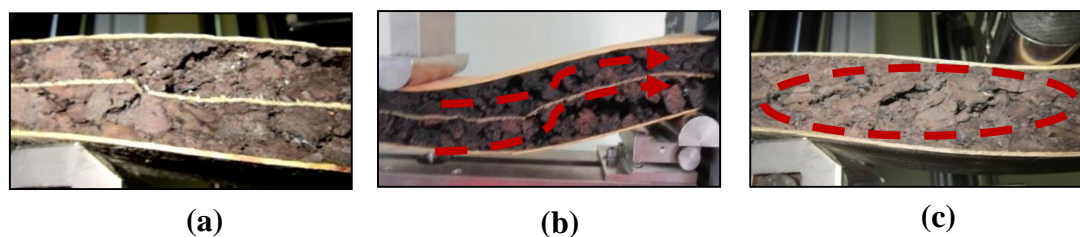


Figure V.28. Progression des fissures : (a) début de propagation des fissures dans le panneau SN20 sous flexion 3 points ; (b) propagation des fissures à la fin de l'échantillon dans le panneau SN20 sous flexion 3 points ; (c) fissuration du panneau SN40 sous flexion 4 points.

Dans le cadre de flexion, les dommages aux panneaux sandwiches ont commencé avec une petite fente de cisaillement se propageant à partir de la région d'application de charge aux extrémités de l'éprouvette (figure V.29). Ce comportement est similaire aux résultats trouvés pour panneaux sandwiches liège / carbone et montre que les matériaux de liège sont avantageux par rapport à d'autres matériaux de base pour les structures tolérantes aux dommages (Castro et al, 2010) [145]. La résistance à la flexion des panneaux sandwiches (tableau V.4) a été supérieure à la résistance à la flexion du matériau de base (liège). Les contraintes à la rupture des panneaux sandwiches sont de 14.9 MPa et 6.7 MPa pour SN20 et SN40 respectivement. Ces valeurs sont plus élevées par rapport à 2.9 MPa rapportée sur agglomérat de liège expansé (Diaz et al, 2003) [74]. La force maximale des panneaux SN20 et SN40 (figure V.26) était de 380 N et 307 N respectivement, pour flexion 3 points et 583 N et 572 N, respectivement, pour flexion 4 points et ces valeurs sont également plus élevées que celles rapportées pour le liège composite, qui se situait entre 173 et 311N N, en fonction de la densité du matériau (Reis et Silva, 2009) [98].

V.6.1.1.5. Essai de cisaillement

La figure V.30 montre les courbes force-déplacement durant l'essai de cisaillement, pour les deux types de panneaux sandwiches (SN20 et SN40), et le tableau V.5 résume les principales propriétés des panneaux sandwiches SN20 et SN40 sous cisaillement de la force maximale (F_M), la déformation à la rupture (D_M), la contrainte maximale (σ_m) et le module de cisaillement (G [MPa]).

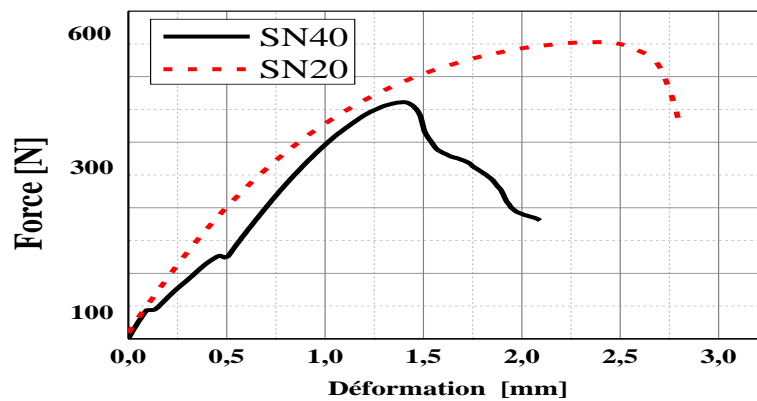


Figure V.29. Comportement mécanique en cisaillement pour les sandwichs SN20, SN40.

Table V.5. Principales propriétés des panneaux sandwichs SN20 et SN40 sous cisaillement : la force maximale (F_M), la déformation à la rupture (D_M), la contrainte maximale (σ_m), le module de cisaillement (G [MPa]), [159].

Panneaux sandwichs	F_m [N]	D_m [%]	σ_m [MPa]	G [MPa]
SN20	600	2.43	0.17	2.37
SN40	450	1.407	0.15	2.23

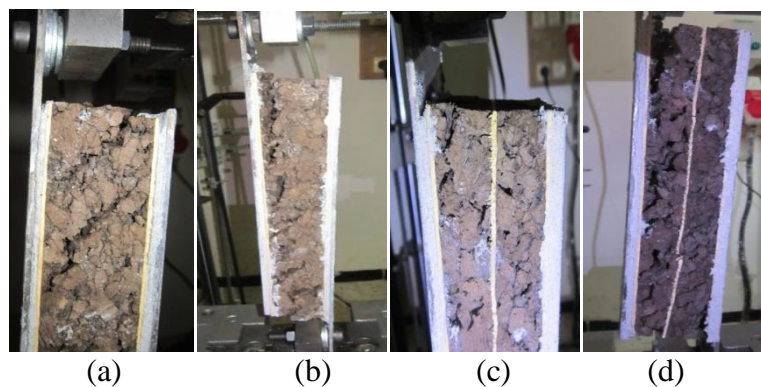


Figure V.30. Évolution typique du comportement mécanique de cisaillement pour les panneaux sandwichs : (a) début de fissuration pour SN40, (b) plusieurs fissures initiation / multiplication pour SN40, (c) début de fissuration pour SN20 et (d) plusieurs fissures pour SN20.

Les valeurs moyennes de la résistance au cisaillement dans la direction perpendiculaire (tableau V.5) sont faibles par rapport aux valeurs trouvées pour les panneaux sandwichs à base de carbon-liège [98]. Ceci est le résultat de la mauvaise adhérence entre les grains, à savoir, la faible résistance de l'auto-adhérence induite par des granulés thermiques.

Le comportement à la rupture des panneaux sandwiches (figure V.30) était similaire par rapport aux autres panneaux sandwiches à base de liège avec le lancement de plusieurs fissures à charge maximale, la propagation des fissures, et échec final [145]. Le comportement à la rupture pour les panneaux sandwiches à base de liège expansé est semblable aux dommages affectants sandwiches liège-carbone [98]. Ce comportement est un bon indicateur de la haute tolérance aux dommages liège composite par rapport à d'autres matériaux de base, qui est un facteur important dans le choix des matériaux pour les dommages tolérants structures.

Cela signifie qu'il est possible d'améliorer le comportement du cœur à base de liège sous l'essai de cisaillement, par l'amélioration de la liaison entre les grains de liège, par exemple, l'adhésif et la géométrie du grain (forme et dimensions).

V.6.1.2. Panneaux sandwiches à base de liège aggloméré blanc

Cette étude a montré que les panneaux sandwiches innovants avec une couche de base de liège aggloméré et des semelles en feuilles de placage de bois, et n'affectant pas l'environnement (Figure V.33) pourraient être produits avec des équipements et des procédures de production industrielle standard de contreplaqué.



Figure V.31. Structures sandwiches multicouches à base de liège aggloméré.



Figure V.32. Préparation des éprouvettes.

V.6.1.2.1. Compression pure

La figure V.33 montre les courbes contrainte-déformation, de la compression dans la direction perpendiculaire de panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40, et le tableau V.6 résume les propriétés de compression.

Tableau V.6. Principales propriétés de panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40 en compression perpendiculaire : module d'élasticité apparent (E_a), contrainte au $\varepsilon = 10\%$ (σ_{10}), déformation maximale (ε_{\max}) et le taux de relaxation (η) [136].

Panneaux sandwiches	E_a [MPa]	σ_{10} [MPa]	ε_{\max} [%]	η [%]
SB10	4.60	0.41	55.54	66.59
SB15	4.11	0.35	56.96	70.02
SB20	4.08	0.32	61.75	95.72
SB40	1.27	0.11	78.43	98.35

Dans tous les cas, les courbes contrainte-déformation suivent la même tendance : une zone élastique jusqu'à des valeurs de déformation d'environ 9.0%, 7.4%, 5.4% et 14.6%, pour les panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40, respectivement, correspondant à des valeurs de déformations de 0.40 MPa ; 0.30 MPa ; 0.26 MPa et 0.16 MPa, suivies d'un grand plateau avec une pente faible pour les déformations de 35% à 60%, avec une forte augmentation ultérieure de déformations de contraintes plus élevées. L'essai a été arrêté à des contraintes de 4.4 MPa ; 4.2 MPa ; 3.9 MPa et 1.7 MPa, ce qui correspond à une déformation de 55.0% ; 56.5% ; 59.1% et 70.9%, pour les panneaux sandwiches SB10 ; SB15 ; SB20 et SB40, respectivement (tableau V.6).

L'effet de cette contrainte de la compression maximale de liège aggloméré de l'âme dans les panneaux sandwiches est représenté sur la figure V.33 où la diminution de sa dimension dans la direction de la compression, est clairement visible. Le comportement à la compression des quatre panneaux sandwiches est différent. Bien que les courbes de contrainte-déformation soient tout à fait similaires, les panneaux sandwiches multicouches (SB10, SB15, SB20) montrent un module d'Young plus grand par rapport au panneau sandwich monocouche (SB40), et une phase de densification commence plus tôt (figure V.34). Par exemple, les modules d'Young étaient de 4.6 MPa et 1.3 MPa pour des panneaux SB10 et SB40 et la déformation maximum était de 55.5% et de 78.4% respectivement. L'augmentation du nombre de couches, augmente uniquement la rigidité du panneau dans une moindre mesure ; par exemple, le module d'Young était de 4.6 MPa et 4.1 MPa et la contrainte maximale est de 55.3% et 61.8% pour les panneaux sandwiches avec 4 couches d'âme (SB10) et les panneaux avec deux couches (SB20), respectivement,

Le taux de relaxation après 14 jours, était inférieur, pour les panneaux SB10 et SB15 (66.6% et 50.0%) et plus élevé, pour les panneaux SB20 et SB40 (95.7% et 98.4% respectivement).

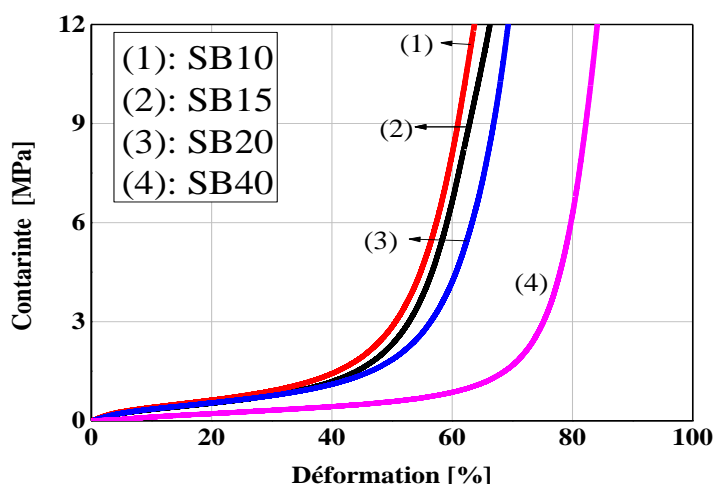


Figure V.33. Courbe contrainte-déformation des panneaux sandwiches (SB10, SB15, SB20 et SB40) lors de la compression dans la direction perpendiculaire [136].



Figure V.34. Image du liège s'agglomère dans le panneau sandwich S20 avant (à gauche) et après (à droite) compression dans la direction perpendiculaire.

Le comportement à la compression des panneaux sandwiches (figure V. 33) est similaire à ce qui est rapporté pour la compression de liège [44, 59, 66, 148]. Ceci montre que les propriétés de compression des panneaux sandwiches ont été déterminées par le liège aggloméré de base, ce qui permet de grandes déformations et reprise dimensionnelle. Ceci est le résultat de la structure cellulaire du liège qui est clairement visible dans les granules de liège aggloméré (Figure V.36).

Les valeurs trouvées ici pour le module d'Young (tableau V.6) étaient similaires à la valeur de 2.8 MPa obtenue pour le sandwich à base de liège aggloméré comme âme et des feuilles de fibres de carbone comme peau [94], mais un peu plus basse que les valeurs 6.0 MPa à 8.5 MPa rapportées pour les panneaux sandwiches avec micro-aggloméré de liège comme âme et feuilles de surface en alliage d'aluminium [93], pour le composite de polymère de liège elles sont de 5.4 MPa et 9.8 MPa [155], et pour liège aggloméré, elle est 7.4 MPa [153].

C'est certainement une zone où le développement des propriétés ciblées peut être obtenues par variation de la dimension des grains de liège et en optimisant l'adhésif et le procédé de fabrication du panneau.

La déformation sous charge élevée a été prise par les granulés de liège qui réduisent sensiblement leurs dimensions (figure V.34). La valorisation atteinte après 15 jours, par les panneaux sandwiches était en moyenne de 83%, ce qui est presque comparable à la pleine récupération du liège après une contrainte de déformation de 50% [152].

IV.6.1.2.2. Essai de traction

La figure V.35 montre les courbes force-déplacement pour les panneaux sandwiches sous une charge de traction appliquée dans la direction perpendiculaire et le tableau V.7 présente les valeurs moyennes des propriétés de traction. Le comportement sous une force de traction a montré trois phases : d'abord, une augmentation linéaire de la charge appliquée, suivie d'un comportement non linéaire jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte, et finalement une diminution de la force à la rupture totale. La rupture s'est produite à 418.7 N ; 236.0 N, 230.6 N et 163.3 N (tableau V.7).

La rupture se situe toujours dans le noyau (liège aggloméré), et la rupture entre les feuilles de surface et le noyau ne s'est jamais produit. La première fissure apparaît dans le liège aggloméré, lorsque la charge maximale a été atteinte et propagée horizontalement vers la fin de l'éprouvette. Elle se produit toujours entre les granules de liège (Figure V.36). Le comportement à la traction des quatre types de panneaux sandwiches était similaire, bien que les panneaux multicouches aient des valeurs de contrainte de traction et de déformation à la rupture maximale, plus élevées par rapport aux panneaux sandwiches monocouches (SB40) (tableaux V.7).

Le comportement en traction représenté par la figure V.35 est un comportement commun des matériaux cellulaires de liège, qui déjà décrit [143, 144]. Cependant, la résistance à la traction des panneaux sandwiches (tableau V.7) a été inférieure à celle rapportée pour liège. Par exemple 0.6 à 1 MPa avec des déformations de 5 à 7% [143-145]. Le défaut se produit toujours entre les granules de liège (figure V.36) et se propage rapidement, plus ou moins perpendiculairement à la contrainte (figure V.36). Cela signifie que la majeure partie de la résistance à la traction est donnée par la résistance d'adhérence inter-granulaire et donc ouverte à une optimisation. En effet, lorsque la liaison entre les granules de liège est forte, la contrainte de traction peut être logée par le redressement des ondulations et les ondulations des parois des cellules de liège [98, 144, 146].

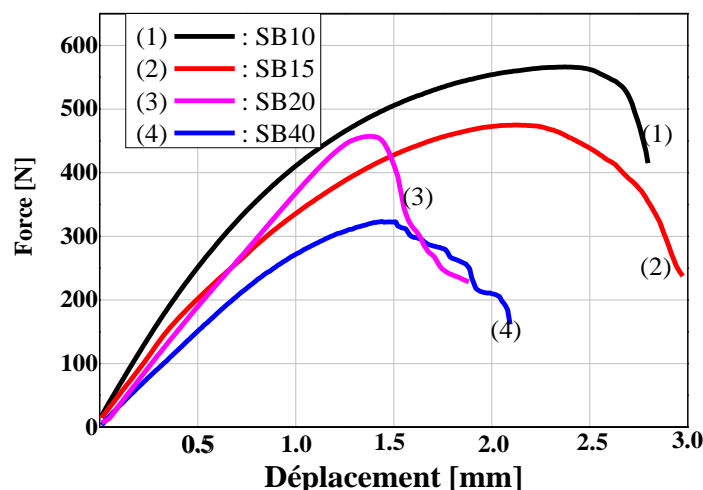


Figure V.35. Courbes force-déplacement des panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40 sous contrainte de traction appliquée dans la direction perpendiculaire [136].

Tableau V.7. Contrainte maximale (σ_m) et contrainte à la rupture (de σ_b) des panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40, sous l'essai de traction appliqué dans la direction perpendiculaire [136].

Panneaux sandwiches	F_m [N]	D_m [mm]	σ_m [MPa]	F_b [N]	D_b [mm]	σ_b [MPa]
SB10	569.21	2.46	0.227	418.69	2.79	0.167
SB15	475.24	2.15	0.190	236.04	2.98	0.094
SB20	456.45	1.37	0.182	230.59	1.87	0.092
SB40	324.73	1.48	0.129	163.33	2.09	0.065

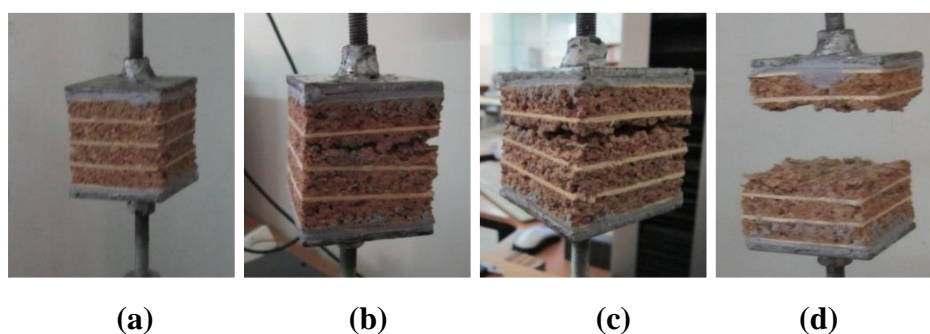


Figure V.36. Étapes du processus de rupture, en traction perpendiculaire, de liège aggloméré : (a) domaine élastique ; (b) début de la déformation plastique ; (c) initiation et propagation des fissures ; (d) rupture finale [136].

V.6.1.2.3. Compression sans (pure) ou avec flambage

Les figures V.37 et V.38 montrent les résultats de compression obtenus dans la direction longitudinale des panneaux sandwiches, et le tableau V.8 présente les valeurs calculées des

caractéristiques de compression. Les courbes montrent dans la première phase, l'augmentation linéaire de la charge appliquée, correspondant à de faibles déformations, suivie d'une phase non linéaire courte jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte ; puis on observe une diminution de la charge appliquée jusqu'à la rupture totale.

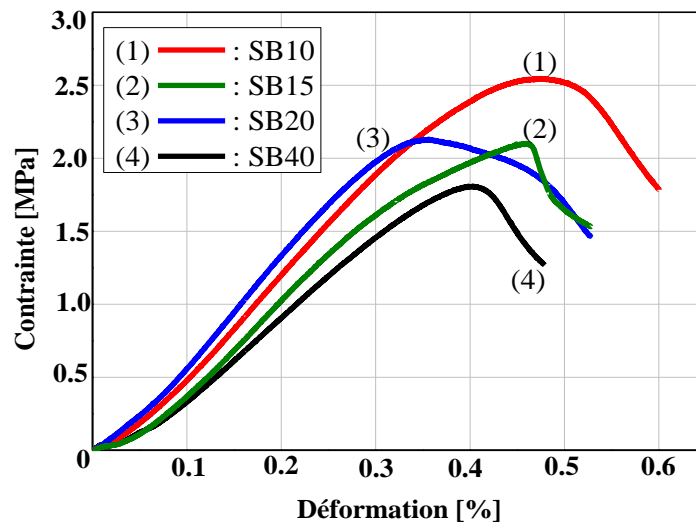


Figure V.37. Courbe contrainte-déformation des panneaux sandwiches SB10, SB15, S20 et SB40 sous l'essai de compression longitudinale pure [136].

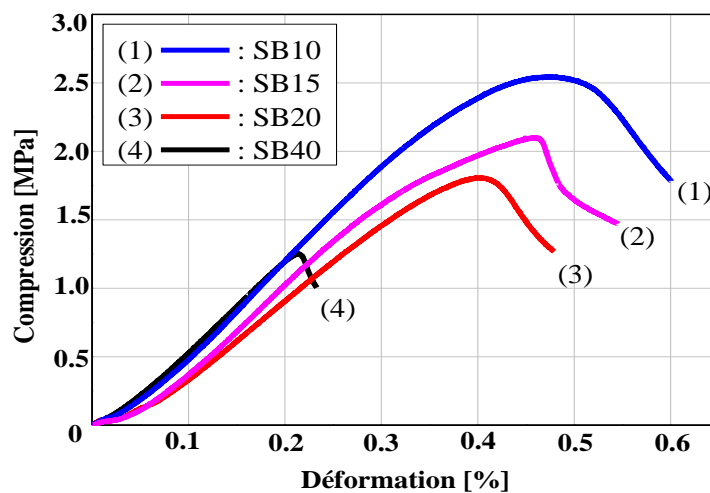


Figure V.38. Comportement à la compression avec flambage dans la direction longitudinale, pour les panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40 [136].

Dans la plupart des cas, il n'y avait pas de séparation entre les feuilles de placage de bois et la couche de liège aggloméré. La plupart des essais ont montré une combinaison de flexion et la formation de cloques (figure V.39), la rupture se produisant par cisaillement ou par formation de cloques avec apparition de fissures (figure V.40). L'intégration de plusieurs couches dans la structure composite ne modifie pas le comportement global de compression par rapport à une seule couche de matériau de base (SB40). L'augmentation de couches augmente la rigidité et la résistance des panneaux (tableau V.8).

Tableau V.8. Contrainte maximale et déformation en compression longitudinale compression avec flambage des panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40 [136].

Panneaux sandwiches	Compression pure		Compression avec flambage	
	σ_m [MPa]	D_b [%]	σ_m [MPa]	D_b [%]
SB10	2.54	0.50	2.56	0.48
SB15	2.11	0.45	2.11	0.46
SB20	2.13	0.34	1.82	0.41
SB40	1.78	0.41	1.26	0.26

Lors de l'essai de compression sur champ, il n'y avait pas de séparation entre le noyau et les feuilles de surface. Ce fut une bonne performance par rapport au microflambage, à la séparation de la feuille de surface au matériau de base (âme) et ou délaminage qui est signalé pour un panneau sandwich [154].

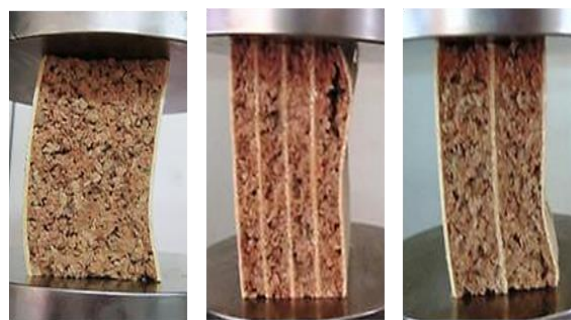


Figure V.39. Exemples illustrant les modes de défaillance des panneaux sandwiches en compression pure [136].

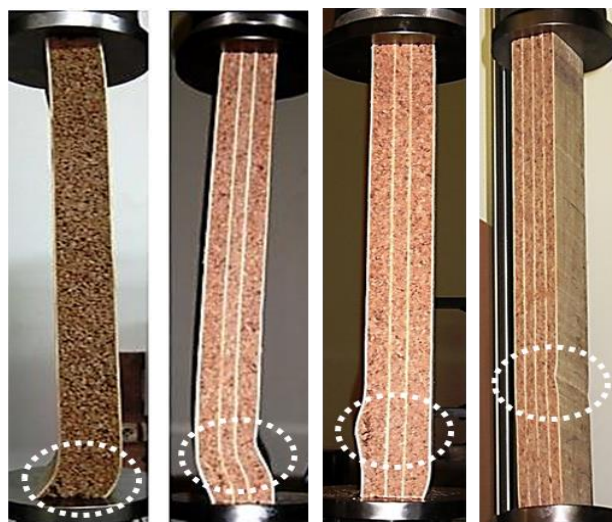


Figure V.40. Défaut des panneaux sandwiches soumis à une compression avec flambage : une rupture en cisaillement (à gauche) et l'échec de formation des cloques / milieu et à droite [136].

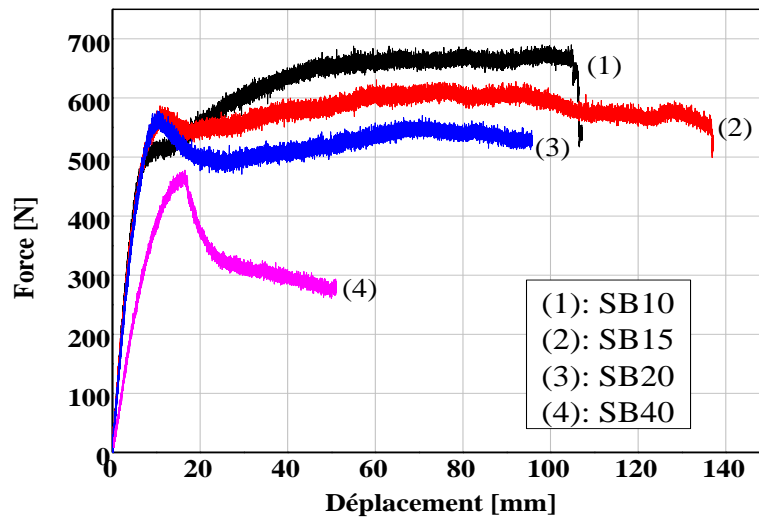
IV.6.1.2.4. Flexion 3 et 4 points

La figure V.41 montre les courbes force-déplacement de flexion trois et quatre points pour les quatre types de panneaux sandwiches et le tableau V.9 résume les valeurs de contraintes correspondant de flexion (σ_3 , σ_4), résistance à la flexion (D), rigidité de cisaillement (N) et le module de l'âme de Coulomb (G_a). Le comportement en flexion était similaire et montrait trois phases principales : une première phase correspondant à une augmentation linéaire de la charge appliquée à la flèche, suivie une seconde phase de comportement non linéaire, dans laquelle la charge maximale a été atteinte, et une diminution de la dernière charge, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. L'intégration d'un matériau multicouche (bois et liège) dans la structure composite ne modifie pas le comportement général en flexion par rapport au matériau de base monocouche (SB40). Cependant, l'augmentation de la rigidité des couches qui augmente, la résistance à la flexion les panneaux sandwiches SB10 était beaucoup plus forte que pour les autres panneaux sandwiches (tableau V.9).

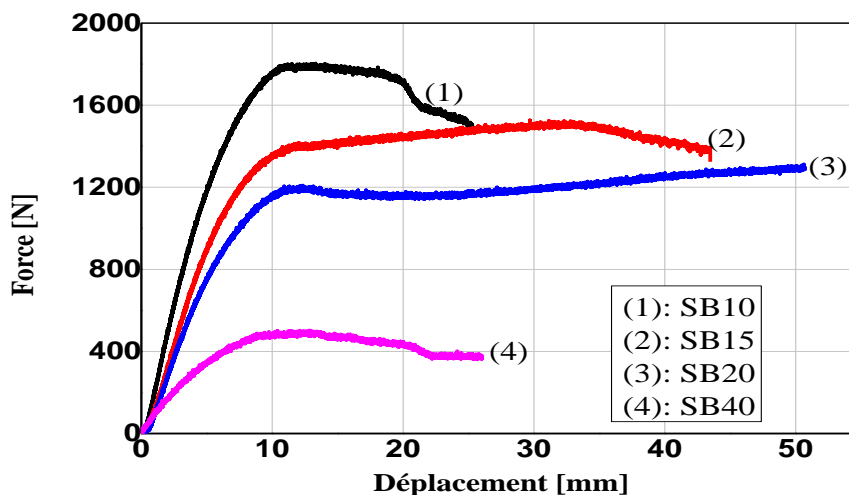
Tableau V.9. Propriétés mécaniques des panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40 sous flexion 3 points et 4 points de flexion [136].

Panneaux sandwiches	σ_3 [MPa]	σ_4 [MPa]	D [N/mm ²]	N [kN]	G_a [N/mm ²]
SB10	33.12	44.79	37.67 10 ⁶	4134.81	0.778
SB15	25.30	33.88	35.10 10 ⁶	1490.59	0.343
SB20	21.78	24.05	161.52 10 ⁶	1363.63	0.357
SB40	9.74	7.67	53.44 10 ⁶	973.44	0.286

Les observations notées au cours des essais de flexion 3 points, ont montré que, dans la plupart des cas, les ruptures se sont produites par cisaillement de l'âme. La première fissure macroscopique est apparue, pour la force maximale, dans les agglomérés de liège et se propage à la fin de l'éprouvette (figure V.41). Par exemple, la rupture peut commencer dans la région localisée de concentration de contrainte élevée, entre l'actionneur et le chargement (figure V.42). La déformation est réversible, après suppression de l'effort d'extension, et l'éprouvette revient à son état initial.



(a)



(b)

Figures V.41. Courbes force-déplacement pour les panneaux sandwiches SB40, SB20, SB15, SB10 sous : (a) flexion 3 points et (b) flexion 4 points [136].

En flexion 3 points (Figure V.42), l'endommagement s'effectue par écrasement en compression de la peau à la partie supérieure (côté comprimé) et par rupture de la peau et du liège, à la partie inférieure (côté tendu).

En flexion quatre points, l'endommagement s'effectue par cisaillement de l'âme et des fissures macroscopiques se sont produites pour, la force maximale, dans les agglomérés de liège et s'est propagée à la fin de l'éprouvette (figure V.43).



Figure V.42. Progression des fissures (SB15) en flexion 3 points : (a) début du test, (b) apparition et propagation de la fissure, (c) limite de propagation de la fissure à l'extrémité de l'échantillon [136].



Figure V.43. Séquence de la défaillance des échantillons à base de liège (SB10) ; en flexion 3 points, (a) début du test, (b) compression maximale et (c) retour à l'état initial.

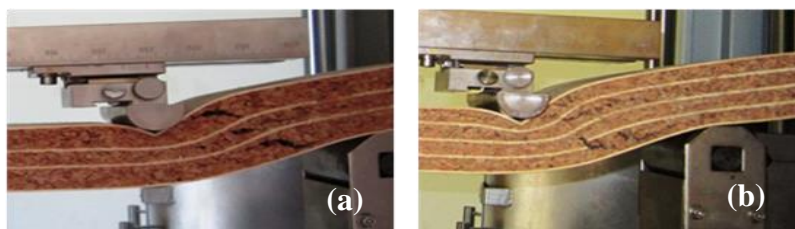


Figure V.44. Essais de flexion quatre points : (a) fissuration de l'âme (SB15) ; rupture de l'âme et des peaux inférieures (SB10) [136].

Les caractéristiques de flexion des panneaux sandwichs (tableau V.9) se comparent favorablement avec les valeurs déclarées pour les panneaux sandwichs à base de liège aggloméré comme âme et des feuilles de carbone / époxy comme peau [145]. Les valeurs des contraintes maximales pour flexion se situaient entre 33.2 à 9.7 MPa et entre 44.8 MPa, à 9.7 MPa respectivement pour flexion trois et quatre points et sont, en général, plus élevés par rapport aux valeurs trouvées dans la littérature, et qui varient entre 13.5 à 24.22 MPa [98].

Les valeurs moyennes de la rigidité de cisaillement étaient similaires à celles rapportées pour le sandwich en carbone-liège [98]. Le comportement à la rupture des panneaux sandwiches (figure V.42 et figure V.44) était similaire à des d'autres panneaux sandwiches à base de liège avec l'ouverture de plusieurs fissures à la charge maximale, propagation de la fissure [145]. Le comportement à la rupture sur la figure V.43 (à gauche et au milieu) a montré une défaillance dans la zone localisée de la concentration de contrainte élevée. L'échec final de la couche de bois représenté sur la figure V.44 (à droite), est similaire à l'endommagement affectant les sandwiches liège-carbone [98]. Ce comportement est un bon indicateur des dommages de tolérance élevée de liège composite par rapport à d'autres matériaux de base, ce qui est un facteur important dans le choix des matériaux, pour les structures tolérantes aux dommages.

V.6.1.2.5. Essai de cisaillement

La figure V.45 montre les courbes force-déplacement pour les panneaux sandwiches sous une charge de cisaillement appliquée dans le sens longitudinal et le tableau V.10 résume les valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques de cisaillement. Un comportement similaire a été observé dans tous les panneaux sandwiches, où il existe une inflexion au début du régime élastique, le plus souvent influencée par la propriété viscoélastique du liège ou en raison de l'alignement systématique de la ligne de charge. La première phase a pris fin lorsque la première fissure s'est produite. Pendant la deuxième phase, il ya une denture qui peut être associée à une instabilité de la déformation due à la défaillance progressive des couches en liège aggloméré (figure V.46). La rupture s'est produite lorsque la charge appliquée dépasse la résistance de seuil de la matière. En général, cela s'est produit dans les régions entre les grains de l'agglomérat de liège.

Les paramètres de l'essai de cisaillement (tableau V.10) ont été similaires à ceux trouvés dans la littérature, par exemple pour les panneaux sandwiches à base de carbone / époxy et liège l'aggloméré [98], ainsi que le comportement à la rupture (figure V.46) ce qui montre une bonne adhérence entre le bois et le liège. La défaillance s'est produite dans les agglomérés de liège inter-granulaire (Figure V.38 et figure V.46). Cela signifie qu'il est possible d'améliorer le comportement du noyau à base de liège sous cisaillement et des contraintes de traction par l'optimisation de la liaison : par exemple, géométrie de grain et l'adhésif (forme et dimensions).

Tableau V.10. Principales propriétés des panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 ou SB40 sous cisaillement : force maximale (F_M), déformation à la rupture (D_M), contrainte maximale (σ_m), module de cisaillement (G [MPa]).

Panneaux sandwiches	F_m [N]	D_m [%]	σ_m [MPa]	G [MPa]
SB10	2769.16	8.44	0.22	3.34
SB15	2675.65	6.96	0.21	3.21
SB20	2144.90	7.32	0.17	2.37
SB40	1879.52	4.88	0.15	2.23

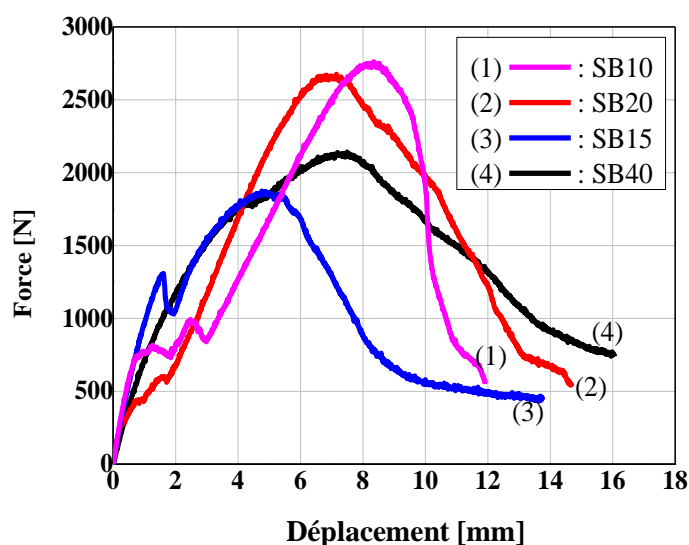


Figure V.45. Comportement mécanique en cisaillement des panneaux sandwiches SB10, SB15, SB20 et SB40 [136].

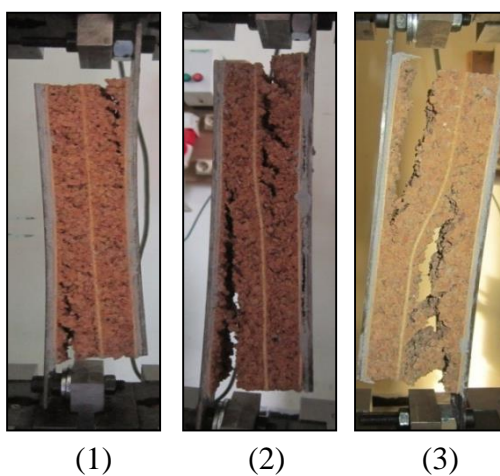


Figure V.46. Évolution typique du comportement mécanique de cisaillement, pour les panneaux sandwiches de la série SB20 : (1) début de fissuration, (2) plusieurs fissures initiation / multiplication, et (3) échec final.

En ce qui concerne l'influence de la conception des couches multiples, il a été observé pour tous les paramètres mécaniques de compression, de traction, de flexion et de cisaillement, que le nombre de couches dans le panneau sandwich, était important et une plus grande résistance mécanique est observée. L'effet de forces impliquées, était plus élevé, en ce qui concerne les situations de traction et de cisaillement, comme influence directe de la plus grande résistance des couches de placage de bois. Globalement, ces agglomérés de panneaux sandwiches de placage de bois-liège ont montré une bonne performance en tant que composants non structuraux, destinés à une utilisation potentielle, comme des cloisons et des panneaux de séparation dans le bâtiment. Leur faible densité et les propriétés connues de l'isolation thermique, l'absorption acoustique et une faible hygroscopicité donnée par le noyau de liège [45] contribuent à la valoriser ces panneaux sandwiches dans des applications intérieures, dans la construction.

V.6.2. Analyse hygrothermique

V.6.2.1. Analyse de la variation de la masse après séchage en étuve, pour les panneaux sandwiches

La figure V.47 montre respectivement la variation de la masse des panneaux sandwiches multicouches à base de liège aggloméré expansé (SN20 et SN40) et à base de liège aggloméré blanc (SB10, SB15, SB20 et SB40) respectivement, en fonction du temps de séchage dans une étuve, à une température de 100 °C. Au début de l'essai, la masse de tous les panneaux sandwiches multicouches diminue, cela est dû à une évaporation rapide de l'eau qui est liée physiquement à travers les pores du matériau (bois et liège) ; par la suite, une diminution de cette allure jusqu'à arriver à une stabilité de la masse, après les 15 premières heures de séchage.

La figure V.47-(a) montre la variation de la masse des panneaux sandwiches multicouches à base de liège expansé (aggloméré noir) de grande densité (SN20 et SN40), en fonction du temps de séchage, dans une étuve, à une température de 100 °C. Le panneau sandwich de la série 20 (SN20) perd dans les 05 premières heures, 6.63 % de sa masse ; de 05 heures jusqu'à 24 heures, il perd 0.9 % de sa masse. Le panneau sandwich série 40 (SN40) perd 7.25 % dans les 05 premières heures ensuite ; 1.68% jusqu'à 15 heures. Les pertes de masse en pourcentage des sandwiches, sont stabilisées de 15 heures jusqu'à 24 heures avec une perte de 0.5 % de sa masse.

Les panneaux sandwiches à base de liège aggloméré blanc (SB10 et SB15) perdent dans les 15 premières heures, 6 % de leur masse initiale ; de 15 heures jusqu'à 24 heures, ils perdent 0.15 % de leur masse de la série 10 (SB10) et 0.58% pour la série 15 (SB15). La série 20 (SB20) perd 8 % dans les 15 premières heures, ensuite, 1.46% jusqu'à 24 heures. En ce qui concerne la série 40 (SB40) elle perd 8.94%, dans les 15 premières heures, ensuite 1.13% jusqu'à 24 heures.

On note une variation de masse plus importante entre les quatre séries (SB40, SB20, SB15, SB10) qui sont dues à l'augmentation du nombre des couches de bois et de liège aggloméré de 1 heure jusqu'à 15 heures. Au bout de 15 heures en étuve, les pertes de masse en pourcentage de sandwiches sont stables et identiques. La variation de masse des quatre types de sandwiches peut s'expliquer par l'augmentation des nombres des couches du bois de pin d'Alep et de liège aggloméré et au bout de 15 heures, l'âme du sandwich atteint sa limite de perte de masse, élimination de la présence d'airs entre granulés dans le liège aggloméré constituant l'âme qui se trouve remplie de résine que nous ne pouvons chasser par la température, à l'intérieur de l'étuve. À partir de 15 heures en étuve, à 100°C, ce sont les peaux qui commencent à perdre de leur poids.

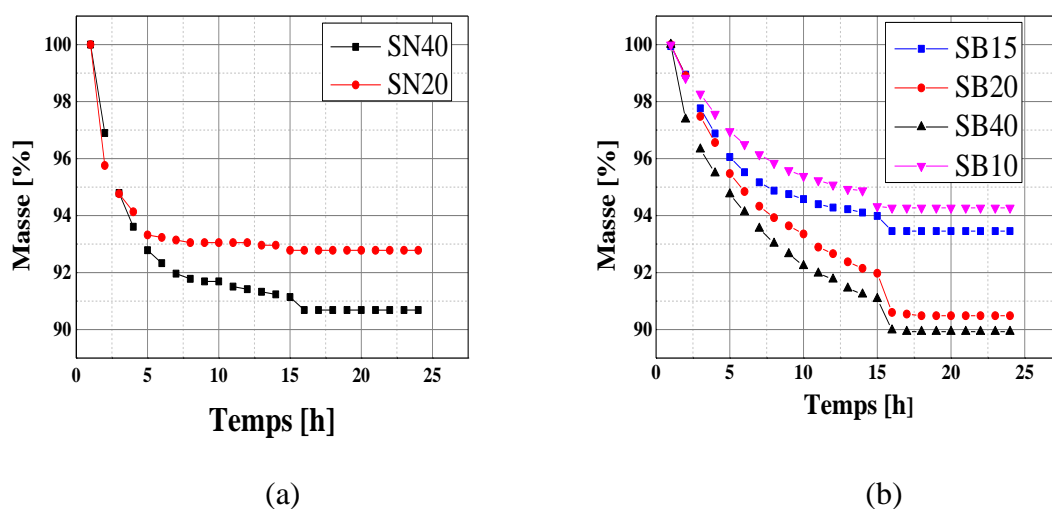


Figure V.47. Variation de la masse des panneaux sandwiches multicouches : (a) panneaux sandwiches à base de liège expansé (SN20 et SN40) et (b) panneaux sandwiches à base de liège aggloméré blanc (SB10, SB15, SB20 et SB40), en fonction du temps de chauffage en étuve, portés à une température de 100°C.

Cette différence de pertes masse entre les deux séries est due à l'augmentation du nombre des couches et peut s'expliquer aussi par la présence d'airs plus importants dans le liège aggloméré noir, du fait que nous avons une granulométrie plus serrée que celle des panneaux

sandwiches à base de liège aggloméré blanc qui se trouve remplie de résine que nous ne pouvons chasser par la température, à l'intérieur de l'étuve.

Les résultats obtenus à partir d'analyse de la variation de la masse, après séchage en étuve à 100 °C ont révélé que la performance des panneaux sandwiches multicouches à base de liège aggloméré, dépend essentiellement de la taille des granules de liège, de sa densité et de la procédure de collage utilisées pour la cohésion des granules, et ces paramètres peuvent être ajustés en fonction du nombre de couches d'âmes et de peaux, c'est-à-dire, selon leur structure. Ces résultats permettent également de montrer que le liège aggloméré a des propriétés spécifiques qui confirment sa capacité supérieure en tant que matériau de cœur de sandwich à des composants, par rapport aux autres matériaux conventionnels.

V.6.2.2. Analyse du pouvoir d'absorption d'eau des panneaux sandwiches multicouches

Le tableau V.11 représente les différents types de panneaux sandwiches (SB10, SB15, SB20, SB40, SN20, SN40), pour des épaisseurs égales qui montrent la valeur de la masse initiale, la surface en contact avec l'eau, la masse après 24 heures ainsi que pouvoir d'absorption W_p (kg/m²) de tous les types des panneaux sandwiches.

Tableau V.11. Valeurs du pouvoir d'absorption d'eau des panneaux sandwiches [158].

Panneaux sandwiches	Masse initiale m_0 [Kg]	Aire A_p [m ²]	Masse après 24h m_{24} [kg]	Pouvoir d'absorption W_p [Kg/m ²]
SB10	0.618	0.304	0.676	0.190
SB15	0.603	0.271	0.658	0.202
SB20	0.611	0.347	0.759	0.426
SB40	0.483	0.294	0.656	0.587
SN20	0.302	0.237	0.328	0.109
SN40	0.307	0.254	0.351	0.173

La figure V.48 montre la variation du pouvoir d'absorption W_p [kg/m²] des panneaux sandwiches à base de liège (aggloméré et expansé) en immersion partielle dans un bac pendant 24 heures. Nous remarquons que le pouvoir d'absorption d'eau varie d'un panneau à l'autre et le pouvoir d'absorption des panneaux sandwiches à base de liège aggloméré (SB10, SB15, SB20 et SB40) et plus élevé pour les panneaux sandwiches à base de liège expansé (SN20 et SN40).

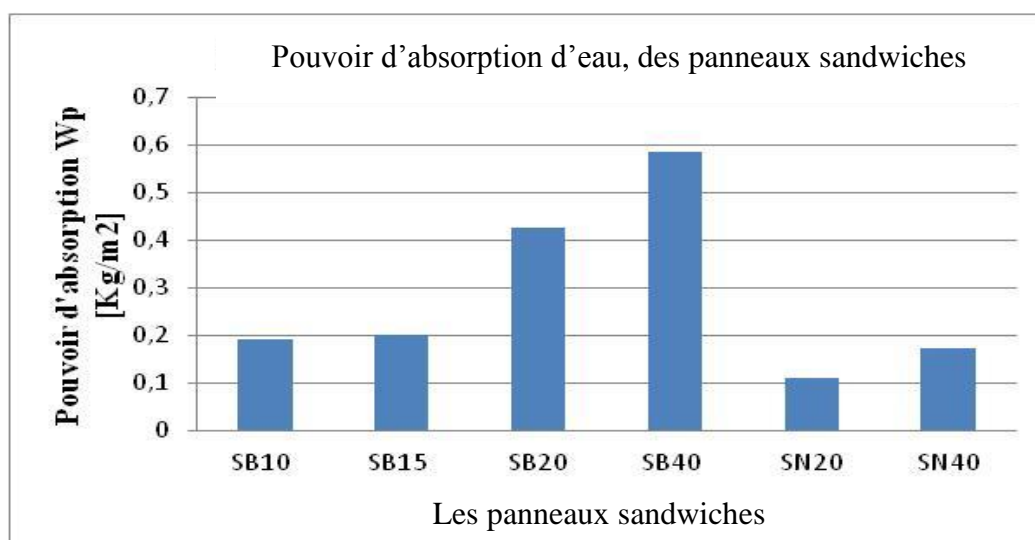


Figure V.48. Analyse du pouvoir d'absorption d'eau des panneaux sandwiches multicouches [158].

D'après ces résultats, on remarque que le pouvoir d'absorption d'eau, pour le panneau sandwich SB40, est très important, comparé aux autres types de panneaux sandwich à base de liège aggloméré blanc (SB10, SB15 et SB20). Il est aussi très important comparé aux panneaux sandwiches SN20 pour les panneaux sandwiches SN40.

Les panneaux sandwich à base de liège aggloméré (SB10, SB15, SB20 et SB40) possèdent un pouvoir d'absorption de l'ordre de 0.19 Kg/m², 0.20 Kg/m², 0.42 Kg/m² et 0.58 Kg/m², respectivement. Cette différence est certainement liée à l'augmentation du nombre de couches de bois et de liège aggloméré (structure). Les panneaux sandwich à base de liège aggloméré (SN20 et SN40) possèdent un pouvoir d'absorption de l'ordre de 0.10 kg/m² et 0.17 kg/m² respectivement. Ces résultats sont inférieurs par rapport au pouvoir d'absorption des panneaux sandwich à base de liège aggloméré blanc (SB10, SB15, SB20 et SB40).

Les résultats obtenus à partir des essais d'absorption ont montré que les performances des structures sandwich dépendent essentiellement de la taille des granules de liège, de sa densité et de la procédure de collage utilisée pour la cohésion des granules (liège expansé fabriqué dans un autoclave fermé, à haute température (environ 300°C) et à la pression (environ 40 Kpa), sans l'utilisation de l'adhésif. Ce processus thermique industriel provoque la dégradation thermo-chimique de la paroi cellulaire du liège) et l'influence positive de l'augmentation du nombre de couches du matériau d'âme dans la structure des sandwiches sur le pouvoir d'absorption.

V.6.3. Analyse thermique

V.6.3.1. CT mètre

Le tableau V.12 montre les valeurs de la conductivité thermique et le coefficient de corrélation des panneaux sandwiches à base de liège aggloméré (SB10, SB15, SB20 et SB40) et à base de liège expansé (SN20 et SN40), respectivement.

Tableau V.12. Valeurs des conductivités thermiques et coefficients de corrélation des différents types de matériaux utilisés pour la fabrication des panneaux sandwiches (liège aggloméré, liège expansé, placage du bois de pin d'Alep), obtenues à l'aide de CT mètre.

Matériaux utilisés	Epaisseurs [cm]	Moyennes & Ecart-type	Conductivités thermiques [W/m.K]	Coefficients de corrélations « Moyenne »
Liège aggloméré	1	Moyenne	0.0640	0.999
		Ecart-type	0.063	
Liège aggloméré	1.5	Moyenne	0.0691	0.999
		Ecart-type	0.09	
Liège aggloméré	2	Moyenne	0.0696	0.999
		Ecart-type	0.04	
Liège aggloméré	4	Moyenne	0.0712	0.999
		Ecart-type	0.13	
Liège expansé	2	Moyenne	0.0442	0,999
		Ecart-type	0.094	
Liège expansé	4	Moyenne	0.0481	0,999
		Ecart-type	0.14	
bois	0.15	Moyenne	0.1775	0,999
		Ecart-type	0.96	

Liège aggloméré blanc avec des épaisseurs (1, 1.5, 2 et 4 cm) possèdent une conductivité thermique de l'ordre de 0.064 W/m.K ; 0.0691 W/m.K ; 0.0696 W/m.K et 0.0712 W/m.K respectivement.

Les lièges expansés (aggloméré noir) avec des épaisseurs (2 cm et 4 cm) possèdent des conductivités thermiques de l'ordre de 0.0442W/m.K et de 0.0481cm, respectivement. Le

liège expansé (SN20 et SN40) possède une faible conductivité thermique par rapport liège aggloméré blanc (SB10, SB15, SB20 et SB40) à cause de la procédure de fabrication, la taille de grains et constitution (la résine dans le liège aggloméré). Plus la densité est faible plus la conductivité est faible. Dans notre cas, plus l'épaisseur augmente, plus la conductivité du liège augmente.

V.6.3.2. Maquette

Le tableau V.13 contient toutes les données des mesures, calculées, et ainsi que les résultats pour les panneaux sandwiches (bois et liège aggloméré/ liège expansé).

Tableau V.13. Températures, les valeurs de k et les conductivités de différents matériaux isolants utilisées (liège aggloméré, liège expansé et placage de bois).

Matériaux	E [cm]	Θ_{Li} [°C]	Θ_{wi} [°C]	Θ_{wa} [°C]	Θ_{La} [°C]	P/A [W /m2]	K [W /Km2]	λ [W /Km]	λ' [W /Km]
Liège aggloméré	1	59	47.1	31.6	19.4	98.82	2.476	0.063	0.0640
Liège aggloméré	1.5	56.4	46.2	28.8	18.9	80.19	2.155	0.069	0.0691
Liège aggloméré	2	53	44.1	26.4	18.8	61.56	1.871	0.069	0.0696
Liège aggloméré	4	59.8	54.2	25.6	19	53.46	1.278	0.074	0.0712
Liège expansé	2	57.7	51.1	26.9	20.2	54.27	1.40	0.044	0.0442
Liège expansé	4	54.5	51	24.3	20.3	32.4	0.933	0.048	0.0481
Bois	0.15	59.8	46.7	45.1	22.1	186.3	3.913	0.174	0.1775

E : Epaisseur en cm
 λ' : Valeurs des conductibilités thermiques des matériaux, donnés, par la méthode du CT mètre.

Les températures de parois en bois et en liège aggloméré enregistrées au cours de la phase de chauffage, ont montré des parois en liège, d'une épaisseur identique pour avoir une capacité de stockage de chaleur plus élevée. Dans le mur en bois, les températures de l'état d'équilibre ont été atteintes, même après 20 min. L'éclairage de courte durée des parois donne lieu à une très haute température sur la paroi extérieure (de chauffage, d'environ 30° à 80 °C). Dans la

paroi en liège, le chauffage est transmis avec seulement un très léger décalage dans le temps (environ 2 minutes) et une faible amplitude de la paroi intérieure (de chauffage d'environ 7 K). Après la déconnexion de la lampe, les températures à l'intérieur et à l'extérieur chutent à des valeurs initiales en moins de 5 min.

Au cours de l'illumination de la paroi en bois, la température à l'intérieur augmente sensiblement seulement au bout d'environ 2 min, pour atteindre la valeur maximale après un nouveau 8 min. Depuis, la température d'équilibre de la paroi en bois n'a pas encore été atteinte. Seule, une très légère baisse de température de la paroi interne se produit à l'issue de la période d'éclairage. La température de la paroi extérieure descend lentement après la déconnexion de la lampe, pour atteindre la température finale, au bout d'environ 30 min seulement.

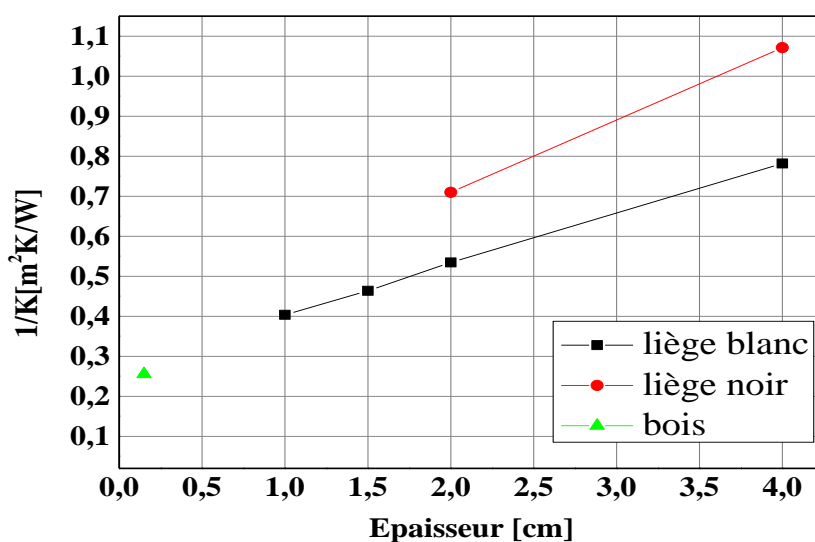
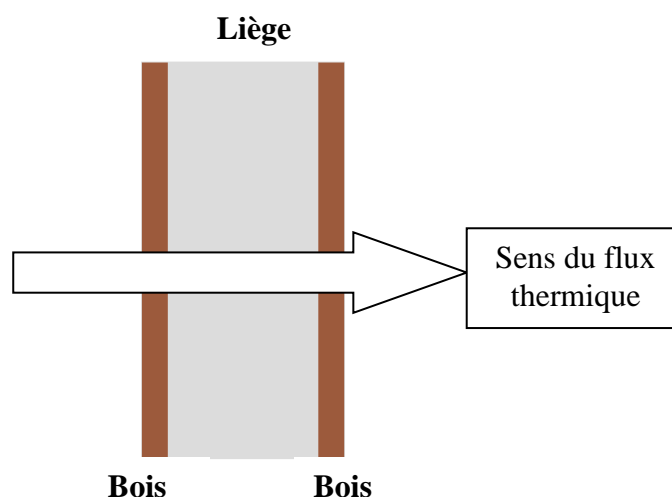


Figure V.49. Résistance de la chaleur de transition $1/k$ en fonction de l'épaisseur de paroi (bois et liège).

V.6.3.2.1. Exploitation des résultats

On obtient directement les valeurs des conductivités thermiques pour le bois et le liège avec différents types d'épaisseurs, car on effectue les mesures avec, uniquement ces matériaux. En ce qui concerne la maquette bois + liège, c'est-à-dire, les panneaux sandwiches multicouches, on doit effectuer un calcul d'après l'équation N°22 pour connaître la conductivité thermique et la valeur de K d'ensemble, en prenant la valeur précédemment mesurée, de la conductivité thermique du bois et de liège.



Où
$$\frac{e_{eq}}{\lambda_{eq}} = \frac{e_{liège}}{\lambda_{liège}} + \frac{e_{bois}}{\lambda_{bois}} \quad (V.22)$$

Donc le tableau suivant résume les valeurs de K calculées d'après l'équation V.18.

Tableau V.14. Les valeurs de k équivalentes de différents panneaux sandwichs isolants réalisés.

Panneaux sandwiches	1/K [Km ² /W]	K [W /Km ²]	λ [W/Km]
SB10	0.9172	1.0902	0.0517
SB15	0.7152	1.3981	0.0643
SB20	0.8477	1.1796	0.0524
SB40	0.7990	1.2514	0.0538
SN20	1.1986	0.8343	0.0371
SN40	1.0883	0.9188	0.0408

V.6.4. Analyse par

Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Cette étude a montré que les panneaux sandwichs innovants et n'affectant pas l'environnement, avec une couche de base de liège aggloméré et des feuilles de placage de bois comme peau, ou bien en utilisant une couche de base de liège expansé et des feuilles de placage de bois comme peau, pourraient être produits avec des équipements et des procédures de production standard industriels de contreplaqué.

L'adhérence entre le bois et le liège de base était bonne, satisfaisante dans tous les cas (figure V.50 et figure V.51).

V.6.4.1. MEB pour les panneaux sandwiches à base de liège expansé (noir)

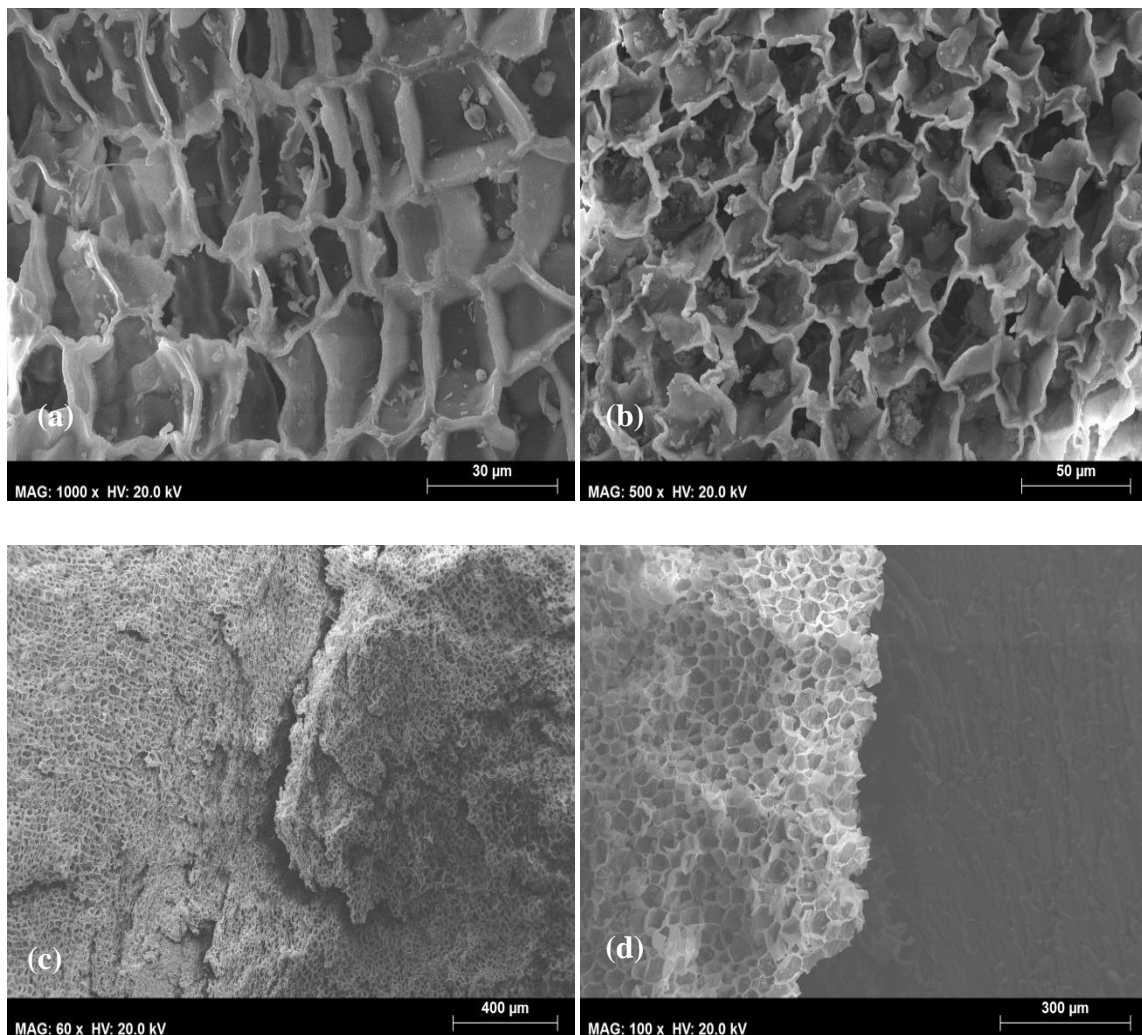


Figure V.50. Photographies MEB de liège expansé dans le panneau sandwich, illustrant la structure cellulaire du liège : (a) dans une direction transversale, (b) une direction radiale (c) section : la jonction de granulés de liège et (d) la zone d'adhérence entre le placage de bois et de liège expansé.

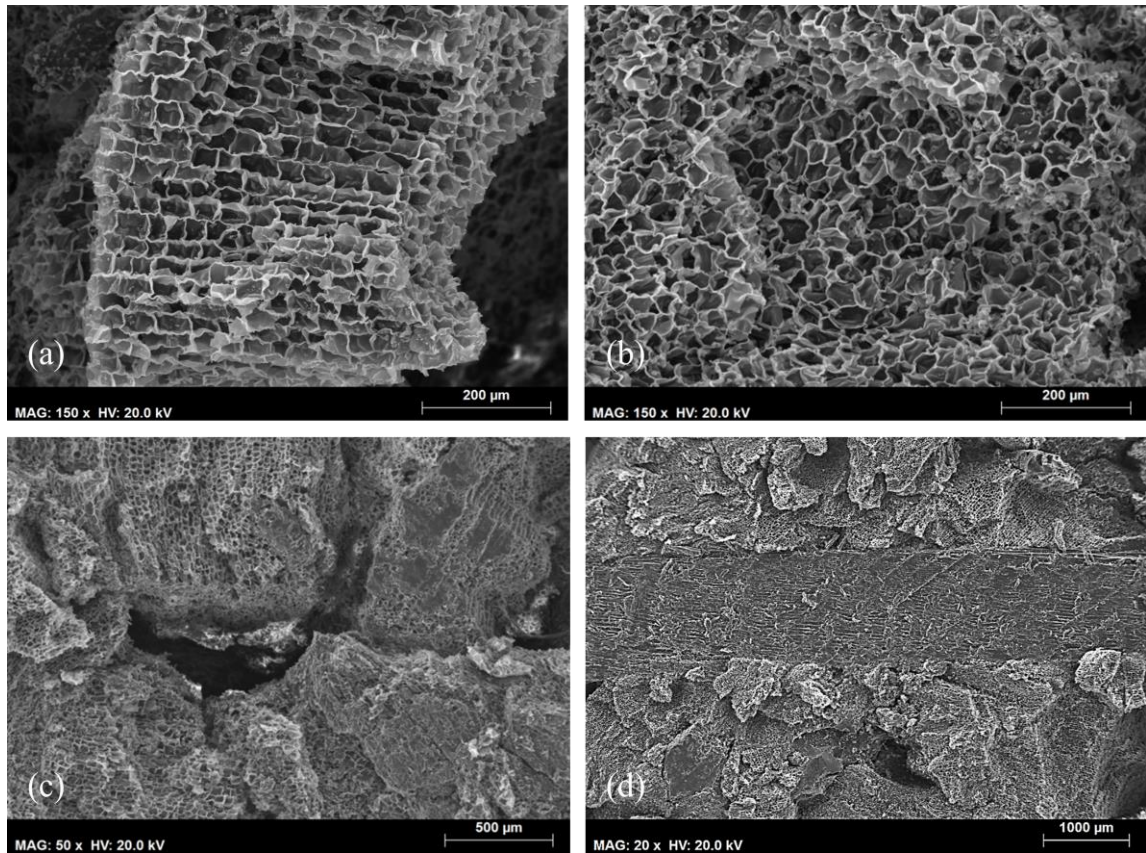
V.6.4.2. MEB pour les panneaux sandwichs à base de liège aggloméré (blanc)

Figure V.51. Photographies de MEB de liège aggloméré blanc dans le panneau sandwich illustrant, la structure cellulaire du liège dans une : (a) direction transversale, (b) direction radiale, (c) la section de la jonction de granulés de liège, et (d) la zone d'adhérence entre le placage de bois et le liège aggloméré.

Conclusion générale

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats de ce travail ont montré que les panneaux sandwichs multicouches innovants à base des produits naturels étaient obtenus à faibles coûts de production, et une empreinte écologique favorable a été élaborée avec placage du bois de pin d'Alep comme peau et deux types de lièges agglomérés (liège expansé et liège aggloméré blanc) avec différentes épaisseurs en tant que matériau de base, en utilisant des équipements de production et l'adhésif de contreplaqué standard. L'adhérence entre les placages de bois et le liège aggloméré était bonne dans tous les cas des panneaux sandwichs multicouches.

L'étude a pris en considération l'influence de l'augmentation du nombre de couches de bois et de liège aggloméré sur les caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrothermiques des panneaux sandwichs.

L'aggloméré de liège fournit un noyau de haute performance en compression perpendiculaire, tandis que les couches de bois protègent l'âme, et a amélioré sa résistance mécanique.

La rupture des panneaux sandwichs lors des essais mécaniques est produite par la rupture entre les granulés de liège dans le noyau ; cela signifie qu'il est possible d'améliorer le comportement mécanique du noyau à base de liège aggloméré, par exemple, en améliorant la conception du produit, à savoir, en ce qui concerne le type d'adhésif, la géométrie des grains (forme et dimensions).

En ce qui concerne l'influence de la conception multicouches, nous avons constaté pour tous les essais mécaniques de compression, traction, flexion et cisaillement que le nombre de couches dans le panneau sandwich est important, plus le nombre de couches augmente plus la résistance mécanique augmentée.

L'analyse thermique des différents échantillons de liège aggloméré et des plaquages en bois, a été effectuée par deux méthodes distinctes : à l'aide d'un CT mètre et par la méthode de maquette thermique.

Les résultats obtenus par les deux méthodes montrent une certaine similitude. Nous avons une réelle correspondance entre les valeurs de conductivité thermique obtenues par ces deux méthodes. La faible conductivité thermique et la résistance à la compression font du liège un excellent matériel pour l'isolation thermique dans les panneaux sandwichs multicouches.

Dans le domaine hygrothermique, on note l'influence de la température sur la variation de la masse des différents types des panneaux sandwichs multicouches à base de liège aggloméré (expansé et aggloméré blanc). Les panneaux sandwichs perdent une masse importante dans la première phase ; cette perte n'est pas identique pour les différents types de lièges, avec ou sans présence de résine (liège expansé et liège aggloméré blanc) et selon le nombre de couches. La partie absorption d'eau a montré que les différents types de lièges ne se comportent pas de la même manière en milieu humide ; la variation de la densité du liège influe sur son pouvoir d'absorption (liège expansé et liège aggloméré blanc).

L'effet global de ces panneaux sandwichs de placage de bois-liège aggloméré, a montré une bonne performance en tant que composants non structurels, destiné vers une utilisation potentielle comme cloisons de séparation et des panneaux de séparation dans le bâtiment. Leur faible densité, les propriétés d'isolation thermique, ont contribué à valoriser ces panneaux sandwichs pour des applications intérieures dans la construction.

En perspective, il serait intéressant de poursuivre ces travaux en variant l'épaisseur et l'essence de bois de placage, afin de déterminer leur influence sur le comportement des panneaux fabriqués.

De plus il est intéressant d'étudier le comportement des matériaux fabriqués à l'impact, l'indentation et la fatigue.

Les panneaux obtenus permettent de faire une étude de l'isolation phonique et acoustique.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dilem A.E.K., « Contribution à l'étude de la détermination de quelques propriétés de base du bois de pin d'Alep (*pinus halepensis* Mill) »; Thèse de doctorat à l'INPL (France), Centre de recherche de Nancy (INRA), Université des Sciences et Techniques du Languedoc, (1992).
- [2] Barbéro M., Loisel R., Quézel P., Richardson D.M. & Romane F., « Pines of the Mediterranean Basin». Dans: Ecology and biogeography of Pinus (éd. RICHARDSON D.M.), Cambridge University Press, Cambridge, p. 153-170, (1998).
- [3] Bettaye A., Azzaoui M., « Etude comparative entre les propriétés physiques de base du bois de pin d'Alep et de pin maritime » ; Université Ibn Khaldoun Tiaret (Algérie) - ingénieur d'état en agronomie (2010).
- [4] Berreur L., De Maillard B., Nösperger S., « L'industrie française des matériaux composites » ; Etude stratégique (Rapport de synthèse) réalisée par Nodal consultants pour le compte de la Digitip / SIM, (2002).
- [5] Boudy P., « Economie forestière Nord-Africaine. Monographie et traitement des essences résineuses ». Tome II, Fscicule2 : 280p, (1955).
- [6] Maatoug M., « Études des effets stationnes sur les propriétés physiques de *Tetraclinis Articulata* ». Thèse de doctorat, Institut national de Sidi Bel Abbes, (2003).
- [7] Vernet J.L., « Les données historiques et l'étude de la flore méditerranéenne », Coll. Int/C.N.R.C.no 235, P.305-353, (1974).
- [8] Jaudon J.L., « Le Lami bois, nouveau matériau dérivé du bois ». Paris : Centre technique du bois, 27 p. +6 annexes, (1981).
- [9] Jaquiot C. «Atlas anatomique des bois des conifères », Paris ,80 p, (1955).
- [10] Keller R., «Structures -Composition- Formation du bois », Cours de D.E.A. Sciences du bois. E. N.G.R.E.F, p.p. 15, (1994).
- [11] Harrington J., «Les caractéristiques physiques et mécaniques du bois de pin d'Alep». Softwood structure (1996), [http:// www.mech.canterbury.ac.nz/sp](http://www.mech.canterbury.ac.nz/sp).
- [12] Nahal L., « Le Pin d'Alep (*Pinus-halepensis* Mili), étude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole ». Annales des Forêts et de Station de Recherche et Expériences. Nancy (1962).
- [13] Centre technique du bois (C.T.B). « Principaux bois utilisés en France ». P 13, (1983).

- [14] Quiquandon B., « Etudes des bois de pin d'Alep en Tunisie ». Centre technique des bois. Paris XII. 19p, (1966).
- [15] Centre technique du bois et de l'ameublement (C.T.B.A), « Séchage du bois ». Guide pratique, (1989).
- [16] Selmi., « Utilisation mécanique et technique du bois et de gemme de pin » E.N.G.R.E.F Nancy P32, (1976).
- [17] Tischler K., « Les propriétés physiques et mécaniques du bois de pin d'Alep ». Institut, Volcani des Recherches Agronomiques, 37p, (1971).
- [18] El Abid A., « Aptitude techno-économique du pin d'Alep et du pin maritime issus de reboisements marocains à produire du bois de mine ». Annales de recherches forestières au Maroc. pp. 7-9, (1981).
- [19] Polge., « Le bois juvénile des conifères ». France, (1963).
- [20] Rahme A., « Contribution à l'étude des propriétés physiques, mécanique, micro densitométriques et papetières du bois de Pinus brutia Ten; de quatre stations du nord-ouest de la syrie. Liaison entre caractéristiques et influence de divers facteurs du milieu ». Thèse de docteur ingénieur de Nancy 1. 190p, (1972).
- [21] Forest Products Laboratory. « Wood handbook - Wood as an engineering material». Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, (1999).
- [22] Giordano G., « Pin d'Alep ». Technologia del legno 3. 384 p, (1976).
- [23] Chakali G., « Influence climatique sur les populations de scolytes dans les peuplements de pin d'Alep en zone semi-aride (Djelfa) ». In Sem. Impact des changements climatiques sur l'écologie des espèces animales, la santé et la population humaine Maghrébine. Gredur, 10 pp, (2003).
- [24] Berrichi A., « Etudes des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de Quercus ilex, Quercus suber, Quercus faginea, dans la région de Tlemcen ». Thèse de magister, INA.Algérie. 156p, (1993).
- [25] Thibaut B., Loup C., Chanson B., Dilem A., « La valorisation du pin d'Alep (pinus halepensis Mill) en zone méditerranéenne française ». Forêt méditerranéenne, tome XIII, N°3. Spécial Pin d'Alep pp.226-233, (1992).
- [26] Plaisance G., « La forêt privée française ». pp. 63-68, (1976).
- [27] Simonet M., « Conférence sur le pin d'Alep. E.N.G.R.E.F ». Centre de Nancy. 13p, 1970.

- [28] Badel J., « Aménagement et gestion des peuplements de Pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. E.N.G.R.E.F ». Centre Montpellier. Option méditerranéenne : le Pin d'Alep et le Pin brutia dans la sylviculture méditerranéenne. 109-119 PP, (1986).
- [29] Berrichi A., « Influence des facteurs atmosphériques sur les propriétés mécaniques et physiques des panneaux de particules ». Mémoire d'Ingénieur. Agro.INA.EL-Harrach, ALGER.76P, (1988).
- [30] Limam A., « Essai d'amélioration de la qualité des panneaux de particules produit à l'unité de Khenchela ». Mémoire d'Ingénieur. Forest. Université de Tlemcen. 112p, (1990).
- [31] Brahimi A., « Etude de la fabrication et des caractéristiques mécaniques et physiques des panneaux de particules produit à l'unité de Djelfa ». Mémoire d'Ingénieur. Forest. Université de Tlemcen.92p, (1993).
- [32] Abes H., « Influence de l'âge de Pin d'Alep sur les caractéristiques papetières ». Thèse d'ingénieur agronome (I.N.A), (1987).
- [33] Marchal R., Jullien D., Mothe F., Thibaut B., «Mechanical aspects of heating wood in rotary veneer cutting», Proceedings of the 11th international wood machining seminar, Honne (Norvège), 257-278 p, (1993).
- [34] CTB « Centre technique du bois », hêtre. «Fiches de documentation sur les principales essences des pays tempérés». Paris : CTB, 14 p, (1976).
- [35] Feihl O., «Venner cutting manual». Forintek Canada Corp, Special publication SP 510, ISBN 0-86488-507-1, 266 p, (1986).
- [36] Thibaut B., « Le processus de coupe du bois par déroulage ». Thèse de doctorat d'état, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 386 p, (1988).
- [37] Movassaghi E., « Influence des paramètres micro densimétriques du bois, sur les efforts de coupe et la qualité des placages de douglas et de châtaigner obtenus par déroulage » ; Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 181p, (1985).
- [38] Gil L., « Cortiça: produção, tecnologia e aplicação », Lisbon, INETI, (1998).
- [39] Costa A., Pereira H., Oliveira A. « Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production ». For. Ecol. Manage. 175: 239–246, (2003).
- [40] Barberis A., Dettori S., Filigheddu M.R., « Management problems in Mediterranean cork oak forests », post-fire recovery. J Arid Environ 54:565–569, (2003).
- [41] Pereira H., «Boletim do Instituto dos Produtos Florestais – Cortiça», 545, 99–112, (1984).

- [42] Gil L., Moiteiro C., « *Cork* », In Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology, 6th ed.; Wiley- VCH: Verlag, Germany, (2003).
- [43] Benamirouche S., Chouial M., « Cartographie et description des peuplements porte-graines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia (Nord-est algérien) », Station régionale de recherche forestière de Jijel Oued kissir El Aouana- Jijel – Algérie Tél/fax (213) 34 51 32 76.
- [44] Gibson L.J., Easterling K. E., Ashby M. F., «The structure and mechanics of cork». Proceeding of the Royal Society of London A, 377: 99-117, (1981).
- [45] Pereira H., «Macroscopic appearance and quality. Dans: *Cork*. 1ère Ed., Elsevier Science B.V., Amsterdam. 163-186, (2007b).
- [46] Lequin S., « Etude de l'adsorption et de la diffusion, en phase gazeuse, de petites molécules actives du vin dans le liège ». Thèse de Doctorat d'Université de Bourgogne, (2010).
- [47] Pina P., Fortes MA., «Characterization of cells in cork». Journal of Physics D: Applied Physics, 29: 2507-2514, (1996).
- [48] Prak S., Gunata Z., Guiraud J.P., Schorr-Galindo S., «Fungal strains isolated from cork stoppers and the formation of 2, 4, 6-trichloroanisole involved in the cork taint of wine». Food Microbiology, 24: 271-280, (2007).
- [49] Rosner S., Kartusch B., «Structural change in primary lenticels of Norway spruce over the seasons. International Association of Wood Anatomists, 24: 105-116, (2003).
- [50] Esau K., «Periderm. In: Anatomy of seeds plants». Sons, J. W. a, 1ère Ed., 142-155, (1966).
- [51] Groh B., Hübner C., Lenzian, K., « Water and oxygen permeance of phellemis isolated from trees: The role of waxes and lenticels». Planta, 215: 794-801, (2002).
- [52] Teixeira R.T., Pereira H., «Ultra structural observations reveal the presence of channels between cork cells». Microscopy and Microanalysis, 15: 539-544, (2009).
- [53] Raven P.H., Evert R. F., Eichhorn S. E. «The plant cell and the cell cycle. In: Biology of plants». 3ème Ed., W.H. Freeman and Company/Worth Publishers, New York. 63 65, (1999).
- [54] Gil L., «Cork powder waste: An overview». Biomass and Bioenergy, 13: 59-61, (1997).
- [55] Silva S.P., Sabino M.A., Fernandes E.M., Correló V. M., Boesel L.F., Reis R.L. «Cork: Properties, capabilities and applications». International Materials Reviews, 50: 345-365, (2005).

- [56] Pereira H., «Density and moisture relations. Dans: Cork». 1ère Ed., Elsevier Science B.V., Amsterdam. 187-205, (2007e).
- [57] Rosa M.E., Fortes M.A., «Deformation and fracture of cork in tension ». *Journal of Materials Science*; 26(2):341–8, (1991).
- [58] Gibson L. J., Ashby M. F. «Cellular solids: structure and properties», 2nd edn, 453–467, Cambridge, Cambridge University Press, (1997).
- [59] Rosa M.E., Fortes M.A. «Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork». *Journal of Materials Science*; 23(3):879–85, (1988).
- [60] Romano A., Martins-Loução M.A., «In vitro cold storage of cork oak shoot cultures». *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 59:155–157, (1999).
- [61] Fortes M.A., Nogueira M.T., «The Poisson effect in cork», *Materials Science and Engineering A* 122: 227-232, (1989). <http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093>.
- [62] Pereira H., Graca J., Baptista C., «The effect of growth rate on the structure and compressive properties of cork». *IAWA Bull.*, 13(4), 389–396, (1992).
- [63] Pereira H., «Cork oak and Cork ». *European Conference. Centro de Estudos Florestais, Lisboa*, 2(XI), 46–50, (1998).
- [64] Pereira H., «The thermochemical degradation of cork», *Wood Science and Technology* 26: 259-269, (1992). <http://dx.doi.org/10.1007/BF00200161>.
- [65] Rosa M.E.; Pereira H., «International Journal of the Biology Chemistry Physics and Technology of Wood». Volume 48(3): 226-232; (1994).
- [66] Rosa M.E., Pereira H, Fortes M.A. «Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork». *Wood and Fiber Science*; 22(2):149–64; (1990).
- [67] Rosa M.E., Fortes M.A., «Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork». *Journal of Materials Science*; 23(3):879–85, (1988).
- [68] Relvas M.C., «Cork boiling system consists of controlled water feed not impairing the physical and organoleptic properties of the product», PT102334, Instituto Nacional de Propriedade Industrial, Lisbon, (2002).
- [69] Borges M., Cunha C., «Boletim da Junta Nacional de Cortiça», 565, 678–679, (1985).
- [70] Rosa M.E., Fortes M.A., Nunez R.V., Proc. 1st International Materials Symposium, Advanced Materials Forum I, April 2001, Coimbra, Portugal, Key Engineering Materials, 230–232, 295–299, (2002).
- [71] Pereira H., Ferreira E. «Scanning electron microscopy observations of insulation cork agglomerates», *Materials Science Engineering*, A111, 217–225, (1989).

- [72] Baptista A.P.M., Vaz M.D.C., «Comparative wear testing of flooring materials» *Wear*, 162-164, pp: 990–995, (1993).
- [73] Amen-Chen C., Pakdel H., Roy C., «Production of monomeric phenols by thermochemical conversion of biomass: a review», *Bioresource Technology*, 79, 277–299, (2001).
- [74] Diaz-Parralejo A., Diaz-Diez M. A., Macias-Garcia A., Rosa-Blanco P., Serrano V. G., «Bending strength of black and composite agglomerates of cork», *Materials Letters*, 57, 4004–4008, (2003).
- [75] Ferreira E., Pereira H., «Cortiça», 576, 274–279, (1986).
- [76] Pinto R., Melo B., «Cork: properties, capabilities and applications» *Boletim da Junta Nacional de Cortiça*, 602: 322-328, (1988).
- [77] Tadeu A., Santos P., «Assessing the effect of a barrier between two rooms subjected to low frequency sound using the boundary element method», *Applied Acoustics*, 64, 287–310, (2003).
- [78] Molinas M., Verdaguer D. «Lignotuber ontogeny in the cork-oak». II. Germination and young seedling. *American Journal of Botany*, 80: 182-191, (1993).
- [79] Denisselle A., Doubrovsky G., «Material in the form of a plate capable of forming a heat-insulating barrier, fire-protection wall including this material, and casing including such a wall», FR2672961, Institut National de la Propriete Industrielle, Paris, (1992).
- [80] Christian B., 'Shoe sole', EP1314370, European Patent Office, Munich, (2003).
- [81] Takayuki M., Nobuhiro T., Akio K., Minoru S., «Water pressure resisting sound insulator», JP9198050, Japan Patent Office, Tokyo, (1997).
- [82] Hiroaki A., «Gasket material layer including cork, fibers, rubber, and a rubber chemical», US5615897, United States Department of Commerce: Patent and Trademark Office, Arlington, VA, (1997).
- [83] Duchemin P.E., Touche R.A.L.L., «Cork-based improved thermal insulating material and process for obtaining it», FR2626519, Institut National de la Propriete Industrielle, Paris, (1989).
- [84] Amorim., « Comportement à la compression et à la traction de liège, Etude numérique, Nature et Technologie - La solution idéale», Université d'Aveiro en 2010 Luís Filipe Ribeiro All Good, (2009).
- [85] Gil L., «Cork Composites : A Review ». *Journal of Materials*, 2, 776-789, (2009) doi : 10.3390/ma2030776, ISSN 1996-1944.

- [86] Gil L., Silva P., «Cork Composites». In ECCM9-Composites: From Fundamentals to Exploitation, Brighton, UK, June 4-7, (2000).
- [87] Gil L., «Cork as a Building Material». Technical Manual; APCOR: Santa Maria de Lamas, Portugal, (2007).
- [88] Lyons L.F., «Floorin system underlayment». US Patent No. 2004 062937, published April 01, (2004).
- [89] Lança M.C., Neagu E.R., Silva P., Gil L., Marat-Mendes J., «Study of electrical properties of natural cork and two derivative products», Materials Science Forum, 514-516, 940-944, (2006).
- [90] Osvaldo C., José M., Silva T.D., Arlindo S, Luís G. «Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures », Materials and Design 31, 425–432, (2010).
- [91] Santos silva J., Dias rodrigues. « Application of Cork Compounds in Sandwich Structures for Vibration Damping », Journal of Sandwich Structures and Materials OnlineFirst, published on June 24, (2009).
- [92] Mir A., « Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy ». Thèse de doctorat, Université M'hamed Bougara – Boumerdes, (2010).
- [93] Sousa-Martins J., Kakogiannis D., Coghe F., Reymen B., Teixeira-Dias F. « Behaviour of sandwich structures with cork compound cores subjected to blast waves Engineering Structures ». Engineering Structures 46, 140–146, (2013).
- [94] James S., Hyung-ick K., Jonghwan S., « Natural cork agglomerate employed as an environmentally friendly solution for quiet sandwich composites», Scientific Reports; 403(2):1–6, (2012).
- [95] La Rosa A.D., Recca A., Gagliano A., Summerscales J., Latteri A., Cozzo G., Cicala G., « Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications », Construction and Building Materials 55, 406-414, (2014).
- [96] González-García S., Hospido A., Feijoo G., Moreira M.T., « Life cycle assessment of raw materials for non-wood pulp mills », hemp and flax. Resour, Conserv Recycl ; 54 :923–30, (2010).
- [97] Sanchez-Saez S., Barbero E., Cirne J., « Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts », Materials Letters 65, 2152–2154, (2011).

- [98] Reis L., Silva A., « Mechanical behavior of sandwich structures using natural cork agglomerates as core materials », *Journal of Sandwich Structures and Materials OnlineFirst*, published on June 5, (2009).
- [99] Gil L., Cortico P., « L'utilisation de résidus de Tetra Pak le type d'emballage et pour la fabrication d'agglomérés de liège », *Industrie & Environnement, Portugal*, 32, 24-27, (2003).
- [100] Gill L., Silva P., « Nouveaux matériaux et procédés liés matériaux, breveté à base de liège », *C & T Matériaux, Portugal*, 16, 12-15, (2004).
- [101] Gil L., « Utilisations innovantes de déchets et sous-produits de la transformation du liège », *Vida Rural*, 1716, 31-32, (2006).
- [102] Gil L., Silva P., « New multifunctional composites of Cork/TetraPak® residues ». In *Materials Congress, London, UK, March 30-April 1, (2004)*.
- [103] Lança M.C., Neagu E.R., Silva P., Gil L., Marat-Mendes J., « Can a cork/TetraPak/wax composite be used as a smart sensor », In *Euromat – European Congress on Advanced Materials and Processes, Nuremberg, Germany, September 3-7, (2007)*.
- [104] Gil L., Silva P., « Process for the production of composite agglomerates and products obtained through the process », *Portuguese Patent PT102992, issued August 16, (2005)*.
- [105] Gil L., Pereira C., Silva P., «New Cork Products Patented by INETI », In *Suberwood, Conference, Huelva, Spain, October 20-22, (2005)*.
- [106] Gil L., « New cork powder particleboards with thermoplastic binding agent ». *Wood Science and Technology*, 27, 173-182, (1993).
- [107] Gil L., « Cork composites : Current applications and new developments », In *6th International Conference on Composites Engineering, Orlando, USA, June 27-July 3, (1999)*.
- [108] Gil L., « New cork based materials for building applications ». In *World Renewable Energy Congress V, Florence, USA, September 20-25, pp. 1297-1299, (1998)*.
- [109] Gil L., Gil M.D., « Process for the production of cork particles agglomerates using thermoplastic binding agents with mould pressing and heating ». *Portuguese Patent PT94133, issued February 19, (1998)*.
- [110] Gil L., « Current and new cork based utilizations ». In *6th Symposium on Renewable Resources for the Chemical Industries and 4th European Symposium on Industrial Crops and Products, Bonn, Germany, March 23-25, (1999)*.

- [111] Abdallah F.B., Cheick R.B., Baklouti M., Denchev Z., Cunha A.M., « Characterization of composite materials based on PP-Cork blends ». *Journal of Reinforced plastics and Composite*, 25, 1499-1506, (2006).
- [112] Sena-Martins G., Lourenço V., Santos J., Duarte C., Cortiço P., Gil L., Duarte J., « Development of ecobinders using technical lignins modified by laccases ». In *Italic 4 – Sci. & Tech. of Biomass ; Advances and Challenges*, Rome, Italy, May 8-10, (2007).
- [113] Gil L., Silva P., Sena-Martins G., Lourenço V., Duarte J. «New cork agglomerates based on modified lignin ecobinders », In *15th European Biomass Conference & Exhibition*, Berlin, Germany, May 7-11, (2007).
- [114] Gil L., « Process for the production of cork powder agglomerates, without glues, through prepolymerization of suberin and polymerization by pressing and heating ». Portuguese Patent PT88239, issued August 04, (1994).
- [115] Shuichi S., Hiroki F., « Synthetic resin floor material ». Japanese Patent Application No. 2000- 085395, applied March 24, (2000).
- [116] Shinya N., Hidekatsu M., Yoshiyuki Y., « Cork powder-containing polyolefinic resin laminate », Japanese Patent JP2000238211, published September 05, (2000).
- [117] Hernandez-Olivaresa F., Bollatib U.M.R, del Rioc M., Parga-Landad B., « Development of cork/gypsum composites for building Applications ». *Construction and Building Materials*, 13 : 179/186, (1999).
- [118] Tadahiro A., « Corkboard and its production ». Japanese Patent Publication No. 11-221809, published August 17, (1999).
- [119] Nóvoa P.J.R.O., Ribeiroa M.C.S., Ferreira A.J.M., Marques A.T., « Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granules ». *Composites Science and Technology*, 64, 2197-2205, (2004).
- [120] Simão M.S., Pereira Joel R.M., Oliveira, E.F., Freitas P.M., « Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes ». *Construction and Building Materials* 41 : 209–215, (2013).
- [121] Oprea S., «Effects of fillers, namely cork, on polyurethane resin based polyurethane elastomeric bearing materials for passive isolation ». *Journal of composite Materials*, 42, 2673-2685, (2008).
- [122] NF B51-003., Norme française Bois, « Bois - Conditions générales d'essais - Essais physiques et mécaniques », Septembre (1985).

- [123] Anonyme., Norme belge NBN-ISO 3129. « Bois - Méthodes d'échantillonnage et conditions générales pour les essais physiques et mécaniques ». Bruxelles : Institut belge de normalisation, 4 p, (1993).
- [124] NF B51-004., Norme française Bois. « Détermination de l'humidité », Septembre (1985).
- [125] NF B51-005., Norme Française, « Bois- Détermination de la masse volumique », (1985).
- [126] NF B51-009., Norme Française, « Bois- Essai de flexion dynamique », Septembre (1985).
- [127] Essai de cisaillement (EN 314-1), contreplaqué-qualité du collage Juin (2005).
- [128] Collardet et Besset, « Bois commerciaux, tome 1 : les résineux », (1988).
- [129] Parviz N., Heger F., « Comportement thermo-hydromécanique, applications technologique et dans les structures ». Editeur : Press polytechnique et universitaires Romandes (PPUR), 298 P, (2005).
- [130] Sesboua A., Nepveu G., « Variabilité infraspécifique du retrait avec collapse et de la densité du bois chez *Eucalyptus camal dulensis* », *Annals of Forest sciences*, V.4 N°35, P.237-263, (1978).
- [131] NF EN ISO 14125, Norme européenne, JUIN (1998).
- [132] Berrichi A., « Etudes des caractéristiques physiques et mécaniques du bois de *Quercus ilex*, *Quercus suber*, *Quercus faginea*, dans la région de Tlemcen », Thèse de magister, INA. Algérie. P 156, (1993).
- [133] Lakreb N., Bezzazi B., Aribi C., Dilmi H., « Caractérisation physico-mécanique du bois de Pin d'Alep Algérien pour une valorisation industrielle » Page 104. Actes du Séminaire National sur les Matériaux, Procédés et Environnement, SNMPE'2014, ISBN 978-9931-9090-2-6, Université de Boumerdès, 11 et 12 Mai 2014, 258, pages <http://www.urmpe.dz/valorisation-scientifique/livres.html>
- [134] Marchal R., « Intérêt de la prise en compte de caractéristiques physiques et anatomiques simples du bois de chêne pur l'appréciation de la qualité des placages d'ébénisterie », DEA Sciences du Bois, INPL, Nancy, 105 p, (1983).
- [135] Mothe F., « Evaluation de la qualité d'un placage déroulé application au cas de l'Épicéa. Actes du 3eme colloque des Sciences et Industries du Bois, Bordeaux, pp 83-92, (1990).

- [136] Lakreb N., Bezzazi B., Pereira H. « Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates ». *Materials and Design*, ISSN: 0261-3069, Science Direct (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.059>.
- [137] NF T 54-602, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de la compression perpendiculaire ». Afnor 83647 ; Novembre (1983).
- [138] NF T 54-603, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de traction perpendiculaire », Afnor 83648 ; Novembre (1983).
- [139] NF T 54-604, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de la compression longitudinale sans ou avec flambage », Afnor 86618 ; Décembre (1986).
- [140] NF T 54-606, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de flexion. Afnor 87461 ; Octobre (1987).
- [141] NF T 54-605, Norme Française, «Structures sandwich à base de plastique, essai de cisaillement», Afnor 83650 ; Novembre (1983).
- [142] ISO 3350, «Bois- Détermination de la dureté statique », Première édition, 15/08/1975.
- [143] NF EN 1609. «Produits isolants thermiques destinés aux applications du bâtiment- Détermination de l'absorption d'eau à court terme : essai par immersion partielle», Juillet (1997).
- [144] Pereira H., Baptista C., «Influence of raw material quality and process parameters in the production of insulation cork agglomerates», *Holz Roh Werkst* 51(5): 301-308, (1993).
- [145] Castro O., Silva J.M., Devezas T., Silva A., Gil L., «Cork agglomerates as an ideal core material in lightweight structures», *Materials and Design* 31:425–432, (2010).
- [146] Alcantara F., Teixeira D., Paulino M., «Cork composites for the absorption of impact energy», *Composite Structures* 95:16–27, (2013).
- [147] Fernandes R., Moura M.F.S.F., Silva F.G.A., Dourado N., «Mode I fracture characterization of a hybrid cork and carbon–epoxy laminate», *Composite Structures* 112: 248–253, (2014).
- [148] Anjos O., Pereira H., Rosa M.E., «Effect of quality; porosity and density on the compression properties of cork», *Holz Roh Werkst* 66(4):295–301, (2008).
- [149] Vaz M.F., Fortes M.A., «Friction properties of cork». *Journal of Materials Science* 33:2087–2093, (1988).
- [150] Sen A., Velez Marques A., Gominho J., Pereira H., «Study of thermochemical treatments of cork in the 150 400 °C range using colour analysis and FTIR spectroscopy». *Ind Crop Prod* 38:132– 138, (2012).

- [151] Sen A., Van den Bulcke J., Defoirdt N., Van Acker J., Pereira H., «Thermal behaviour of cork and cork components». *Thermochim Acta*, 582:94–100, (2014).
- [152] Anjos O., Rodrigues C., Morais J., Pereira H., «Effect of density on the compression behaviour of cork», *Materials and Design*, 53:1089–1096, (2014).
- [153] Moreira R.A.S., Melo F.J.Q., Dias Rodrigues J.F., «Static and dynamic characterization of composition cork for sandwich beam cores». *Journal of Materials Science*, 45 (12): 3350-3366, (2010).
- [154] Shivakumar K.I., Chen H., «Structural performance of eco-core sandwich panels». In: Daniel IM, Rajapakse YDS, Gdoutos EE. *Major accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures*, USA, Springer Science+Business Media B.V pp 381-405, (2009).
- [155] Soares B., Reis L., Sousa L., «Cork composites and their role in sustainable development», *Process Engineering*; 10: 3214–9, (2011).
- [156] Moussady S., Abdul-Wahab M., Moubayed N., Davies P., « Etude du comportement dynamique de panneaux sandwichs à l'impact ». In: *Annals of the University of Craiova. Electrical Engineering series*, vol. 33. P.148–53, (2009).
- [157] Lakreb N., Bezzazi B., Aribi C, Belkacemi C, Ferahi N. « Elaboration et caractérisation d'un nouveau matériau composite à base d'éco-matériaux Algériens. ». 1er Congrès International des Composites et des Matériaux Avancés, CICMA 2014, Khenchela, 03 et 04 Mars 2014.
- [158] Lakreb N., Bezzazi B., « Analyse du pouvoir d'absorption d'eau des structures sandwichs à base de liège aggloméré et du bois algériens destiné pour la construction ». Les journées nationales scientifiques et techniques JNST, Thème : Génie civil, 28 – 29 avril 2014.
- [159] Lakreb N., Bezzazi B., Pereira H., « Mechanical strength properties of innovative sandwich panels with expanded cork agglomerates». *European Journal of wood and Wood Products*. Springer Berlin Heidelberg. 10 Apr 2015. DIO 10.1007/s00107-015-0908-y.

Publications internationales

Lakreb N., Bezzazi B., Pereira H. « Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates ». *Materials and Design*, ISSN : 0261-3069, Science Direct (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.059>.

Lakreb N., Bezzazi B., Pereira H., « Mechanical strength properties of innovative sandwich panels with expanded cork agglomerates », *European Journal of Wood and Wood Products*. Springer Berlin Heidelberg. 10 Apr 2015. DOI 10.1007/s00107-015-0908-y.

Publication nationale

Lakreb N., Bezzazi B. « Etude et analyse du comportement mécanique d'une structure Sandwich à âme multicouches en liège ». *Journal of Materials, Processes and Environment* ISSN : 2335-1020 Vol.1 (01) (2013). Pp 52-61. <http://www.urmpe.dz/journal/archives>.

Communications internationales

Lakreb N., Bezzazi B, Aribi C. « Experimental study of the behavior in compression of the structures sandwiches multilayer in agglomerated cork and Algerian wood ». *International Symposium on Aircraft Materials - ACMA 2014 -Marrakech - Morocco - April 23-26 2014*. Page 138. ISBN 978-2-9534804-3-6 acma2014.uiz.ac.ma/

Lakreb N., Bezzazi B, Aribi C, Belkacemi C, Ferahi N. « Elaboration et caractérisation d'un nouveau matériau composite à base d'éco-matériaux Algériens. ». *1er Congrès International des Composites et des Matériaux Avancés, CICMA 2014, Khenchela, 03 et 04 Mars 2014*.

Lakreb N., Bezzazi B. « Influence of Hygrothermal Test on the Mechanical Behavior of Multilayer Sandwich Panels Made From Algerian Wood and Cork », *The 5th International Conference on "Structural Analysis of Advanced Materials"*, ICSAAM-2013 23 - 26 September 2013, Kipriotis Village Resort, Island of Kos, Greece <http://icsaam2013.upatras.gr/ICSAAM%202013%20Conference%20Programme.pdf>.

Lakreb N., Bezzazi B. « Caractérisation mécanique des matériaux composites bois assemblés avec différents type de colle ». Actes du colloque International sur les Matériaux et le Développement Durable CIMDD'2013, ISBN : 978-9931-9090-1-9, Université de Boumerdès, 06-09 Mai 2013, 330 pages. <http://www.urmpe.dz/valorisation-scientifique/livres.html>.

Lakreb N., Bezzazi B., «Etude et analyse du comportement mécanique d'une structure Sandwich à âme multicouches en liège » 1er Congrès international de génie civil et d'hydraulique Guelma, 10-11 décembre 2012.

Lakreb N., Bezzazi B., «Elaboration et caractérisation d'un composite sandwich à âme en liège renforcé de jute et enveloppes en bois», 3^{ème} Conférence Internationale sur le Soudage, le Contrôle Non Destructif et l'Industrie des Matériaux et Alliages, du 26 au 28 novembre 2012 à Aïn El Turck (Oran) <http://www.csc.dz/seminaire.php>.

Communications nationales

Lakreb N., Bezzazi B., Aribi C., Dilmi H., « Caractérisation physico-mécanique du bois de Pin d'Alep Algérien pour une valorisation industrielle » Page 104. Actes du Séminaire National sur les Matériaux, Procédés et Environnement, SNMPE'2014, ISBN 978-9931-9090-2-6, Université de Boumerdès, 11 et 12 Mai 2014, 258, pages <http://www.urmpe.dz/valorisation-scientifique/livres.html>.

Lakreb N., B. Bezzazi, Caractérisation mécanique et hygrothermique d'un composite multicouches en liège et panneaux de bois, IV^{ème} Séminaire National : Matériaux, Procédés et Environnement FSI, Boumerdès 15 & 16 Mai 2012, p.89, p. 4, ISBN : 987-9931-9090-0-2.