HAL
open science

Développement de contreplaqués pour la construction navale : caractérisation multiéchelle et compréhension des phénomènes de collage du pin maritime à l'état vert

Anne Lavalette

To cite this version:

Anne Lavalette. Développement de contreplaqués pour la construction navale : caractérisation multiéchelle et compréhension des phénomènes de collage du pin maritime à l'état vert. Autre [cond-mat.other]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2013. Français. NNT : 2013BOR15215 . tel-00961177

HAL Id: tel-00961177

https://theses.hal.science/tel-00961177

Submitted on 19 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par Anne, LAVALETTE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Mécanique

DEVELOPPEMENT DE CONTREPLAQUES POUR LA CONSTRUCTION NAVALE: CARACTERISATION MULTI-ECHELLE ET COMPREHENSION DES PHENOMENES DE COLLAGE DU PIN MARITIME A L'ETAT VERT

Soutenue le : 4 décembre 2013

Devant la commission d'examen formée de :

M. GRIL, Joseph	Directeur de recherche, CNRS, Montpellier	Rapporteur
M. MARCHAL, Rémy	Professeur, CIRAD, Montpellier	Rapporteur
M. BLANCHET, Pierre	Professeur, Université Laval, Québec	Examinateur
Mme PROPERZI, Milena	Professeur, HEG-ARC, Suisse	Examinateur
Mme DELISEE, Christine	Professeur, Bordeaux sciences Agro	Encadrant
M. DANIS, Michel	Professeur, Université Bordeaux 1	Encadrant
M. POMMIER, Régis	Chercheur sous contrat, Université Bordeaux 1	Encadrant
M. MARTIN, Emmanuel	Gérant, Chantier naval Dubourdieu, Gujan-Mestras	Invité

Université Bordeaux 1
Les Sciences et les Technologies au service de l'Homme et de l'environnement

Remerciements

Ce travail représente l'aboutissement de réflexions menées collectivement et n'aurait pu exister sans la participation d'un grand nombre de personnes, laboratoires, institutions ou entreprises.

Aussi je tiens à remercier Eric Arquis, pour m'avoir accueillie au sein de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Denys Breysse et Olivier Cahuc, responsables des départements Génie Civil et Environnemental (GCE) et Matériaux, Procédés, Interactions (MPI) où j'ai effectué la majorité des travaux de thèse.

Un grand merci à Michel Danis, qui m'a encadré tout au long de cette thèse, pour sa disponibilité et son savoir faire.
Je remercie Christine Delisée pour ses encouragements, son aide sur la tomographie et son esprit critique lors de la rédaction.
Merci à Régis Pommier qui m'a ouvert les portes de la recherche, m'a fait confiance et m'a permis de réaliser ce travail en toute autonomie.

J'exprime toute ma reconnaissance à Joseph Gril et Rémy Marchal qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Merci pour tous les échanges constructifs que l'on a pu avoir. Merci à Pierre Blanchet et Milena Properzi, membres du jury, pour l'intérêt porté aux travaux de thèse.

Merci à Emmanuel et Beatrice Martin de m'avoir ouvert les portes de leur entreprise, le chantier naval Dubourdieu, et merci au chef Marc et à toute l'équipe du chantier pour leur aide et leur initiation à la construction navale.

Merci aux entreprises Beynel Manustock, Collano, Rolpin, Thébault, Orion Engineering, FCBA qui ont cru en ce projet, et l'ont rendu réalisable grâce à la fourniture de matières premières et à leur apport de connaissance. Merci Gérard, Jean-David, Fabrice, Jean-Christophe, Guillaume, Jean-Denis et Maryel.

Merci aux membres du COST FP0904 de m'avoir permis de travailler un court moment au sein de l'université d'Aalto aux côtés de Mark Hughes, Anti Rohumaa et toute l'équipe de Finlande. Cette période a été très bénéfique scientifiquement et culturellement.

Merci à tous les membres du laboratoire I2M pour leur sympathie et leurs nombreux services rendus.

Mercià Alain Cointe, qui a souhaité rester du côté obscur de la thèse et qui a pourtant éclairé ce travail.
Merci à Myriam Chaplain pour toutes nos discussions qui m'ont permis de saisir quelques bribes de ce vaste domaine qu'est la mécanique du bois.
Merci à Gérard Elbez pour son investissement dans le projet de collage du bois vert, et son apport scientifique concernant la mouillabilité et le collage.
Merci à Matthieu Pedros pour son aide sur l'élaboration de matériaux composites, la mouillabilité, et pour son optimisme communicatif.

Merci à Guillaume Garbay de m'avoir aidé lors de toutes ses séances de collage pas toujours évidentes (je ne regretterai quand même pas les élastiques!!)

Merci à Philippe Taris, Bernard Solbes et Sylvain Matéo pour leur aide précieuse en matière de dispositifs et d'analyses d'essais.

Mes remerciements vont également à Jean-Luc Coureau, Stéphane Morel, Emmanuel Maurin, Frédéric Bos, Didier Bert, Gérard Dimier, François-Xavier Kromm, Christophe Bois, Hervé Wargnier, Philippe Galimard, Jean-Marc Sibaud, Michel Chassagne, Christophe Lavergne, Seif Eddine Hamdi, Amadou Ndiaye pour leur aide et leurs conseils pertinents délivrés au cours de ces 3 années.

Un grand merci à Corinne Blain, qui m'a poussée dans la bonne direction tout au long de la thèse.

Merci à Cécile pour avoir été là dans les moments critiques qui se sont parfois transformés en nuits blanches, et pour tous les moments partagés qui continueront après la thèse, à Marie pour son soutien constant, à Alex pour le bois réunionnais, à Julie (a toi de prendre la garde alternée de la piscine!), Guillaume C., Boris, Huyen et Phan, Guilhem, Christophe et Frankpour, entre autres, les courses à Thouars, à Tanguy, pour ce stage en or sur le séchage du contreplaqué, et à tous ceux que j'ai croisés pendant ces trois ans.

Merci à Aïcha pour son dynamisme matinal.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à mes ami(e)s, et à ma famille, qui n'ont cessé de m'encourager tout au long de ce travail.
Merci à Cathy, Bernard, Hélène, Max, Jacqueline, Simon, Gautier, François, Stella, Marie.
Merci à Edouard d'avoir été si patient et compréhensif, à Sophie et J-B, colocs d'un temps, de m'avoir supportée pendant la période de rédaction, à tous le groupe ESB 73, à la troupe du 79, à Laura (on part où??), Anna, Simon, Charlotte, Ozlem, Bou, Gaelle et Matéo, Benes et Pauline, Bel y Dim, Elo et Nico, Mimi et Juju, Elsa, Célia, et tous ceux que je ne cite pas ici mais à qui je pense quand même.

Merci Robin d'avoir été là pendant la rédaction, de m'avoir corrigé et écouté répéter sans jamais râler.

Je dédie ce travail à Patrick Castera...

Table des matières

Introduction générale **5**

1 Bois et construction navale : état de l'art et problématique industrielle **9**

1.1 Matériaux et procédés de fabrication utilisés en construction navale 10

1.1.1 Matériaux utilisés pour la construction navale 10

1.1.2 Procédés de fabrication des bordés en matériaux composites fibres/résine . . 11

1.1.3 Utilisation des matériaux à base de bois dans la construction navale 12

1.2 Procédés de fabrication d'un matériau composite à partir de plis de bois déroulé . . 15

1.2.1 Procédé de fabrication du contreplaqué sous presse 15

1.2.2 Procédé de fabrication des coques moulées sous vide 18

1.2.3 Les limites du procédé de moulage sous vide 22

1.3 Spécificités du matériau bois en présence d'eau 23

1.3.1 Propriétés d'hygroscopicité du bois 25

1.3.2 Détermination de la teneur en eau des plis de bois destinés à la fabrication des panneaux de contreplaqué : 26

1.3.3 Propriétés mécaniques du bois à l'état vert 28

1.4 Le collage du bois à l'état vert 32

1.4.1 Principes généraux du collage du bois 32

1.4.2 Paramètres d'utilisation d'une colle polyuréthane adaptée au collage du bois vert 33

1.5 Synthèse de l'état de l'art 35

2 Différentes étapes de la conception des panneaux de contreplaqué 37

2.1 Définition du cahier des charges des panneaux 37

2.1.1 Définition du besoin exprimé par l'industriel 38

2.1.2 Fonctions et solutions techniques permettant de répondre au besoin exprimé par l'entreprise 39

2.1.3 Caractéristiques mécaniques requises par le bureau d'étude 40

2.2 Etude des paramètres pertinents de fabrication des panneaux de contreplaqué 44

2.2.1 Recensement des paramètres influents 44

2.2.2 Etude des paramètres « teneur en eau » et « grammage d'adhésif » au travers d'un plan d'expériences 48

2.2.3 Réalisation des tests mécaniques en cisaillement 51

2.2.4 Analyse statistique des résultats 54

2.2.5 Identification d'un modèle théorique renseigné par les résultats expérimentaux 56

2.3 Etude des paramètres de séchage des panneaux 62

2.3.1 Les mouvements de fluides dans le bois de résineux lors du séchage 63

2.3.2 Mécanismes du séchage sous vide 64

2.3.3 Etude expérimentale du séchage du bois sous vide 66

2.4 Synthèse et détermination des paramètres de fabrication retenus 71

3 Caractérisation de la qualité du collage du pin Maritime à l'état vert **74**

3.1 Aspects théoriques du collage 74

3.1.1 Différents types de liaisons entre substrat et adhésif 75

3.1.2 Aspects théoriques de la mouillabilité appliqués au bois 77

3.2 Mesures expérimentales des paramètres thermodynamiques de surface des matériaux 79

3.2.1 Première étape : détermination de l'énergie libre de surface du solide 79

3.2.2 Deuxième étape : détermination de la tension de surface du liquide 83

3.2.3 Troisième étape : estimation de l'énergie de mouillage de la colle sur le bois . 84

3.3 Observation par imagerie de l'imprégnation de la résine dans le bois 88

3.3.1 Observations microscopiques 88

3.3.2 Analyse microtomographique 91

3.4 Conclusion 93

4 Caractérisation mécanique des panneaux **96**

4.1 Caractérisation à la rupture en traction-cisaillement 97

4.1.1 Définition de l'essai 97

4.1.2 Exploitation des essais 98

4.1.3 Résultats 99

4.2 Détermination des propriétés élastiques et de rupture du panneau en flexion 103

4.2.1 Recensement des tests de flexion réalisés sur les panneaux de contreplaqué . . 103

4.2.2 Détermination théorique des propriétés élastiques des panneaux 108

4.2.3 Détermination expérimentale des caractéristiques mécaniques des panneaux de contreplaqué grâce au dispositif BOGUI 111

4.2.4 Détermination numérique des caractéristiques élastiques des panneaux 116

Conclusion générale **124**

Liste des tableaux **130**

Liste des figures **132**

Bibliographie **138**

Annexes **146**

Annexe 1 : Courbes d'équilibre hygroscopique du bois 148

Annexe 2 : Propriétés des colles utilisées 149

Annexe 3 : Plans du Greencanot, démonstrateur de l'étude 154

Annexe 4 : Matrice complète d'analyse du plan d'expériences 157

Annexe 5 : Méthode utilisée pour comparer des résultats expérimentaux aux valeurs calculées - test de Student 159

Annexe 6 : Procédures utilisées pour le calcul des enthalpies de surface et à l'interface des matériaux 161

Annexe 7 : Fiche technique - Contreplaqué Batipin - Smurfit Rol Pin 166

Annexe 8 : Protocole de réalisation des panneaux 168

Introduction générale

Ce travail s'articule autour d'un projet de ré-interprétation de la pinasse traditionnelle initié par le chantier naval Dubourdieu. Ce bateau typique du bassin d'Arcachon a connu une grande popularité en tant que bateau de pêche ou d'ostréiculture. Cette fonction a quasiment disparu aujourd'hui au profit d'une utilisation touristique et de plaisance. Créé en 1800, le chantier naval Dubourdieu (situé à Gujan-Mestras) est un des derniers chantiers du bassin d'Arcachon à construire des pinasses à moteur en bois. La production s'est peu à peu orientée vers des produits de luxe, sur-mesure, alliant savoir-faire ancestral et construction moderne. La méthode de fabrication a évolué au fil des ans et les bois locaux ont peu à peu été remplacés par du contreplaqué marine en okoumé (bois provenant d'Afrique centrale) et autres matériaux composites à matrice organique.

Ayant une volonté d'amélioration continue et d'évolution en fonction du contexte social et environnemental, le chantier naval Dubourdieu a initié depuis 2008 une réflexion sur la conception environnementale de ses bateaux. Cette initiative a débouché sur un partenariat de recherche et développement avec le laboratoire I2M, dans le cadre du projet Greenboat®, ce projet étant lui-même rattaché au programme de recherche industrielle ABOVE+2 [1] (Aboutage du BOis VErt). Ce projet de 3 ans porté par le chantier a pour but final d'offrir des prestations touristiques de qualité ; une réflexion a donc été menée sur différents aspects de la construction des pinasses traditionnelles afin de concevoir un bateau de transport de passagers prenant en compte l'empreinte écologique du bateau de sa création à sa fin de vie et ce sans perte de performances, qu'elles soient techniques, esthétiques et économiques.

Au sein de ce projet, la thèse a pour objectif le développement et la mise en oeuvre d'un

1. Projet FUI 2011-2015 (Coordinateur : Beynel Manustock). Partenaires : cluster d'industriels, Université Bordeaux 1, FCBA.

matériau à base de bois local (le pin Maritime) à destination des coques et de l'agencement des bateaux. Ce matériau doit répondre aux exigences mécaniques de la construction navale, il doit pouvoir s'adapter aux formes variées des coques et avoir un impact environnemental réduit par rapport aux coques actuelles.

Les bordés de bateau en bois sont mis en œuvre à l'aide de contreplaqués traditionnels, par assemblage de ceux-ci sur les membrures. Les limites dimensionnelles comme de mises en forme empêchent leur développement industriel. Le procédé développé dans le manuscrit permet de répondre à la problématique de mise en œuvre d'un nouveau matériau. Le collage du bois à l'état vert permet d'utiliser le matériau issu déroulage, sans séchage ni pré-découpages aux formes de la presse. Le procédé de mise en œuvre par pression sous vide s'adapte au bois déroulé à l'aide d'un plan d'expérience corrélé aux états de surface du bois et aux adaptations de l'adhésif. Des outils de caractérisation, permettant de répondre de façon ciblée aux contraintes d'usage des bordés de bateaux, ont été développés. La conception, la mise en œuvre par collage et la caractérisation de notre matériau sont présentés dans les chapitres de la thèse, chacun faisant appel à une discipline scientifique permettant de soulever les verrous technologiques de la réalisation. Pour répondre à cette problématique, différents axes ont été explorés et sont présentés tout au long de ce mémoire.

Une étude bibliographique du sujet, présentée au chapitre 1, nous a permis de sélectionner un matériau et un procédé de fabrication. Le collage du bois a l'état vert à partir d'une colle polyuréthane a été particulièrement étudié au cours de précédentes recherches menées au sein du projet ABOVE. Ces travaux, à but industriel, ont permis l'établissement du procédé d'aboutage du bois frais de sciage. Des essais de caractérisation physiques, chimiques et mécaniques ont permis d'approcher les propriétés des joints de colle. Nous tiendrons compte des observations et des résultats obtenus afin d'orienter les recherches vers la fabrication de contreplaqués collés à l'état vert. Nous travaillerons sur un contreplaqué collé à l'état vert et mis en forme sous vide. Les avantages potentiels de cette solution seront mis en avant par rapport aux procédés traditionnels.

Le chapitre 2 présente les spécifications techniques requises pour un matériau utilisé en tant que bordé de bateau. Les paramètres de collage du matériau seront ensuite étudiés afin de répondre aux exigences du bureau d'étude. En effet, le collage est un phénomène complexe

et très important pour la qualité du matériau final. Un plan d'expériences sera réalisé afin d'observer l'influence de différents paramètres sur la qualité de collage des panneaux. Basées sur des essais de cisaillement normatifs classiques dans l'industrie du contreplaqué, les analyses statistiques de ce plan permettent d'avoir une première approche du comportement des panneaux de contreplaqué collés à l'état vert sous vide.

Des analyses plus fines du collage et du comportement des panneaux sont ensuite réalisées dans le chapitre 3. La relation entre le bois et l'adhésif polyuréthane lors du collage sera évalué à plus fine échelle, à travers l'évaluation des propriétés de surface des matériaux en présence (mouillabilité) puis des observations microscopiques ou tomographiques des joints afin d'évaluer la capacité d'ancrage de la colle dans le bois. La connaissance des interactions à l'interface entre la colle et le bois apportent une meilleure compréhension du phénomène de collage et permettent d'expliquer les propriétés mécaniques obtenues au chapitre précédent.

Le chapitre 4 est consacré à la caractérisation mécanique des panneaux. Ces tests sont nécessaires afin d'apporter des connaissances sur le comportement élastique et à la rupture du contreplaqué ; ils permettent également de dimensionner les panneaux à fixer sur la charpente du bateau. Deux tests spécifiques sont réalisés : un essai de flexion-torsion adapté aux plaques composites et un essai pour définir un critère de rupture en traction-cisaillement du composite.

Les résultats obtenus permettent de confirmer les paramètres de réalisation des panneaux de contreplaqués à respecter pour la fabrication de coques et de valider le procédé innovant employé. Ces paramètres ont été utilisés pour le développement de démonstrateurs qui offrent un nombre important de perspectives.

Chapitre 1

Bois et construction navale : état de l'art et problématique industrielle

Dans un premier temps, les différentes technologies utilisées dans la fabrication d'éléments de bateaux seront présentées de manière générale. Une attention particulière sera portée aux procédés de réalisation des coques en matériaux composites, aujourd'hui très majoritairement employés dans la construction navale et adaptables pour certains au matériau bois.

Le procédé de mise en oeuvre du contreplaqué, un matériau composite particulier à base de bois, sera ensuite exposé. Il s'agit d'un matériau historiquement utilisé dans la construction navale et encore majoritairement au chantier naval Dubourdieu pour la fabrication des coques ou de l'agencement intérieur des bateaux. Les procédés existants pour la mise en forme du contreplaqué seront décrits. Les limites de mise en oeuvre actuelles de ce matériau seront précisées, liées principalement à la faible capacité de cintrage du bois dans le sens des fibres.

Dans une troisième partie, l'utilisation du bois à l'état vert (bois dont la teneur en eau est supérieure à 30%) a été envisagée pour pallier à ce problème de mise en forme. L'effet de l'eau dans le bois et les caractéristiques propres au bois à forte teneur en eau seront détaillées afin de présenter le comportement du bois vert, qui diffère de celui d'un bois sec.

Enfin nous nous intéresserons à la technologie du collage du bois à l'état vert, actuellement développée pour l'aboutage des bois et pour le collage des lames dans les bois lamellés-collés.

Nous décrirons les phénomènes physiques et chimiques mis en jeu pour les transposer dans la suite de l'étude au procédé de collage et de formage du contreplaqué à l'état vert.

1.1 Matériaux et procédés de fabrication utilisés en construction navale

Dans cette partie, nous présenterons les différents matériaux utilisés dans la construction navale. Nous détaillerons les procédés de fabrication des coques de bateaux en matériaux composites et des coques à base de bois.

1.1.1 Matériaux utilisés pour la construction navale

Les matériaux composites, l'acier, l'aluminium et le bois sont les 4 principaux types de matériaux utilisés pour la construction navale de plaisance (Figure1.1, [1]), avec une très forte prédominance des matériaux composites.

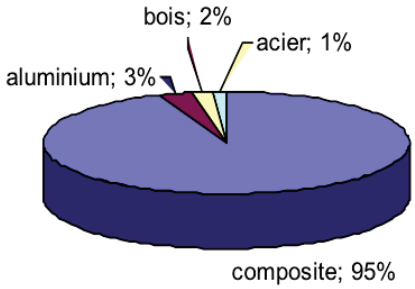


FIGURE 1.1 – *Répartition des différents matériaux utilisés pour la construction de bateaux de plaisance en France en 2009 [1]*

Ces matériaux sont choisis en fonction du type de bateau (forme, taille, procédé de fabrication, utilisation [2]) et des enjeux environnementaux et économiques ainsi que de leurs propriétés mécaniques. L'acier et l'aluminium sont utilisés pour construire des bordés (enveloppe extérieure de la coque) composés de plaques soudées entre elles. L'acier permet la construction de bateaux de grandes dimensions. L'aluminium est adapté à la réalisation de bateaux de taille intermédiaire. Les matériaux composites (résine + fibres) sont présents aujourd'hui en

grande majorité dans le domaine de la construction navale de plaisance. Ils se sont développés dans les années 1950, suite à l'évolution des techniques de fabrication (stratification, moulage sous vide, ...) afin d'améliorer les performances techniques [3]. Les matériaux composites ont permis la réalisation de coques durables possédant des formes complexes en une seule pièce. Leur coût modéré et leur méthode de mise en œuvre, adaptés à la production en série comme à la réalisation de prototypes, sont d'autres avantages de ce type de matériaux. Ainsi, ils ont peu à peu supplanté la construction bois qui était historiquement très répandue [4].

1.1.2 Procédés de fabrication des bordés en matériaux composites fibres/résine

Ces composites sont constitués de fibres (verre, kevlar, carbone, fibres naturelles notamment) noyées dans une matrice de résine (époxy, polyester, polyuréthane ou encore quelques résines naturelles qui font leur apparition) et sont réalisés sur des moules constitués d'une forme mâle et de sa contre-forme femelle ou sur des demi-moules (forme mâle ou contre-forme femelle). Les techniques de fabrication les plus utilisées sont listées et explicitées ci-après :

- moulage au contact (demi-moule)
- moulage sous vide (demi-moule + membrane imperméable)
- moulage par infusion (demi-moule + membrane imperméable)
- moulage par injection (moule complet)

Dans le cas de la technologie de **moulage au contact,** les fibres sont placées sur un demi-moule et la résine est appliquée manuellement à l'aide d'un rouleau. La technique du **moulage sous vide** repose sur le même principe, mais le matériau composite formé est ensuite mis sous vide à l'aide d'une bâche imperméable et d'une pompe à vide (Figure 1.2 a.). Dans ce cas, la dépression créée permet d'appliquer une pression sur le stratifié grâce à la bâche et l'excès de résine est évacué. La technique de **moulage par infusion** utilise l'aspiration sous vide de la résine pour imprégner les tissus de fibre placés au préalable dans un demi-moule fermé par une bâche (Figure 1.2 b.), alors que la technologie du **moulage par injection** consiste en l'injection de résine sous pression, dans un moule complet (fermé par un contre-moule) contenant les tissus de fibre. La matrice utilisée et le type de renfort dépendent de l'application souhaitée.

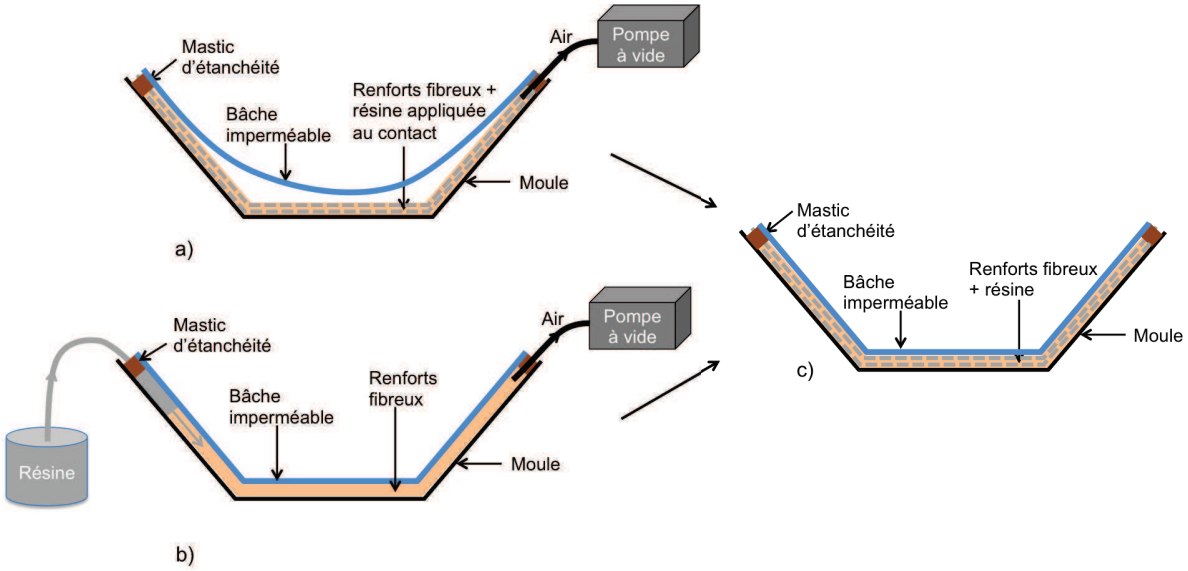


FIGURE 1.2 – *Représentation des techniques (a) de moulage sous vide et (b) d'infusion. La Figure c) représente le stratifié polymérisé sous vide avant démoulage*

Cependant, les matériaux composites ont le désavantage majeur de poser des problèmes de recyclage en fin de vie. Les renforts fibreux (verre, carbone, fibres naturelles, etc.) imprégnés de résine (polyester, polyuréthane, époxy, etc.) n'ont pas de solution de recyclage vraiment adaptée à l'heure actuelle. Le bois et les produits dérivés du bois ont ici un atout environnemental, avec des filières de recyclage déjà implantées en France.

Dans la partie suivante, nous nous intéresserons aux différents procédés de fabrication des bordés en bois.

1.1.3 Utilisation des matériaux à base de bois dans la construction navale

Les bateaux en bois sont encore fabriqués aujourd'hui dans certains chantiers navals. Il existe différentes techniques de fabrication des bordés de bateaux en bois. Trois d'entre elles sont décrites ci-après.

- Le **strip-planking** consiste à coller de fines baguettes de bois massif adjacentes, mises en forme et assemblées directement sur la membrure du bateau ou sur un demi-moule (Figure

1.3 a). Cette technique est très peu utilisée, au profit du contreplaqué et du bois moulé, qui peuvent également être qualifiés de composites à base de bois.

- La technique du **bois moulé au contact** permet de reproduire la plupart des formes par l'assemblage de plusieurs plis de bois sur la charpente du bateau (Figure 1.3 b). L'angle du fil du bois croisé à 30°, 45° ou 90° entre chaque couche permet en outre d'obtenir de bonnes performances mécaniques. Cette technique correspond en réalité à la fabrication d'un contreplaqué directement en forme sur la charpente. Dans les années 1880, des travaux menés sur la mise en oeuvre d'un canoë réalisé en 3 plis de déroulage à l'état vert croisés à 90° ont été reportés par C.E. Chase [5], il précise que les plis à l'état humide peuvent être pressés à la forme souhaitée, mais ne donne pas de détails précis sur la méthode de fabrication.

a)

b)

FIGURE 1.3 – *Techniques de fabrication de bateaux bois : a) Strip-planking, b) bois moulé* [6]

- Les **contreplaqués** sont les matériaux à base de bois les plus répandus pour la réalisation de bordés des bateaux à bouchain vif (angle vif formé lors du raccordement entre le fond et la muraille - Figure 1.4), mais également pour les aménagements intérieurs. Ce type de coque peut être habillé d'un bordé en contreplaqué, car les courbures sont limitées par rapport aux coques "en forme", qui sont entièrement lisses. Dans certains cas, même si l'angle vif entre le fond et la muraille du bateau permet la pose de deux parties distinctes ayant un grand rayon de courbure, le contreplaqué doit tout de même être découpé en fines bandes (diagonaux) pour épouser la forme. Cette technique est utilisée en particulier au chantier naval Dubourdieu. Les étapes de la pose du bordé sont illustrées sur la Figure 1.4 : la photo a) présente la charpente du bateau avant la pose du bordé ; les photos b) et c) illustrent l'étape de fixation des diagonaux sur la structure. Des bandes de 8 à 15 cm de large sont découpées dans des plaques de 6 ou 8 mm d'épaisseur et 2 ou 3 couches sont appliquées

croisées sur la charpente. La pose d'une seconde couche est observée sur la photo d). De la colle époxy est utilisée pour assurer l'assemblage des plis de déroulage. L'épaisseur du bordé est déterminée par le bureau d'étude en fonction du type et des caractéristiques du bateau conçu. Pour les bateaux réalisés en contreplaqué, le chantier naval Dubourdieu donne par expérience une approximation de l'épaisseur en fonction de la taille du bateau : la longueur du bateau en mètres correspond environ à l'épaisseur du bordé en mm. Ainsi, pour un bateau de 12 m de long, un bordé d'environ 12 mm d'épaisseur sera réalisé.

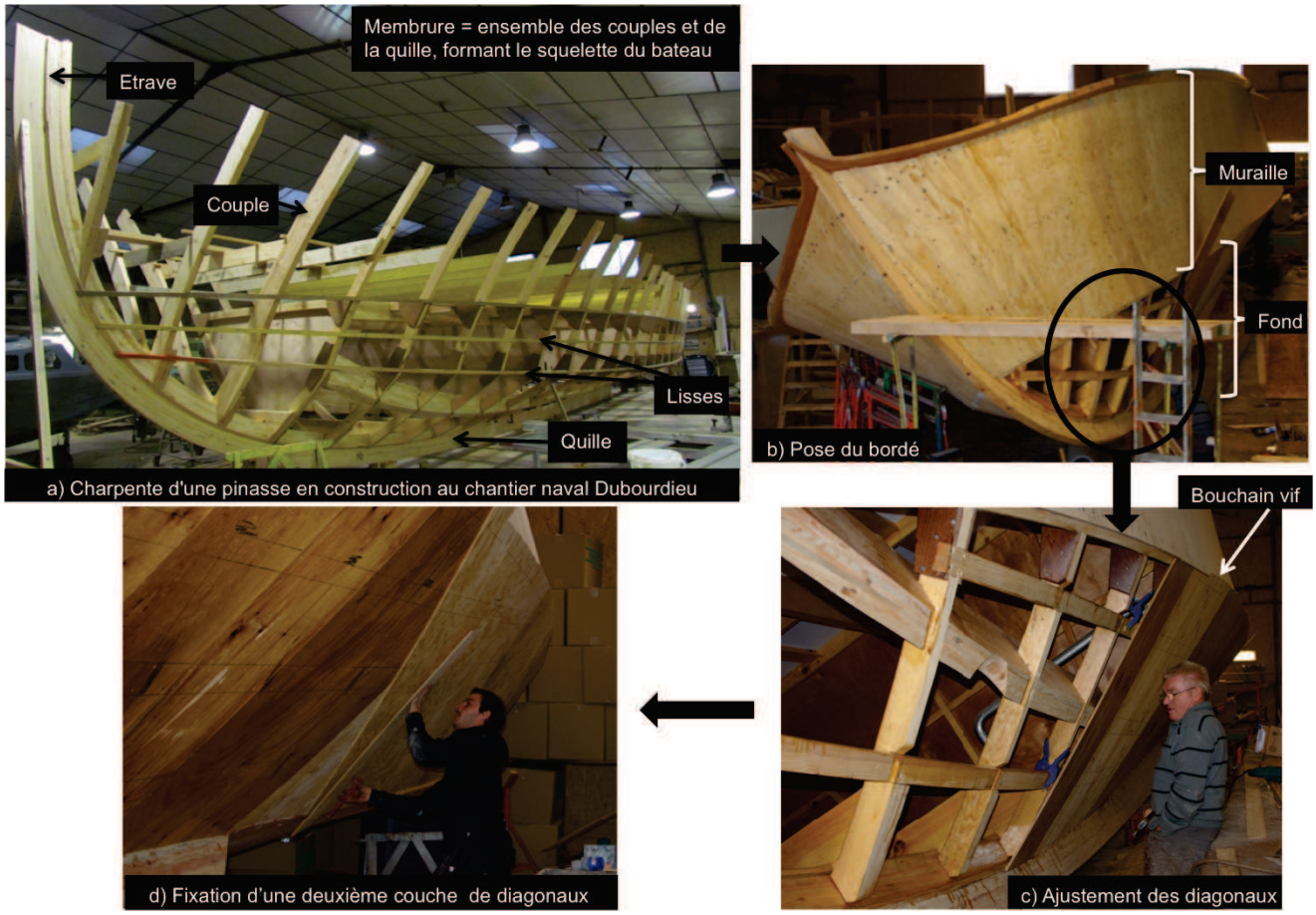


FIGURE 1.4 – *Illustration des étapes de fabrication d'un bordé de bateau en contreplaqué* (chantier naval Dubourdieu*)*.

On rencontre également des bordés constitués d'un mélange de ces différentes technologies. Quelle que soit la technique utilisée pour mettre en forme le contreplaqué, une finition par stratification fibre / résine est effectuée à l'extérieur du bordé pour en augmenter la durabilité,

assurer l'étanchéité et protéger la coque contre les chocs et les frottements répétés lors de la navigation (vagues, pression de l'eau, vitesse du bateau).

1.2 Procédés de fabrication d'un matériau composite à partir de plis de bois déroulé

Le contreplaqué est un matériau utilisé dans de nombreux secteurs tels que la construction, le coffrage, le mobilier, l'emballage ou encore le transport. Il s'apparente à une plaque composite [7] du fait de la superposition à fil croisés de plis de bois de fine épaisseur (1 à 4 mm). Il existe plusieurs procédés pour fabriquer des panneaux de contreplaqué. Nous présenterons dans un premier temps la méthode traditionnelle de fabrication du contreplaqué plan ou cintré sous presse, puis la technique de réalisation du contreplaqué moulé sous vide sera détaillée.

1.2.1 Procédé de fabrication du contreplaqué sous presse

La gamme de fabrication industrielle d'un panneau de contreplaqué plan standard est présentée sur la Figure 1.5. Les plis sont issus du déroulage de billons de bois étuvés pendant 12h à 72h en fonction des essences [8]. Ils sont ensuite coupés à dimension et séchés, encollés et superposés à fil croisé à 90° avant d'être pressés pour former le contreplaqué.

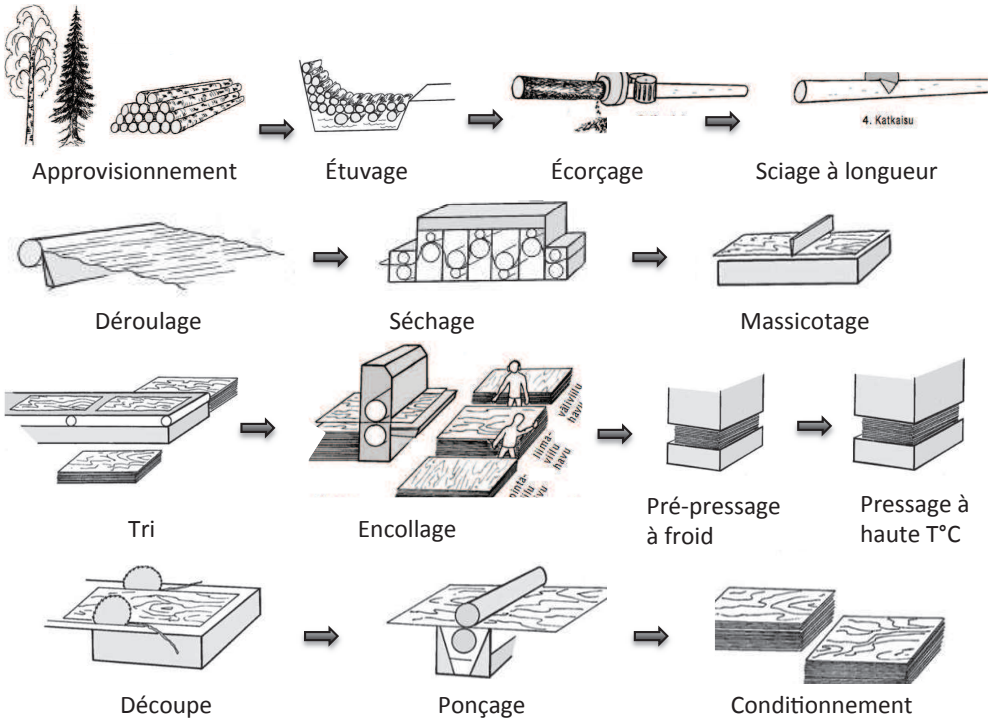


FIGURE 1.5 – *Schéma de fabrication du contreplaqué* [9]

On notera la formation de fentes de déroulage sur la face intérieure des plis, dues à leur mise en tension lors de la découpe des billons (Figure 1.6). Ces fentes peuvent être minimisées en ajustant les paramètres de déroulage (barre de pression, vitesse de découpe, étuvage, affutage de la lame etc.).

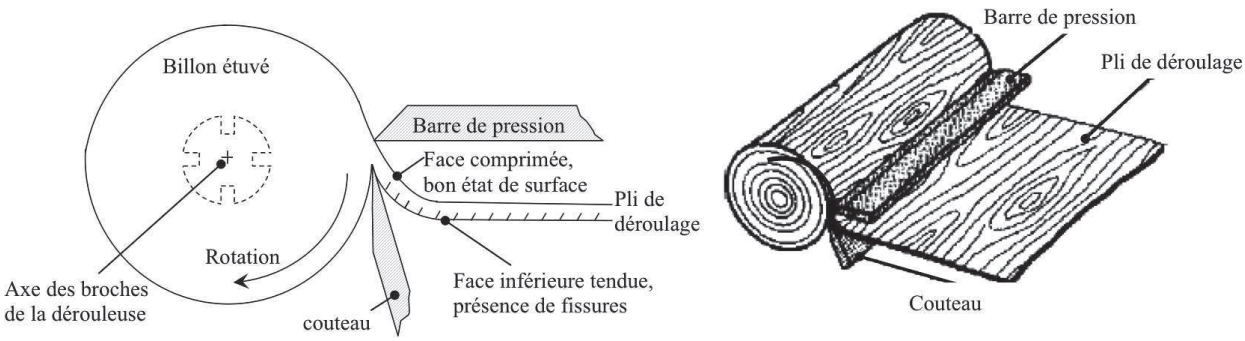


FIGURE 1.6 – *Présentation du procédé de déroulage de bois - Formation de fissures sur la face tendue ([10], A. Dupleix)*

Les faces endommagées des plis (présentant les fentes de déroulage) seront placées à l'intérieur des panneaux, afin d'obtenir un aspect extérieur le plus esthétique possible.

L'épaisseur maximale des contreplaqués industriels est de 40 mm. Les panneaux formés sont équilibrés, c'est à dire que les plis qui les composent sont répartis de manière symétrique de part et d'autre d'un pli central (âme). Les panneaux sont également hétérogènes, hygroscopiques et orthotropes (i.e. ils possèdent des propriétés différentes selon leurs trois directions principales perpendiculaires). Les trois plans de symétrie orthogonaux et leurs directions associées sont montrés sur la Figure 1.7. La disposition des plis de bois à fils croisés à angle droit confère aux panneaux une plus grande homogénéité que celle du bois massif et une plus grande stabilité dimensionnelle.

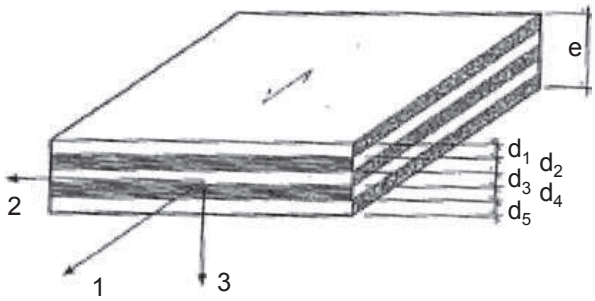


FIGURE 1.7 – *Composition d'un contreplaqué 5 plis symétrique. d1, d3, d5 ont l'angle du fil du bois parallèle à l'axe 1, d2 et d4 ont l'angle du fil perpendiculaire [11]. Direction 1= direction longitudinale des fibres du pli extérieur, 2 = tangentielle, 3 = perpendiculaire aux plans de collage*

Les panneaux de contreplaqué à usage structural se sont développés avec l'apparition de résines synthétiques au XXème siècle. Généralement, les colles utilisées dans la fabrication du contreplaqué sont des résines Urée-Formol (U.F) pour un usage intérieur et des résines Phénol Formaldéhyde (PF) pour un usage extérieur. La résine est appliquée sur des plis de 6% à 12% de teneur en eau. Le grammage de colle appliqué se calcule de façon à avoir entre 65 g et 85 g de matière sèche de résine par mètre carré de collage (la valeur sèche est évaluée après séchage à 105°C), soit environ 180 – 250 g/m^2 (référence pour les colles aqueuses en usage dans les industries du contreplaqué). La viscosité des adhésifs adaptés au collage du contreplaqué industriel varie de 800 à 1600 mPa.s.

Nous avons vu ici la technique de réalisation de contreplaqués plans sous presse ; cependant de nombreux produits en contreplaqué sont courbes. Le procédé de réalisation des contreplaqués cintrés sous presse s'apparente à celui des panneaux plans, excepté le fait que la presse est conçue à la forme du moule (Figure 1.8). Les plis de déroulage sont séchés, encollés et pressés dans un moule fermé. Ils sont souvent chauffés par plateaux chauffants, par des radiations à hautes fréquences ou par induction, afin d'accélérer la polymérisation de la colle et d'assouplir le bois [4, 10, 12].

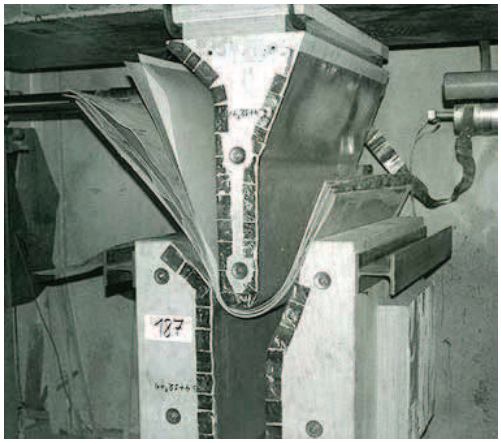


FIGURE 1.8 – *Opération de cintrage d'un panneau de contreplaqué sous presse* [4]

Il existe d'autres procédés permettant d'obtenir des contreplaqués mis en forme, tels que le moulage au contact (technique du bois moulé, présenté au paragraphe 1.1.3) ou le moulage du contreplaqué sous vide.

1.2.2 Procédé de fabrication des coques moulées sous vide

Le moulage de coques sous vide et sans apport de chaleur a notamment été développé dans les domaines aéronautique et naval [13] afin de réaliser des produits faciles à mettre en forme et possédant les avantages du contreplaqué classique. Il s'agit d'une technologie utilisant la pression atmosphérique pour comprimer le contreplaqué durant la polymérisation de l'adhésif. Cette technique s'approche du procédé de moulage sous vide présenté lors de la fabrication de coques composites (paragraphe 1.1.2). La pression est appliquée via une bâche (ou membrane) à des plis de déroulage encollés et disposés sur un demi-moule (plan ou en forme). La

bâche constitue une barrière flexible imperméable entre l'air extérieur et la pièce à mouler. Une pompe à vide assure la dépression. Quand la membrane est jointée au demi-moule, la pompe évacue l'air du système, ce qui a pour effet de diminuer la pression à l'intérieur de la membrane. La pression atmosphérique répartie uniformément sur la surface extérieure de l'enveloppe force la bâche et son contenant à se comprimer. La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de l'enveloppe détermine la pression appliquée sur le contreplaqué. La dépression maximum est obtenue lorsque le vide est parfait (1 bar), mais en réalité le différentiel de pression varie entre 500 et 900 mbar. Les avantages de la mise en forme et du collage sous vide sont [4, 14, 15] :

- épaisseurs et formes variables possibles,
- répartition uniforme de la pression sur l'ensemble de la surface, et contrôle de l'excès de résine,
- formation d'un panneau unique de grandes dimensions, sans jointure visible,
- matériel peu onéreux et facile à utiliser.

Les différents tissus nécessaires lors de la mise en œuvre d'un produit sous vide sont présentés sur la Figure 1.9 : le panneau est entouré d'éléments anti-adhésifs afin d'éviter qu'il n'accroche au demi-moule (cire) ou à la bâche (tissu d'arrachage) ; un feutre de drainage est présent pour absorber le surplus de résine et homogénéiser le vide ; un tissu perforé situé sous le feutre absorbant évite qu'une quantité trop importante de résine ne remonte vers la pompe. La bâche est scellée au demi-moule à l'aide d'un mastic d'étanchéité. Une prise de vide, reliée par un tuyau à la pompe à vide, permet d'évacuer l'air de la poche ainsi formée.

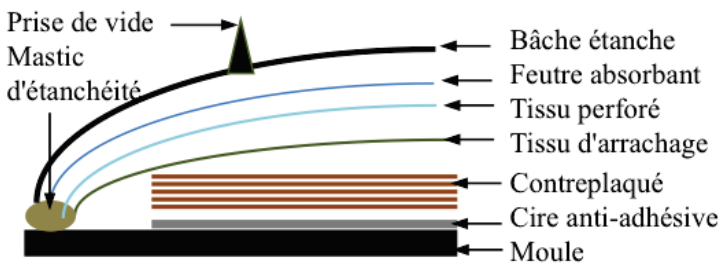


FIGURE 1.9 – *Système utilisé lors de la mise en œuvre du moulage sous vide*

Les étapes de la fabrication de produits bois par moulage sous vide sont décrites par de nombreux auteurs [3, 4, 10, 16, 17]. Le moulage du contreplaqué produit des panneaux avec des degrés variés de courbure. Les plis de bois sont coupés sur mesure avant la pose pour obtenir des jointures adaptées. Ils sont ensuite collés et courbés simultanément sous vide. La colle utilisée doit polymériser lentement, pour permettre la mise en place des plis les uns par rapport aux autres. En théorie, les plis formant le contreplaqué doivent être alternés à 90°, mais en pratique, cela est souvent difficile avec des pièces à forte courbure. Le sens du fil du bois est alors placé de manière à répondre à deux critères [18] :

- la disposition des plis doit permettre la reproduction de la forme souhaitée.
- les fibres de la coque peuvent être orientées en fonction des sollicitations appliquées à la coque.

Afin de bien épouser les formes de la pièce à produire, les plis de bois sont souvent disposés à 30°, 45° ou 90° les uns des autres. Le degré et la forme des courbures (simple ou multiples) déterminent les caractéristiques des plis (largeur, épaisseur, nombre, essence de bois, etc.). Lorsque la forme n'est pas développable, les plis de déroulage doivent être étroits, entre 5 et 20 cm dans les zones les plus critiques. La courbure de la pièce détermine également l'épaisseur des plis utilisés : une épaisseur de déroulage plus faible permettra de réaliser des courbures de plus faible rayon. La relation entre la courbure maximale et l'épaisseur des plis est déterminée par l'Equation (1.1) :

$$\frac{e}{R} = \varepsilon^{+} - \varepsilon^{-} \tag{1.1}$$

avec e= épaisseur du pli de bois, R= rayon intérieur de courbure, ε^{+} = déformation à la rupture en traction, ε^{-} = déformation à la rupture en compression, comme illustré sur la Figure 1.10.

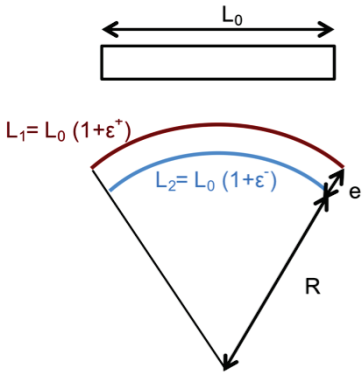


FIGURE 1.10 – *Détermination de la courbure des panneaux. L_1 et L_2 sont respectivement les longueurs des fibres supérieures et inférieures de la pièce cintrée*

A la fin du XXème siècle, des architectes tels que K. Hughes ou J. Brown, D. Newick et J. Marples s'intéressent de près à la réalisation de coques moulées sous vide et réalisent des multicoques en bois moulé à froid sous vide [18]. Ces coques performantes ont l'avantage d'être peu coûteuses et faciles à mettre en œuvre : un bateau de 35 pieds a ainsi été réalisé selon ce procédé (Figure 1.11).

FIGURE 1.11 – *Réalisation d'une coque en contreplaqué moulé - étape de pose des plis de bois* [18]

Il est possible d'utiliser la méthode du moulage sous vide, pour des placages fins et peu courbés. Cependant, cela ne semble pas adapté à tous les cas de figures, notamment pour des mises en œuvre plus complexes et avec des courbures importantes.

1.2.3 Les limites du procédé de moulage sous vide

Dans certains cas, la pression atmosphérique est considérée comme insuffisante pour courber les feuilles de placage de manière importante. Le procédé du moulage sous vide est alors limité aux produits à faible courbures [17, 16, 4]. Nous présenterons ici les techniques utilisées pour obtenir une pression supérieure à la pression atmosphérique. Deux méthodes ont été relevées dans la littérature :

1. l'utilisation d'un autoclave. Le principe est le même que celui du moulage sous vide décrit dans la partie 1.2.2, mais l'ensemble (contreplaqué + dispositif de moulage sous vide) est placé en autoclave pour être maintenu dans des conditions de pression et de température plus élevées [4].
2. le gonflement d'une membrane pour appliquer une pression supérieure à la pression atmosphérique. En effet, certains auteurs ont inventé des équipements pour former et mouler du contreplaqué avec une membrane [17]. Par exemple, le placage peut être inséré dans un demi-moule et une pression est appliquée par gonflement d'une membrane.

Différentes méthodes de moulage sous vide sont illustrées sur la Figure 1.12. Le schéma A correspond au moulage sous vide décrit dans la partie 1.2.2 [16]. Les schémas B et D illustrent l'application d'une pression via une membrane gonflée, et les schémas C et E représentent des contreplaqués réalisés sous vide avec une pression ajoutée par autoclave.

Les techniques B, C, D et E permettent l'application de pressions supérieures à la pression de l'atmosphère. Les facteurs influençant le procédé de fabrication tels que la température, la pression ou le temps de mise en œuvre sont déterminés par expérience.

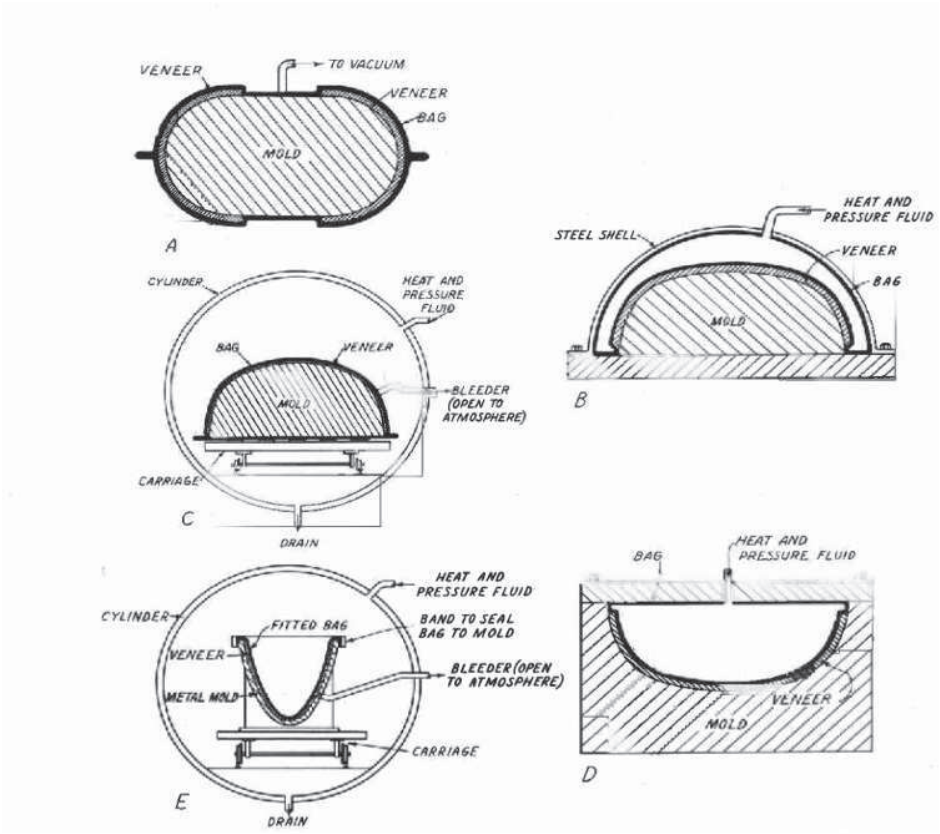


FIGURE 1.12 – *Présentation de différentes méthodes utilisées pour mouler du bois sous vide* [16]

Comme nous l'avons vu, pour des formes peu courbées et avec des plis de déroulage fins, il est possible d'utiliser la membrane comme seul moyen de pression. Par contre, une dépression par le vide est insuffisante pour des formes trop complexes et à faibles rayons de courbure. Dans ce cas, la mise en forme doit être assistée (par action mécanique ou par autoclave par exemple).

1.3 Spécificités du matériau bois en présence d'eau

Dans notre étude, les plis de déroulage seront utilisés à de fortes teneurs en eau, dans un souci d'économie d'énergie (au séchage notamment) et afin d'améliorer la mise en forme du bois. Le bois est un matériau hygroscopique poreux formé lors de la croissance en diamètre de l'arbre. Les cellules de bois formées au niveau du cambium (Figure 1.13) se différencient pour prendre

leur fonction définitive. Arrivées à maturité, la plupart de ces cellules se vident de leur contenu et seule la paroi assure la fonction définie (soutien et conduction principalement). Les parois sont principalement constituées de cellulose (40% environ), d'hémicelluloses (30% environ) et de lignine (30% environ) [19]. Le comportement absorbant du bois dépend entre autres de sa teneur en extractibles, de sa structure anatomique et de sa direction de coupe. En effet, le bois est un matériau orthotrope qui n'a pas les mêmes propriétés (propriétés mécaniques, circulation de l'eau, retrait etc.) selon ses trois directions principales (Longitudinale, Radiale et Tangentielle) [20, 21].

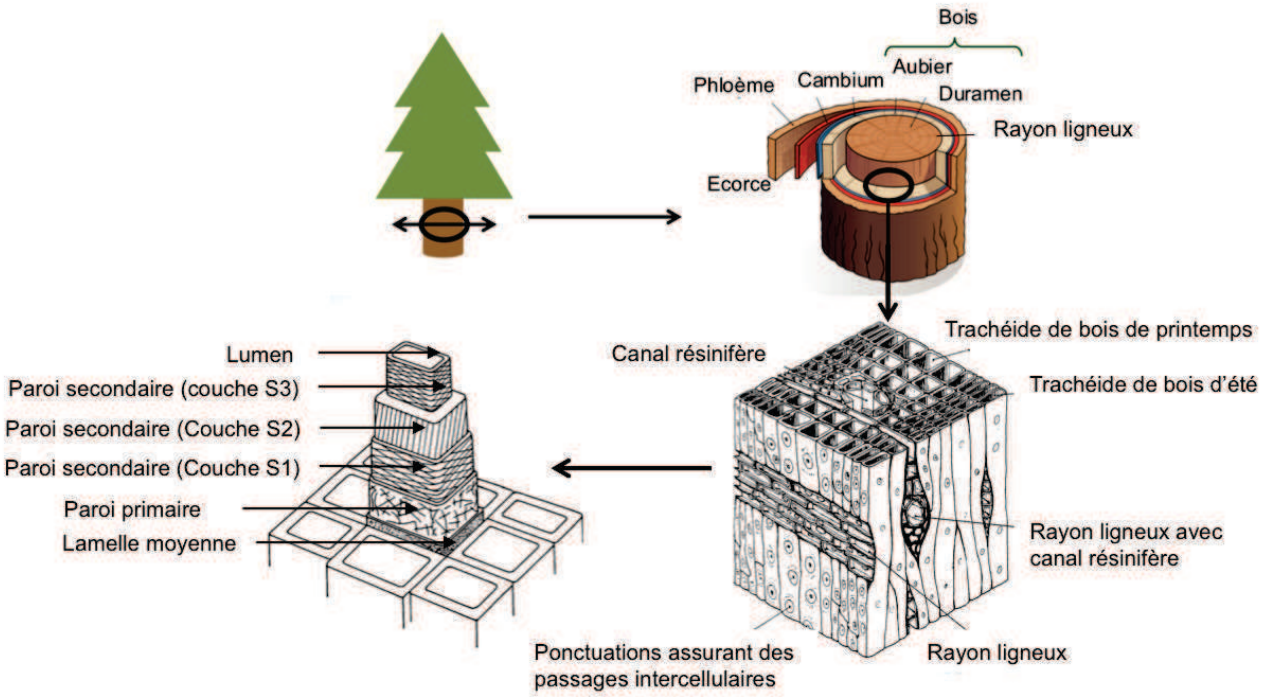


FIGURE 1.13 – *Structure du bois de résineux à différentes échelles* [10, 22, 23]

Le bois de conifère, avec lequel nous travaillons dans cette étude, est constitué à 90% de trachéides. Il a une croissance en diamètre différente selon les saisons, ce qui explique la formation de trachéides de gros diamètre, lors de la reprise de croissance du bois au printemps (= bois initial) et de trachéides de plus petit diamètre en été et automne (= bois final). Les canaux résinifères et les rayons ligneux constituent le reste des cellules du bois. Toutes ces

cellules communiquent entre elles par des ponctuations, qui définissent en partie les propriétés de transfert dans le bois. Le diamètre des ponctuations du bois initial est supérieur au diamètre de celles du bois final.

1.3.1 Propriétés d'hygroscopicité du bois

Les propriétés physiques et chimiques du bois sont fortement influencées par sa teneur en eau. La teneur en eau du bois est calculée en faisant le rapport de la quantité d'eau présente dans le bois sur la masse anhydre. On a :

$$MC = \frac{(m_h - m_0)}{m_0} \times 100 \tag{1.2}$$

avec MC (en %) = teneur en eau (Moisture Content), m_h= masse du bois humide à la teneur en eau MC, m_0= masse à l'état anhydre (après séchage du bois en étuve à 103°C).

Le bois sur pied contient une grande quantité d'eau qu'il transporte dans ses cellules (dans les porosités internes, ou lumen, et dans les parois). Une fois scié, le bois est généralement séché, il peut ensuite perdre ou reprendre de l'humidité au cours de son cycle de vie en fonction des conditions environnementales dans lesquelles il se trouve [24]. Ces variations de la teneur en eau peuvent entraîner des variations dimensionnelles du matériau (Figure 1.14). On observe 3 états de l'eau présente dans le bois : l'eau libre, l'eau liée et l'eau de constitution.

Lorsque le bois est à l'état vert, l'eau est présente sous forme d'eau libre, elle remplit les lumen des cellules du bois sans aucune liaison avec les constituants pariétaux des trachéides. Cette eau s'écoule facilement des cellules, elle n'a aucun effet sur les comportements du bois et peu d'énergie est nécessaire pour l'évacuer (Figure 1.14). Elle est présente dans le bois lorsqu'il est saturé d'eau, jusqu'au point de saturation des fibres (PSF, pour $MC_{bois} \approx 30\%$). Ce point est atteint lorsque toute l'eau libre a été évacuée, il ne reste alors que l'eau liée aux parois cellulaires ainsi que l'eau de constitution.

En dessous du point de saturation des fibres, il reste de l'eau liée aux constituants des parois du bois par des ponts hydrogène. Cette eau liée correspond à la deuxième forme d'eau dans le bois. Les variations hygroscopiques du bois entraînent des phénomènes de retrait et

gonflement du bois dans la plage du PSF jusqu'à MC= 0% : lorsque la teneur en eau diminue dans cette plage, les molécules d'eau sont extraites des parois, ce qui crée une rétractation des trachéides.

L'eau de constitution entre dans la composition chimique des constituants du bois et ne peut pas être extraite. Elle est même présente dans le bois à l'état anhydre.

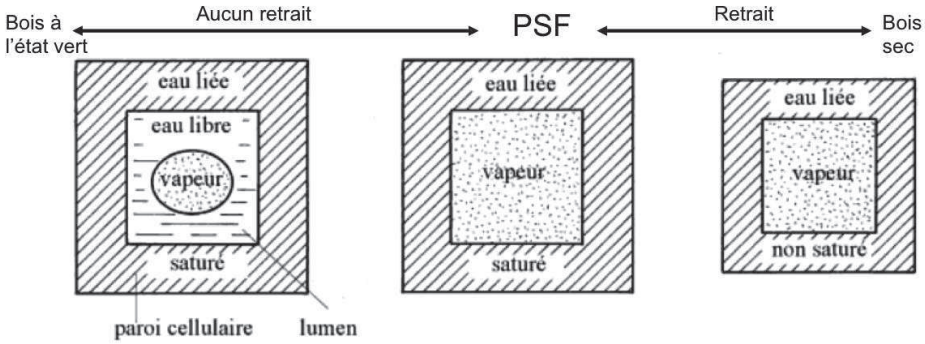


FIGURE 1.14 – *Les trois états de l'eau dans le bois* **[10]**

La teneur en eau du bois se stabilise à une valeur qui dépend des conditions de température et d'humidité relative de l'air ambiant. Cette teneur en eau d'équilibre, est appelée « équilibre hygroscopique du bois » (EMC), est identique quelle que soit l'essence pour un couple (T°C, humidité relative (HR) de l'air) donné. Les courbes d'équilibre hygroscopique du bois (Annexe 1) permettent de déterminer la teneur en eau d'équilibre d'un bois en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant.

1.3.2 Détermination de la teneur en eau des plis de bois destinés à la fabrication des panneaux de contreplaqué :

Au cours de ce travail de thèse, la teneur en eau des plis de bois à coller sera déterminée à partir de la mesure de la masse anhydre (m_0) d'échantillons prélevés parmi les plis de bois destinés à la fabrication des panneaux. Pour chaque lot de plis de bois reçu, 10 rectangles de bois ou plus sont découpés à des dimensions de même ordre de grandeur que les panneaux à réaliser. Ils sont ensuite mesurés (longueur, largeur et épaisseur) et placés dans une étuve à 103°C jusqu'à stabilisation afin d'obtenir leur masse anhydre. Ces mesures permettent de

calculer la masse volumique anhydre des plis de bois (ρ_0, en kg/m^3), selon l'Equation (1.3) :

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \tag{1.3}$$

Avec m_0 la masse anhydre des plis en kg, et V_0 le volume anhydre des plis de bois en m^3.

Pour des teneurs en eau supérieures ou égales au point de saturation des fibres (MC$\approx$ 30%), on admet que V_0= 0,88 V_H, avec V_H le volume de l'échantillon à forte teneur en eau. Cette relation, issue de la bibliographie [22, 24], a également été vérifiée expérimentalement dans des travaux menés au laboratoire [25]. Les résultats obtenus pour un lot de bois sont présentés au Tableau 1.1.

	ρ_0 (kg/m^3) n=13	V_0/V_H n=95
Moyenne	540	0,88
Ecart type	30	0,02
COV	6%	2%

TABLE 1.1 – *Détermination de la masse volumique anhydre d'un lot de déroulage de pin Maritime et rapport V_0/V_H associé pour un nombre n d'échantillons*[25]

On notera qu'il sera important de réaliser ces mesures pour chaque lot de bois reçu destiné à la fabrication des contreplaqués. En effet, si la masse volumique anhydre des plis (ρ_0) varie peu au sein d'un même lot de bois, nous avons observé des variations allant de 450 à 650 kg/m^3 entre deux lots de bois différents.

On obtient donc la relation suivante :

$$m_0 = \rho_0 \times 0,88 V_h \tag{1.4}$$

En substituant « ρ_0 x 0,88 V_H » à « m_0 » dans l'Equation (1.2), on obtient l'Equation (1.5), permettant de calculer la masse du pli correspondant à une teneur en eau MC en fonction de la masse volumique ρ_0 estimée au préalable pour chaque lot de bois et du volume humide V_H mesuré pour chaque pli de bois :

$$m_h = \rho_o \times 0,88 V_h (1 + MC\%) \tag{1.5}$$

La teneur en eau des plis de bois non séchés et destinés à la fabrication des contreplaqués

est ensuite obtenue par pesées successives des plis placés en chambre conditionnée (20°C, 65% d'humidité relative de l'air), jusqu'à ce que la masse correspondant à la teneur en eau souhaitée soit atteinte (Equation 1.5).

1.3.3 Propriétés mécaniques du bois à l'état vert

La présence d'eau liée dans les parois des cellules confère au bois des propriétés spécifiques, qui vont différencier le comportement du matériau à l'état vert et à l'état sec. Les propriétés mécaniques du bois varient avec la quantité de molécules d'eau dans les parois (de MC= 0% au PSF). Au delà du point de saturation des fibres, elles sont considérées comme constantes (Figure 1.15). L'évolution est différente selon les propriétés mécaniques observées et selon le type de bois utilisé.

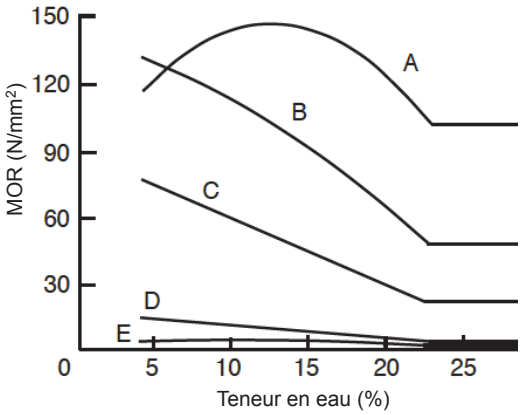


FIGURE 1.15 – *Evolution du module de rupture (MOR) en fonction de la teneur en eau* [20]. *A : traction parallèle au fil du bois, B : flexion, C : compression parallèle au fil du bois, D : compression perpendiculaire au fil du bois, E : traction perpendiculaire au fil du bois.*

Les propriétés élastiques du bois (notamment le module d'élasticité MOE) varient également en fonction de sa teneur en eau (Figure 1.16). Des équations représentant l'évolution des propriétés élastiques du bois en fonction de sa teneur en eau ont été établies par D. Guitard [22] dans la plage de 6% à 20% de teneur en eau, elles sont reportées ci-après.

$$
\begin{aligned}
MOE_L^{MC} &= MOE_L^{12}\left[1 - 0,015\,(MC - 12)\right] \\
MOE_R^{MC} &= MOE_R^{12}\left[1 - 0,03\,(MC - 12)\right] \\
MOE_T^{MC} &= MOE_T^{12}\left[1 - 0,03\,(MC - 12)\right]
\end{aligned}
\tag{1.6}
$$

avec MOE le module d'élasticité du bois en MPa ; L, R et T sont les indices désignant les trois directions principales du bois, respectivement les directions Longitudinale, Radiale et Tangentielle. MC est la teneur en eau du bois en %.

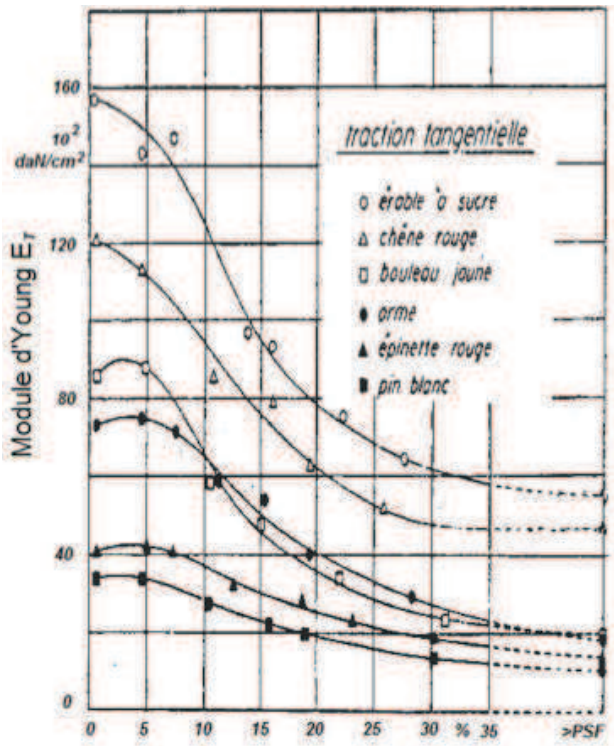


FIGURE 1.16 – *Evolution du MOE en fonction de la teneur en eau* [26]

Le bois a un comportement élastique jusqu'au seuil de contrainte correspondant à sa limite d'élasticité. Au delà de ce seuil, on observe un comportement ductile jusqu'à la rupture. Lors de tests de traction, la zone ductile est très courte quelle que soit la teneur en eau : on parle de matériau quasi-fragile. En compression, le comportement du bois est plus ductile pour une teneur en eau élevée, avec une plage de déformation plus importante.

Les propriétés mécaniques d'un résineux standard à différentes teneurs en eau sont données dans le Tableau 1.2[22, 27].

	Longitudinal	Radial	Tangentiel
MOE 12% (MPa)	13100	1100	636
MOE 20% (MPa)	11528	836	483
MOR 12% (MPa)	80	5	5
Retrait du PSF à 0%	‹1%	4,5%	9%

TABLE 1.2 – *Propriétés d'un résineux standard en fonction de sa teneur en eau* [22, 27]

Le comportement du bois au cintrage est affecté par sa teneur en eau. Comme nous l'avons vu dans la partie 1.2.2, la courbure est limitée par la faible capacité d'extension du bois. Dans le but d'améliorer l'aptitude au cintrage du bois, une possibilité consiste à augmenter sa teneur en eau. Ce phénomène est décrit dans de nombreux travaux sur le comportement thermo-hydro-mécanique du bois (COST FP0904, [10, 28]). En effet, la déformation critique d'un bois vert en traction et en compression est supérieure à la déformation d'un bois à MC= 12%. D'après l'Equation (1.1), le rayon de cintrage minimum d'un bois vert peut être calculé : il est environ le double d'un bois à MC= 12% [10]. Ce phénomène est dû aux modifications physico-chimiques engendrées par l'action des molécules d'eau sur les constituants du bois (hémicellulose, cellulose et lignine), qui rendent le matériau plus ductile. La modification des interactions entre les différents constituants de la matière ligneuse sous l'action de la teneur en eau du bois et de la température permet une augmentation des mouvements moléculaires au sein du matériau et entraîne une augmentation de la souplesse du bois.

Les paramètres teneur en eau et température ont un effet couplé sur la souplesse du bois, comme l'illustre le graphe de la Figure 1.17.

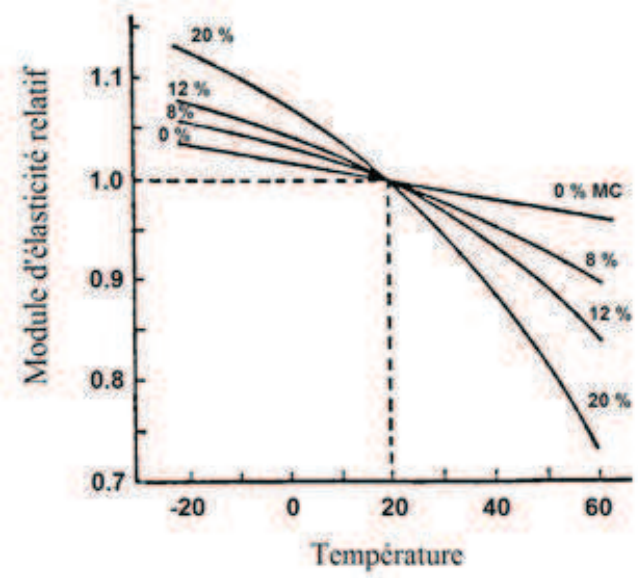


FIGURE 1.17 – *Effet couplé de la teneur en eau du bois et de la température sur le module d'élasticité relatif* [29]

La connaissance des propriétés d'hygroscopicité permet de définir les meilleurs domaines d'utilisation pour optimiser des procédés tels que le cintrage du bois et l'étuvage des billons de bois. L'étuvage est un traitement utilisé pour améliorer l'aptitude au déroulage des bois. Cette étape consiste à exposer les billons non séchés à de la vapeur d'eau dans le but d'augmenter la température dans l'ensemble du bois. L'eau déjà présente à l'état initial dans le bois permet de conduire la chaleur jusqu'au centre du bois. La matériau se trouve alors dans des conditions de température et teneur en eau élevées, ce qui a pour effet de diminuer les efforts de coupe appliqués au bois ; un déroulage de qualité est alors obtenu. L'aspect de surface du bois est amélioré, avec des fissures moins profondes dans le pli de bois formé, une épaisseur constante et une dissolution de la résine dans le cas des bois résineux.

Nous avons vu ici que le bois vert a des propriétés mécaniques et physiques différentes de celles du bois sec. Les procédés de transformation du bois doivent également être adaptés en fonction de sa teneur en eau.

1.4 Le collage du bois à l'état vert

Le collage du bois à l'état vert a connu un intérêt croissant dans la seconde moitié du XXème siècle, particulièrement pour la réalisation de produits aboutés. Cette technologie a entraîné le développement de nouveaux adhésifs spécifiques pour des teneurs en eau du bois supérieures à MC= 20%.

1.4.1 Principes généraux du collage du bois

La technologie du collage du bois vert permet [30] :

- **de travailler avec un bois plus souple** : les propriétés spécifiques au bois vert sont décrites au paragraphe 1.3.3,
- **de simplifier la gamme de fabrication**, notamment lors d'une utilisation de bois déroulés : industriellement, après une étape de déroulage du bois, les plis formés sont séchés avant d'être encollés. L'étape de séchage des plis de déroulage est délicate, les plis ondulent, se cassent, les noeuds sautent, et une étape de réparation des plis est nécessaire par la suite. Ces étape sont inexistantes lorsqu'on utilise le bois à l'état vert,
- **d'économiser de l'énergie lors de la fabrication du produit et d'améliorer le rendement matière**, car seul le produit final est séché. Les parties non utilisables pour la suite du procédé de fabrication (noeuds, fentes, flashes par exemple) sont purgées avant séchage. Les pièces de bois peuvent également être collées et courbées sans fortes hausses de pression et de température.

Les études réalisées par M. D. Strickler, G. E. Troughton et S. Chow [31, 32] ont permis de valider le procédé de collage du bois vert pour un usage structural, avec des colles phénol-resorcinol-formaldéhyde (PRF), ou mélamine-urée-formol (MUF). Plus récemment, la recherche autour du collage du bois à forte teneur en eau a débouché sur la mise en œuvre de nouveaux adhésifs :

- Greenweld, un adhésif PRF modifié, a été développé par le New Zealand Forest Research Institute,

– Soybond, un adhésif bi-composants à base de protéines de soja et de résine PRF, a été produit aux USA [33, 34, 35],
– une colle polyuréthane mono-composante a été brevetée dans la même période [36, 30].

Les principes généraux de ces adhésifs consistent à chasser l'eau du bois aux abords de la surface à coller par divers mécanismes. L'adhésif que nous utiliserons dans cette étude est un prépolymère de polyuréthane qui polymérise grâce à l'eau apportée par le substrat bois. Appliquées sur le bois vert, les fonctions isocyanates en excès du pré-polymère de polyuréthane réagissent avec l'eau libre et l'eau liée du bois, libérant ainsi les sites hydroxyles des composants pariétaux du bois.

~ NHCOO ~ NHCOO ~ NHCOO ~ NCO = prépolymère de polyuréthane

~ NHCOO ~ NCO + H_2O -> ~ NHCOO ~ NH_2 + CO_2

L'amine (NH2) formée aide à la polymérisation. Des liaisons sont ensuite créées entre le polyuréthane et le bois.

~ NHCOO ~ NCO + HO-bois -> ~ NHCOO ~ NHCOO-bois

Il est nécessaire de définir une proportion adéquate d'eau par rapport à la quantité appliquée d'adhésif afin qu'il y ait assez d'eau pour réagir avec le pré-polymère de polyuréthane, et suffisamment d'adhésif pour créer des liaisons avec la paroi des cellules du bois [36]. La réaction de polymérisation des polyuréthanes avec l'eau a été largement étudiée, pour des teneurs en eau ne dépassant pas le PSF. Cela permet d'avoir une première connaissance des mécanismes en jeu [37, 38, 39, 40, 41]. Cependant, pour des teneurs en eau supérieures au PSF, une étude plus approfondie doit être réalisée, suite à un manque de données dans la littérature.

1.4.2 Paramètres d'utilisation d'une colle polyuréthane adaptée au collage du bois vert

La formation des joints de colle est une étape très importante lors de la réalisation des plaques de contreplaqué. Elle garantit la qualité du produit final. De nombreux paramètres influent sur les performances du collage.

Ils peuvent être classés en quatre groupes [42, 43, 44, 45] :

- l'ambiance de mise en œuvre (température, humidité relative, etc.),
- les propriétés de l'adhésif polyuréthane (dont viscosité, grammage, propriétés physico-chimiques, etc.),
- les propriétés du substrat bois (notamment stockage, état de surface, teneur en eau, etc.),
- le procédé de mise en œuvre du panneau (par exemple température, temps de presse).

Les effets de certains de ces paramètres ont été étudiés et définis précédemment [30], d'autres seront étudiés plus précisément dans cette thèse. Des essais en laboratoire ont déjà été réalisés dans le cadre du projet ABOVE (collage du bois vert) sur des panneaux et des aboutages de pin Maritime à l'aide d'une colle polyuréthane (de référence RP 1127) proche de celle que nous utiliserons (de référence RP 2554). Les fiches techniques de ces deux colles sont présentes en Annexe 2. Ces tests ont eu pour objectif d'évaluer les effets des paramètres de mise en oeuvre sur la qualité du collage. Le Tableau 1.3 présente les paramètres de collage pour le bois abouté à l'état vert, avec la colle RP 1127.

Paramètres	Consignes	Remarques
Teneur en eau de collage	De 20% environ à 70% environ	Pour des collages à plat seulement ; pour l'aboutage, la teneur en eau n'est pas limitée
Temps de serrage	30 minutes	Similaire au collage sec PU.
Grammage de la colle	300 g/m2	Similaire au collage sec PU.
Pression de serrage	1 MPa	Similaire au collage sec PU.
Teneur en eau en sollicitation mécanique	Inférieure au point de saturation des fibres	Nous obtenons un collage structural
Etat de surface du bois	Sans rabotage	La rugosité d'un sciage (scie circulaire) n'est pas gênante pour coller du bois à l'état vert, mais la qualité des sciages est parfois insuffisante
Température de collage	De 4°C à 65°C permet un bon collage	Le temps de serrage de la colle doit passer de 15 min à 65°C, à 90 min à 4°C
Type de bois	La densité du bois n'a pas eu d'effet sur la tenue du collage	Densités de Pin maritime aléatoires

TABLE 1.3 – *Paramètres de collages définis pour l'adhésif polyuréthane Collano, de référence RP 1127* [30]

1.5 Synthèse de l'état de l'art

Le but de la thèse est de mettre au point un procédé de fabrication de contreplaqués collés à l'état vert à destination des coques et de l'agencement des bateaux. L'étude bibliographique nous a permis de répertorier différents matériaux et méthodes utilisés pour obtenir des coques formées correspondant aux attentes des chantiers navals. Chacune des techniques utilisées est connue et maitrisée séparément : moulage sous vide / fabrication du contreplaqué / collage du bois massif à l'état vert avec une colle polyuréthane. Actuellement, la fabrication de coques à partir de panneaux de contreplaqué impose l'usage de fines bandes, découpées dans les panneaux plans pour être courbées et ajustées sur la charpente. L'enjeu de la thèse est de parvenir à profiter des avantages de chaque méthode de fabrication afin de proposer un procédé de mise en œuvre innovant permettant de repousser les limites de fabrication. Il faut pour cela :

- analyser la faisabilité du procédé choisi,
- optimiser les paramètres de fabrication des panneaux définis,
- déterminer si le procédé permet la mise en œuvre d'un matériau respectant les exigences mécaniques requises.

Pour cela, nous étudierons la fabrication d'un composite constitué de plis déroulés non séchés collés à l'aide d'un adhésif polyuréthane spécifique. Ces plis seront moulés sous vide au contact. Le travail consistera tout d'abord en la définition des différentes étapes de la conception. Après avoir défini le cahier des charges du matériau, les paramètres adéquats de fabrication du contreplaqué seront déterminés à partir d'un plan d'expériences. Les paramètres de séchage seront également étudiés. Puis une étude spécifique du collage sous vide à plus fine échelle permettra de comprendre les résultats obtenus lors de l'analyse du plan d'expériences. Dans la dernière partie de ce travail, la caractérisation mécanique de ce matériau à travers des tests de flexion, de cisaillement, mais aussi des analyses spécifiques aux panneaux fabriqués seront réalisées. Toutes ces étapes devront mener à la réalisation d'un démonstrateur qui validera le procédé utilisé.

Chapitre 2

Différentes étapes de la conception des panneaux de contreplaqué

Le bordé de bateau doit répondre à un besoin et aux exigences techniques de l'entreprise, mais aussi à des exigences normatives définies par le bureau d'étude, détaillées dans la première partie de ce chapitre. Puis nous nous intéresserons au procédé de fabrication des panneaux qui nous permettra d'atteindre les propriétés requises. Ainsi, parmi les nombreux paramètres de fabrication ayant une influence sur les performances mécaniques des panneaux, nous avons choisi d'étudier principalement l'effet des paramètres « teneur en eau du bois » et « grammage de colle appliqué », en utilisant la méthode des plans d'expériences. Une analyse statistique permettra de quantifier l'influence de ces paramètres sur la qualité de collage des panneaux. Enfin, l'étude des paramètres du séchage sous vide des panneaux sera abordée, dans le but de finaliser le processus de réalisation des panneaux.

2.1 Définition du cahier des charges des panneaux

La démarche suivie pour définir le cahier des charges des panneaux est inspirée de la méthode d'analyse de la valeur, utilisée lors de la création ou de l'amélioration d'un produit.

Cette méthode a pour but de trouver des **solutions technologiques** qui répondront à un

besoin (= désir exprimé par le chantier naval Dubourdieu), à partir des **fonctions** (actions qui doivent être satisfaites par le produit ou de l'un de ses constituants) définies.

Dans notre étude, nous analyserons et énoncerons précisément le besoin de l'entreprise partenaire de la thèse, le chantier naval Dubourdieu. Les fonctions du contreplaqué permettant de répondre à ce besoin seront identifiées. Des solutions technologiques permettant de satisfaire les fonctions du produit seront ensuite avancées pour fabriquer un panneau correspondant aux attentes de l'entreprise.

2.1.1 Définition du besoin exprimé par l'industriel

Comme nous l'avons vu précédemment, l'entreprise concernée est le chantier naval Dubourdieu, spécialisé dans la construction de bateaux sur mesure et fabriqués essentiellement à partir du matériau bois. Les coques de bateaux sont actuellement réalisées à partir de panneaux de contreplaqué découpés en fines bandes (diagonaux) plaquées sur la charpente (cf. paragraphe 1.1.3). Cette méthode est longue à mettre en oeuvre et délicate à adapter à des coques présentant des courbures importantes.

L'entreprise cherche ainsi à développer la fabrication et la mise en forme d'un panneau à base de bois directement sur la charpente. La conception d'un contreplaqué en bois, sur mesure, collé à l'état vert, est une solution évoquée pour répondre à cette problématique ; elle a été envisagée suite à l'étude bibliographique présentée au chapitre 1. Le laboratoire I2M, qui travaille sur le collage du bois à l'état vert depuis quelques années, et le chantier naval Dubourdieu se sont ainsi rapprochés pour partager leurs connaissances et leur savoir-faire respectifs.

Dans la partie qui suit, nous déterminerons les spécifications techniques à développer pour répondre au besoin de l'entreprise.

2.1.2 Fonctions et solutions techniques permettant de répondre au besoin exprimé par l'entreprise

Pour faciliter les étapes de fabrication et de mise en œuvre des panneaux, différentes fonctions sont identifiées :

- **s'adapter à la forme de la charpente :** l'utilisation des plis de déroulage à l'état vert permet de courber le bois de manière plus importante que dans le cas du bois sec (cf. paragraphe 1.3.3). Pour assurer l'assemblage des plis à l'état vert, la colle polyuréthane développée au laboratoire I2M pourra être utilisée. Concernant l'application d'une pression, la technologie du moulage sous vide semble adaptée au contreplaqué. Elle permet notamment de former des coques de grande dimension d'un seul tenant (cf. paragraphe 1.2.2).

- **être facile à mettre en œuvre par l'opérateur :** les plis de déroulage sont fins, légers et peu encombrants lorsqu'ils sont transportés sous forme de rouleaux jusqu'au chantier naval. Ils doivent donc être courbés, collés et pressés en forme sur site et sans transport ultérieur après collage. Les jointures seront décalées entre les couches successives des plis pour obtenir une continuité. Le protocole de réalisation des panneaux est présenté en Annexe 8. Enfin, le panneau doit être facile à fixer sur la charpente, cette étape est possible par collage ou à l'aide de vis à bois.

- **limiter l'impact environnemental du matériau :** nous utiliserons des matériaux locaux, naturels et renouvelables. Ainsi, le pin Maritime sera choisi en tant qu'essence de bois locale. Le procédé de fabrication sera adapté afin d'optimiser le rendement et limiter les consommations d'énergie (cf. paragraphe 1.4.1). Les étapes de fabrication seront réduites, puisque le panneau sera réalisé directement à la forme de la charpente. Il pourra également être séché et pressé dans un même temps, par apport de chaleur lors du procédé de mise sous vide. Des essais expérimentaux devront vérifier la faisabilité du procédé.

- **répondre aux exigences de qualité requises par le bureau d'étude :** afin de recenser les caractéristiques mécaniques requises pour le bordé, il est nécessaire en premier lieu de définir un bateau. Les travaux ont pour objectif la réalisation d'un démonstrateur, un bateau de 6 m de long, dont les plans sont joints en Annexe 3. Le bureau d'étude *Orion Naval*

Engineering[1] a pour rôle de dimensionner les différents éléments du bateau (structure, bordé) pour obtenir un ensemble cohérent et correspondant aux normes [2]. Des panneaux de 6 m seront nécessaires à la réalisation de ce démonstrateur.

2.1.3 Caractéristiques mécaniques requises par le bureau d'étude

Le Bureau Véritas [46] et la norme ISO 12215 [2] établissent les règles de dimensionnement pour les bateaux en matériaux composites de moins de 24 mètres utilisés pour la navigation de plaisance. Les techniques de fabrication en acier et en aluminium sont également bien prises en compte par ces normes. Par contre, les règles de dimensionnement régissant la construction de navires en bois sont moins explicites, avec pour conséquence des bateaux largement surdimensionnés [47]. Le dimensionnement des éléments du bateau dépend des propriétés des matériaux utilisés. Concernant le bordé qui nous intéresse ici, les calculs sont basés sur la théorie classique de la résistance des matériaux.

La norme [2] considère un panneau élémentaire de bordé de surface « a » x « b », délimité par les 4 éléments du cadre de la charpente auquel il est fixé. « a » et « b » définissent le maillage de la structure, « b » étant le plus petit côté du panneau (Figure 2.1). L'Equation (2.1), issue de la norme, donne la résistance minimale en flexion σ_{uf} (MPa) parallèle au petit côté « b » du panneau en fonction :

- de la pression P s'appliquant sur un panneau au cours de la vie du bateau (kN/m^2),

- de la largeur « b » du panneau (mm).

- de l'épaisseur « e » des panneaux (mm).

$$\sigma_{uf} = \frac{P.b^2}{2e^2} \times \frac{1}{0,5 \times 1000} \tag{2.1}$$

Le facteur 0,5 au dénominateur est un facteur de sécurité utilisé pour le dimensionnement des panneaux ; le facteur 1000 convertit le résultat en MPa.

1. Bureau d'études spécialisé en architecture navale et ingénierie maritime
Adresse : 14 Avenue Ferdinand de Lesseps, ZAC Actipolis, 33610 Canéjan,
http ://www.orion-naval.com/fr/

Dans la pratique, on découpe des échantillons de type poutre de longueur « b » sur lesquels on effectue des essais de flexion.

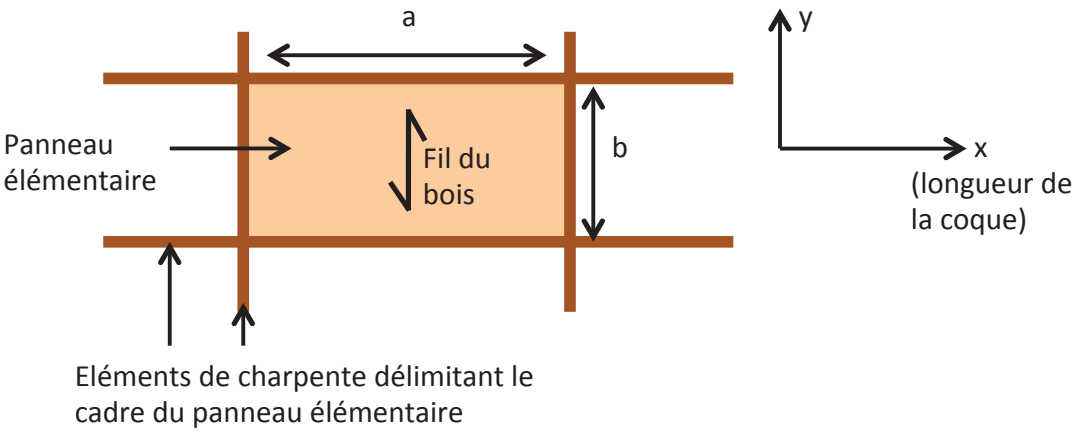


FIGURE 2.1 – *Schéma d'un panneau élémentaire de bordé sur la charpente*

La pression P, appelée aussi pression de conception, est calculée théoriquement en fonction des caractéristiques intrinsèques du bateau (masse en charge, surface de conception, catégorie du bateau, angle de la carène, vitesse du bateau, etc...). Cette pression est donc imposée. Ainsi, le dimensionnement de la structure dépend essentiellement des propriétés des matériaux constitutifs du bordé σ_{uf}, et des paramètres géométriques de panneaux : l'épaisseur « e » et la largeur « b ».

La méthodologie utilisée par le bureau d'études pour définir ces propriétés (e, b et σ_{uf}) diffère selon les configurations des projets. Premièrement, l'objectif des différentes démarches est de connaître les propriétés des matériaux constitutifs du bordé (σ_{uf}). Pour cela, différentes voies sont possibles, comme le présente la Figure 2.2. Les propriétés mécaniques du matériau à utiliser en tant que bordé peuvent être connues dès le départ, soit parce qu'il s'agit d'un matériau souvent utilisé, soit parce qu'il est répertorié dans une base de données. Il peut également s'agir d'un nouveau matériau défini par l'entreprise, qui fournit dans ce cas les valeurs de la résistance σ_{uf} au bureau d'étude. Lorsqu'elle est déterminée expérimentalement, σ_{uf} correspond à 80% de la contrainte moyenne mesurée, ou à la valeur moyenne moins deux écarts types. Un autre cas peut se présenter, lorsque le bureau d'étude lui-même définit le matériau utilisé, dont les propriétés mécaniques sont estimées à l'aide d'un logiciel de calcul.

Dans ces trois cas, suite à la mesure ou à l'estimation des propriétés des panneaux en flexion, l'épaisseur du bordé et la largeur du maillage peuvent être définies. De nombreux échanges ont lieu entre le bureau d'étude et l'industriel lors de la mise en place d'un nouveau matériau : les contraintes normatives ou de fabrication sont ainsi respectées. Suite à la définition des paramètres recherchés (e, b et σ_{uf}), un panneau est réalisé et testé en laboratoire afin de vérifier qu'il a les propriétés requises (σ_{uf}).

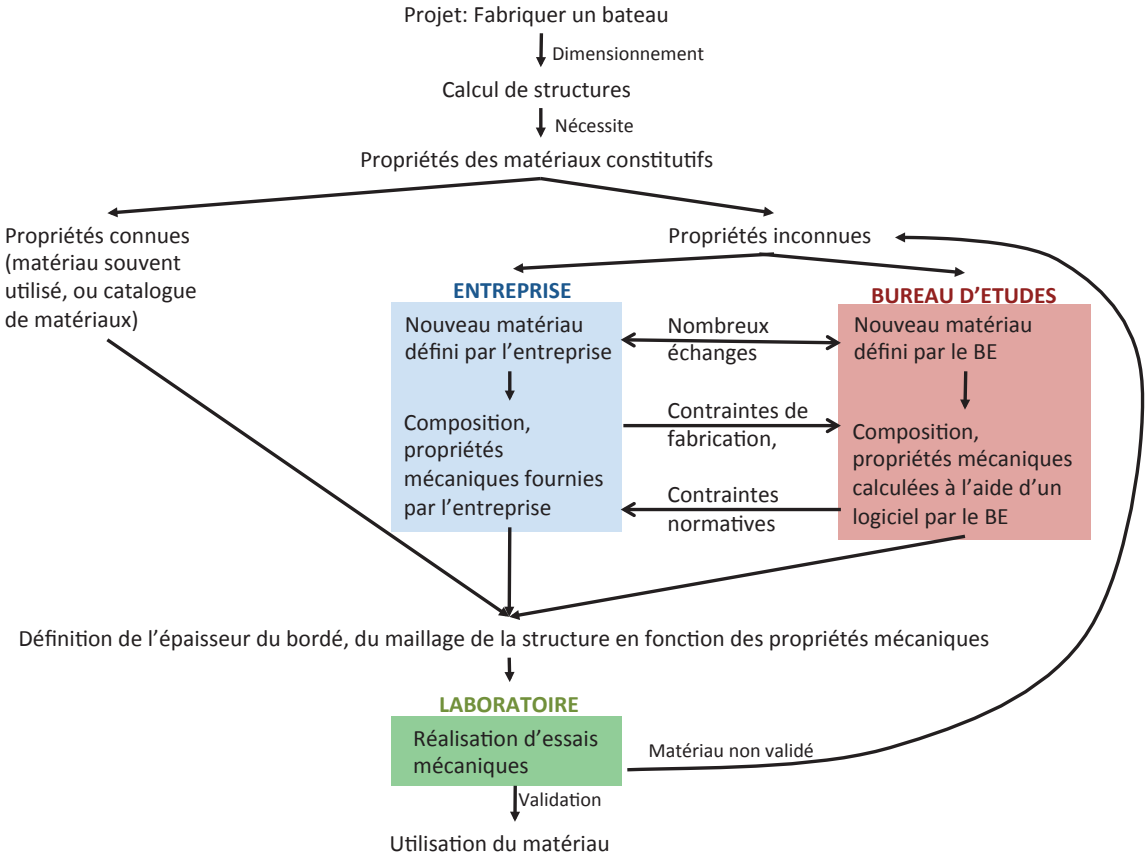


FIGURE 2.2 – *Rôle des différents acteurs dans le dimensionnement d'une structure navale*

Dans notre cas, il s'agit d'une configuration mixte, où le bureau d'étude a défini une épaisseur de bordé pour un panneau de contreplaqué en pin Maritime classe 3 (c'est-à-dire utilisable en milieu extérieur) standard, dont les propriétés sont connues. Un panneau de contreplaqué d'épaisseur 13 mm, constitué de 5 plis dont la contrainte en flexion parallèle au petit côté du panneau doit être supérieure à 40 MPa, est recommandé en application sur la charpente présentée en Annexe 3 (panneau de 6 x 1 m^2 à réaliser).

Ainsi, il s'agit de satisfaire les exigences normatives tout en répondant aux besoins de l'entreprise, en proposant un contreplaqué 5 plis innovant, ayant des propriétés mécaniques adaptées. Ce nouveau contreplaqué devra satisfaire toutes les fonctions techniques nécessaires. La Figure 2.3 représente les étapes successives suivies dans cette étude permettant de vérifier la conformité du panneau réalisé par rapport aux attentes du bureau d'étude. Suite à la définition de l'épaisseur du panneau, comme décrit précédemment, nous élaborerons un plan d'expériences permettant de définir les paramètres de réalisation des panneaux (grammage de colle et teneur en eau lors du collage principalement). L'analyse du plan d'expériences sera basée sur la réalisation de tests de cisaillement selon la norme NF EN 314 [48]. Ces essais préliminaires permettront de sélectionner les configurations optimales de réalisation des panneaux pour une utilisation en milieu extérieur. Le protocole de fabrication sera alors figé. Les panneaux qui en découlent seront testés en flexion afin de vérifier la concordance avec les exigences du bureau d'études. Un essai de flexion spécifique à l'étude des plaques composites (essai BOGUI) présenté au paragraphe 4.2.1, sera réalisé.

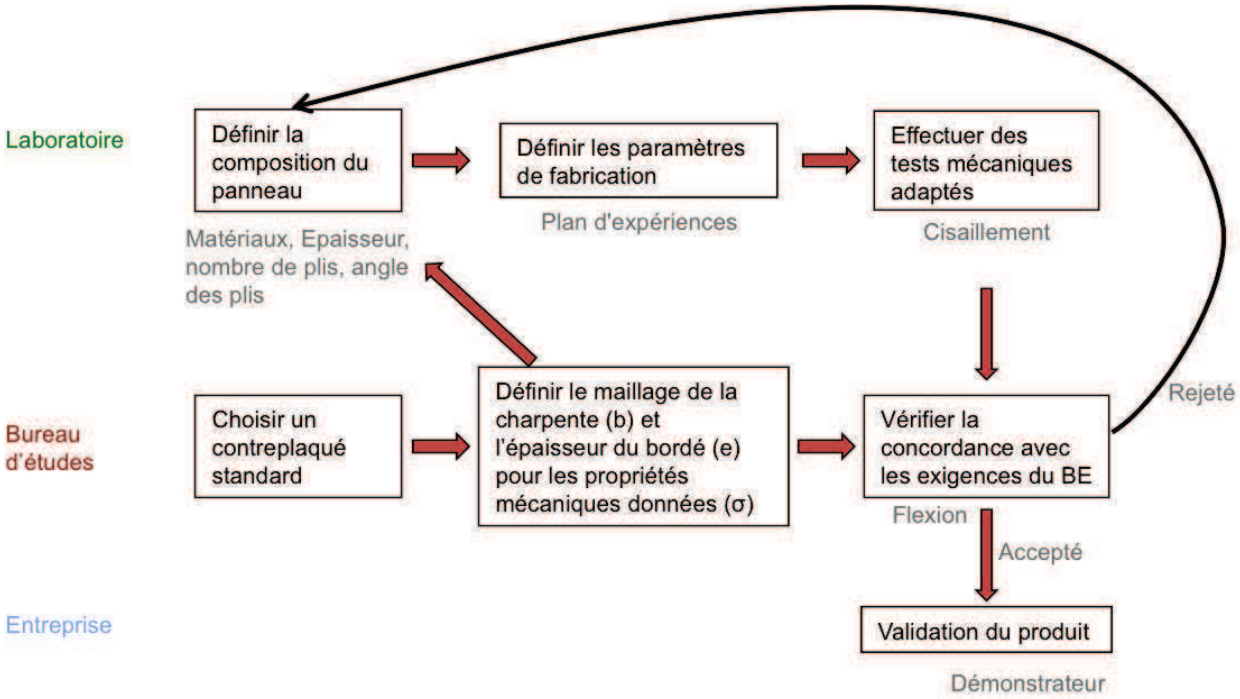


FIGURE 2.3 – *Etapes suivies pour la réalisation des panneaux*

La structure des panneaux sera identique à celle proposée par le bureau d'étude pour le contreplaqué standard, soit un matériau constitué de 5 plis de 2,5 mm croisés perpendiculairement. Les points récapitulés ci-dessous doivent être vérifiés :

- la contrainte de rupture en flexion moyenne doit être supérieure ou égale à 40 MPa,

- le contreplaqué doit être utilisable en milieu extérieur, ce qui implique l'utilisation de la norme NF EN 314 [48] pour la réalisation des tests de cisaillement,

- le bois doit être encapsulé après la construction pour stabiliser le taux d'humidité à long terme. Des revêtements étanches, ne participant pas à la tenue structurale, sont donc nécessaires.

Une étude approfondie des paramètres de fabrication et du séchage sera tout d'abord réalisée dans le but de définir les paramètres optimums de collage, comme décrit dans les paragraphes qui suivent.

2.2 Etude des paramètres pertinents de fabrication des panneaux de contreplaqué

Les différents paramètres ayant une influence sur la qualité du collage sont présentés dans ce paragraphe. Recensés et hiérarchisés dans la première partie de cette section, ils sont séparés en deux catégories : les facteurs contrôlés (qui peuvent être fixés par l'expérimentateur dans le cadre de cette étude) et les facteurs non-contrôlés (qui peuvent avoir une influence sur les résultats sans pouvoir être maitrisés ici, dont l'effet sera inclus dans l'erreur expérimentale). Certains des paramètres contrôlés seront choisis et figés suite à une étude bibliographique, pour d'autres leur effet sur la qualité du collage sera étudié au travers d'un plan d'expériences. Ces choix sont expliqués dans le paragraphe ci-dessous.

2.2.1 Recensement des paramètres influents

La qualité du collage et de la formation de l'interface bois/colle est liée aux conditions d'ambiance, aux propriétés de l'adhésif polyuréthane, aux propriétés du substrat bois et au

procédé de fabrication du panneau [42, 43, 44, 45]. Les paramètres influents que nous avons recensés sont regroupés suivant ces 4 grandes classes et sont présentés sur la Figure 2.4.

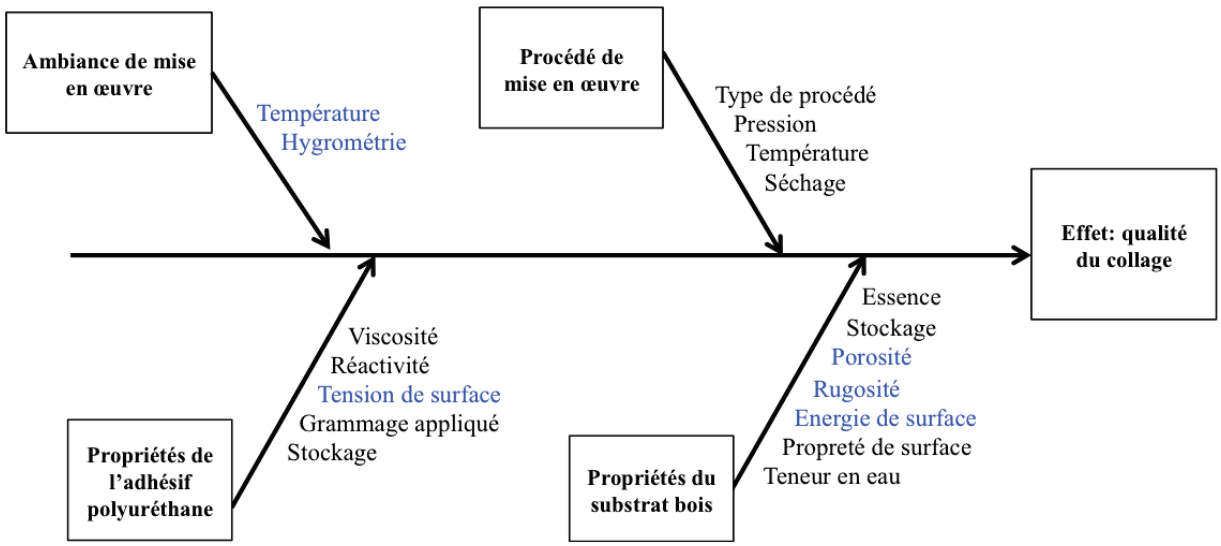


FIGURE 2.4 – *Inventaire des paramètres de fabrication des panneaux (facteurs contrôlés et non-contrôlés)*

Les paramètres non contrôlés sont la *température* et *l'hygrométrie* du milieu, puisque le collage des plis est effectué en conditions d'ambiance, variables.

L'état de surface du bois (*rugosité*) et sa *porosité* sont inclus dans les facteurs non contrôlés, les approvisionnements et la procédure industrielle de déroulage ne permettant pas dans notre cas de maîtriser ces paramètres.

Les propriétés de surface des matériaux (*tension de surface* des adhésifs ou *énergie de surface* du bois) sont les autres facteurs non contrôlés. Ces propriétés peuvent évoluer en fonction des paramètres contrôlés : elles seront donc étudiées (chapitre 3) pour comprendre le phénomène d'adhésion et la relation avec les paramètres contrôlés.

Tous les autres facteurs sont des facteurs contrôlés.

Parmi les propriétés du substrat bois, l'*essence* choisie est le pin Maritime. Les plis utilisés pour la fabrication des contreplaqués proviennent de l'entreprise Rolpin (Labouheyre, France), ils sont déroulés de manière à avoir une épaisseur de 2,5 mm en bois sec, conformément aux contreplaqués industriels. Nous utiliserons du bois d'aubier, provenant d'un même lot de pin Maritime, pour chacune des campagnes expérimentales réalisées. Un lot comprend un ensemble de plis issus de billons déroulés le même jour, provenant d'une même parcelle (arbres du même âge). La *propreté de surface* du substrat lors du collage correspond au standard appliqué classiquement dans le cas des contreplaqués industriels.

Afin de pouvoir maitriser la teneur en eau des bois lors du collage, le *stockage* des plis déroulés sera réalisé sous eau. Ce procédé permet de garder le bois à l'état vert, mais cela affecte ses propriétés. En effet, certaines entreprises ont observé que les bois stockés sous eau ou transportés par l'eau absorbaient plus de solution de préservation que les bois stockés à l'air, [49, 50]. De nombreuses publications montrent que le stockage sous eau augmente la porosité et la perméabilité des bois et facilite son imprégnation [51, 52, 53, 54]. Par contre, aucun changement significatif n'est observé pour les autres propriétés du bois (physiques, mécaniques...). L'augmentation de la porosité du bois est due à l'action de bactéries, présentes en grande quantité dans les bois immergés. Ces bactéries s'attaquent aux composés pectiques et plus anecdotiquement aux hémicelluloses et à la cellulose du bois. Les bactéries ont un effet plus limité sur les bois étuvés stockés sous eau, pour lesquels les pectines et hémicelluloses sont déjà partiellement dégradées. Il ne faut toutefois pas les laisser trop longtemps en eau stagnante pour éviter des dégradations plus poussées (des hémicelluloses ou de la cellulose). Pour des raisons pratiques et pour homogénéiser la matière première, nous avons systématiquement immergé les plis de bois pendant une période d'un mois maximum.

Concernant les facteurs liés aux propriétés de l'adhésif, les consignes de *stockage* dans un endroit correspondant aux données du fabricant seront respectées afin de ne pas influencer les résultats des tests. La colle utilisée est une colle polyuréthane mono-composante spécifiquement développée par l'entreprise Collano pour le collage du bois vert (cf. paragraphe 1.4). Une première version de cet adhésif (RP 1127) a été développée lors de précédentes recherches concernant l'aboutage du bois à l'état vert [36]. La viscosité et la réactivité (vitesse de polymérisation) de la colle ont été modifiées de manière à être plus adaptées à la fabrication de panneaux de contreplaqué (cf. paragraphe 1.2). Ainsi, le temps de polymérisation a été

porté à 4h (au lieu de 30 min pour l'aboutage du bois massif) pour permettre l'assemblage et la mise sous vide des plis encollés avant la polymérisation de la colle. La viscosité a été fixée à 1000 mPa.s (contre 7500 mPa.s pour le bois abouté), ce qui correspond à la viscosité des colles employées dans l'industrie des contreplaqués [55]. La colle sera référencée RP 2554 dans la suite des travaux. La fiche technique de cette colle est jointe en Annexe 2.

Pour finir, le procédé de fabrication des panneaux de contreplaqué est étudié. Le *type de procédé* utilisé est la technologie du moulage sous vide qui a été définie dans le Chapitre 1. La *dépression* appliquée correspond à la capacité de la pompe à vide, elle se situe autour de 850 mbar. La température lors du collage est un facteur qui permet une augmentation de la vitesse de polymérisation. Dans le cas particulier des colles polyuréthane, elle est de plus susceptible d'améliorer les propriétés finales en modifiant positivement le point de transition vitreuse (Tg). Par contre, une température appliquée lors du procédé de moulage sous vide des panneaux a une influence sur le processus de séchage des panneaux. Nous avons choisi de considérer l'effet du séchage sous vide indépendamment du procédé de moulage sous vide. Dans un premier temps, les panneaux seront collés sous vide, puis placés pour le séchage en salle conditionnée à 20°C, 65% HR jusqu'à ce qu'ils soient stabilisés à une teneur en eau de 12%, valeur requise pour les tests mécaniques. Les paramètres de séchage sous vide des panneaux seront optimisés par la suite au paragraphe 3.5.

Les valeurs des facteurs contrôlés évoqués jusqu'ici ont été fixées suite à des recherches bibliographiques ou des travaux préliminaires, afin de limiter le nombre de paramètres à faire varier, mais ils pourront évoluer en fonction des résultats des tests. En se référant à la Figure 2.4, on observe que deux des paramètres contrôlés ne peuvent pas être fixés : le *grammage d'adhésif* et la *teneur en eau* du bois. Un plan d'expériences mettant en oeuvre ces deux facteurs sera réalisé pour avoir une première approche des paramètres de collage permettant la réalisation de panneaux de contreplaqué sous vide.

2.2.2 Etude des paramètres « teneur en eau » et « grammage d'adhésif » au travers d'un plan d'expériences

La méthode des plans d'expériences est un outil robuste, qui a été développé par R. A. Fisher dans les années 1920 alors qu'ils existaient jusqu'alors de manière informelle. Leur objectif est de quantifier l'influence de paramètres (ou facteurs) sur une grandeur mesurée (ou réponse). Dans notre cas, il s'agit de définir l'influence des facteurs « grammage d'adhésif » et « teneur en eau » sur la contrainte de cisaillement des panneaux (représentative de la qualité du collage [48]), afin d'optimiser le procédé de fabrication des panneaux. Après avoir posé cette problématique, on utilise la méthode des plans d'expériences pour créer une table répertoriant les expériences à réaliser. Cette table est définie en fonction du type de plan, de la nature de la réponse et de l'utilisation que l'on souhaite en faire [56, 57, 58]. Les plans d'expériences permettent de minimiser notamment le nombre d'essais à réaliser pour obtenir un maximum d'informations. De nombreux types de plans sont utilisés dans la littérature. Dans notre cas, un plan factoriel complet a été réalisé pour caractériser le procédé de collage. Ce plan suppose la réalisation d'une expérience pour chaque combinaison possible entre toutes les veleurs (ou niveaux) de tous les facteurs considérés. Ce type de plan ne diminue pas le nombre d'expériences à réaliser, mais il permet l'apport d'un maximum d'informations pour répondre à la problématique posée. Il peut être réalisé ici car, d'une part seulement deux facteurs sont étudiés (le grammage de colle et la teneur en eau du bois) et d'autre part, les tests sont faciles à effectuer. Le plan inclut 4 niveaux pour le facteur « teneur en eau », appelé MC par la suite et 2 niveaux pour le facteur « grammage de colle », dénommé G. Le but de ce plan est de quantifier l'effet de MC et de G sur la variation des propriétés en cisaillement des panneaux. Les plages de variation des deux facteurs considérés sont différentes, aussi pour pouvoir comparer l'effet des facteurs et simplifier l'analyse mathématique associée, nous transformons ces variables en variables centrées réduites (plage de variation comprise entre -1 et 1) [57, 58]. Pour effectuer ce changement de variables, nous utilisons la relation suivante :

$$x = \frac{(A - A_0)}{pas} \tag{2.2}$$

avec x= valeur du niveau du facteur en unité centrée réduite, A= valeur du niveau du facteur en unité courante, A_0= valeur centrale en unité courante et *pas*= variation en unité courante

correspondant à une unité centrée réduite.

Ainsi, le Tableau 2.1 présente le choix des niveaux des facteurs ainsi que les correspondances entre valeurs courantes et valeurs centrées réduites.

	Teneur en eau du bois MC (%)		Grammage d'adhésif appliqué G (g/m^2)	
	Valeurs courantes	Valeurs centrées réduites	Valeurs courantes	Valeurs centrées réduites
Niveau 1	12% : collage à l'état sec	-1	250 : valeur classique	-1
Niveau 2	30% : point de saturation des fibres (PFS)	-0,59	500 : valeur forte	1
Niveau 3	60% : valeur intermédiaire	0,09		
Niveau 4	100% : obtenue après déroulage	1		

TABLE 2.1 – *Définition des niveaux et des facteurs du plan d'expériences*

L'ensemble des 8 combinaisons possibles des niveaux des facteurs est représenté sur la Figure 2.5. Chaque point correspond à un couple (MC, G).

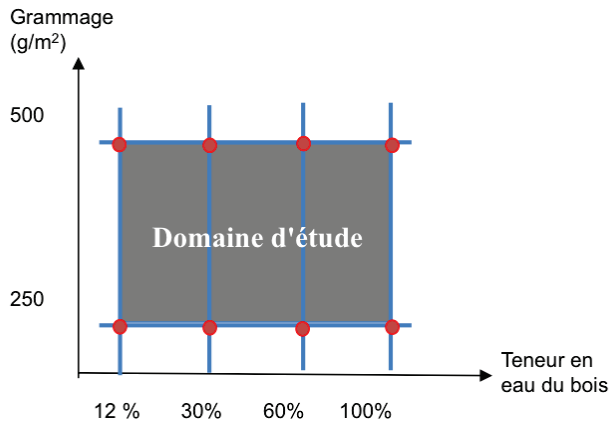


FIGURE 2.5 – *Représentation graphique du plan d'expérience défini*

L'ensemble des configurations est représenté sous forme de tableau (Tableau 2.2) précisant la désignation des panneaux réalisés.

Désignation des panneaux 5 plis	Grammage d'adhésif (RP 2554)	Teneur en eau du bois
250-12	250 g/m^2	12%
250-30	250 g/m^2	30%
250-60	250 g/m^2	60%
250-100	250 g/m^2	100%
500-12	500 g/m^2	12%
500-30	500 g/m^2	30%
500-60	500 g/m^2	60%
500-100	500 g/m^2	100%

TABLE 2.2 – *Paramètres de fabrication des panneaux*

Après déroulage et stockage sous eau (cf. paragraphe 2.2.1), les plis de bois sont à une teneur en eau MC $>$ 100%. Ils sont découpés aux dimensions des panneaux et amenés aux teneurs en eau du plan d'expériences. Pour cela, les bois saturés d'eau sont placés dans une chambre conditionnée à 20°C, 65% d'humidité relative (HR). Les plis devant être collés à MC= 12% sont laissés dans l'enceinte qui est réglée pour stabiliser le bois à cette teneur en eau (Annexe 1), jusqu'à ce que leur masse soit constante entre deux pesées. Les plis destinés à être collés à des teneurs en eau supérieures sont pesés régulièrement et encollés lorsqu'ils atteignent les teneurs en eau de 30%, 60% et 100%. La masse à atteindre pour chaque teneur en eau est déterminée selon la méthode présentée au paragraphe 1.3.2.

La quantité exacte d'adhésif polyuréthane (Collano RP2554) est pesée avant chaque collage afin de garantir le grammage appliqué (250 g/m^2 ou 500 g/m^2). L'adhésif est appliqué sur les plis de bois par simple encollage, à l'aide d'une raclette crantée afin que la colle soit répartie uniformément. Ils sont ensuite disposés en alternant à 0/90° le sens du fil du bois pour former un contreplaqué équilibré (cf. paragraphe 1.2).

Les panneaux 5-plis sont réalisés par moulage sous vide pendant 24 heures. Le schéma de principe du montage utilisé pour la fabrication sous vide est présenté sur la Figure 1.9. Le protocole de réalisation des panneaux de contreplaqué est donné en Annexe 8. La pompe à vide utilisée lors du collage est une pompe standard Mil's Evisa E40 ayant une capacité volumétrique de 50 m^{3}h^{-1} : la dépression obtenue avec cette pompe lors des essais est de 850 mbar environ.

Trois panneaux de 500 x 500 x 13 mm^3 sont produits pour chaque couple de facteurs (MC,

G) (Tableau 2.2). Ils sont portés à une teneur en eau d'équilibre homogène (MC=12%) requise pour les tests mécaniques, selon la norme NF EN 314 [48]. Pour cela, ils sont placés après leur fabrication en enceinte climatique (20°C, 65% HR, conformément à l'Annexe 1), empilés sur tasseaux et chargés mécaniquement afin de conserver leur géométrie plane, jusqu'à stabilisation de leur masse. Dix échantillons par configuration sont testés en cisaillement pour déterminer la qualité du joint de colle [48]. Cette répétition des essais permet une estimation de la variabilité résiduelle lors de l'analyse du plan d'expériences. Comme nous l'avons vu, l'objectif du plan d'expériences est d'observer la variation de la réponse en fonction des niveaux des facteurs. Cependant, en plus de la variation due aux facteurs il existe une variation résiduelle, qui est due en particulier aux erreurs de mesure et à la variabilité naturelle du matériau bois. Nous verrons l'importance de cette variation résiduelle lors de l'analyse des résultats.

Les propriétés en cisaillement des joints de colle sont déterminées selon la norme NF EN 314 [48]. Cette norme a été choisie car elle est utilisée pour déterminer industriellement la qualité du collage des contreplaqués. De plus, elle définit les classes d'utilisation des contreplaqués en fonction de la qualité du collage. Il existe trois classes de collage développées dans cette norme, dépendant de l'utilisation finale du contreplaqué : la classe de collage 1 (milieu intérieur sec), la classe de collage 2 (milieu intérieur humide) et classe de collage 3 (milieu extérieur). Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.1.3 le contreplaqué réalisé doit être conforme à une utilisation en milieu extérieur (soit classe 3), afin d'être placé sur la charpente du bateau. Ainsi, les tests de cisaillement seront effectués en vue d'une utilisation en milieu extérieur du contreplaqué. Les résultats obtenus seront comparés aux valeurs requises par les normes en vigueur.

2.2.3 Réalisation des tests mécaniques en cisaillement

Le contreplaqué étant constitué d'un assemblage de plis de bois, ses faiblesses potentielles sont situées au niveau des joints de colle [59]. Les propriétés en cisaillement sont donc les plus représentatives de la qualité du collage des panneaux. Généralement, un collage performant est obtenu si la rupture a lieu dans le bois.

Des éprouvettes de dimensions 13 x 25 x 150 mm^3 sont découpées dans les panneaux de manière à avoir les fibres des plis extérieurs selon la longueur des échantillons. Deux traits de scie sont réalisés jusqu'au milieu du second ou du quatrième pli de bois sur les échantillons afin de définir une surface de cisaillement ([48], Figure 2.6). Afin de satisfaire les exigences de la norme sus-citée, il est nécessaire de réaliser des essais après 3 traitements préalables des échantillons pour valider l'emploi des contreplaqués en milieu extérieur (classe 3). Nous n'effectuerons que deux de ces trois tests dans cette étude, dont le plus sévère. Les résultats présentés par la suite seront donc valides sous réserve que les échantillons vérifient également les exigences suite au troisième traitement.

10 échantillons par configuration seront immergés 24h en eau froide (traitement I) avant d'être testés. 10 autres échantillons par configuration seront testés après avoir subi le traitement II, c'est à dire 72h en eau bouillante, pour observer le comportement des joints en conditions sévères (Tableau 2.3). Finalement, 8 configurations x 2 traitements x 10 échantillons, soit un total de 160 essais ont été réalisés au cours de cette campagne expérimentale.

Traitement préalable	Description
I	Immersion 24h en eau froide (20 ± 3°C)
II	Immersion 72h en eau bouillante

TABLE 2.3 – *Procédés de pré-traitement des éprouvettes* effectués [48]

Les tests sont réalisés sur les échantillons saturés d'eau immédiatement après leur sortie des bains de pré-traitements (traitements I ou II), dans des conditions de température et d'humidité relative normalisées (20°C, 65% HR). Les tests ont été réalisés au FCBA [2], selon la procédure d'essais standard illustrée sur la Figure 2.6. L'appareillage utilisé lors des tests est une machine électromécanique de traction/compression (réf : Adamel Lhomargy DY 23). Elle est pilotée en déplacement de la traverse. La vitesse de déplacement a été choisie de façon à ce que la rupture se produise en 300±120 sec. La force a été mesurée au cours de l'essai, afin de calculer la résistance au cisaillement. Le capteur de force utilisé a une capacité de 500 daN.

2. Institut Technologique Forêt-Cellulose-Bois-Ameublement, allée de Boutaut, Bordeaux

La contrainte de cisaillement est estimée d'après l'Equation (2.3).

$$\tau = \frac{\mathrm{P}}{L \times b} \tag{2.3}$$

où τ= contrainte de rupture en cisaillement (MPa), P = charge à la rupture (N), L = longueur de cisaillement (mm), b = largeur de cisaillement (mm).

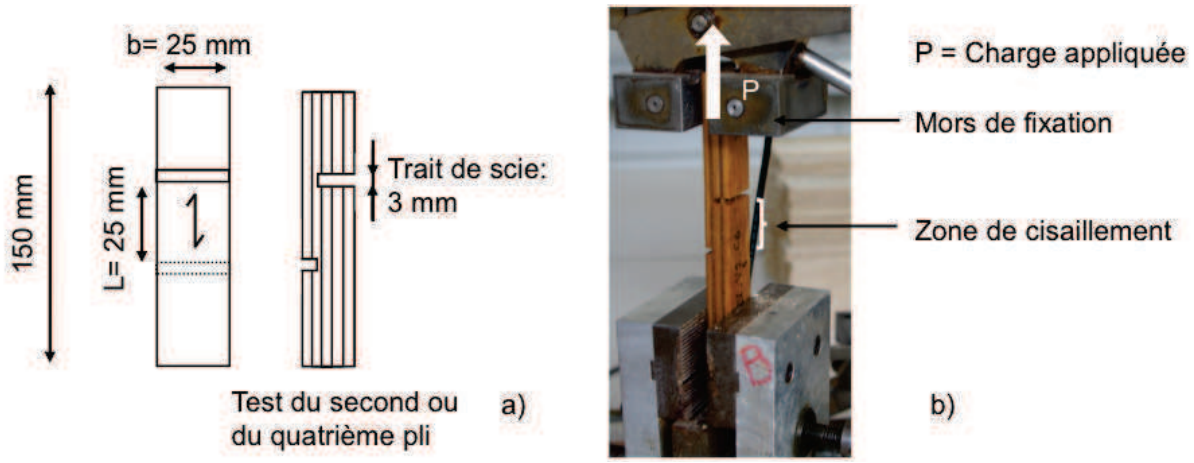


FIGURE 2.6 – *Configuration des échantillons de cisaillement (a) et essais mécaniques associés (b) selon la norme NF EN 314* [48]

Le pourcentage de rupture cohésive apparente dans le bois et la contrainte de rupture en cisaillement des panneaux sont mesurés pour chaque configuration selon la norme NF EN 314 [48] et comparés aux valeurs requises de cette norme. La Figure 2.7 montre différents pourcentages de rupture cohésive apparente dans le bois au niveau des faces de la section cisaillée.

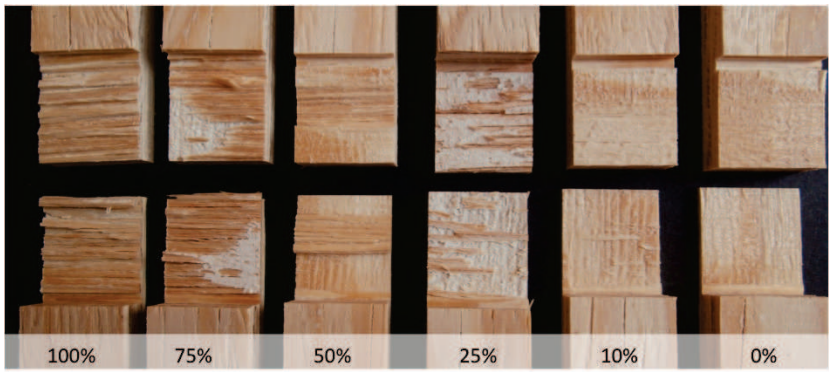


FIGURE 2.7 – *Evaluation du pourcentage de rupture cohésive apparente dans le bois*

Les résultats des tests sont présentés dans le Tableau 2.4 pour les traitements préalables I et II. Les contraintes de cisaillement obtenues pour les différents traitement sont supérieures à 1 MPa comme préconisé par la norme NF EN 314, excepté pour les panneaux 250-100 testés selon le traitement II.

Traitement	Panneaux	250-100	500-100	250-60	500-60	250-30	500-30	250-12	500-12
I	τ moyen (MPa)	1,28	1,22	1,42	2,14	2,22	2,74	1,45	1,67
	COV	7%	15%	10%	6%	12%	11%	15%	12%
	Ecart type (MPa)	0,09	0,18	0,14	0,12	0,27	0,30	0,22	0,20
	% de rupture cohésive apparente	2%	27%	2%	46%	2%	60%	1%	1%
II	τ moyen (MPa)	0,72	1,12	1,11	1,28	1,40	1,64	1,14	1,19
	COV	11%	20%	6%	13%	13%	11%	22%	21%
	Ecart type (MPa)	0,08	0,22	0,06	0,17	0,18	0,18	0,25	0,25
	% de rupture cohésive apparente	2%	1%	2%	5%	40%	50%	1%	1%

TABLE 2.4 – *Contraintes de cisaillement mesurées lors des tests*

Seul le panneau 250-100 ne répond pas aux exigences de la norme. De plus, les panneaux 500-100 et 250-60 sont proches des limites acceptables (1 MPa). Les contraintes mécaniques les plus élevées (supérieures à 2 MPa après le traitement I, ou supérieurs à 1,2 MPa après le traitement II) sont obtenues pour les panneaux 500-60, 250-30 et 500-30.

L'influence de chaque facteur sur la contrainte de cisaillement est étudiée plus précisément par une analyse statistique des résultats. Cette analyse mène à un modèle qui permet de prédire la contrainte de cisaillement à la rupture à partir du grammage d'adhésif appliqué et de la teneur en eau du bois lors du collage.

2.2.4 Analyse statistique des résultats

L'analyse d'un plan d'expériences n'est valable que dans le domaine d'étude défini et ne peut pas être étendue à des valeurs extérieures. Le logiciel MINITAB® est utilisé dans un premier temps pour tracer les diagrammes des effets principaux et des interactions pour les traitements I et II (Figures 2.8 et 2.9).

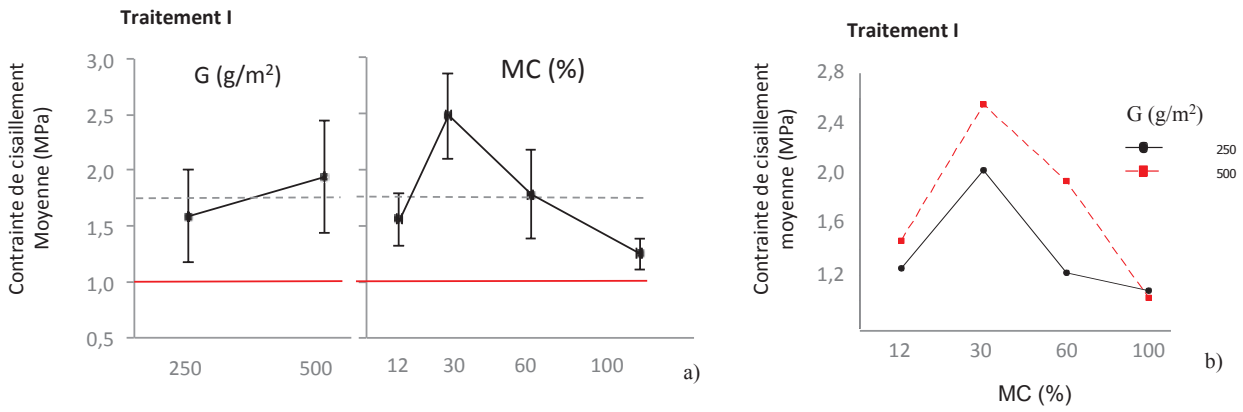


FIGURE 2.8 – *Traitement I : analyse statistique du collage en fonction du grammage et de la teneur en eau : a) graphique des effets principaux et b) graphique des interactions*

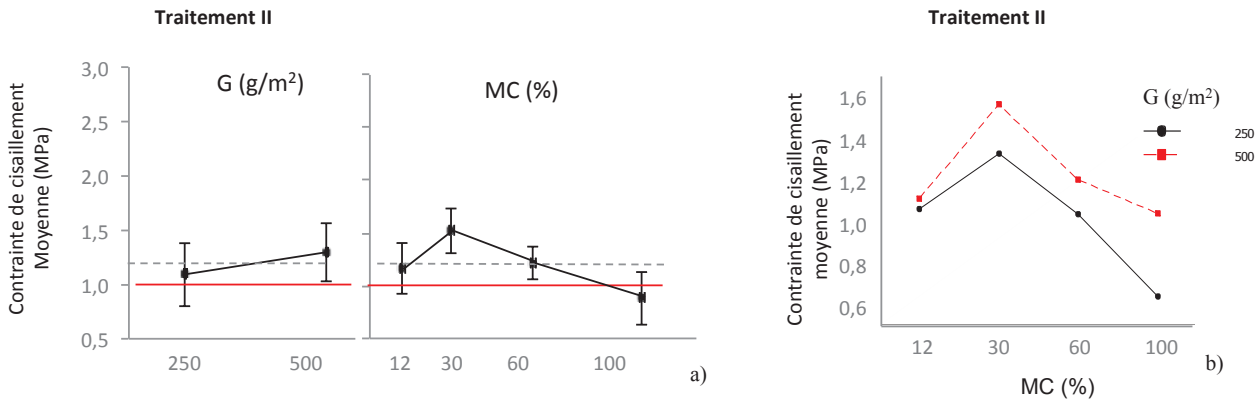


FIGURE 2.9 – *Traitement II : analyse statistique du collage en fonction du grammage et de la teneur en eau : a) graphique des effets principaux et b) graphique des interactions*

L'effet d'un facteur représente l'influence de ce facteur sur la réponse étudiée. Le graphique des effets principaux (a) permet de comparer les effets de chacun des facteurs séparément, sans tenir compte des interactions entre les facteurs. Sur ces graphiques, chaque point représente la réponse moyenne de tous les essais réalisés au niveau du facteur considéré. La pente des lignes reliant les réponses moyennes des niveaux des facteurs représente l'effet du facteur sur la réponse. Ainsi, l'effet de la teneur en eau est plus important que l'effet du grammage (pente supérieure). Les panneaux collés avec un grammage de 250 g/m^2 ont des propriétés mécaniques en cisaillement inférieures aux panneaux collés à un grammage de 500 g/m^2.

Pour le domaine d'étude considéré, une teneur en eau de 100% entraîne une forte diminution des propriétés mécaniques du panneau. Un optimum semble être obtenu pour une valeur de MC= 30%.

Cette analyse est complétée par le diagramme des interactions (b), qui indique la dépendance de l'impact de la teneur en eau en fonction du niveau du facteur « grammage ». Ce graphe correspond aux effets moyens de MC calculés selon le niveau de G. Si les droites sont parallèles il n'y a pas d'interaction entre les facteurs, ce qui n'est pas le cas ici pour le traitement I. Ce graphique montre que les panneaux collés à une teneur en eau de 30% et un grammage de 500 g/m^2 ont la contrainte de cisaillement moyenne la plus élevée. Les panneaux collés à une teneur en eau de 30% et un grammage de 250 g/m^2 et ceux collés à une teneur en eau de 60% et un grammage de 500 g/m^2 ont des propriétés en cisaillement similaires. Toutes les autres combinaisons montrent des propriétés mécaniques plus basses. De plus, pour MC= 100%, le grammage n'a pas d'influence sur les propriétés en cisaillement du joint.

On observe un schéma similaire pour le traitement II concernant le graphique des effets principaux. Par contre pour ce traitement en conditions sévères, une interaction très faible est observée entre les paramètres G et MC (Figure 2.9).

2.2.5 Identification d'un modèle théorique renseigné par les résultats expérimentaux

A partir de ces données, nous avons cherché à établir une fonction mathématique qui permette de relier les facteurs expérimentaux à la contrainte de cisaillement. Les effets de la teneur en eau étant non linéaires entre MC= 12% et MC= 100%, une régression polynomiale a été choisie. Afin d'ajuster au mieux le modèle aux résultats expérimentaux, nous sommes partis d'un modèle d'ordre élevé (Equation (2.4)) représentant tous les effets et les interactions des facteurs. L'allure de la courbe associée au facteur MC entre les 4 niveaux testés implique la présence de termes quadratiques et cubiques pour ce facteur. Par contre, on émet l'hypothèse que G varie de façon linéaire entre les deux valeurs testées, le terme G ne sera donc présent qu'à l'ordre 1. La matrice d'expériences complète est jointe en Annexe 4.

L'équation prend donc la forme suivante :

$$\tau = a + bG + cMC + dMC.G + eMC^2 + fG.MC^2 + gMC^3 + hG.MC^3 + \varepsilon \qquad (2.4)$$

où a est la réponse au centre du plan d'expériences et b, c, d, e, f, g, h sont les coefficients à définir du modèle.

Le paramètre ε représente l'écart entre les valeurs réelles et le modèle : cette valeur regroupe le manque d'ajustement du modèle et l'erreur expérimentale.

La régression réalisée avec le logiciel MINITAB® permet la détermination des coefficients du modèle par la méthode des moindres carrés. Les résultats obtenus pour le traitement I sont présentés dans le Tableau 2.5. La colonne « Coef. » donne les valeurs des coefficients de l'Equation (2.4) ; la valeur du coefficient de détermination R^2 (0,87) indique que le modèle est bien ajusté aux valeurs mesurées, avec 87% de la variance expliquée par le modèle.

Termes	Coef.	Ecart type coef.	t	p
Constante	a : 1,94	0,04	47,92	0,00
G	b : 0,36	0,04	8,95	0,00
MC	c : -1,79	0,12	-14,36	0,00
G.MC	d : 0,01	0,12	0,09	0,92
MC^2	e : -0,54	0,05	-10,19	0,00
$G.MC^2$	f : -0,32	0,05	-6,08	0,00
MC^3	g : 1,64	0,13	12,37	0,00
$G.MC^3$	h : -0,08	0,13	-0,62	0,54
R^2	87%			

Table 2.5 – *Analyses MINITAB® de la régression générale* $\tau = f(G, MC)$ *pour le traitement I*

Tous les termes de l'équation n'influent pas forcément de façon significative sur la réponse. Certains ont peu d'effet et peuvent être retirés de l'équation. En admettant l'hypothèse que les résultats expérimentaux sont distribués selon une même loi normale [56], un test statistique est effectué afin d'identifier les facteurs qui ont un effet notable sur la réponse et d'imposer une valeur nulle aux coefficients des facteurs dont l'effet est jugé négligeable.

Il s'agit du test statistique de Student, basé sur les hypothèse suivantes pour chacun des coefficients du modèle :

- l'hypothèse nulle est désignée par H_0, elle implique que l'effet du facteur sur la réponse est nul (coef= 0).
- l'hypothèse alternative est désignée par H_1, elle implique que le facteur considéré a un effet sur la réponse (coef$\neq$ 0).

Le test de Student permet de décider si on rejette ou non H_0, grâce à la valeur de t et sa probabilité associée p. La valeur de t calculée correspond au rapport de la valeur du coefficient sur son écart type. Cette valeur est comparée à la valeur de $t_{critique}$ que l'on trouve dans la table de Student pour un risque p= 5%. Les paramètres ayant une influence sur la qualité du collage des panneaux sont ceux pour lesquels $t > t_{critique}$. La valeur de p représente la probabilité de rejeter H_0 si elle est vraie. Plus la valeur de p est petite, plus on peut affirmer que le facteur influe sur la réponse. On considère qu'un facteur a un effet sur la réponse pour une valeur de $p \leq 5\%$. [56, 57, 58]. En s'appuyant sur les résultats présentés sur le Tableau 2.5, on peut voir que les termes G.MC et G.MC^3 n'affectent pas la réponse. Ces termes non significatifs sont retirés du modèle pour obtenir l'Equation (2.5) pour le traitement I :

$$\tau = 1,94 + 0,37G - 1,79MC - 0,54MC^2 - 0,33G.MC^2 + 1,64MC^3 \tag{2.5}$$

Certains coefficients de l'Equation (2.5) diffèrent légèrement de ceux présentés au Tableau 2.5, car les calculs d'identification ont été refaits avec les seuls facteurs ayant une influence significative sur la réponse. La corrélation entre le modèle et les données expérimentales est présenté Figure 2.10.

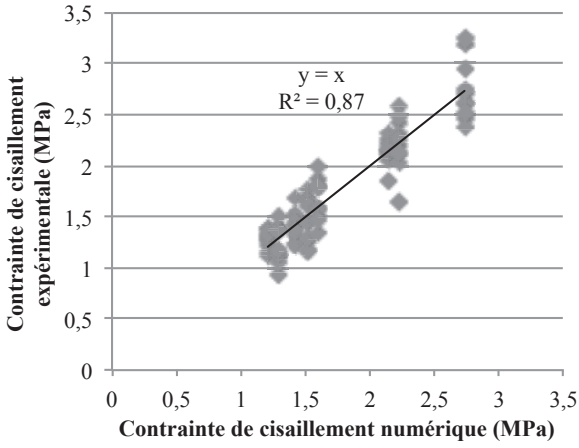


FIGURE 2.10 – *Corrélation de la contrainte de cisaillement numérique et expérimentale pour le traitement I*

Les mêmes analyses sont réalisées pour les résultats de le traitement II. Le logiciel MINITAB® a permis de définir les coefficients de l'Equation 2.4 pour le traitement II. Ils sont présentés dans le Tableau 2.6.

Termes	Coef.	Ecart type coef.	t	p
Constante	a : 1,27	0,04	30,9	0,00
G	b : 0,1	0,04	2,2	0,03
MC	c : -0,8	0,13	-6	0,00
G.MC	d : -0,1	0,13	-0,7	0,47
MC^2	e : -0,23	0,06	-4	0,00
$G.MC^2$	f : 0,02	0,06	0,4	0,70
MC^3	g : 0,67	0,14	4,7	0,00
$G.MC^3$	h : -0,18	0,14	1,3	0,20
R^2	68%			

Table 2.6 – *Analyses MINITAB® de la régression générale* $\tau = f(G, MC)$ *pour le traitement II*

L'Equation (2.6) associée est dans ce cas :

$$\tau = 1,28 - 0,78MC - 0,26MC^2 + 0,64MC^3 \tag{2.6}$$

Dans cette équation, aucun terme contenant G n'a été retenu, car ils n'agissent pas de manière significative sur la réponse (Tableau 2.6), contrairement au cas de l'Equation (2.5).

Ainsi pour le traitement II, le grammage n'est pas un paramètre ayant un effet significatif sur la réponse. On remarque également que seulement 68% de la variance est expliquée par le modèle pour ce traitement en conditions plus sévères.

Finalement, les modèles identifiés permettent de représenter l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction des paramètres « grammage » G et « teneur en eau » MC. Les surface et courbe de réponse pour les deux traitements préalables I et II sont présentées sur la Figure 2.11.

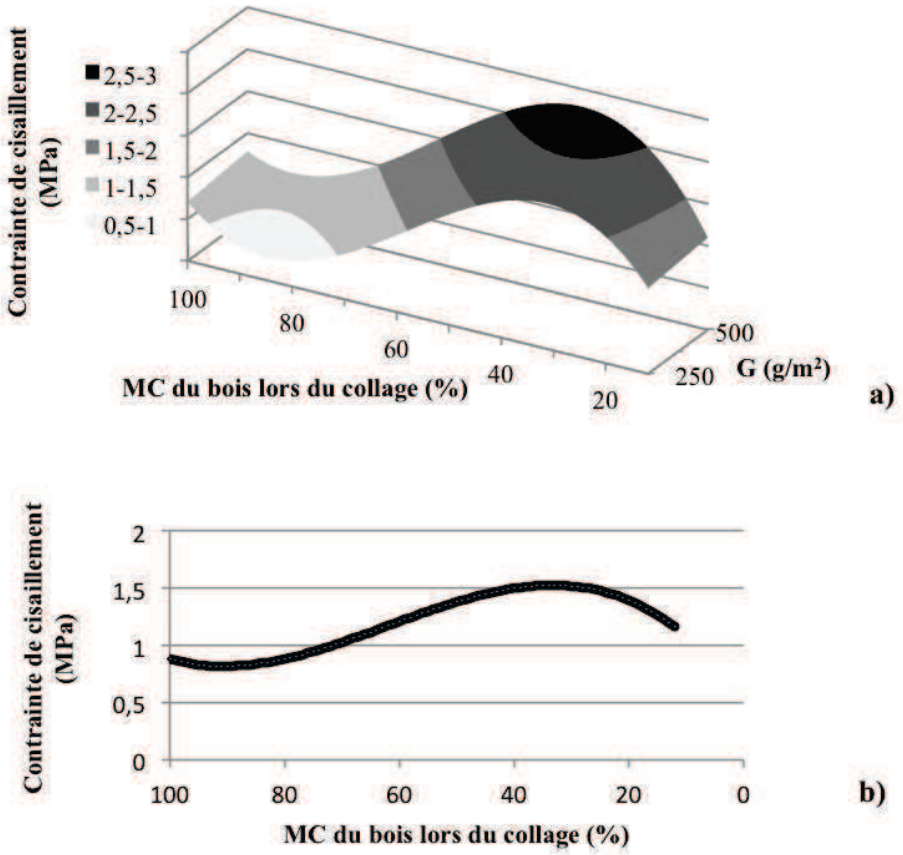


FIGURE 2.11 – *Surface et courbe de réponse pour les traitems I (a) et II (b) représentant la contrainte de cisaillement en fonction de G et MC*

La même tendance est observée pour les deux traitements, mais des valeurs de contraintes inférieures sont obtenues pour le traitement II. En effet, le cycle en eau bouillante dégrade les propriétés du joint. On observe également pour ce traitement moins de différence entre les

contraintes maximum et minimum obtenues. Les deux surfaces montrent un optimum estimé pour une teneur en eau de 30%. Les valeurs les plus basses de la contrainte de cisaillement sont obtenues pour les plus fortes teneurs en eau (> 60%). On note également que les résultats sont légèrement meilleurs pour un grammage de 500 g/m^2 par rapport à celui de 250 g/m^2 dans le cas du traitement I.

Afin de vérifier la validité du modèle, un panneau a été réalisé à partir des paramètres G et MC situés approximativement au centre du domaine d'étude, soit G= 400 g/m^2 et MC= 45%. Les valeurs expérimentales et numériques sont comparées grâce au test statistique de Student, permettant de définir si l'écart entre une population expérimentale et une valeur théorique (ici modélisée) est significatif. Le mode opératoire de ce test est détaillé dans l'Annexe 5. Les résultats des tests expérimentaux sont comparés aux valeurs numériques dans le Tableau 2.7.

	Traitement I	Traitement II
Contrainte de cisaillement expérimentale τ_{exp} (MPa)	2,38	1,69
Nombre d'échantillons	10	10
Ecart type	0,44	0,25
$I_{5\%}$	$2{,}7 \geq \tau_{mod} \geq 2{,}1$	$1{,}9 \geq \tau_{mod} \geq 1{,}5$
Modèle de réponse	2,40	1,45

TABLE 2.7 – *Comparaison des réponses expérimentales et modélisées au point central*

$I_{5\%}$ correspond à l'intervalle dans lequel la valeur modélisée n'a pas d'écart significatif avec la moyenne expérimentale obtenue lors des tests de cisaillement. Cet intervalle est calculé selon le test t de Student, avec un risque de 5% d'erreur. Les résultats simulés indiquent une bonne approximation des valeurs expérimentales, même si la valeur obtenue pour le traitement II est légèrement inférieure à la borne basse de l'intervalle de confiance.

En résumé, dans cette partie du travail, les panneaux de contreplaqués ont été collés à différents teneurs en eau et grammages de colle. Ils ont été pressés par procédé de moulage sous vide, puis séchés en enceinte climatisée jusqu'à atteindre une teneur en eau d'équilibre de 12%, avant d'être soumis aux traitements préalables I et II [48]. Les tests mécaniques de cisaillement et les analyses statistiques des résultats obtenus ont permis de sélectionner une plage de teneur en eau à respecter lors du collage des plis de bois constitutifs des panneaux, comprise entre MC= 30% et MC= 60%.

Dans la suite de cette étude, nous avons choisi de coller les différents panneaux à une teneur en eau située autour de 60% pour des raisons pratiques, celle-ci étant plus la plus rapide à atteindre dans la plage sélectionnée. Le grammage de colle de 250 g/m^2 est suffisant pour obtenir une résistance au cisaillement requise pour les panneaux, mais pas forcément optimal ; il n'est pas fixé ici et pourra varier dans la suite des travaux. Le séchage en salle climatisée a permis de sécher les panneaux jusqu'à la teneur en eau souhaitée pour les essais mécaniques, cependant il s'agit d'un mode de séchage très long (plusieurs mois) et sévère pour les panneaux en début de séchage lorsqu'ils sont à forte teneur en eau (gradient d'humidité très important pouvant entraîner la création de fissures). Afin de réaliser un séchage plus rapide tout en optimisant le processus de polymérisation du joint et la qualité des panneaux, une étude doit être réalisée. Elle permettra d'examiner puis de déterminer les paramètres régissant le séchage.

2.3 Etude des paramètres de séchage des panneaux

Les préoccupations classiques du séchage sont la réduction des temps de fabrication, l'économie d'énergie et l'obtention d'un produit de qualité [60]. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire d'étudier les paramètres auxquels le processus de séchage est subordonné (température, pression, humidité relative de l'air notamment), afin de développer un procédé de séchage adéquat. Le paragraphe suivant décrit dans un premier temps les mécanismes gouvernant le séchage, en consacrant une partie au séchage sous vide. Les enseignements tirés de cette étude bibliographique ont permis de choisir une procédure de séchage, qui sera appliquée expérimentalement, afin de vérifier que le procédé sélectionné peut être transféré industriellement aux panneaux de contreplaqué collés sous vide.

2.3.1 Les mouvements de fluides dans le bois de résineux lors du séchage

Le séchage correspond à un phénomène complexe de transfert simultané de chaleur et de masse, destiné à extraire une partie de l'eau contenue dans le matériau par apport d'énergie. Il fait appel à deux types de mécanismes [19] :

- les transferts internes d'eau sous forme liquide ou vapeur dans le bois. L'énergie (chaleur) nécessaire à la circulation de cette eau peut être apportée principalement par conduction, convection ou rayonnement.

- l'évacuation de l'eau en surface du matériau, qui constitue les transferts externes, par entrainement, vaporisation ou diffusion moléculaire.

Dans le bois, les transferts d'eau sont différents dans les trois directions d'orthotropie (Longitudinale, Radiale, Tangentielle). Lorsqu'un bois est parcouru par un fluide, la circulation se fait principalement via les trachéides longitudinales. Le fluide circule également via les rayons ligneux dans la direction radiale du bois. Une connexion a lieu entre ces rayons ligneux et les trachéides adjacentes par les ponctuations. La nature des flux dépend également de l'essence, des conditions de stockage du bois et des paramètres du séchage [21, 61]. De plus, pour un bois à l'état vert qui n'a jamais été séché, le bois de printemps est plus perméable que le bois d'été car il comporte un plus grand nombre de ponctuations. Les dimensions de la pièce de bois considérée influencent également la qualité du flux. Pour des éléments minces et longs, par exemple les plis de déroulage constitutifs du contreplaqué, la circulation longitudinale peut être négligée par rapport aux flux radial ou tangentiel.

Pour sécher le bois, il faut le maintenir dans des conditions permettant une migration de l'eau du centre du matériau vers le milieu extérieur. Cette circulation est due à la création de gradients de pression et d'humidité. Tant que la pression partielle de vapeur de l'enceinte est inférieure à la pression de vapeur dans le bois, ce dernier sèche. L'objectif est de choisir un programme de séchage adapté, provoquant un gradient de pression de vapeur suffisant, mais pas trop important pour ne pas entraîner la création de défauts (fentes par exemple). A la fin du séchage, la pression partielle de vapeur de l'air à l'intérieur du bois et celle de l'enceinte s'équilibrent. Le retour du bois à température ambiante doit être progressif pour éviter un endommagement du matériau.

2.3.2 Mécanismes du séchage sous vide

Le séchage sous vide est développé pour des applications complexes sur de grosses sections de bois, ou pour des bois qui exigent une grande qualité. Il permet de diminuer le temps de séchage, les fissures aux extrémités et la température à appliquer sur les panneaux [62, 63, 64]. Lorsqu'on applique un vide partiel, c'est-à-dire lorsque la pression totale est inférieure à la pression atmosphérique, la température d'ébullition de l'eau devient d'autant plus faible que cette pression diminue, comme illustré sur la Figure 2.12, ce qui accélère le séchage. La pression de vapeur saturante P_{VS} est la pression à laquelle la vapeur d'eau est en équilibre avec sa phase liquide. Elle correspond au point d'ébullition de l'eau, et dépend exclusivement de la température, selon le modèle de Rankine (Equation (2.7)). Ce modèle est valable pour une gamme de température de 5°C à 140°C, avec P_{VS} en atm. et T en Kelvin.

$$ln(P_{VS}) = 13,7 - \frac{5120}{T} \tag{2.7}$$

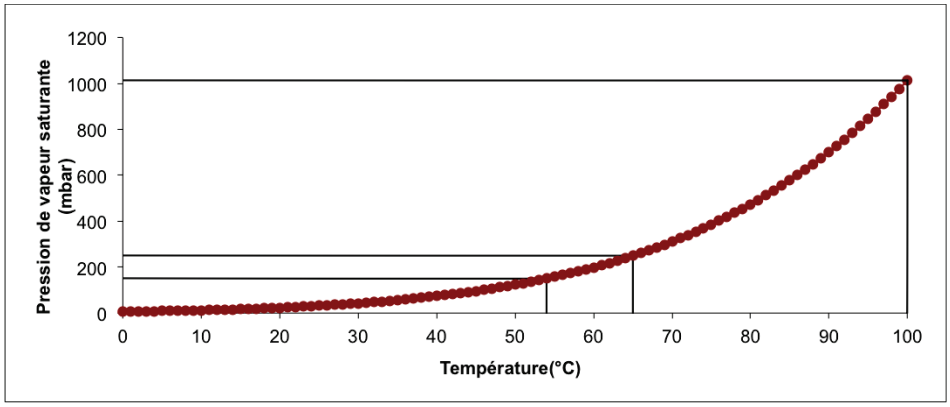


FIGURE 2.12 – *Evolution de la pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température*

Le processus de séchage sous vide peut être décomposé en 3 phases.

La première phase est appelée phase isenthalpe ou encore phase à flux-masse constant [62]. Lors de cette étape la surface du matériau est alimentée en permanence en eau libre par capillarité. L'eau est vaporisée en surface.

La seconde phase débute lorsque la surface du bois entre dans le domaine hygroscopique. Un

front d'ébullition est créé lorsque la température est supérieure ou égale au point d'ébullition de l'eau [21, 65]. Ce front, qui sépare la phase d'eau à l'état liquide (au centre de la pièce de bois) de la phase d'eau à l'état vapeur (dans la partie externe de la pièce de bois), comme présenté sur la Figure 2.13, se déplace vers le centre du bois dans la direction longitudinale au fur et à mesure du séchage. La vapeur d'eau formée migre des zones de forte pression (au centre, où $P > P_{VS}$) vers les zones de plus faible pression, aux extrémités de la pièce de bois. Un flux continu de vapeur est créé du front d'ébullition à la surface. Ce flux, dépendant de la perméabilité du bois, est considéré comme le plus important lors du séchage du bois sous vide [66]. Il y a toujours migration d'eau par capillarité mais également présence de diffusion sous forme de vapeur et de diffusion-sorption de l'eau liée.

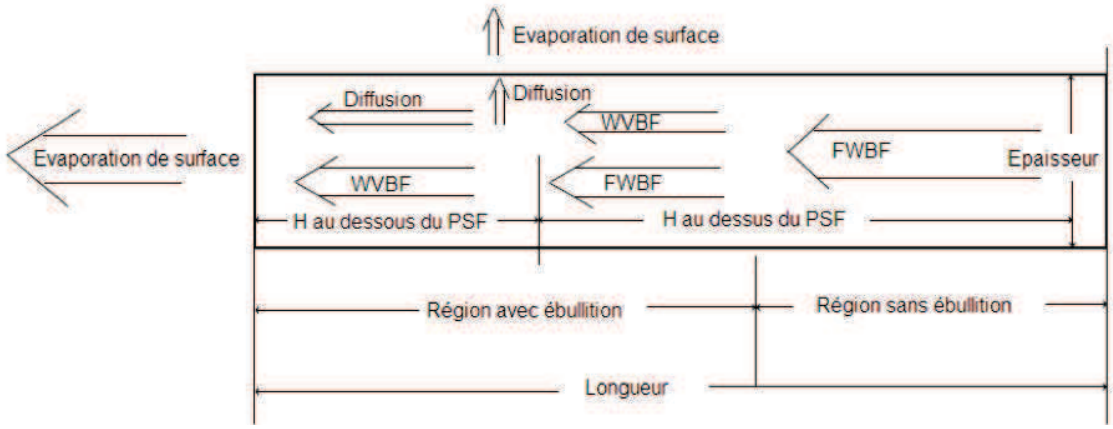


FIGURE 2.13 – *Représentation des flux propres au séchage sous vide[66]; FWBF (free water bulk flow) flux d'eau libre, VWBF (vapor water bulk flow) flux d'eau à l'état de vapeur*

La troisième phase du séchage sous vide commence lorsque l'eau n'est présente que sous forme d'eau liée et de vapeur d'eau. Le séchage prendra fin lorsque la teneur en eau d'équilibre sera atteinte dans l'ensemble du matériau.

Afin de retenir un mode de séchage adapté au procédé de fabrication des panneaux, nous nous sommes intéressés aux principaux modes de séchage sous vide utilisés dans l'industrie. Le processus de séchage peut se dérouler de façon continue (apport de chaleur par conduction) ou discontinue (apport de chaleur par convection lors de phases à pression atmosphérique au cours du séchage)[19]. Divers cycles de pression, d'humidité ou de température peuvent également être ajoutés. Les cycles entraînent une variation de la teneur en eau du bois en

surface, et permettent ainsi la relaxation des contraintes du bois par effet mécanosorptif [67, 64, 63]. Ils permettent aussi de créer des gradients de pression au sein du matériau et des gradients d'humidité relative de l'air qui accélèrent le séchage en fournissant de l'énergie au système, sans forcer les paramètres de pression et de température. La qualité finale des produits est ainsi améliorée par rapport aux séchages en séchoir [66].

Dans notre cas, l'intérêt du séchage sous vide est double puisqu'il peut avoir lieu en même temps que le pressage des panneaux sans ajouter d'étape supplémentaire. Une couverture chauffante sera appliquée sur la bâche qui permet la pression sous vide. Cette méthode fait appel au mécanisme de conduction. La couverture permet d'appliquer une température de l'ordre de 65°C au maximum, au contact du système à sécher. Elle est composée de résistances souples qui garantissent son adaptation aux formes du panneau réalisé.

2.3.3 Etude expérimentale du séchage du bois sous vide

Lors de la fabrication du contreplaqué sous vide, la pression absolue appliquée sur les panneaux varie de 150 à 250 mbar. La température d'ébullition de l'eau correspondant à cette pression est d'environ 55°C à 65° (Figure 2.12). Il s'agira de ne pas dépasser cette température pour ne pas endommager le bois par une l'ébullition de l'eau dans tout le matériau. Industriellement, le séchage sous vide est soumis à des cycles de température ou de pression variant en fonction de l'essence et des dimensions des produits à sécher. Un cycle de 140 minutes sera défini pour cette étude (Figure 2.14) [66]. Au cours de ce cycle, la température sera réglée à 45°C pendant les 30 premières minutes, puis elle sera programmée pour monter à 65°C. Un palier sera maintenu jusqu'à la 75ème minute du cycle, suivi d'une descente douce jusqu'à retrouver la température initiale de 45°C à la fin du cycle. Les cycles s'enchaineront en continu pendant toute la durée du séchage, soit environ 30h comme nous le verrons par la suite.

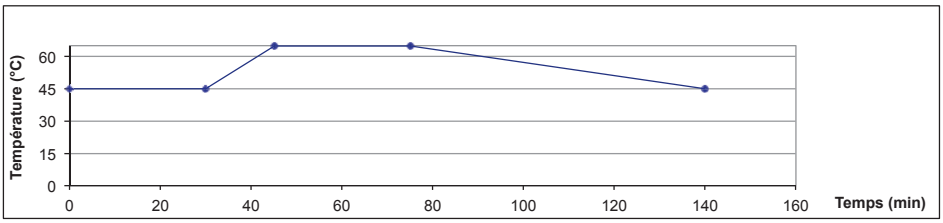


FIGURE 2.14 – *Cycle de séchage*

Lors d'un séchage sous vide, l'évacuation d'eau est complexe. L'eau sous forme de vapeur peut se condenser sur les parois des cellules et ré-humidifier le bois. Pour pallier à ce problème, nous avons utilisé des sels absorbants, placés sous les prises de vide. Le sel sélectionné après une étude des produits existants a été le gel de silice, un agent déshydratant et adsorbant. Il s'agit d'un polymère d'acide silicique $Si(OH)_4$ possédant une forte polarité permettant d'adsorber les molécules d'eau lorsqu'elles se trouvent à proximité d'une poche de gel (Figure 2.15). Le gel de silice a une gamme d'utilisation correspondant au procédé utilisé. Il possède un agent actif coloré indiquant le fonctionnement et la saturation du produit. Une fois saturé, il suffit de chauffer le gel pendant 5 heures à 120°C afin de le régénérer. Il se trouve sous la forme de billes de 1 à 3 mm.

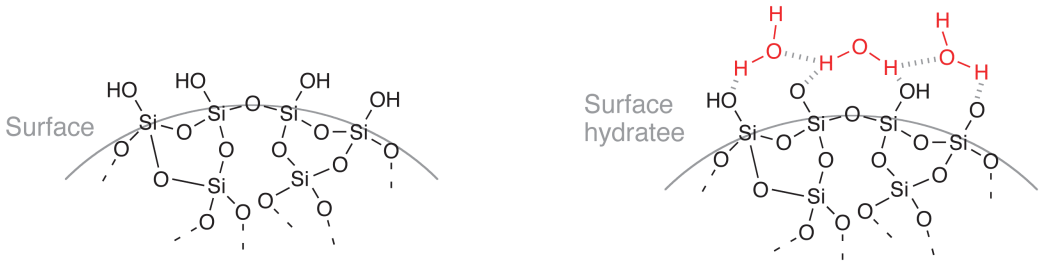


FIGURE 2.15 – *Mécanisme d'adsorption du gel de silice*

Nous avons effectué des tests, décrits ci-après, sur des panneaux sans colle afin de vérifier la faisabilité du procédé de séchage choisi. Cela permet également d'estimer le temps du processus de séchage.

La première étape consiste à analyser la perte en eau sur des échantillons comportant 5 plis de dimension 200 x 200 x 2,6 mm (dimensions humides) non collés. Il est nécessaire de connaître l'évolution des plis au cours du séchage sans ajouter dans un premier temps le

facteur supplémentaire du collage. Les facteurs mis en jeu sont la température, le temps et le cycle de séchage.

L'étude se concentre uniquement sur le séchage de plis à une teneur en eau initiale MC= 60%. La teneur en eau a été estimée avant les essais par pesée (cf. paragraphe 1.3.2). A la fin des tests, les échantillons ont été placés dans un four à 103°C afin d'obtenir leur masse anhydre. La teneur en eau réelle des panneaux a été ajustée à l'aide de l'Equation (1.2). Lors de cette étape, on a observé une différence d'aspect entre des plis séchés à l'air libre, et placée en étuve et des plis séchés sous vide avant d'être placés dans l'étuve. Les plis n'ayant pas subi de séchage cyclique sous vide ont été déformés (Figure 2.16), alors que les plis séchés au préalable sous vide, avec des cycles de température ont conservé leur géométrie plane initiale.

FIGURE 2.16 – *Déformation des plis suite au séchage à l'air libre (à gauche) sous vide avec cycles (à droite)*

L'adsorption d'eau par le gel de silice (de référence Silicagel Rubin) équivaut à 30% de la masse du gel. 400g de gel ont été introduits dans le système sous vide lors des essais. Le gel n'étant pas saturés d'eau après les essais, nous avons conservé cette quantité pour la suite.

Les plis de déroulage sont posés successivement à 0°/90° sur une plaque de Téflon. Ils sont placés sous vide selon le même procédé que les panneaux réalisés précédemment (Figure 2.17).

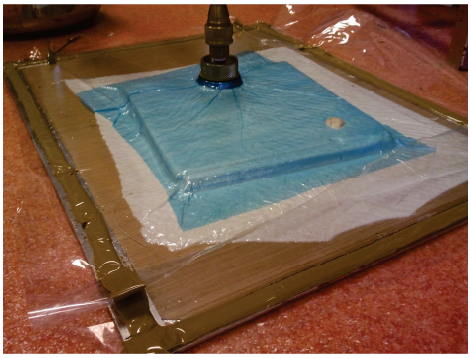


FIGURE 2.17 – *Panneau témoin (20°C, sans sels absorbants)*

Puis l'ensemble est placé dans un four afin d'être chauffé aux températures que nous allons expérimenter. Les échantillons sont sortis du vide pour être pesés après 2h, 4h, 6h, 8h, 22h et 24h. Cette brève interruption du vide influe sur le séchage. Cependant, ce processus étant appliqué à tous les panneaux, cela n'empêche pas la comparaison des résultats. Le Tableau 2.8 présente les différents modes de séchage étudiés, la teneur en eau finale correspondant à la mesure à l'issue des 24h.

Sel de silice	Température	Teneur en eau initiale	Teneur en eau finale
0 g	Continu 20°C	63 %	60 %
400 g	Continu 20°C	62 %	52 %
400 g	Continu 65°C	62 %	20 %
400 g	Cyclique 45°C-65°C (Figure 2.14)	66 %	15 %

TABLE 2.8 – *Résultats obtenus en fonction des cycles de séchage*

Nous avons également effectué un essai complémentaire à une température légèrement supérieure à la température d'ébullition de l'eau sous vide (70°C, sans cycles) afin d'observer l'effet de ce paramètre. Cet essai confirme le fait que la température est un facteur ayant une grande importance lors du séchage sous vide, puisque nous observons l'apparition de fentes bien supérieures sur le panneau séché à 70°C que sur celui séché à une température maximale de 65°C (Figure 2.18).

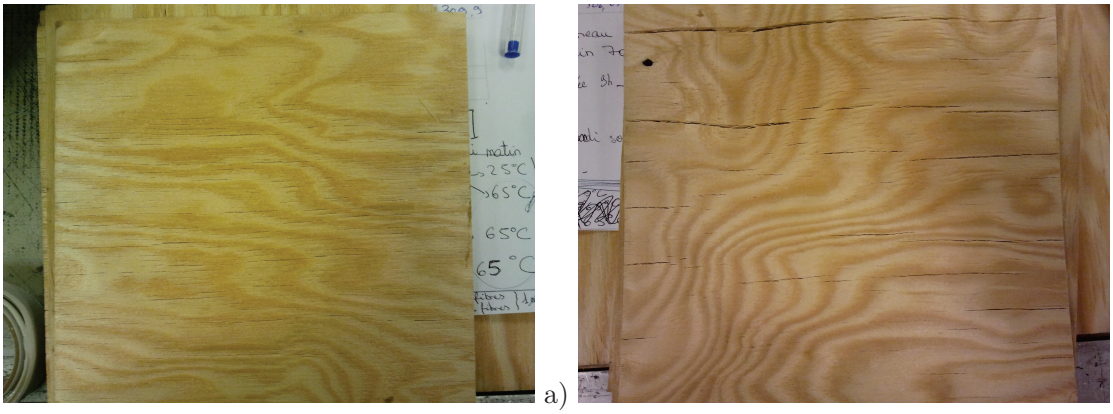


FIGURE 2.18 – *Comparaison des fentes créées lors d'un séchage cyclique à 65°C maximum (a) et d'un séchage constant à 70°C (b)*

Bien qu'utilisé par certains industriels, les connaissances sur l'adsorption du gel en présence de bois et dans un environnement clos sont quasiment nulles. Il donc important de connaître leur fonctionnement à 20/25°C. Lors de ces expériences, l'efficacité des agents actifs n'a vraiment été observable qu'après 6 heures sous vide. Sans modifier les paramètres de pression ou de température, la présence du gel de silice permet d'accroître la vitesse de perte en eau libre du bois.

En accord avec la littérature, les tests réalisés avec différents procédés de séchage ont montré que le gel de silice et les cycles augmentent la vitesse de séchage, tout en obtenant des plis de qualité, sans fissures. La courbe de séchage obtenue ainsi que les paramètres associés sélectionnés sont présentée dans la Figure 2.19.

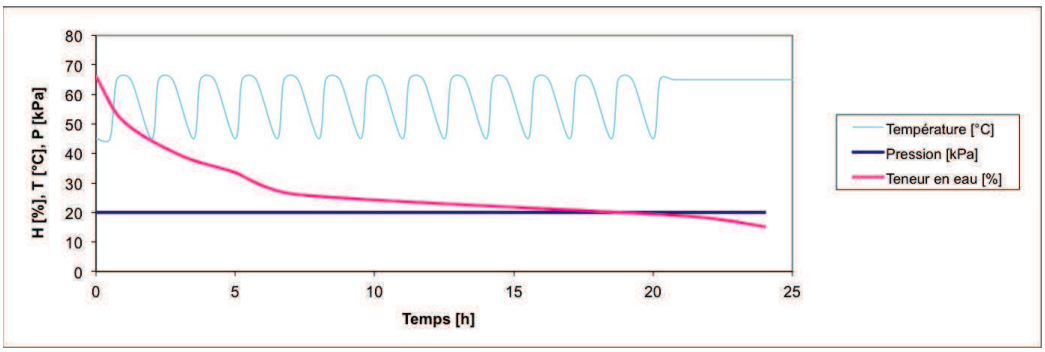


FIGURE 2.19 – *Paramètres de séchage définis*

Afin de valider le procédé de séchage mis en place, un essai a été réalisé sans ouverture intermédiaire de la bâche, pour un panneau sans colle et un panneau collé, séchés selon la procédure de séchage définie. Les résultats présentés dans le Tableau 2.9 montrent que le séchage peut être stoppé au bout de 24h pour une teneur en eau finale de 15%. La colle ne perturbe pas le séchage, elle l'améliorerait même pendant sa phase de polymérisation (correspondant aux premières heures du séchage), car elle réagit avec l'eau du bois pour sa réaction de polymérisation.

Panneau	Processus de séchage	Teneur en eau initiale	Teneur en eau finale (après 24h)
Avec colle	Séchage sous vide, avec des cycles de température et du gel de silice	66%	15%
Sans colle		65%	15%

TABLE 2.9 – *Comparaison du séchage de panneaux collés et non collés*

Cette partie a permis d'approcher les mécanismes gouvernant le séchage de nos panneaux sous vide. Les paramètres de séchage définis à la Figure 2.19 permettent d'obtenir des panneaux à une teneur en eau de 15% après 24h sous vide. Ce procédé peut être amélioré par des recherches plus poussées, mais il ne constitue pas l'objet principal de la présente étude. Les résultats obtenus satisfont au cahier des charges.

2.4 Synthèse et détermination des paramètres de fabrication retenus

Dans ce chapitre, nous avons évoqué les différents paramètres ayant un effet sur la qualité du collage. Une étude bibliographique a permis de fixer certains de ces paramètres, tels que le mode de stockage des panneaux, le procédé de collage, ou encore l'adhésif utilisé. Deux facteurs ont été étudiés plus précisément : la teneur en eau des plis de bois et le grammage appliqué lors du collage [48]. L'effet de ces deux facteurs a été observé par la réalisation et l'analyse statistique d'un plan d'expériences factoriel complet, comprenant 4 niveaux pour le facteur teneur en eau et deux niveaux pour le facteur grammage. La contrainte de cisaillement a été mesurée en tant que réponse du plan d'expériences, afin de quantifier la qualité du collage selon la norme NF EN 314 [48]. Les meilleurs résultats sont obtenus pour des panneaux de

contreplaqué collés à l'état vert, entre le point de saturation des fibres et environ 60% de teneur en eau. Dans cette plage, les propriétés des joints en cisaillement sont supérieures aux valeurs préconisées par la norme en vigueur. Pour des teneurs en eau très élevées, supérieures à 60%, les propriétés mécaniques diminuent. En dessous du PSF, il n'y a pas suffisamment d'eau pour assurer la polymérisation de l'adhésif au niveau du joint de colle.

Les panneaux ont été collés à l'aide d'un adhésif polyuréthane spécialement développé pour cette étude, avec un viscosité de 1000 mPa.s, et un temps de polymérisation de 4h. L'adhésif a été appliqué à un grammage de 250 g/m^2 et de 500 g/m^2. Pour des raisons économiques et environnementales, un grammage de 250 g/m^2 d'adhésif est préférable ; peu de différences ayant été notées entre les deux grammages. Même si des propriétés en cisaillement légèrement meilleures sont obtenues pour le grammage le plus élevé, les valeurs mesurées pour G= 250g/m^2- MC= 30% et MC= 60%, sont dans tous les cas supérieures aux valeurs requises par la norme.

S'agissant du collage du bois à l'état vert, il est nécessaire d'assurer le séchage du produit collé. Les cycles thermiques et le gel absorbant sont deux paramètres permettant de réduire le temps de séchage. En effet, ils diminuent l'humidité relative de l'air et créent un gradient de pression partielle de vapeur accélérant le séchage. Les paramètres de séchage ont été fixés en jouant sur ces facteurs de manière à obtenir des panneaux ayant un temps de séchage relativement court sans pour autant forcer sur les paramètres température et pression, ce qui pourrait entraîner certaines dégradations des panneaux. La pression du vide se situe autour de 200 mbar, et la température varie de 45 à 65°C. On peut également envisager des cycles de pression, à la place des cycles de température réalisés, en pilotant le débit de la pompe à vide au cours du séchage.

On remarque que le séchage provoque des fissures parallèles aux fibres de bois. En effet, il engendre des contraintes dues aux capacités de retrait différentes dans les directions longitudinales et tangentielles des plis collés, disposés à 0°/90°. Toutefois, cette fissuration n'est pas pénalisante pour les panneaux lors d'une utilisation en tant que bordé de bateau, puisqu'ils sont enduits d'une couche de résine et de fibres de verre dans la suite du procédé. Elle ne sera pas plus étudiée dans cette étude, mais ouvre des perspectives intéressantes pour la suite, pour d'autres applications industrielles.

Une fois les paramètres de fabrication des panneaux fixés, nous nous intéresserons dans le chapitre suivant à la compréhension des phénomènes observés. La relation qui est observée entre les propriétés mécaniques du joint de colle, la teneur en eau et le grammage d'adhésif sera expliquée grâce à des observations microscopiques et microtomographiques des joints de colle, et à une analyse des propriétés de surface des matériaux en présence.

Une autre partie de ce travail sera consacrée à la caractérisation mécanique des panneaux réalisés avec les paramètres choisis ici. En effet, la connaissance des propriétés mécaniques des panneaux est une étape indispensable en vue d'une utilisation industrielle. Après avoir spécifié les charges s'appliquant sur la coque pendant la vie du bateau, le bureau d'étude doit connaitre les caractéristiques des panneaux à mettre en oeuvre afin de dimensionner correctement la structure. Des tests spécifiques aux plaques en flexion-torsion et cisaillement seront ainsi réalisés afin de mieux connaitre le comportement des panneaux de contreplaqué.

Chapitre 3

Caractérisation de la qualité du collage du pin Maritime à l'état vert

Nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent que le comportement mécanique du joint de colle était dépendant des paramètres de collage étudiés (teneur en eau de bois et grammage d'adhésif). Nous nous sommes donc intéressés aux phénomènes mis en jeu lors de la formation du joint de colle pour comprendre les mécanismes sous-jacents. Lors du collage des plis déroulés pour former le contreplaqué, les joints doivent assurer une continuité entre les pièces de bois à assembler. Il ne doivent pas être une zone de faiblesse : les propriétés mécaniques du substrat doivent être assurées quelle que soit la sollicitation appliquée. La formation du polyuréthane et son adhésion sur un substrat humide est donc une étape essentielle garantissant la qualité du collage. Il s'agit aussi d'un mécanisme complexe faisant intervenir de nombreux phénomènes, que nous détaillerons dans ce chapitre afin de comprendre les différences mécaniques observées au travers des tests de cisaillement présentés précédemment.

3.1 Aspects théoriques du collage

« Le collage correspond à la mise en contact de deux surfaces de façon durable ; l'ensemble formé devra résister aux sollicitations mécaniques extérieures envisagées, mais aussi aux va-

riations prévisibles d'humidité et de température » [55]. Afin de répondre à ces exigences, il est utile de définir les phénomènes qui régissent le collage, permettant la formation de liens entre l'adhésif et les constituants du bois.

3.1.1 Différents types de liaisons entre substrat et adhésif

Les liaisons entre le substrat et l'adhésif peuvent être de différentes natures et complémentaires. Les auteurs travaillant sur ce sujet, notamment A. Pizzi, K. L. Mittal, J. J. Meynis de Paulin, D. J. Gardner, s'accordent à dire que ces liaisons sont mécaniques (ancrage), chimiques (liaisons covalentes) et physiques (liaisons hydrogènes, Van der Waals, électrostatiques, etc.) [68, 69, 70]. Les différents types de liaisons sont présentés ci-après, qui entraînent la formation d'un joint de colle lorsque l'adhésif liquide polymérise au contact de la surface solide.

- L'ancrage mécanique : selon les paramètres de collage, la pénétration de la colle dans les trachéides est plus ou moins importante, ce qui fait varier la qualité de l'adhésion. Une étude sur le collage de contreplaqués en pin Maritime réalisée au FCBA par G. Elbez (Nov. 1995) a montré qu'un collage performant et durable est la conséquence d'une répartition régulière de la colle à l'intérieur d'environ trois couches de cellules de bois, soit sur une épaisseur proche de 100 µm. Si la pénétration de la colle est excessive, le joint est quasi nul ; on note dans ce cas une performance mécanique élevée uniquement à sec mais peu de performance lors d'une exposition climatique sévère. A l'inverse, si la pénétration est trop faible, il n'y a pas d'ancrage mécanique et la tenue du collage est faible. Le joint de colle a été observé par fluorescence dans plusieurs travaux [38, 71] pour simuler le flux de d'adhésif dans les cellules de bois.

- L'attraction physique est due à l'existence de liaisons de faible énergie créées entre les molécules du bois et celles de l'adhésif. Il s'agit principalement des forces de Van der Waals et des liaisons hydrogène. Elles dépendent de la polarité des matériaux et des mouvements d'électrons entre les molécules du substrat et de l'adhésif.

– L'adhésion chimique prend en compte la formation de liaisons fortes entre le substrat et l'adhésif, créées lors de réactions chimiques entre ces deux éléments. Ces liaisons, de type covalentes par exemple, permettent d'atteindre des énergies de liaison élevées. Les analyses par Résonance Magnétique Nucléaire ou Infrarouge peuvent permettre l'identification des liaisons chimiques de manière qualitative.

L'association de ces phénomènes permet d'expliquer les propriétés du joint de colle, avec différents degrés d'implication de chacun en fonction de l'adhésif et du substrat utilisé [59, 69, 55].

Le procédé de collage peut être décomposé en 3 séquences (Figure 3.1), ayant chacune son importance dans la qualité finale du joint. L'adsorption (phase 1) et l'absorption (phase 2) sont les phénomènes les plus étudiés pour évaluer la qualité de l'adhésion. La vérification de l'assemblage doit être finalement réalisé par les tests mécaniques (phase 3). Cette dernière étape a été présentée dans le chapitre 2.

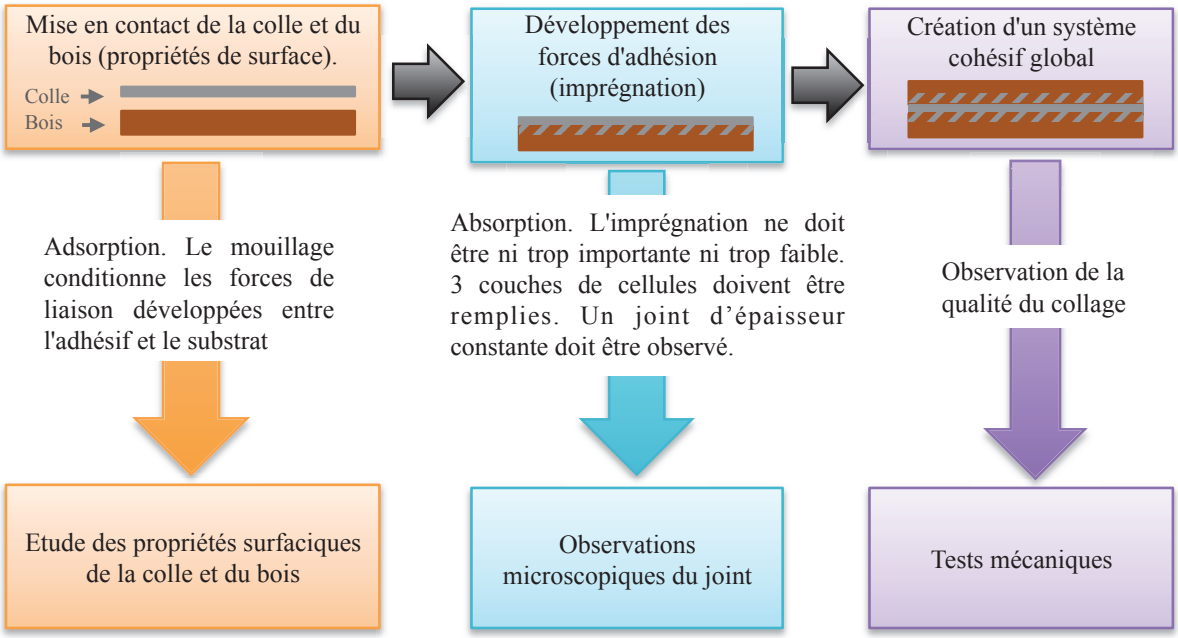


FIGURE 3.1 – *Séquences de collage et moyens de contrôle*

L'affinité entre le bois et l'adhésif peut être expliqué par l'approche thermodynamique. Ce modèle est basé sur le principe qu'un contact intime entre le substrat et l'adhésif doit être obtenu pour permettre la création et la densification des liaisons intermoléculaires (physiques ou chimiques). Les phases 1 et 2 (Figure 3.1) présentées seront étudiées à travers des mesures de mouillabilité permettant d'exprimer puis d'interpréter le modèle thermodynamique de l'adhésion. La phase 1 d'adsorption sera étudiée par des mesures de mouillabilité. La phase 2 d'absorption sera analysée au travers d'observations microscopiques des joints de colle. Ces mesures apportent des connaissances sur le comportement de l'adhésif et peuvent servir de critère d'évaluation de la qualité du collage. Cependant, la mouillabilité et l'ancrage mécanique ne peuvent pas être directement corrélés aux performances de collage, car l'adhésion est un phénomène plus complexe, mais ils peuvent être un indicateur suffisant pour la définition des paramètres de collage.

3.1.2 Aspects théoriques de la mouillabilité appliqués au bois

La mouillabilité correspond à l'aptitude du liquide à créer des liaisons intermoléculaires à l'interface avec le bois, exprimée en énergie de mouillage, E_w ou d'adhésion, E_{AD}. Elle dépend des propriétés de surface des 3 phases en présence et est caractérisée par la mesure de l'angle de contact formé entre le solide, le liquide et l'air lorsqu'une goutte de liquide est déposée à la surface du substrat. ϑ correspond à l'angle formé entre les interfaces liquide/vapeur et solide/liquide au point de contact solide/liquide (Figure 3.2). Il résulte des forces cohésives qui maintiennent la goutte en forme et évitent l'étalement, et des forces adhésives entre le solide et le liquide, entraînant l'étalement de la goutte à la surface.

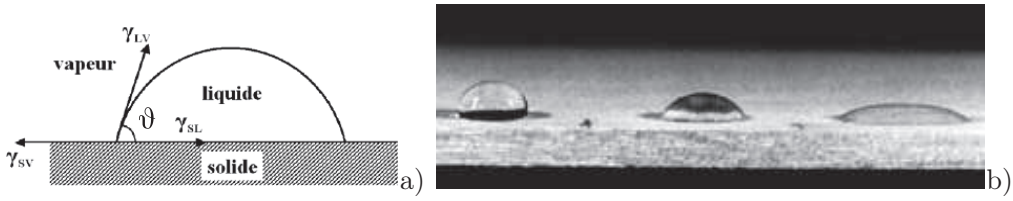


FIGURE 3.2 – *a) Schématisation de la goutte de liquide sur le substrat bois, avec γ_{SV} l'énergie de surface du solide, γ_{LV} la tension de surface du liquide, γ_{SL} l'énergie d'interaction solide/liquide. b) 3 gouttes ont été appliquées à la surface simultanément, et ont été photographiées après 30 s. La goutte de gauche a un grand angle de contact, alors que celle de droite montre une meilleure mouillabilité avec un plus faible angle de contact* [20].

Le degré de mouillabilité est défini par un équilibre entre ces deux types de forces. Plus l'angle est faible, plus le liquide s'étale à la surface et plus le support est susceptible de favoriser des liaisons physiques et chimiques avec l'adhésif. Si $\vartheta > 90°$, le mouillage est défavorable, il n'y aurait en théorie pas d'imprégnation.

Dans le cas de surfaces idéales non poreuses, cet angle de contact initial ne varie pas, ou très peu au cours du temps. Au contraire, une évolution très rapide de cet angle sur le bois est constatée. 3 phases successives sont observées [72] :

1. formation d'un angle de contact initial ϑ_i,
2. étalement du liquide à la surface ,
3. pénétration du liquide dans le bois jusqu'à atteindre un angle d'équilibre ϑ_e (remarque : le bois est hygroscopique, les molécules des liquides polaires migrent dans les trachéides et il est souvent impossible d'obtenir un angle d'équilibre ϑ_e, à moins de saturer le bois) [73].

La mesure de l'angle de contact est influencée par les propriétés du bois [73, 72, 74], notamment par sa porosité, sa rugosité et son hétérogénéité, mais également par son énergie de surface. En effet, les propriétés de surface du bois évoluent par exemple en fonction de la teneur en eau, de la température, du vieillissement du bois (dû aux remontées des extractibles à la surface) ou encore des traitements chimiques. Afin de limiter l'influence de ces paramètres non contrôlés lors des mesures d'angles de contact, nous utiliserons du bois provenant du même lot stocké sous eau. Tous les bois utilisés auront donc le même vécu.

Concernant la mesure de l'angle de contact, elle dépend principalement du temps après dépôt, des paramètres de calcul accessibles par l'équipement et du volume des gouttes. La méthode choisie parmi les différentes possibilités de mesure des angles de contact sur le bois est celle de la goutte sessile (dépôt d'une goutte sur le substrat, comme illustré sur la Figure 3.2), de par sa simplicité et la possibilité de réaliser des mesures comparatives. D'autres méthodes seraient envisageables pour la mesure des paramètres de mouillabilité [73] (méthode Wilhelmy, chromatographie inverse des gaz, capillarité par exemple), mais ne seront pas utilisées ici.

Les énergies de mouillage (E_W, énergie fournie par le système lorsqu'on impose un liquide sur la surface solide) ou d'adhésion (E_{AD}, énergie qu'il faut fournir pour séparer le liquide du substrat) permettant d'évaluer la mouillabilité sont directement liée aux enthalpies de surface des matériaux en présence. La connaissance des propriétés thermodynamiques de surface du bois et de la colle est donc essentielle pour optimiser le procédé de collage en optimisant les interactions bois/colle. Nous déterminerons dans un premier temps, les enthalpies de surface et d'interface des matériaux. On approchera ainsi les tensions de surface des liquides utilisés (γ_{LV}, en mJ/m^2), les énergies libres de surface des bois à différentes teneurs en eau (γ_{SV}, en mJ/m^2), les énergies d'interaction liquide / solide (I_{SL}, en mJ/m^2). Dans un second temps les énergies de mouillage pour les différentes configurations étudiées seront calculées.

3.2 Mesures expérimentales des paramètres thermodynamiques de surface des matériaux

3.2.1 Première étape : détermination de l'énergie libre de surface du solide

Cette propriété de surface influence l'adsorption et la mouillabilité. Elle est obtenue en mesurant l'angle de contact formé entre le bois et des liquides ayant des tensions de surfaces connues. Différentes approches peuvent être utilisées [73, 75] :

- la méthode de Zisman et l'approche "Equations d'état" : ce sont des modèles approximatifs qui ne donnent pas assez d'informations sur les propriétés de surface du bois,
- le modèle à trois composantes, Lifshitz-van der Waals, acide de Lewis et base de Lewis : il donne un maximum d'informations sur la composition chimique du bois (cellulose, lignine...), mais il est trop complexe par rapport aux résultats comparatifs que l'on souhaite obtenir,
- le modèle à deux composantes définit une composante polaire et une composante dispersive (modèle de Wu, Fowkes, Owens et Wendt [76]) : ce modèle, qui permet de comparer l'énergie de mouillage pour différentes configurations sans tenir compte des propriétés acido-basiques du bois, sera retenu pour notre étude. En effet, il ne s'agit pas de répondre aux exigences physico-chimiques de l'angle de contact au sens strict. On parlera ici de paramètres apparents ; ils permettront de comparer les affinités entre le bois et la colle pour différentes

configurations. Les mesures des angles de contact permettront d'obtenir des informations relatives aux paramètres thermodynamiques de surface en fonction de l'adhésif et de la teneur en eau du bois.

Dans le modèle choisi, l'énergie de surface d'un solide γ_{SV} et la tension de surface d'un liquide γ_{LV} peuvent être divisées en deux composantes polaire (P) et dispersive (D), comme l'expriment les Equations (3.1) et (3.2).

$$\gamma_{SV} = \gamma_S^P + \gamma_S^D \tag{3.1}$$

$$\gamma_{LV} = \gamma_L^P + \gamma_L^D \tag{3.2}$$

La méthode utilisée pour calculer la tension de surface du bois aux différentes teneurs en eau consiste à déterminer successivement γ_S^D, la composante dispersive de l'énergie de surface du solide et γ_S^P, sa composante polaire, selon la méthode détaillée par G. Elbez [76]. Cette méthode est synthétisée dans l'Annexe 6. L'angle de contact formé entre le substrat bois et une goutte de liquide dont les composantes de surface (γ_L^P et γ_L^D) sont connues sert de base à ces mesures, réalisées à température ambiante à l'aide d'un goniomètre Kruss. Le liquide est placé dans une seringue, perpendiculaire à la surface étudiée. Les gouttes sont photographiées chaque 0,04 seconde pendant 1 min grâce à une caméra à haute résolution et les angles de contact sont mesurés grâce au logiciel intégré au goniomètre (Figure 3.3).

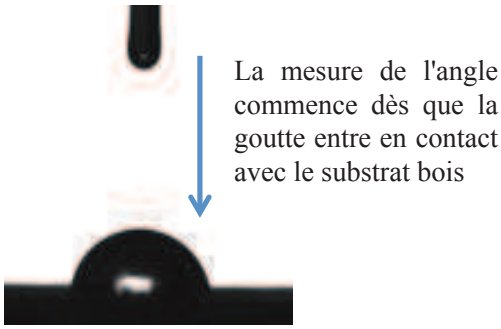


FIGURE 3.3 – *Photographie d'une goutte tombée au contact du substrat bois*

Différents liquides ayant des composantes polaire et dispersive connues ont permis d'obtenir les valeurs nécessaires au calcul de la tension de surface du bois. Des liquides uniquement dispersifs ont été utilisés dans un premier temps pour le calcul de γ_S^D.

Puis des liquides possédant une composante polaire en plus de la composante dispersive ont été déposés sur les surfaces de bois, pour obtenir les valeurs de γ_S^P. Le Tableau 3.1 récapitule les propriétés superficielles des liquides utilisés [76].

Liquides	γ_L^P (mJ/m^2)	γ_L^D (mJ/m^2)
Diiodométhane	2,3	48,5
α-bromonaphthalène	0	44,6
Glycérol	26,4	37

TABLE 3.1 – *Propriétés de surface des liquides utilisés*

Les plis de déroulage destinés à la fabrication des panneaux de contreplaqué ont servi de support à ces mesures. Des échantillons de bois de dimensions humides 2,6 x 20 x 50 mm^3 ont été portés à différentes conditions hygroscopiques. Les teneurs en eau de 12%, 30%, 60%, 75%, 100% ont été choisies pour être en accord avec les paramètres de réalisation du plan d'expériences proposé au chapitre 2.

10 mesures ont été faites pour chaque configuration. La moyenne des angles de contact est utilisée pour construire les courbes de ϑ en fonction du temps. Afin d'obtenir des valeurs comparables, l'angle de contact intégré dans les équations a été relevé au point de transition entre la phase d'étalement et la phase d'absorption du liquide dans le bois, comme illustré sur la Figure 3.4. Cette méthode, utilisée par M. Petric [77], a fourni des informations satisfaisantes pour la détermination et la comparaison d'angles de contact apparents.

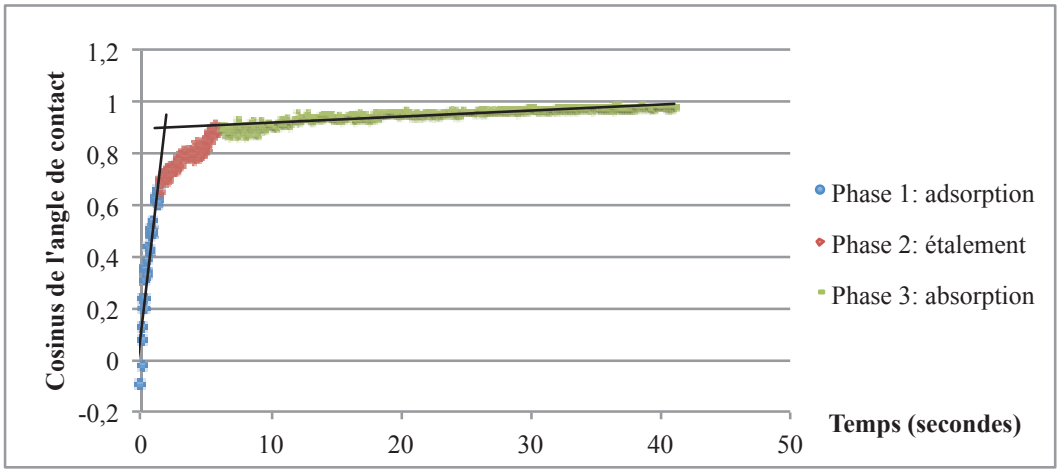


FIGURE 3.4 – *Cosinus de l'angle de contact en fonction du temps pour une goutte de glycérol déposée sur la surface d'un bois à 100% de teneur en eau*

Le Tableau 3.2 présente les composantes polaires et dispersives de l'énergie de surface du bois.

Teneur en eau du bois	γ_S^D	γ_S^P
12%	42,2	1,6
30%	39,2	3,5
60%	30,5	9,9
75%	27,8	19,9
100%	32,7	24,1

TABLE 3.2 – *Paramètres thermodynamiques du bois en surface à différentes teneurs en eau*

On remarque que la composante polaire γ_S^P de cette enthalpie augmente avec la teneur en eau du bois, alors que la composante dispersive à tendance à diminuer. En effet, l'eau est une molécule polaire qui modifie les propriétés de surface du bois en augmentant la composante polaire de l'énergie de surface.

La Figure 3.5 nous permet de visualiser cette évolution, de tendance linéaire.

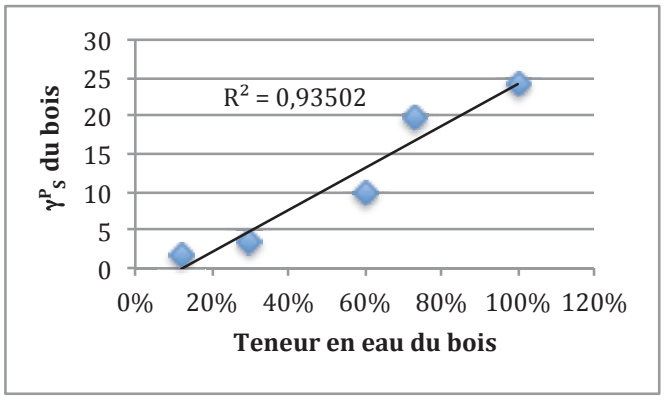


FIGURE 3.5 – *Composante polaire de l'énergie de surface du bois γ_S^P en fonction de sa teneur en eau (mouillant : glycérol)*

Après avoir déterminé les énergies surfaciques du bois en fonction de la teneur en eau, les propriétés de surface de l'adhésif mis au contact du bois lors du collage doivent être déterminés afin de pouvoir caractériser l'affinité entre les deux phases.

3.2.2 Deuxième étape : détermination de la tension de surface du liquide

Les tensions de surface de plusieurs adhésifs sont comparées, afin d'obtenir les paramètres thermodynamiques permettant le calcul de l'énergie de mouillage en présence de colle. La méthode de la goutte pendante est utilisée pour calculer la tension de surface des liquides, γ_{LV}. Ce paramètre est lié aux forces de cohésion qui tendent à minimiser la surface de la goutte, lui conférant ainsi une forme particulière. L'approche de la mesure est développée dans l'Annexe 6, elle consiste à remplir une seringue de liquide et à former une goutte au bout de l'aiguille, retenue par les forces capillaires. Les mesures de γ_{LV} sont réalisées à l'aide du goniomètre Kruss, qui utilise le contour de la goutte pour calculer la tension de surface totale du liquide.

La tension de surface est mesurée selon cette technique pour la colle polyuréthane utilisée de référence RP 2554, ainsi que pour des colles modifiées par ajout de charges ou d'autres composés permettant d'augmenter la viscosité, sans pour autant modifier la base des adhésifs. Ces variantes de colle ont été réalisées dans un souci d'amélioration de la qualité du collage. En effet, comme nous le présenterons au paragraphe 3.3.1, il a été observé que l'adhésif RP 2554 migrait de manière excessive dans le bois, dans la plupart des cas étudiés. Un ajout de charges ou une augmentation de la viscosité est une solution envisagée pour permettre l'application d'un grammage plus faible tout en conservant les performances mécaniques observées. Les résultats sont répertoriés dans le Tableau 3.3.

Adhésifs	Propriétés	γ_L total	γ_L^D	γ_L^P
RP 2554	Sans charges, viscosité : 1000 mPa.s	30	28,1	1,9
RP 2558 C	Avec charges, viscosité : 1000 mPa.s	31,3	27,9	3,4
RP 2558 B	Avec charges, viscosité 2400 mPa.s	32,2	29,7	2,5

TABLE 3.3 – *Propriétés de surface de différents adhésifs polyuréthane*

La colle polyuréthane utilisée est majoritairement dispersive, quelle que soit la viscosité, ou la présence de charges (ici des microfibres de verre) dans l'adhésif.

3.2.3 Troisième étape : estimation de l'énergie de mouillage de la colle sur le bois

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'angle formé entre la goutte et le substrat dépend entre autres des forces de liaison développées à l'interface. Un angle faible permet de penser que des interactions chimiques ou physiques nombreuses ont lieu entre le liquide et le solide. La littérature s'accorde à dire qu'un mouillage faisant intervenir un angle de 30° est optimal [76]. Un mouillage trop important (angle inférieur à 30°) est également néfaste à l'adhésion, il aura tendance à augmenter la pénétration dans les cellules du bois. En effet, mouillabilité et pénétration sont liées, car la même mouillabilité qu'en surface est présente à l'intérieur des cellules de bois. Cependant, la pénétration dépend également d'autres paramètres, comme le montre l'équation de Washburn (Equation (3.3)) :

$$h^2 = (\gamma_L.r.cos\vartheta.t)/2\eta \tag{3.3}$$

Ainsi, le front de pénétration de la colle dans le bois h (mm) dépend du rayon des pores r (mm), de l'angle de contact formé entre le liquide et le solide ϑ, de la viscosité de la colle η (mPa.s), du temps t (s) et de la tension de surface de la colle γ_L (mJ/m^2).

Cette relation s'applique dans le cas d'un liquide en contact avec un solide poreux, lorsque le liquide ne submerge pas le solide.

La montée de l'adhésif dans les trachéides du bois due à la force capillaire est donc bien décrite par l'Equation (3.3) [78].

L'effet de la teneur en eau sur les propriétés de mouillage du bois par la colle RP 2554 et sur l'énergie de mouillage (E_w) est mise en évidence dans ce paragraphe. Les mesures effectuées seront corrélées à des observations microscopiques montrant l'imprégnation de l'adhésif dans le bois pour différentes configurations étudiées. Une relation entre propriétés mécaniques / adsorption / absorption pourra être établie.

Ces travaux ont fait l'objet d'une mission scientifique au sein de l'Université d'Aalto, à Helsinki (Finlande). Le même protocole que celui utilisé pour les liquides apolaires sur le bois a été suivi pour la préparation des échantillons et pour la mesure de l'angle de contact.

La surface des plis de 50 x 20 x 2,5 mm est laissée brute après déroulage. Les mesures sont réalisées à 20°C, sur la surface non dégradée par le déroulage du pli de bois et avec un goniomètre CAM 200 (KSV Instruments Ltd).

Nous avons obtenu des résultats homogènes pour des gouttes déposées dans les mêmes conditions de teneur en eau du bois. En effet, les coefficients de variation sont compris entre 3% et 18% pour tous les essais. La Figure 3.6 compare les mesures des angles de contact pour 6 gouttes d'adhésif RP 2554 déposées sur le substrat bois à MC= 30%.

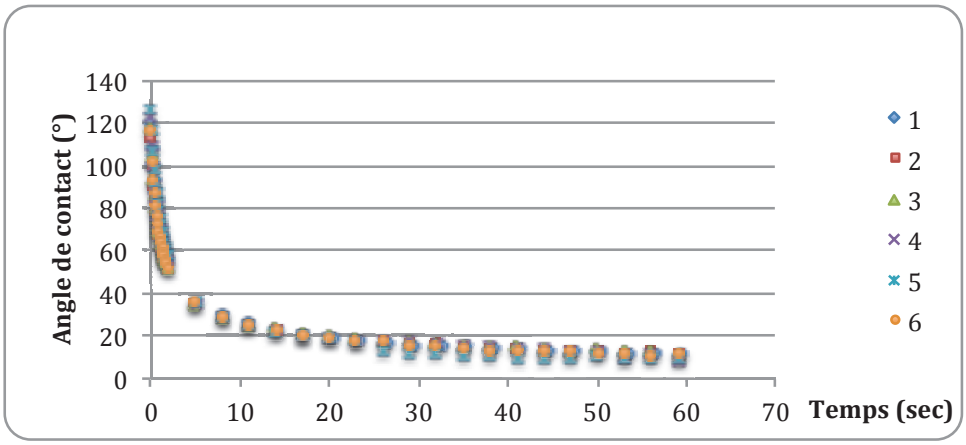


FIGURE 3.6 – *Mesure d'angles de contact sur 6 échantillons de pin Maritime à MC= 30%, RP 2554.*

La faible variabilité permet de penser que les écarts entre les courbes obtenus dans la suite de l'étude dépendent des paramètres de l'essai, ils ne peuvent pas être considérés comme des erreurs de mesure ou des résidus. Dans la Figure 3.7, chaque courbe représente la valeur moyenne de 6 gouttes testées dans les mêmes conditions. Nous pouvons voir que l'angle de contact augmente avec la teneur en eau du bois, pour l'adhésif RP 2554 (Figure 3.8).

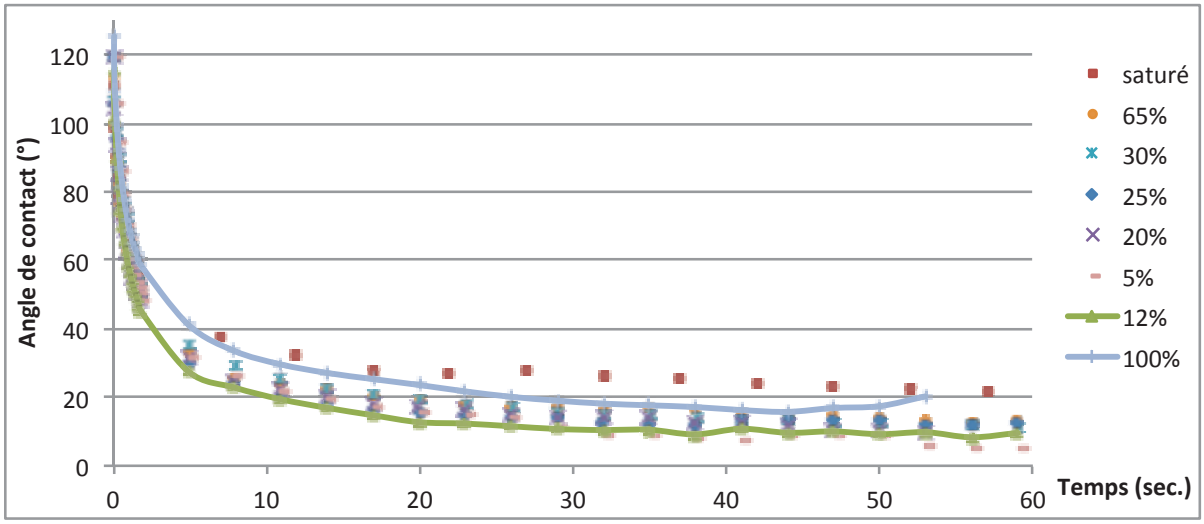


FIGURE 3.7 – *Mesure des angles de contact formés entre l'adhésif RP 2554 et le substrat pin Maritime en fonction du temps et de la teneur en eau du pli de bois*

La mouillabilité est meilleure pour les teneurs en eau les plus faibles. L'eau du bois réduit les affinités entre le bois et la colle. Ce phénomène peut être expliqué par l'utilisation d'une colle à tendance apolaire, sur une surface bois dont la polarité augmente lorsque sa teneur en eau augmente.

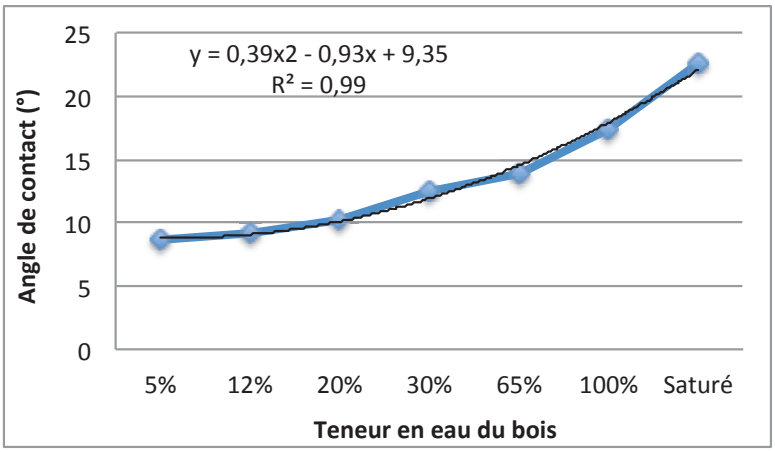


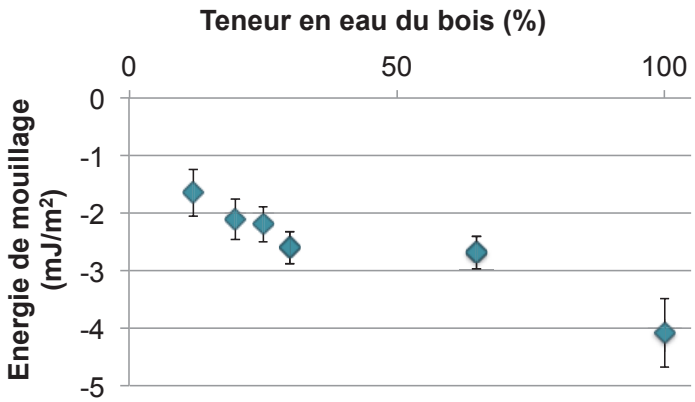
FIGURE 3.8 – *Comparaison des angles de contact moyens à différentes teneurs en eau après 50 sec.*

L'angle de contact formé entre le bois et l'adhésif lorsqu'une goutte de colle est déposée à la surface du pli permet de calculer l'énergie de mouillage E_W.

$$E_w = \gamma_{LV}(cos\vartheta - 1) \tag{3.4}$$

L'énergie de mouillage correspond à l'énergie fournie par le système (= valeurs négatives de l'énergie) lorsqu'on impose un liquide à la surface du substrat. Plus cette énergie est faible en valeur absolue et plus le liquide a d'affinités avec le substrat.

La Figure représente l'évolution de l'énergie de mouillage en fonction de la teneur en eau. Elle diminue significativement jusqu'à un palier de MC= 30% à MC= 65% puis diminue à nouveau pour une teneur en eau de 100%.



cos ϑ	Teneur en eau	E_w
0,87	100	-4,08
0,9	65	-2,7
0,9	30	-2,6
0,93	25	-2,2
0,95	20	-2,1
0,97	12	-1,7

FIGURE 3.9 – *Energie de mouillage du bois avec la colle 2554 en fonction de sa teneur en eau*

Le mouillage est très important pour un bois sec, avec l'adhésif apolaire utilisé. Une énergie de mouillage trop proche de 0 entraîne une pénétration trop importante de la colle dans les cellules du bois et le joint formé est faible. Ce phénomène est confirmé par les observations microscopiques du joint, qui permettent de visualiser la structure interne du contreplaqué collé à l'état vert.

3.3 Observation par imagerie de l'imprégnation de la résine dans le bois

3.3.1 Observations microscopiques

Pour obtenir des informations sur la morphologie du joint, des observations microscopiques ont été réalisées sur les joints de colle des panneaux à l'Université d'Aalto, Département de Forest Products Technology. Parmi les propriétés des liaisons substrat/adhésif décrites dans la section 3.1.1, le degré de pénétration de l'adhésif dans les cellules du bois affecte significativement les performances du joint de colle [43, 45, 42]. Six échantillons de 10 x 20 x 8 mm^3 sont extraits à différents endroits de chaque panneau. Des lames de 20 µm sont découpées à l'aide d'un microtome et préparées pour être observées au microscope optique. On observe une pénétration significative de la colle dans le bois, quels que soient les paramètres étudiés. Une grande quantité de colle est transportée loin du joint de colle par les rayons ligneux ou les fentes de déroulage. La Figure 3.10 illustre les différents schémas d'imprégnation de la colle dans les cellules du bois.

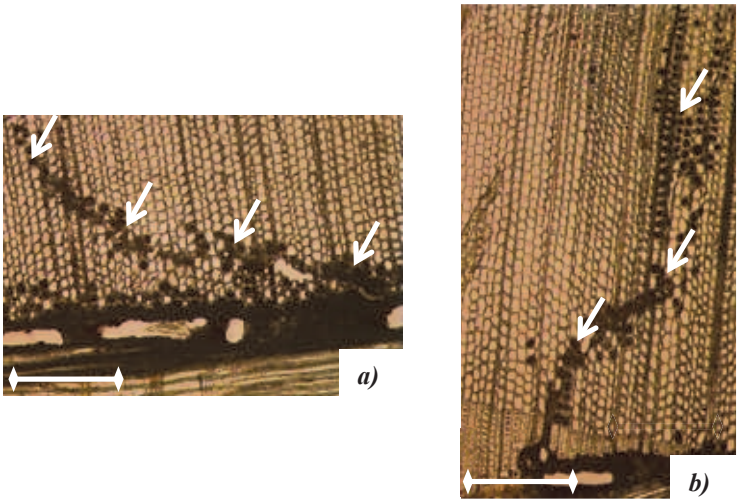


FIGURE 3.10 – *Photos du joint de colle observé par microscopie optique - Barre d'échelle = 0,5 mm. Imprégnation de la colle (RP 2554) dans le bois (pin Maritime) : les flèches montrent les cellules remplies d'adhésif. a), b) Configurations 500-60%.*

Sur cette Figure 3.10, la photo a) montre une fente de déroulage imprégnée de colle, les

cellules remplies de colle autour ou dans les rayons ligneux sont présentées sur la photo b).

La pénétration de colle dans le bois semble plus importante sur les bois à faible teneur en eau (< 30%). Pour un bois à l'état sec, la colle est absorbée dans les cellules et les fentes de déroulage. Très peu d'adhésif reste au niveau du joint, avec pour conséquence une épaisseur de joint quasi-nulle et 0 à 1 couche de cellule remplie de manière continue de part et d'autre du joint, quelle que soit la quantité de colle appliquée (250 g/m^2 ou 500 g/m^2 ; MC = 12%, Figure 3.11 a)). On observe la même morphologie de joint pour des bois collés aux alentour de 30%, avec un grammage de 250 g/m^2 tandis que l'imprégnation est a priori plus régulière et concerne 2 à 3 couches de cellules pour 500 g/m^2, avec un joint de 90 µm d'épaisseur.

Pour des teneurs en eau du bois supérieures au point de saturation des fibres (MC ≈30%), la différence entre les deux quantités de colle testées est plus significative. Les joints formés à MC= 60% et MC= 100% ont une morphologie similaire, avec une épaisseur moyenne respective de 100 µm et 80 µm entre deux plis de bois pour G= 250 g/m^2, alors qu'une épaisseur de 160 µm est mesurée pour le grammage G= 500 g/m^2 pour les deux teneurs en eau.

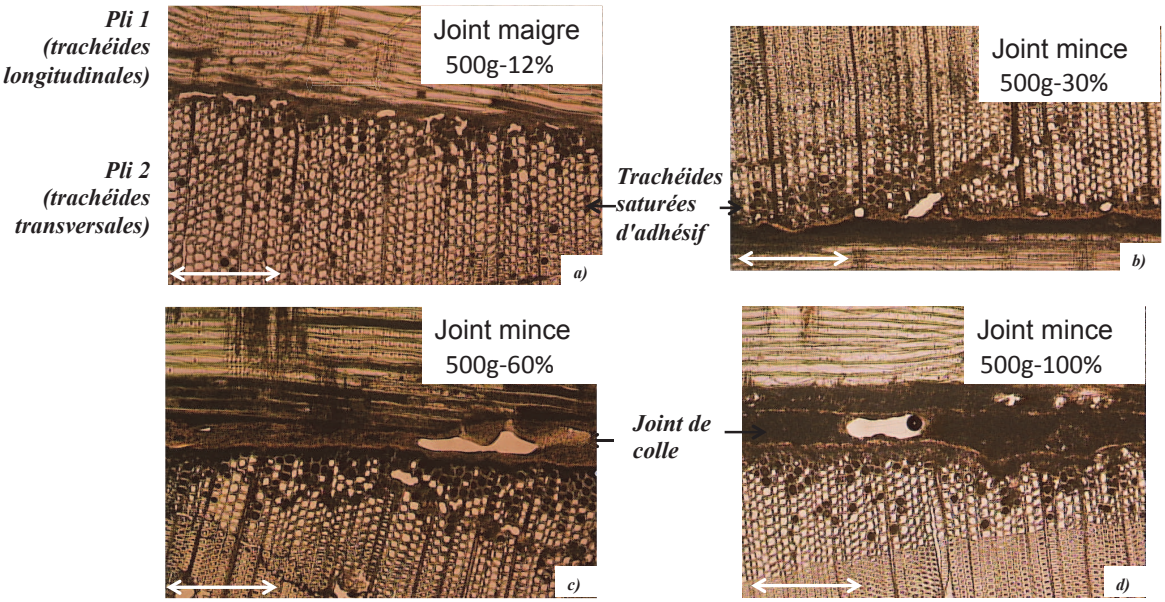


FIGURE 3.11 – *Photos du joint de colle observé par microscopie optique - Barre d'échelle = 0,5 mm. a) Morphologie du joint pour la configuration 500-12%, b) morphologie du joint pour la configuration 500-30%, c) morphologie du joint pour la configuration 500-60%, d) morphologie du joint pour la configuration 500-100%.*

La Figure 3.11 compare la morphologie du joint pour différentes configurations de panneaux : a) 500-12%, b) 500-30%, c) 500-60% et d) 500-100%.

Cependant, le résultats présentés ici ne constituent qu'une tendance, puisque de fortes variations ont été observées concernant les morphologies des joints, représentatif de la formation d'un joint non régulier sur la surface collée. Il est possible que la pression atmosphérique soit insuffisante pour mettre correctement en contact les surfaces de deux plis adjacents, qui ont une rugosité élevée au niveau microscopique. Une grande quantité de colle est donc nécessaire pour combler les vides formés (Figures 3.10 et 3.11).

Les observations microscopiques traduisent que pour une colle dispersive la pénétration est favorisée à faible teneur en eau. A l'inverse, l'étalement et la pénétration de la colle polyuréthane mono-composant sur le bois diminuent quand la teneur en eau du bois augmente. De plus, un grammage de 250 g/m^2 entraîne la formation d'un joint maigre dans la plupart des cas, quelle que soit la teneur en eau.

La réaction de l'adhésif polyuréthane avec l'eau libre, l'eau liée, et les constituants du bois est une hypothèse proposée pour expliquer les phénomènes observés :

- moins d'affinités intermoléculaires entre l'eau, polaire, et la colle, de majorité dispersive ; en effet, deux corps polaires, ou deux corps apolaires, ont plus d'affinité entre eux qu'un corps polaire avec un corps apolaire.
- en présence d'eau, la réaction du polyuréthane est plus violente, voire immédiate ; donc la viscosité de l'adhésif augmente rapidement avec la teneur en eau, ce qui limite sa pénétration dans le bois.
- pour des teneur en eau élevées (MC $>$ 60%), les cellules du bois sont remplies d'eau, la réaction entre la colle et le bois est plus difficile car l'adhésif polymérise essentiellement avec l'eau sans créer de liaisons avec le matériau bois.
- pour une teneur en eau de 12%, le joint est faible car il n'y a pas assez d'eau en surface pour provoquer la polymérisation de la colle à l'interface. La colle pénètre donc dans la structure poreuse du bois pour réagir plus en profondeur avec les terminaisons -OH des composants pariétaux du bois.

3.3.2 Analyse microtomographique

La microtomographie aux rayons X est une technologie permettant de visualiser et numériser en 3D la disposition spatiale des différentes phases d'un matériau. On observe 3 phases : air, bois et colle dans le cas des contreplaqués étudiés dans cette thèse. Le principe, présenté sur la Figure 3.12, consiste à projeter un faisceau de rayons X sur un échantillon (photo a) et à recueillir sur un détecteur CCD (Charge Coupled Device) les spectres d'atténuations aux rayons X de cet échantillon, pour différents angles régulièrement répartis de 0 à 360° (photo b). A partir de ces projections et donc d'une analyse plan par plan de l'échantillon, une image brute tridimensionnelle de l'échantillon est reconstruite numériquement en 16 bits (photo c).

a) b) c)

FIGURE 3.12 – *a) Principe d'acquisition d'images par microtomographie X. Cas d'une source conique. b) Image d'une projection de l'atténuation aux rayons X. c) Dimensions 2048×2048 pixels. Image de l'une des 2048 coupes longitudinales (parallèles aux faces) après reconstruction. Une zone d'intérêt est extraite dans l'image initiale (au centre ici) pour réduire en particulier la taille mémoire de l'échantillon.*

Le niveau de gris en chaque voxel est attribué en fonction des propriétés physiques d'absorption aux rayons X et de densité en ce point. En fonction de l'appareil utilisé, la source peut être conique (microtomographes de laboratoire : Nanotom Phoenix X-Ray, Skyscan 1174, X-Radia par exemple) ou parallèle (rayonnement synchrotron). Dans le cas du microtomographe X-Radia utilisé pour cette étude (Figure 3.13), la résolution peut atteindre 0,5 µm/pixel. Le détecteur est constitué de 2048×2048 capteurs.

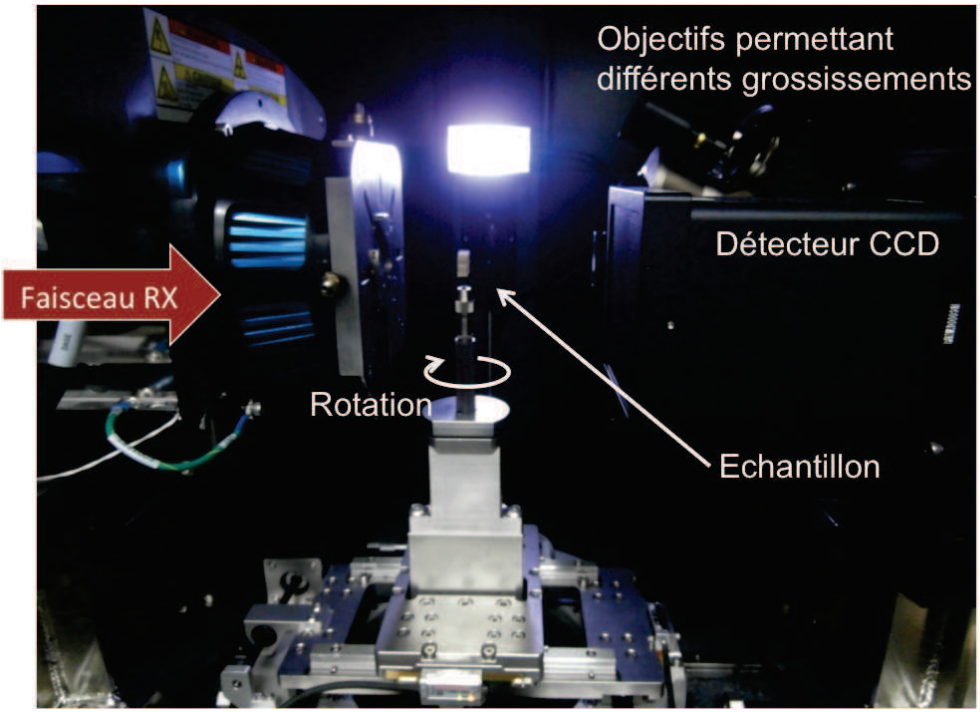


FIGURE 3.13 – *Microtome X-Radia préparé pour l'acquisition d'images de l'échantillon placé au centre, ENSEIRB, 33400 Talence*

Des images 3D de joints de colle ont été réalisées pour des panneaux collés à une teneur en eau MC = 60%, avec l'adhésif RP 2558 B (avec charges, viscosité 2400 mPa.s, présenté au paragraphe 3.2.2). Compte tenu du diamètre des trachéides (de 25 à 75 µm), une résolution de 2 µm/pixel sera suffisante pour observer l'imprégnation de la colle dans les cellules du bois. Les observations ont été réalisées sur des échantillons de 3,5×3,5×3,5 mm^3. La taille initiale des images obtenues est de 1780×1780×1770 voxels. Une zone d'intérêt de taille 1148×1124×1770 (soit 2296×2248×3540 µm^3) est extraite.

Deux joints de colle sont présents dans la zone d'intérêt. On observe une pénétration importante de la colle dans les rayons ligneux, et une asymétrie dans la formation du joint. Du côté inférieur du joint tel que représenté sur la Figure 3.14, de 1 à 2 rangées de cellules environ sont imprégnées régulièrement ; la colle n'a pas migré plus profondément dans le pli de bois, excepté le long des rayons ligneux. De l'autre côté du joint, l'imprégnation est beaucoup plus irrégulière avec des trachéides imprégnées loin du joint. Le fait d'appliquer la colle par simple encollage pourrait entraîner une pénétration plus importante du côté encollé, avant la mise

sous vide. Cette hypothèse fait partie des perspectives à développer suite à cette thèse.

Pour cela, l'apport de la microtomographie, par rapport aux images 2D obtenues lors des observations microscopiques, est la visualisation de la structure interne du matériau en 3D, sur laquelle on peut ensuite travailler pour séparer les différentes phases en présence (bois, adhésif, air), et réaliser des mesures quantitatives. Les différents traitements d'image que nous souhaitons effectuer ont pour but de séparer ces phases, afin d'observer le profil du joint de colle seul.

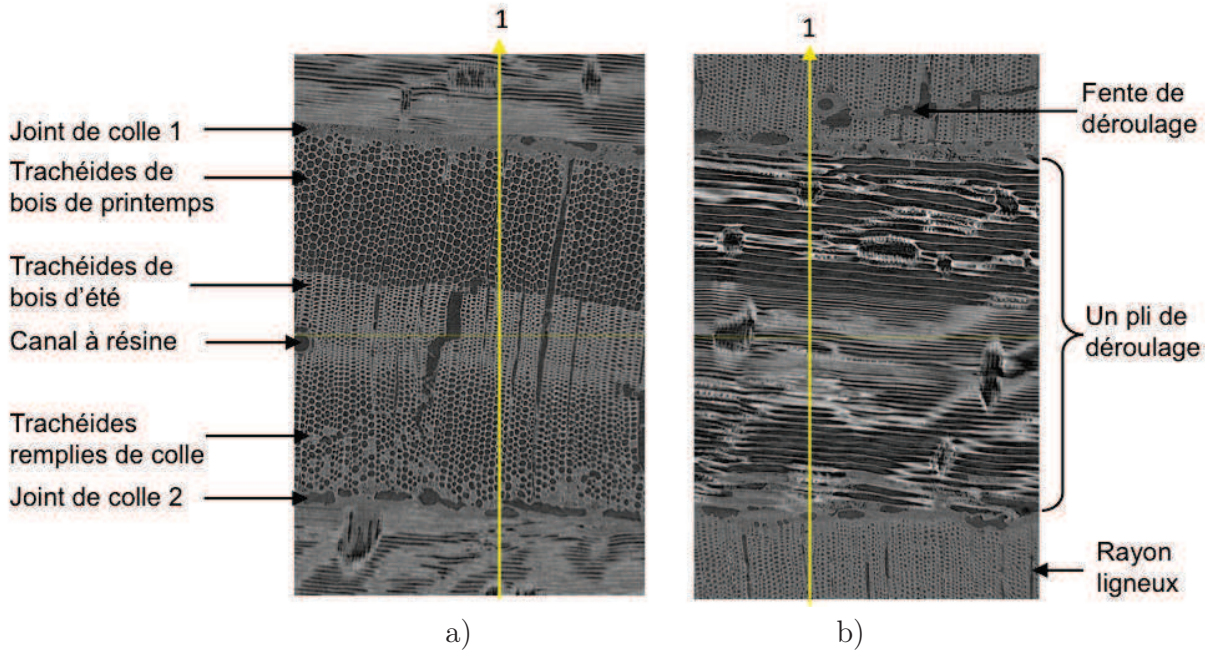


FIGURE 3.14 – *Images acquises avec le microtomographe X-Radia et traitées grâce au logiciel ImageJ représentant deux coupes orthogonales selon l'axe 1 de l'échantillon observé. a) 16-bit, 1148×1770 pixels, soit 2296×3540 µm ; b) 16-bit, 1124×1770 pixels, soit 2248×3540µm*

3.4 Conclusion

Des mesures de mouillabilité et des observations microscopiques ont été réalisées sur les panneaux collés à l'état vert. Les résultats obtenus lors des ces essais ont permis de mieux comprendre les propriétés mécaniques en cisaillement des panneaux étudiées précédemment. La Figure 3.15 représente sous forme graphique les relations entre les paramètres de fabrication des panneaux, les performance mécaniques et les morphologies des joints associées.

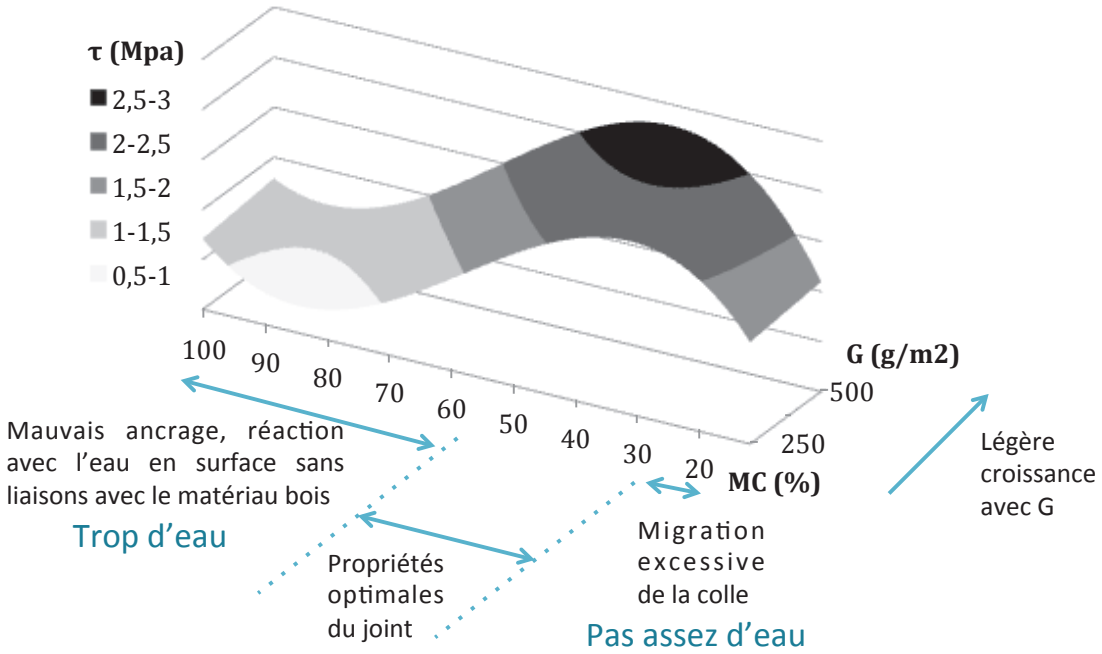


FIGURE 3.15 – *Schéma récapitulatif des propriétés de collage des panneaux en fonction de la teneur en eau du bois - compréhension des phénomènes observés*

Pour des teneurs en eau élevées, la polymérisation de la colle se fait majoritairement avec l'eau du bois au détriment d'une adhésion interfaciale avec le matériau bois. La contrainte de cisaillement associée est faible. A l'inverse, pour des teneurs en eau faibles, trop d'affinité entre la colle et le bois entraîne la formation d'un joint trop mince ayant de faibles propriétés mécaniques. Les propriétés optimales mécaniques en cisaillement et morphologiques se situent entre MC= 30% et MC= 60%.

Chapitre 4

Caractérisation mécanique des panneaux

La caractérisation mécanique d'un matériau composite innovant à utiliser en tant que bordé sur un bateau peut être réalisée en trois étapes, à savoir :

- réaliser des tests mécaniques traditionnels afin d'affiner les paramètres de collage,
- déterminer un critère de rupture sur le matériau optimisé afin de connaitre son comportement à la ruine,
- satisfaire les propriétés requises par les normes en vigueur.

La première étape a été étudiée précédemment : l'effet des différents paramètres de collage sur la qualité du joint des panneaux a été observé en se basant sur des tests normatifs de cisaillement en traction (NF EN 314, [48]). Afin d'expliquer les propriétés mécaniques obtenues lors de ces essais, des mesures de mouillabilité et des observations microscopiques du joint ont été réalisées. Ce chapitre consiste en la caractérisation mécanique plus approfondie des panneaux sélectionnés. Ainsi, un critère de rupture adéquat sera identifié pour les panneaux de contreplaqué collés à l'état vert, de manière à obtenir des informations sur la rupture du bordé. Dans un second temps, la caractérisation mécanique en flexion de l'élément structurel assemblé permettra d'acquérir des connaissances sur le comportement du contreplaqué formé, nécessaires lors du dimensionnement des bordés par les bureaux d'études.

4.1 Caractérisation à la rupture en traction-cisaillement

Les sollicitations s'appliquant sur le bordé du bateau en usage sont de nature complexe. Il a été établi dans de nombreux travaux [79, 80, 81, 82] que la rupture inter-laminaire était la cause la plus fréquente de ruine des matériaux composites. Le matériau étudié est formé par le collage de plis de bois déroulé, le dispositif expérimental utilisé doit donc permettre la caractérisation de l'assemblage.

4.1.1 Définition de l'essai

Différents essais permettent de caractériser la rupture inter-laminaire des composites. Ils peuvent être réalisés selon deux approches :

– mesure de l'énergie nécessaire à la création et à la propagation d'une fissure,
– mesure de la contrainte à la rupture.

Nous nous sommes intéressés particulièrement à l'essai Arcan [79] permettant de caractériser la rupture pour de nombreuses combinaisons de sollicitations en mode-I et mode-II (Figure 4.1). Ce dispositif est constitué de mors en forme de disque, qui transmettent les efforts à l'échantillon dans la partie centrale (Figure 4.2).

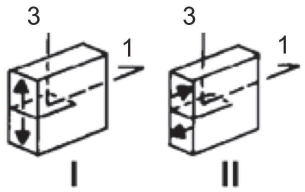


FIGURE 4.1 – *Propagation de fissures en mode I et mode II*

De nombreux auteurs ont travaillé sur la caractérisation de matériaux composites, à l'aide d'un essai spécifique adapté à partir de l'essai Arcan [81, 82, 83]. Ces travaux se sont orientés vers la définition d'un essai permettant à l'assemblage d'être caractérisé jusqu'à la rupture.

Une autre application de l'essai Arcan, proposée par P. Caumes, a été adaptée au bois massif [84]. Le dispositif conçu par P. Caumes a été utilisé ici pour imposer de la traction pure

(mode I), du cisaillement pur (mode II), ou des conditions de chargement mixtes appliquées aux échantillons de contreplaqué collés à l'état vert. La Figure 4.2 illustre le montage utilisé.

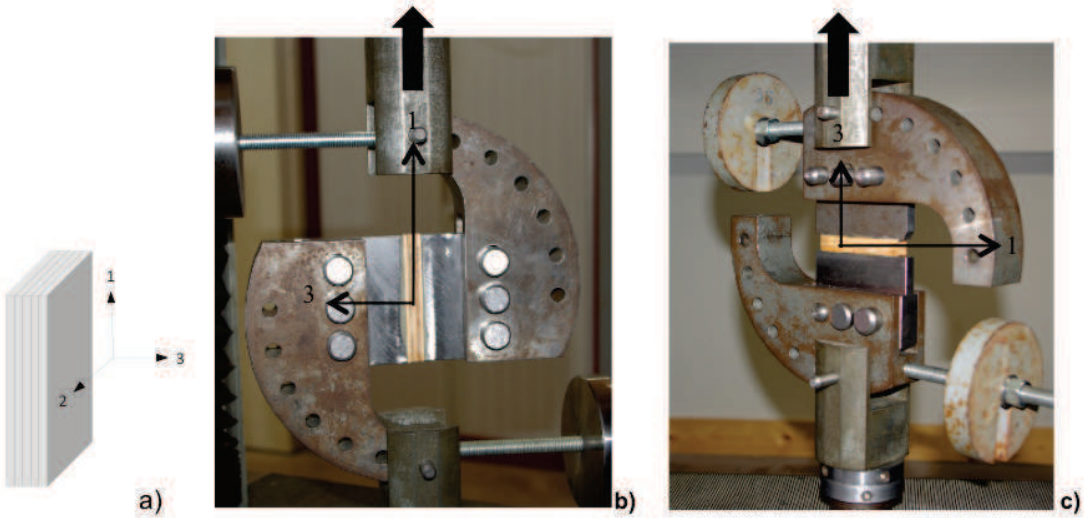


FIGURE 4.2 – *Vue d'ensemble du montage :* a) *échantillon de contreplaqué représentant les directions orthotropes 1 (direction parallèle aux fibres des plis extérieurs), 2 (perpendiculaire aux fibres des plis extérieurs), 3 (perpendiculaire aux plans de colle b)* test *en cisaillement pur c) test en traction pure*

La sollicitation peut être appliquée selon différents angles par rapport au joint de colle, variant de $\vartheta = 0°$ (cisaillement) à $\vartheta = 90°$ (traction). Les essais sont réalisés sur des échantillons de contreplaqué 5 plis de dimensions 88 x 10 x 13 mm^3, pour des angles $\vartheta = 0°$, 45°, 75° et 90°. Nous caractériserons des panneaux collés à une teneur en eau de 60%, conformément à la décision prise au chapitre précédent et avec un grammage de colle de 500 g/m^2. Cette quantité de colle a été choisie de manière à obtenir un joint plus régulier et une résistance au cisaillement plus élevée (cf. paragraphe 3.3.1). Pour chacun des angles envisagés, cinq échantillons sont testés.

4.1.2 Exploitation des essais

Afin de prévoir la résistance au délaminage du matériau composite sous un chargement mixte en traction et cisaillement, des études précédentes [15, 16] ont proposé le critère de rupture présenté à l'Equation (4.1), basé sur la Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture (MLER).

$$\left(\frac{\mathrm{K}_I}{\mathrm{K}_{Ic}}\right)^m + \left(\frac{\mathrm{K}_{II}}{\mathrm{K}_{IIc}}\right)^n = 1 \tag{4.1}$$

avec $\mathrm{K_I}$ = facteur d'intensité de contraintes en mode-I, $\mathrm{K_{II}}$ = facteur d'intensité de contraintes en mode-II, $\mathrm{K_{IC}}$ = facteur critique d'intensité de contraintes en mode-I, $\mathrm{K_{IIc}}$ = facteur critique d'intensité de contraintes en mode-II, m et n = exposants de l'équation.

Nous proposons une approche basée sur la mécanique des milieux continus au lieu de la MLER, menant à une définition en contraintes du critère de rupture. Cette approche peut être justifiée par la proximité des plis de bois adjacents, et la diffusion de colle dans les substrats bois. Le facteur d'intensité de contrainte est proportionnel à la contrainte lorsqu'on se situe dans le domaine élastique (non endommagé).

Un critère de rupture en traction-cisaillement peut être exprimé à travers l'Equation (4.2) dans le plan {1, 3} en considérant des ruptures fragiles (délaminage, Figure 4.2).

$$\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{3u}}\right)^m + \left(\frac{\tau_{13}}{\tau_{13u}}\right)^n = 1 \tag{4.2}$$

où σ_3 = contrainte de traction (MPa) ; τ_{13}= contrainte de cisaillement (MPa) ; $\sigma_{3\mathrm{u}}$ = contrainte de traction ultime (MPa) ; $\tau_{13\mathrm{u}}$ = contrainte de cisaillement ultime (MPa) ; m et n = exposants de l'équation.

La charge à la rupture est mesurée et utilisée pour construire les courbes d'état limite. Les résultats permettent de formuler un critère de rupture adapté au contreplaqué étudié en identifiant les valeurs prises par n et m dans l'Equation (4.2).

4.1.3 Résultats

Le contreplaqué a été testé selon différents angles de chargement. Des ruptures cohésives ont été observées dans 92% des cas dans les deuxièmes et quatrièmes plis de bois (Figure 4.3). Dans ces plis, le fil du bois est orienté selon la direction x_2, dans la largeur de l'échantillon. Seulement 8% des échantillons ont présenté une rupture cohésive dans le joint de colle, ou adhésive à l'interface bois/colle.

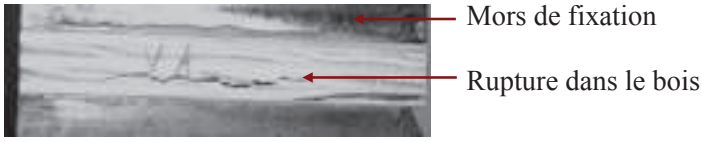


FIGURE 4.3 – *Exemple de rupture lors de l'essai Arcan*

Les résultats des essais sont récapitulés dans le Tableau 4.1. Lors de chargements mixtes en traction/cisaillement, une approche de Résistance Des Matériaux classique a permis de séparer les sollicitations appliquées sur l'échantillon en composantes de traction et de cisaillement.

Angle de chargement	90°		75°	
	Traction	cisaillement	Traction	Cisaillement
Résistance moyenne (MPa)	2,89	0	3,25	0,87
Ecart type (MPa)	0,45	-	0,36	0,1
COV	15%	-	11%	11%

Angle de chargement	45°		0°	
	Traction	cisaillement	Traction	Cisaillement
Résistance moyenne (MPa)	2,08	2,08	0	2,62
Ecart type (MPa)	0,14	0,14	-	0,1
COV	7%	7%	-	4%

TABLE 4.1 – *Résultats de l'essai Arcan pour différents angles de sollicitation*

Suite à ces résultats, des courbes enveloppes de rupture ont été déterminées pour différentes combinaisons des valeurs m et n de l'Equation (4.2). Ces courbes ont été tracées de telle façon qu'elles passent par les points correspondant aux valeurs soit hautes, soit moyennes, soit basses obtenues lors des essais de traction pur et de cisaillement pur.

La Figure 4.4 montre 5 combinaisons pour les exposants de l'Equation (4.2) (m ; n) variant entre 1 et 3, comme cela a été fait dans de précédentes études [85, 81]. La méthode des moindres carrés a permis de déterminer la courbe enveloppe de rupture la plus proche des valeurs obtenues expérimentalement, en calculant pour chaque configuration la somme des carrés des écarts à la moyenne.

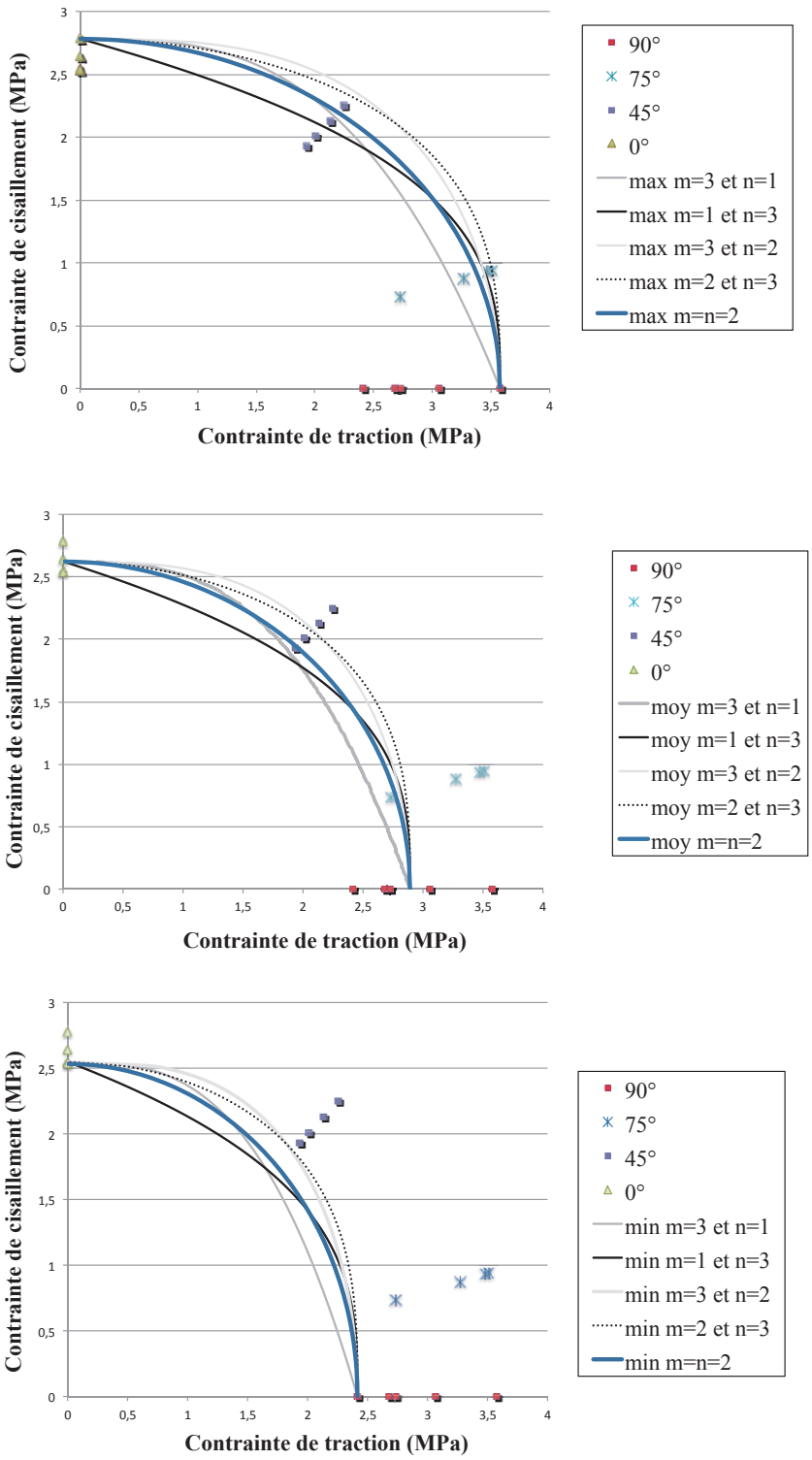


FIGURE 4.4 – *Courbes d'état limite pour les 5 configurations (m ;n) étudiées : a) courbes hautes ; b) courbes moyennes ; c) courbes basses.*

Comme le montre la Figure 4.5, la calibration des valeurs m et n de l'Equation (4.2) donne le couple (m, n)= (2, 3). Ces résultats sont en accord avec les valeurs obtenues précédemment par S.H. Yoon et C.S. Hong [85] ; le critère de rupture est donc :

$$\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{3u}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{\tau_{13u}}\right)^3 = 1 \tag{4.3}$$

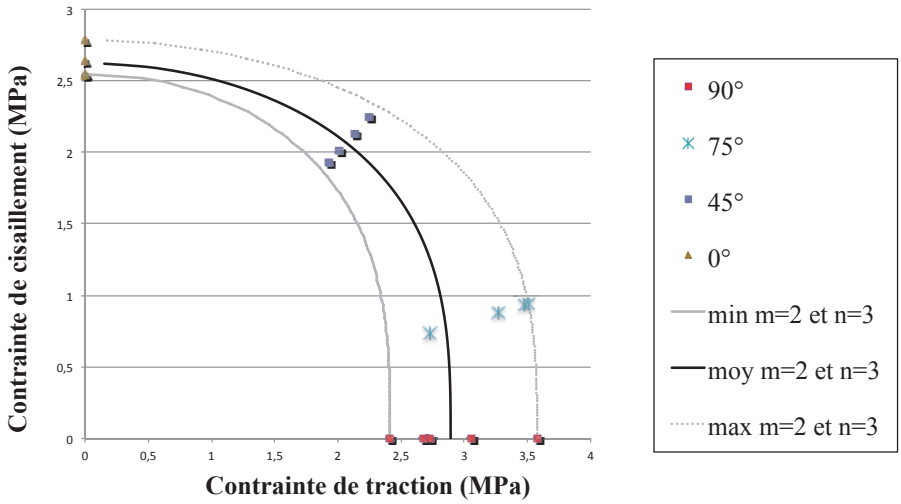


FIGURE 4.5 – *Courbe d'état limite résultante*

Le comportement du contreplaqué lors de la rupture inter-laminaire a été étudié pour des sollicitations en traction pure (90°), en cisaillement pur (0°) et pour des configurations d'essai mixtes à 75° et 45°. Nous avons établi une équation pour établir un critère de rupture inter-laminaire du contreplaqué en mode mixte (Equation (4.3)).

Cependant, il faut souligner que la rupture ayant lieu dans le bois, l'Equation (4.3) dépend surtout des propriétés en traction et en cisaillement des plis élémentaires de bois. Ce seront donc les valeurs ultimes du bois qui seront dimensionnantes et non celles de l'adhésif.

4.2 Détermination des propriétés élastiques et de rupture du panneau en flexion

Nous avons jusqu'ici observé la qualité du collage et les propriétés en cisaillement des joints des panneaux de contreplaqués réalisés à l'état vert. Un collage performant est attesté par la rupture dans les plis de bois lors des tests réalisés. Ces essais ont permis de définir puis de valider la procédure de réalisation des panneaux de contreplaqués collés sous vide à l'état vert. Cependant, lors de l'utilisation du matériau en tant que bordé de bateau, d'autres critères sont à satisfaire. Ainsi, le bureau d'étude partenaire du projet, *Orion Engineering,* précise que la connaissance de certaines propriétés mécaniques est indispensable pour dimensionner les bordés : les modules d'élasticité des panneaux (MOE) et les modules de rupture en flexion (MOR) doivent être disponibles. Actuellement, il existe différents tests normatifs de flexion, réalisés sur les contreplaqués industriels dans ce but. Cependant, ces tests, présentés en première partie de ce paragraphe, ont pour objectif de comparer les valeurs obtenues à des valeurs normalisées par une procédure stricte, sans pour autant caractériser mécaniquement les panneaux. Dans notre cas, il s'agit de tester un nouveau matériau, il semble donc judicieux de le caractériser le plus finement possible. Ainsi, les panneaux de contreplaqué seront testés avec le dispositif de flexion retenu parmi les différents tests de flexion détaillés au paragraphe suivant ; ils seront analysés et comparés à un modèle numérique basé sur la théorie des plaques minces, développé par F. Bos et D. Guitard [86].

4.2.1 Recensement des tests de flexion réalisés sur les panneaux de contreplaqué

Différents types d'essais de flexion réalisés sur les contreplaqués sont recensés dans la littérature. Ce paragraphe présente brièvement ces tests rencontrés ; les caractéristiques de chaque essai seront mises en avant afin de justifier l'essai que nous avons choisi dans cette étude.

- **Le test de flexion 3 points** est un test utilisé pour contrôler la qualité des panneaux ou caractériser la rupture du matériau (**NF EN 310** [87]). Cet essai consiste à appliquer une charge P au centre de l'éprouvette placée sur deux appuis cylindriques parallèles à roulement, comme illustré sur la Figure 4.6.

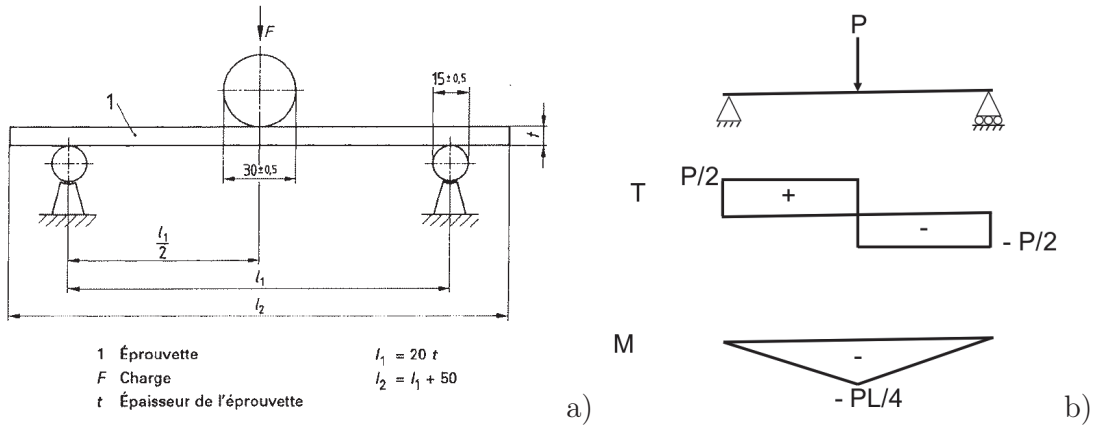


FIGURE 4.6 – *a) Principe de l'essai de flexion 3 points b) Schéma RDM associé, T : effort tranchant, M : moment (NF EN 310)*

Même s'il est très utilisé car facile à mettre en oeuvre, cet essai ne permet pas de déterminer correctement les propriétés élastiques des matériaux. En effet, l'effort tranchant présent dans l'échantillon lors du test induit des déplacements transversaux en plus de la courbure due à la flexion. De plus, le point de chargement est situé au niveau de la zone de rupture du matériau, ce qui peut entraîner une modification des caractéristiques de rupture, par superposition d'un champ de contrainte au niveau de l'appui.

- Le test de flexion 4 points est aussi appelé « flexion pure ». Contrairement à l'essai de flexion 3 points, le moment fléchissant est constant dans la partie centrale de l'éprouvette (entre les deux points de chargement). L'effort tranchant est nul, il n'y a donc pas de cisaillement induit. Les appuis sont linéiques et libres de tourner autour de l'axe x_2. Les caractéristiques de l'essai sont décrites dans la norme **NF EN 789** [88]. La force appliquée P est mesurée au cours de l'essai, ainsi que la flèche à mi-portée. Ces données permettent de calculer la contrainte de rupture du matériau (Equation (4.4)) et le module d'élasticité apparent des panneaux en flexion (Equation (4.5)).

$$\sigma = \frac{M}{I} y \tag{4.4}$$

avec σ la contrainte de rupture (MPa), M= moment de flexion induit par la charge P selon

x_1 (N.mm), I= moment d'inertie à la flexion de la section droite (mm^4), y= distance à la fibre neutre (mm)

$$E = \frac{6aL_1^2}{8e^3b} \times \frac{P}{f} \tag{4.5}$$

avec E= Module d'élasticité (MPa) , a = espacement entre deux appuis (mm), L_1 = longueur sur laquelle la flèche est mesurée (mm), b = largeur de l'éprouvette (mm), e = épaisseur de l'éprouvette (mm), P = charge appliquée (N), f= flèche mesurée (mm)

Le schéma de principe de cet essai est présenté sur la Figure 4.7.

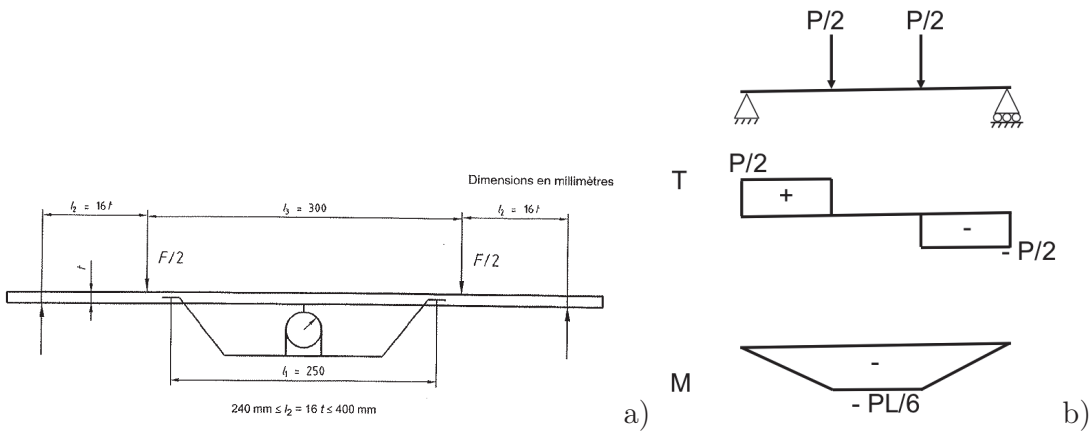


FIGURE 4.7 – *a) Principe de l'essai de flexion 4 points (NF EN 789), b) schéma RDM associé, T : effort tranchant, M : moment*

- Un autre test de flexion 4 points est détaillé dans la norme **ASTM D3043** [89]. Il s'agit d'un essai de flexion 4 points similaire à celui présenté dans le paragraphe précédent, avec des appuis extérieurs linéiques libres de pivoter selon l'axe x_2 mais également selon l'axe x_1 grâce à des roulements (Figure 4.8).

Lors de cet essai, le couplage flexion/torsion pouvant apparaitre lors de tests d'éprouvettes ayant des défauts de planéité ou de conception est limité.

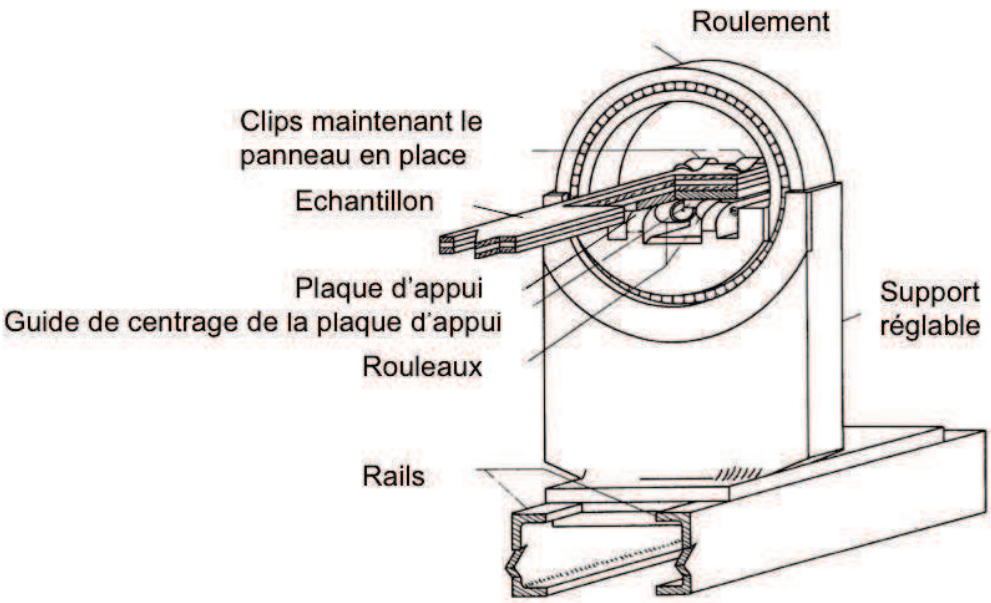


FIGURE 4.8 – *Particularité de l'essai de flexion 4 points ASTM D3043, méthode B [89]*

Les grandeurs mesurées sont la force P appliquée au cours de l'essai et la flèche dans la partie centrale de l'éprouvette. Elles permettent le calcul de la contrainte de rupture et du module d'élasticité des échantillons testés avec les mêmes formules que la flexion 4 points classique.

- Afin de déterminer les propriétés élastiques des contreplaqués en flexion, un montage mis au point par F. Bos [7, 90] pour tester les contreplaqués en tant que plaques minces stratifiées, a été utilisé (**Essai BOGUI**). Les essais présentés jusqu'ici sont effectués et analysés selon la théorie des poutres, c'est-à-dire pour des échantillons ayant deux dimensions (la largeur « b » et l'épaisseur « e ») très inférieures à la troisième (la longueur L). Ces essais permettent la détermination des caractéristiques élastiques et à la rupture d'éprouvettes, mais ne sont pas représentatifs des conditions réelles d'emploi du contreplaqué (sous forme de plaques). En effet, les essais de flexion effectués la plupart du temps sur les panneaux nécessitent la découpe d'échantillons de faible largeur, ce qui permet de s'affranchir de la courbure transverse et de la torsion pouvant apparaitre de manière non négligeable lorsqu'on augmente la largeur de l'échantillon.

Le principal apport de l'essai BOGUI est l'utilisation de deux appuis ponctuels dans la largeur de l'échantillon, au lieu d'un appui linéique. Les roulements présents au niveau des appuis dans la norme ASTM D3043 sont également conservés (Figure 4.9).

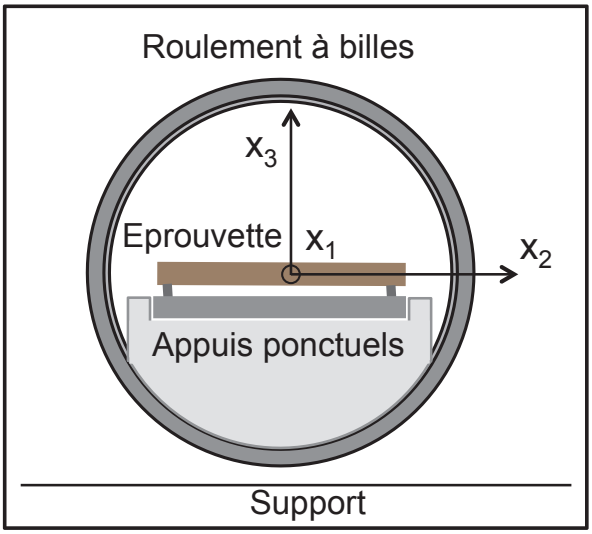


FIGURE 4.9 – *Principe de l'essai BOGUI [90]*

Grâce aux appuis ponctuels et aux roulements, la courbure selon x_2 (dite courbure anti-clastique) et la torsion sont libérées, les moments de flexion M_2 (selon x_1) et de torsion M_6 sont donc nuls, ce qui permet d'appliquer une flexion pure avec un moment M_1 (selon x_2) au cours des essais. L'utilisation d'un bâti de flexion 4 points classique permet la mesure de la flèche due à M_1, mais également due aux moments M_2 et M_6. Dans ce cas, les calculs des caractéristiques élastiques des panneaux sont biaisés.

On choisira de considérer le contreplaqué en tant que plaque mince stratifiée. L'essai BOGUI, le plus adapté pour la caractérisation du contreplaqué en flexion, sera donc utilisé pour tester les contreplaqués collés à l'état vert.

4.2.2 Détermination théorique des propriétés élastiques des panneaux

Les contreplaqués sont des produits constitués par une superposition de plis de bois de fine épaisseur à fil croisé, ils sont ainsi considérés dans cette étude comme des plaques minces stratifiées. La loi de comportement associée à ce type de produits et notamment aux contreplaqués a été exprimée au travers de la matrice des souplesses élastiques présentée ci-dessous (Equation (4.6)) [22, 91].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma_6^0 \\ \mathrm{k}_1 \\ \mathrm{k}_2 \\ \mathrm{k}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{26} & b_{21} & b_{22} & b_{26} \\ a_{61} & a_{62} & a_{66} & b_{61} & b_{62} & b_{66} \\ b_{11} & b_{12} & b_{16} & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{26} & d_{21} & d_{22} & d_{26} \\ b_{61} & b_{62} & b_{66} & d_{61} & d_{62} & d_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_6 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_6 \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

avec ε_i^0, γ_i^0 les déformations de membrane (sans dimensions), $\mathrm{k_i}$ les courbures associées aux moments fléchissants et la torsion associée au moment de torsion (1/mm), $\mathrm{N_j}$ les efforts de membrane (N/mm), $\mathrm{M_j}$ les moments linéiques de flexion et torsion (N), $\mathrm{a_{ij}}$ les souplesses de membrane (mm/N), $\mathrm{d_{ij}}$ les souplesses de flexion/torsion (mm x N)$^{-1}$ et $\mathrm{b_{ij}}$ les termes de couplage entre état mécanique de membrane et de flexion/torsion (N^{-1}).

Le contreplaqué étant un matériau équilibré, les termes de couplage $\mathrm{b_{ij}}$ s'annulent. On peut alors exprimer le comportement en flexion/torsion d'un contreplaqué équilibré en fonction des courbures $\mathrm{k_i}$ et des moments linéiques $\mathrm{M_j}$ selon l'Equation (4.7)

$$d_{ij} = \frac{k_i}{M_j} \text{ avec } i, j \in (1, 2, 6)^2 \tag{4.7}$$

Le dispositif BOGUI utilisé pour la détermination des souplesses de flexion/torsion, présenté au paragraphe 4.2.1, permet l'application d'un moment $\mathrm{M_1}$ seul dans la partie centrale de l'éprouvette. En effet, lors de la réalisation de cet essai, les appuis sont libres de pivoter autour de l'axe $\mathrm{x_1}$ et, du fait de la présence des appuis ponctuels, la courbure $\mathrm{k_2}$ (courbure anticlastique selon $\mathrm{x_2}$) et la torsion $\mathrm{k_6}$ sont libérées. En conséquences, $\mathrm{M_2}$= $\mathrm{M_6}$= 0. Cependant, les courbures $\mathrm{k_1}$, $\mathrm{k_2}$ et $\mathrm{k_6}$ peuvent toutes être exprimées en fonction du moment linéique $\mathrm{M_1}$, comme illustré sur la Figure 4.10. Ainsi, le seul moment linéique $\mathrm{M_1}$ peut entraîner des

courbures du contreplaqué selon x_1 et x_2 ou de la torsion.

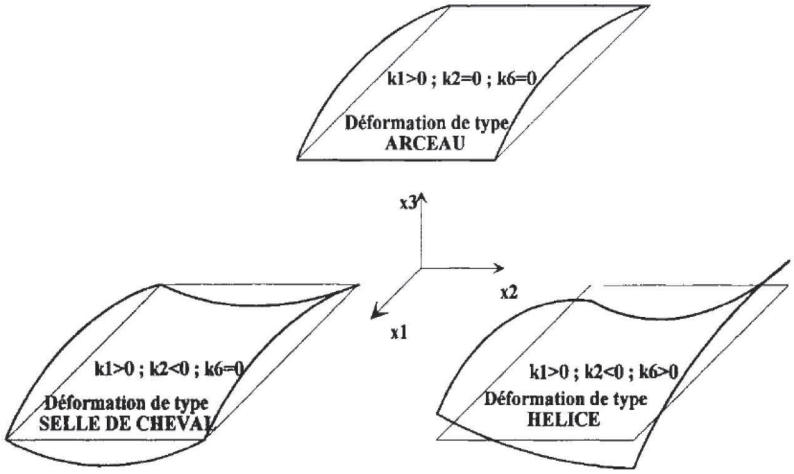


FIGURE 4.10 – *Définition des courburees pouvant apparaitre au cours de l'essai de flexion BOGUI* [7]

La Figure 4.11 schématise le panneau lors d'un essai de flexion BOGUI. Les notations présentées seront utilisées pour les calculs des grandeurs dans la suite de l'étude. On appellera α l'angle de rotation mesuré.

Le moment linéique M_1 peut être exprimé dans la partie centrale de l'éprouvette par l'Equation (4.8)

$$M_1 = \frac{Pa}{2b} \tag{4.8}$$

Les courbures et la torsion peuvent être exprimées en fonction de la flèche des panneaux selon les relations suivantes [7] :

$$k_1 = -\frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial^2 x_1^2} \approx -\frac{8f_1}{L_1^2} \tag{4.9}$$

$$k_2 = -\frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial^2 x_2^2} \approx -\frac{8f_2}{L_2^2} \tag{4.10}$$

$$k_6 = -2\frac{\partial^2 f(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} \approx -\frac{2\alpha}{L_1'} \tag{4.11}$$

Les souplesses de flexion/torsion (Equation (4.7)) peuvent ainsi être déterminées à l'aide de l'expression du moment et des courbures, on obtient :

$$d_{11} = \frac{16b}{aL_1^2} \times \frac{f_1}{P} \tag{4.12}$$

$$d_{21} = \frac{16b}{aL_2^2} \times \frac{f_2}{P} \tag{4.13}$$

$$d_{61} = -\frac{4b}{aL_1'} \times \frac{\alpha}{P} \tag{4.14}$$

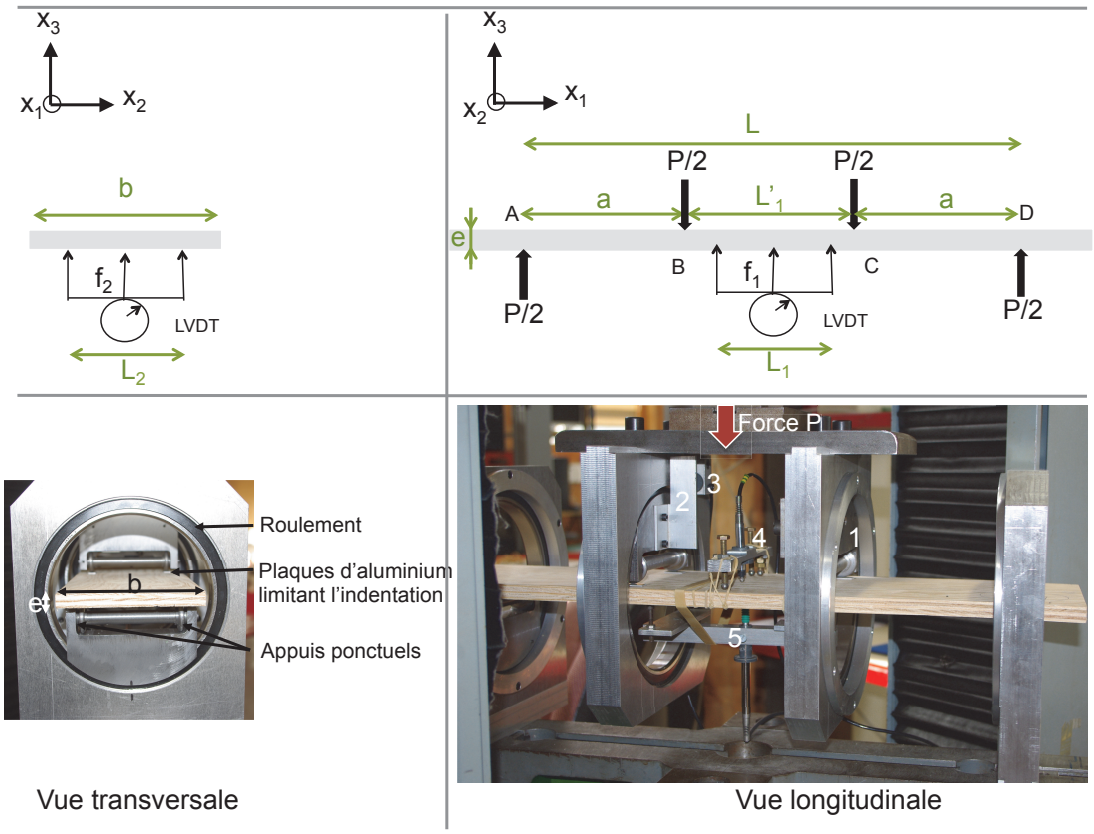


FIGURE 4.11 – *Schématisation du panneau lors de l'essai BOGUI et notations correspondantes. 1 appui bloqué en rotation, 2 : onglet permettant la mesure de l'angle de rotation a, 3 : LVDT associé, 4 : LVDT transverse permettant la mesure de la flèche f_2, 5 : LVDT longitudinal permettant la mesure de la flèche f_1.*

La détermination des souplesses permet également d'obtenir le module apparent d'élasticité (MOE) des panneaux, qui constitue une grandeur caractéristique du matériau requise par le bureau d'étude. Ce paramètre sera défini par la relation suivante (Equation (4.15)) :

$$E_{ij} = \frac{12}{e^3 d_{ij}} \tag{4.15}$$

4.2.3 Détermination expérimentale des caractéristiques mécaniques des panneaux de contreplaqué grâce au dispositif BOGUI

Une mesure expérimentale des différents paramètres présents dans les Equations (4.12), (4.13) et (4.14) est nécessaire pour calculer les souplesses de flexion/torsion. Ces paramètres, représentés sur la Figure 4.11, sont répertoriés ci-dessous :

- la force appliquée P (N),
- la flèche f_1 mesurée dans la longueur de l'éprouvette et dans sa partie centrale, suivant la direction x_3 (mm),
- la flèche f_2 mesurée dans la largeur de l'éprouvette et dans sa partie centrale, suivant la direction x_3 (mm),
- la rotation d'angle α mesurée entre les deux points de chargement centraux, au cours de l'essai.

Des échantillons de dimensions 600 x 140 x 13 mm^3 sont utilisés lors des essais, afin de s'approcher de la configuration d'une plaque mince. Des capteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer) permettent de mesurer les flèches $f_1$et f_2 au cours de l'essai. La rotation est mesurée en bloquant une des deux zones de charge. La rotation au niveau de cet appui étant empêchée, la rotation d'angle α au niveau du second appui central est mesurée à l'aide d'un capteur LVDT placé sur le bâti fixe. Concrètement, la mesure du déplacement horizontal est réalisée grâce à un onglet mobile fixé sur le roulement (Figure 4.12).

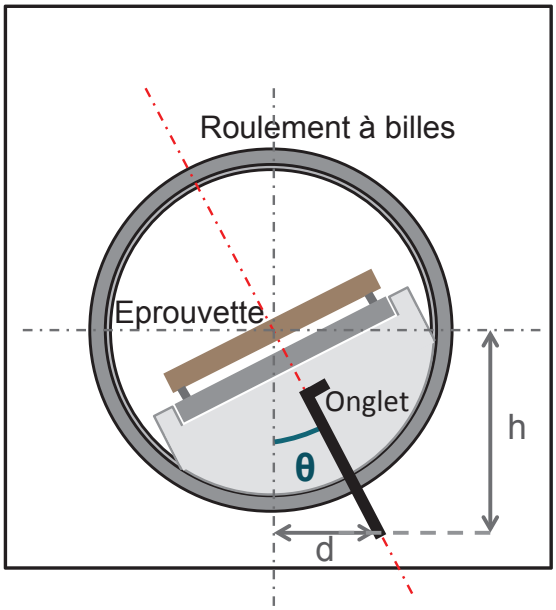


FIGURE 4.12 – *Mesure de la rotation - essai BOGUI*

Cette mesure permet d'obtenir la tangente de l'angle α, tan α≈ d/h. Cette mesure est assimilée à l'angle (tan α≈ α) lorsque les angles mesurés sont petits (<10°).

Les paramètres de fabrication des panneaux ont été fixés pour ces essais à un gramamge de colle RP 2554 de 250 g/m^2 pour une teneur en eau de 60%. Ce grammage a été choisi cette fois par l'industriel, afin de minimiser la quantité de colle appliquée, tout en gardant des performances suffisantes (paragraphe 2.2.4). La teneur en eau correspond à celle préconisée à la fin de cette même partie. 8 essais ont été réalisés sur des échantillons découpés avec la longueur de l'éprouvette selon x_1 et 8 autres sur des échantillons découpés perpendiculairement au fil du bois des plis extérieurs (longueur de l'éprouvette selon x_2). Les éprouvettes ont été sélectionnées au hasard dans les panneaux, puis conditionnées en enceinte climatique (20°C, 65% HR) jusqu'à atteindre la teneur en eau d'équilibre du bois de 12 % avant d'être testées.

L'équipement utilisé pour les tests est une machine électromécanique (Adamel Lhomargy DY25) pilotée en déplacement de la traverse. Le capteur de force utilisé a une capacité de 500 daN. La vitesse de déplacement est fixée une vitesse de 0,04 mm/s pour la détermination des MOE.

Pour plus de précision en évitant le mouvement des corps rigides lors de l'essai, et pour s'affranchir du bruit sur les premières secondes du test, les propriétés élastiques des panneaux sont calculées après 3 cycles de charge/décharge. Ces cycles ont été programmés de manière à ce que l'éprouvette ne soit pas endommagée pour la détermination des caractéristique élastiques. Ainsi, la valeur maximum de la charge appliquée sur les panneaux est bien inférieure à la contrainte de rupture des panneaux, estimée par des essais préliminaires : on prendra $P_{max\ cycle} = 0{,}4\ P_{max\ estimée}$. Cette valeur est également préconisée dans les normes NF EN 310 ou NF EN 789 pour le calcul des MOE. Un exemple de courbe force/déplacement obtenue avec l'application des 3 cycles de charge/décharge sur une éprouvette testée selon x_1 est donné sur la Figure 4.13. Les valeurs des coefficients directeurs des courbes ($= P/f_1$), utilisés pour le calcul des souplesses de flexion/torsion (Equation (4.12)) sont précisés. Les modules apparents de flexion sont ensuite obtenus à partir des souplesses de flexion/torsion à l'aide de l'Equation (4.15).

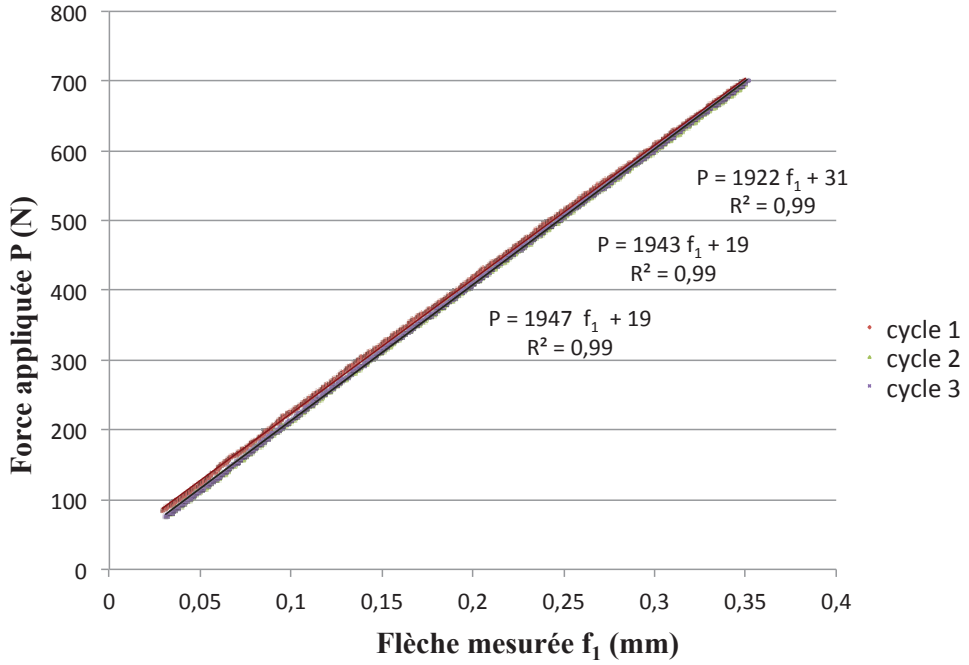


FIGURE 4.13 – *Exemple de cycles de charge/décharge obtenus pour une éprouvette sollicitée en flexion suivant x_1*

Des plaques d'aluminium de 1 mm d'épais ont été interposées entre les appuis et l'échantillon testé pour éviter le poinçonnement des panneaux.

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 4.2. Nous y avons reporté uniquement valeurs des termes E_{11} E_{22} d_{11} d_{22} ; en revanche les données concernant les termes E_{12}, E_{61}, d_{12}, d_{61} n'ont pas été reportées car elles étaient trop dispersées. La variabilité observée montre les limites de l'essai réalisé : les déplacements sont trop faibles pour être mesurés de manière fiable pendant l'essai. En effet, les capteurs ont une précision de 0,01 mm, or les flèches f_2 mesurées sont du même ordre de grandeur, entre 0,025 et 0,05 mm. Concernant E_{61}, on observe de la torsion car le fil du bois dans les plis utilisés pour réaliser le contreplaqué n'est pas parfaitement droit, sa mesure est donc aléatoire. Cette valeur serait égale à 0 dans le cas de plis parfaits. Par ailleurs, un panneau de largeur plus importante, ou ayant une orientation différente (par exemple à 45°) permettrait certainement d'obtenir des valeurs moins dispersées. Cependant, le fait que l'on mesure des valeurs de f_2 et de l'angle α dans les configurations des panneaux à 0° et 90° implique l'existence de courbures k_2 et de torsion k_6 qui justifient l'utilisation de ce dispositif, par rapport à un test de flexion 4 points standard.

	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	d_{11} $(mm.N)^{-1}$	d_{22} $(mm.N)^{-1}$
Valeur moyenne	10700	2770	483	1973
Nombre d'éprouvettes	8	8	8	8
Ecart type	1327	175	58	129
COV	12%	6%	12%	7%

TABLE 4.2 – *Caractéristiques élastiques du contreplaqué collé à l'état vert testé avec le dispositif BOGUI*

Puis, les panneaux ont été testés jusqu'à la rupture, en utilisant ce même dispositif BOGUI (Figure 4.14). En effet, la valeur de la contrainte à la rupture est nécessaire lors du dimensionnement des coques par le bureau d'étude. La vitesse de déplacement de la traverse a été réglée de manière à ce que la rupture se produise en 300 ±120 secondes.

Pour déterminer la contrainte de rupture des panneaux, seule la force ultime est nécessaire. Cette valeur correspond à la force maximum relevée au cours de l'essai, juste avant la rupture (P max). La Figure 4.15 présente une courbe force / déplacement relevée au cours d'un essai de flexion pour un échantillon ayant les fibres disposées longitudinalement sur les plis extérieurs (0°). Le déplacement correspond au déplacement de la traverse car aucune mesure de déplacement rigoureuse n'est effectuée au cours de ces tests. Cette courbe permet néanmoins

d'observer le comportement du panneau pendant l'essai. On observe ainsi une zone élastique au début de l'essai, puis une zone d'endommagement avant la rupture.

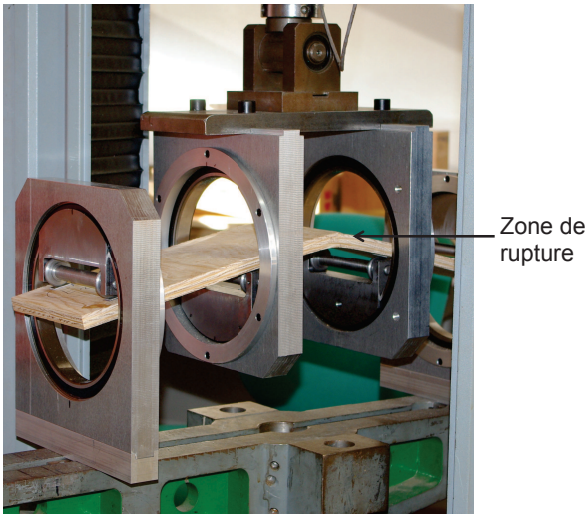


FIGURE 4.14 – *Rupture d'un panneau de contreplaqué testé avec le dispositif BOGUI*

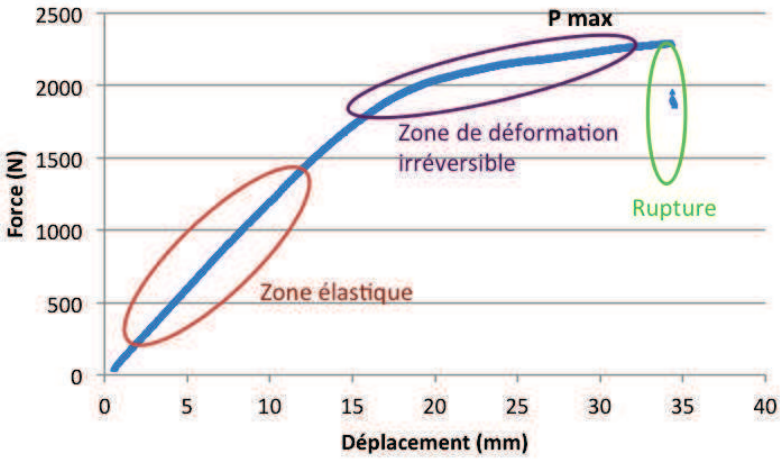


FIGURE 4.15 – *Exemple de courbe force / déplacement traverse selon la direction x_1 au cours d'un essai de flexion BOGUI*

Les valeurs obtenues sont répertoriées dans le Tableau 4.3. Elles sont supérieures aux exigences du bureau d'étude, pour les caractéristiques en flexion requises : une contrainte de rupture moyenne de 40 MPa était demandée dans la direction x_1 et nous avons obtenu une contrainte de 46 MPa.

	0°	90°
Contrainte moyenne (MPa)	46	20
Nombre d'éprouvettes	8	8
Ecart type (MPa)	5	1
COV	12%	7%

TABLE 4.3 – *Caractéristiques de rupture du contreplaqué collé à l'état vert testé avec le dispositif BOGUI, selon x_1 (0°) et selon x_2 (90°)*

Grâce à cet essai, les paramètres élastiques (d_{ij}, MOE_{ij}), ainsi que la contrainte à la rupture des contreplaqués collés à l'état vert ont pu être mesurés sur des panneaux, en supprimant les moments parasites créés par la courbure anticlastique ou la torsion.

4.2.4 Détermination numérique des caractéristiques élastiques des panneaux

Les caractéristiques des panneaux de contreplaqué ont été estimées à l'aide d'un logiciel de calcul des contreplaqués développé à l'I2M [86]. Cet outil permet de calculer numériquement les propriétés élastiques des plaques minces stratifiées constituées d'une superposition de plis de bois. Différentes orientations et épaisseurs de plis peuvent être prises en compte. Lors de la confection du multi-couche, on suppose une continuité au niveau des interfaces, avec la formation d'un joint parfait. Les calculs sont effectués à partir des lois de comportement élastiques du bois massif sous l'hypothèse de faibles déformations en contraintes planes. Des corrections en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau du bois seront apportées aux valeurs d'entrées du modèle [22, 91]. Ce logiciel a été conçu et validé par F. Bos et D. Guitard [86, 7]. Il a permis d'estimer les souplesses de flexion/torsion et les modules d'élasticité des plaques de contreplaqué avec de faibles pourcentages d'erreur.

- Ajustement du modèle

Ce modèle développé précédemment est basé sur les propriétés élastiques du bois massif. L'effet de la colle sur les propriétés du contreplaqué est négligé [92]. Or le déroulage du bois entraîne la création de défauts (fissures) qui modifient son comportement, particulièrement dans la direction tangentielle. La présence des joints de colle influencent également les propriétés mécaniques finales, même si leur effet est faible. Nous avons donc choisi d'étudier

différentes configurations de panneaux lors des simulations, dont les résultats seront comparées aux propriétés mécaniques obtenues expérimentalement. Ainsi, les trois différents cas présentés ci-dessous sont étudiés dans le but d'ajuster le modèle.

1) La première simulation est réalisée en négligeant la présence du joint de colle. On utilise les valeurs standard proposées dans le logiciel pour un bois résineux : E_L= 13 100 MPa, E_T= 636 MPa, G_{LT}= 745 MPa à 12% de teneur en eau, pour une masse volumique de 450 kg/m^3. Des corrections sont apportées en fonction de la masse volumique (MV), selon les Equations (4.16) et (4.17) et en fonction de la teneur en eau (MC), selon les Equations (4.18) et (4.19) [7].

$$E_T^{MV} = E_T^{0,45} + 1910(MV - 0,45) \tag{4.16}$$

$$E_L^{MV} = E_L^{0,45} + 41700(MV - 0,45) \tag{4.17}$$

$$E_T^{MC} = E_T^{12}(1 - 0,03(MC - 12)) \tag{4.18}$$

$$E_L^{MC} = E_L^{12}(1 - 0,015(MC - 12)) \tag{4.19}$$

Dans notre cas, deux masses volumiques seront testées, 450 et 500 kg/m^3. L'épaisseur des plis de bois est de 2,5 mm.

2) Dans la seconde configuration, des plis de colle de 0,1 mm d'épaisseur sont intégrés entre les plis de bois. Les caractéristiques des plis de bois ont les mêmes valeurs que celles entrées au cas 1). Le module d'élasticité de la colle, qui est un matériau isotrope, a été déterminé expérimentalement (Rapport d'essai en Annexe 2). On obtient une valeur proche de 70 MPa. Les deux masses volumiques de 450 et 500 kg/m^{3}pour les plis de bois seront également testées dans le modèle pour cette configuration.

3) Dans le dernier cas, un module d'élasticité, appelé « module endommagé », est utilisé. Il est obtenu à partir de tests réalisés sur un assemblage constitué de deux plis de bois collés parallèlement, selon la procédure décrite ci-dessous. Ainsi, ils correspondent aux modules

élastiques de plis élémentaires composés d'un plis de bois déroulé, comportant des fissures sur la face intérieure ainsi que d'une couche fine de colle. Une épaisseur équivalente de 2,6 mm / pli élémentaire, est entrée dans le logiciel.

- Détermination expérimentale des propriétés élastiques des plis élémentaires

Les tests de traction ont été effectués sur deux plis de déroulage collés avec la colle RP 2554 dont le fil du bois est parallèle. Les tests de traction sont inspirés de la norme NF-EN 408 [93]. Toutefois, une géométrie différente d'éprouvette a été réalisée, car des essais préliminaires ont montré que la rupture avait lieu dans les mors lorsqu'on respectait les dimensions de la norme. L'éprouvette finalement retenue sera de type haltère (Figure 4.16).

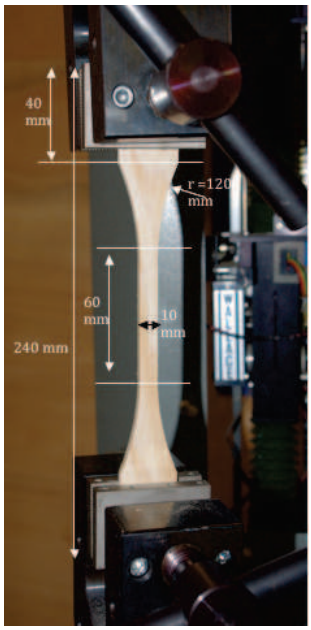


FIGURE 4.16 – *Géométrie des éprouvettes de traction*

Le déplacement de la traverse est fixé à 2 mm/min et un capteur de 500 daN est utilisé pour mesurer l'effort. Un extensomètre disposé dans la partie centrale de l'éprouvette permet d'obtenir l'allongement au cours de l'essai (Figure 4.17).

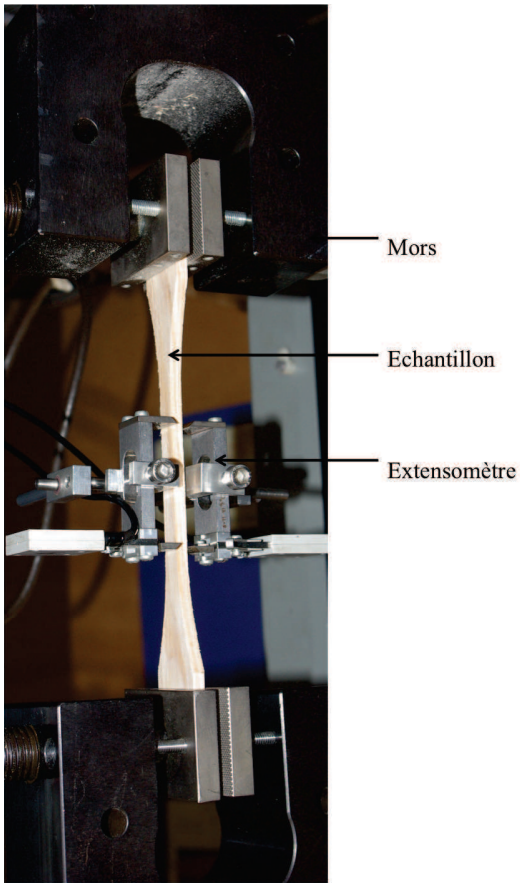
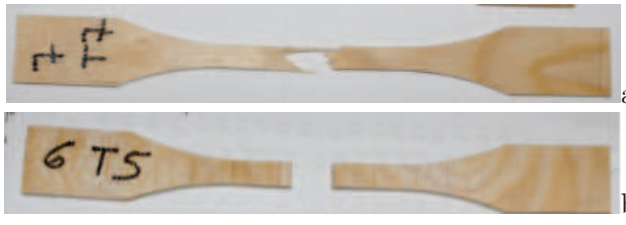


FIGURE 4.17 – *Disposition de l'extensomètre dans la partie centrale de l'éprouvette*

Ces essais permettent de tracer les courbes contrainte/déformation pour chaque éprouvette, à partir desquelles sont obtenus les « modules endommagés » des plis élémentaires. Des éprouvettes sont découpées dans la direction parallèle aux fibres, mais également dans la direction perpendiculaire, pour obtenir les modules d'élasticité dans les deux directions principales. Les éprouvettes coupées dans le sens des fibres seront renforcées par des talons en aluminium au niveau des mors, afin d'assurer la rupture dans la partie utile de l'échantillon (Figure 4.18). 10 échantillons sont testés pour chaque configuration.



a)

b)

FIGURE 4.18 – *Exemple de rupture d'éprouvettes testées dans la direction des fibres (a) et dans la direction perpendiculaire au fil du bois (b)*

Les résultats des essais ont montré que les propriétés élastiques longitudinales sont proches de celles du bois massif, avec un MOE moyen expérimental de 12 500 MPa, les fissures étant orientées parallèlement aux fibres. Dans le sens perpendiculaire aux fibres, les modules élastiques sont largement inférieurs aux modules trouvés dans la littérature pour des plis de bois massifs, avec une valeur moyenne de 364 MPa. La présence de fentes de déroulage (pouvant atteindre 2/3 de l'épaisseur des plis) explique cette différence de valeur pour le MOE selon x_2.

Pour le calcul des propriétés élastiques des contreplaqués, nous entrerons dans le logiciel modèle les « modules endommagés » obtenus expérimentalement ainsi que les épaisseurs équivalentes des plis élémentaires, soit 2,6 mm. Les valeurs brutes prendront ainsi en compte la colle de manière indirecte, à travers l'épaisseur et les modules issus du calcul sur deux plis parallèles assemblés par collage.

- Comparaison des valeurs obtenues par simulation numérique avec les valeurs expérimentales

Nous comparons dans cette partie les valeurs des propriétés mécaniques obtenues suite aux simulations à celles obtenues expérimentalement. Cela permet d'observer la pertinence du modèle et de compléter la caractérisation élastique des panneaux collés à l'état vert, en estimant les paramètres n'ayant pas pu être mesurés expérimentalement.

Les valeurs expérimentales et numériques sont comparées grâce à un test statistique de Student, permettant de définir si l'écart entre la population expérimentale et la valeur modélisée est significatif (cf. Annexe 5). Les résultats simulés sont confrontés aux résultats expérimentaux dans le Tableau 4.4.

	Modules d'élasticité (MPa)				Souplesses de flexion/torsion $10^{-6}(m.N)^{-1}$			
	E_{11}	E_{22}	E_{66}	E_{12}	d_{11}	d_{22}	d_{66}	d_{12}
Valeurs issues des simulations des panneaux								
Configuration 1) : plis de bois déroulés de 2,5 mm sans colle								
Masse volumique : 450 kg/m^3	10578	3250	745	-126246	581	1890	8250	-48
Masse volumique : 500 kg/m^3	12259	3762	794	-147888	501	1630	7734	-41
Configuration 2) : plis de bois déroulés de 2,5 mm + plis d'adhésifs de 0,1 mm								
Masse volumique : 450 kg/m^3	9021	2774	661	-95383	620	2015	8454	-59
Masse volumique : 500 kg/m^3	10257	3166	730	-105222	545	1766	7655	-53
Configuration 3) : plis élémentaires de 2,6 mm comprenant le bois déroulé + la colle - modules endommagés								
	10016	2900	-	-195832	545	1883	-	-30
Valeurs issues des essais expérimentaux sur les panneaux								
Moyenne expérimentale (n=8)	10700	2770	non mesuré	-	483	1973	non mesuré	-
$I_{5\%}$	11752 ≥ $E_{11\ sim}$ ≥ 9594	2912 ≥ $E_{22\ sim}$ ≥ 2627			531 ≥ $d_{11\ sim}$ ≥ 436	2078 ≥ $d_{22\ sim}$ ≥ 1869		

TABLE 4.4 – *Comparaison des valeurs expérimentales et simulées obtenues pour des panneaux 5 plis Valeurs expérimentales et valeurs simulées situées hors de l'intervalle de confiance*

$I_{5\%}$ représente l'intervalle de confiance dans lequel les valeurs simulées n'ont pas d'écart significatif avec les valeurs expérimentales. Ces résultats montrent que les propriétés mécaniques en élasticité des panneaux peuvent être approchées de manière fiable à l'aide du logiciel pour la configuration 3 utilisant des plis endommagés. Nous observons que les écarts entre les valeurs modélisées et les valeurs expérimentales ne sont pas significatifs, sauf pour la valeur d_{11}. Pour les configurations 1 et 2 on obtient des valeurs plus éloignées des valeurs expérimentales, avec des modules d'élasticité souvent supérieurs à ceux des échantillons testés. La configuration 3 prend en compte les propriétés réelles des plis de bois déroulés, elle intègre également la présence de l'adhésif (modules et épaisseurs équivalents) ; ces modifications permettent une bonne estimation des propriétés élastiques des panneaux.

Ces travaux ont permis de caractériser les panneaux en élasticité et jusqu'à la rupture. Les propriétés mécaniques en flexion du matériau formé sont ainsi connues, elles s'approchent des propriétés obtenues pour des contreplaqués industriels de même épaisseur en pin Maritime, selon les données de l'entreprise Rolpin (la fiche technique d'un contreplaqué standard est donnée en Annexe 7). De plus, les contraintes mesurées montrent que les panneaux répondent aux critères exigés par le bureau d'étude pour une utilisation des panneaux en tant que bordé du bateau défini (Annexe 8). Grâce au modèle numérique associé, d'autres configurations (épaisseurs et nombre de plis de bois, angle du fil notamment) pourront être modélisées de cette manière afin d'obtenir une estimation des propriétés élastiques des panneaux de différente composition.

Conclusion générale et perspectives

Les problématiques liées au collage à forte teneur en eau de plis de bois déroulés ont été étudiées dans cette thèse, dans le but de réaliser des panneaux de contreplaqué adaptés à une utilisation en construction navale.

Une première partie bibliographique a permis de définir le procédé de réalisation de panneaux de contreplaqué collés à l'état vert. Il s'agit du procédé de moulage sous vide, inspiré de la technologie de fabrication des matériaux composites. Cette technique a plusieurs avantages, correspondant aux attentes du chantier naval Dubourdieu, partenaire de cette étude. En effet, des panneaux de grandes dimensions et sans jointures peuvent être réalisés de manière simple, notamment sans ajout de fortes pression, avec des formes et des épaisseurs variées.

Les paramètres de collage ont ensuite été étudiés. Si certains d'entre eux, ayant une influence sur la qualité du collage, ont pu être déterminés grâce aux études réalisées précédemment sur ce sujet, d'autres ont été testés expérimentalement. Les effets du grammage d'adhésif et de la teneur en eau du bois ont particulièrement été étudiés et quantifiés à l'aide d'un plan d'expérience. Les analyses de ces travaux ont fait apparaitre que la teneur en eau avait un effet prédominant sur le grammage de colle, avec un joint ayant de meilleures performances entre 30% et 60% de teneur en eau. Deux grammages ont été testés, 250 et 500 g/m^2, le grammage le plus élevé entrainant la formation d'un joint très légèrement plus performant lors des sollicitations en cisaillement.

Suite à ces observations nous avons souhaité comprendre et caractériser les phénomènes intervenant lors de la formation des joints. Pour atteindre cet objectif, les propriétés de surface des matériaux (tension de surface des colles ou énergie de surface du bois) ont été

approchées dans un premier temps. Des mesures de mouillabilité, réalisées avec l'adhésif polyuréthane utilisé sur des plis de pin Maritime à différentes teneurs en eau ont également permis d'analyser le comportement de la colle au contact du bois. Ces essais nous ont révélé que pour une teneur en eau variant de 12% à environ 30% (point de saturation des fibres), l'énergie de mouillage fournie par le système augmente avec la teneur en eau, ce qui implique une diminution de l'affinité entre le bois et la colle. Elle est ensuite constante pour une teneur en eau variant de 30% à 60%.

Des analyses microscopiques et tomographiques des joints ont complété ces observations. Les résultats sont en accord avec les performances mécaniques obtenues précédemment, c'est-à-dire qu'à une teneur en eau de 12%, qui correspond donc à une mouillabilité très importante, la quasi-totalité de la colle appliquée est absorbée dans le matériau, sans rester au niveau du joint. Le bois est alors trop sec pour permettre un collage performant quelle que soit la quantité d'adhésif testées. Une forte imprégnation est également observée pour les teneurs en eau de 30% et 60%, cependant une quantité de colle plus importante au niveau du joint permet d'obtenir des performances mécaniques plus élevées. Pour les collages réalisés à 100% de teneur en eau, une quantité importante d'eau à la surface réduit la formation de liaisons entre l'adhésif et le matériau bois : la mouillabilité est faible, cela se traduit par des performances mécaniques plus basses. L'hypothèse évoquée pour expliquer ces différents résultats est qu'une quantité précise d'eau doit être en contact avec une quantité connue d'adhésif lors du collage, de manière à ce que l'adhésif réagisse avec l'eau dont il a besoin pour polymériser, tout en créant des liens à la surface du bois. Ces observations à plus fine échelle ont permis d'interpréter la qualité de l'adhésion lors de variations des paramètres contrôlés (teneur en eau du bois, grammage et formulation d'adhésif).

Ces travaux ont permis de fixer une plage d'évolution des paramètres pour un collage performant au sein de laquelle les panneaux ont les propriétés requises pour un usage en milieu extérieur. Cependant, les panneaux étant à destination du secteur naval (notamment pour la réalisation de bordés) d'autres critères sont à satisfaire pour répondre aux exigences du bureau d'étude responsable du projet. Ces contraintes techniques nous ont amené à réaliser une caractérisation mécanique des panneaux en flexion principalement. Un dispositif spécifiquement dédié à l'étude des plaques, l'essai BOGUI, a été mis en oeuvre lors de la réalisation des tests. Ce dispositif comporte des roulements au niveau des appuis, qui ont la particularité

d'être des appuis ponctuels. La torsion et la courbure anticlastique potentiellement induites lors de la réalisation des tests sont alors libérées. Les propriétés élastiques des panneaux peuvent donc être estimées de manière précise pour des éprouvettes s'approchant plus de plaques que de poutres, même si elles présentent un déséquilibre (dû la variation de l'angle du fil dans les plis déroulés, ou à la disposition des plis approximativement à 0/90° lors de la fabrication des panneaux).

Pour répondre à la problématique initiale, les propriétés du bois à l'état vert ainsi que la technologie du moulage sous vide représentent une association pertinente pour certaines applications industrielles. Un protocole a été instauré pour la réalisation des panneaux ; il a permis la fabrication de démonstrateurs, réalisés suite aux études présentées dans ce mémoire. Quatre panneaux de 6 m ont été produits selon le procédé établi dans l'Annexe 8, afin d'être mis en oeuvre sur un bateau appelé « Greencanot ».

Les perspectives de cette thèse sont nombreuses. Lors de la réalisation des panneaux, dans tous les cas de figure testés, le grammage le plus élevé entraîne de meilleure propriétés du joint, car l'imprégnation de la colle dans le bois est très importante. Une réflexion peut être menée pour obtenir des joints plus épais et réguliers pour un grammage de colle plus faible, par exemple en continuant la réflexion sur la colle (ajout de charges, viscosité notamment), pour limiter sa pénétration dans le bois. La poursuite des analyses tomographiques permettra également d'apporter plus de connaissances concernant les phénomènes de migration de la colle dans le bois.

On notera également l'importance de continuer les recherches vers la tenue à long terme (durabilité) de la coque. Des essais de durée de vie et de fluage pourront être envisagés. Les conditions d'usage des coques sont sévères, elles sont en contact avec l'eau salée, et soumises à des variations de température et d'humidité en fonction des saisons et de leur utilisation (stockées en hangar ou dans le port). Des essais de durée de vie et de fluage pourront être envisagés.

Par ailleurs, le comportement du bois soumis à un séchage sous vide pourra aussi être analysé dans le but de réduire les fissures créées pendant ce procédé sur les faces et sur les plis internes des panneaux de contreplaqué dans le sens des fibres. La fissuration ne pose pas de problème pour l'utilisation des panneaux en tant que bordés de bateaux, puisque la coque est étanchéifiée, stratifiée à la fibre de verre et recouverte d'un gel coat dans la suite du procédé de fabrication. Par contre, ces fissurations sont gênantes d'un point de vue esthétique pour d'autres applications industrielles, par exemple lors de l'utilisation des panneaux pour l'aménagement intérieur des bateaux.

Ces fissures peuvent être dues à une température trop élevée lors du séchage, qui entraînerait un endommagement des plis lors de l'ébullition de l'eau, ou à la présence initiale de défauts sur les plis de bois. Mais elles sont aussi dues en grande partie à l'orthotropie des plis de bois : le contreplaqué est constitué par le collage des plis successivement à 0 et 90°. Le retrait dans le sens transverse du bois (environ 5% pour passer d'un bois saturé à un bois ayant une teneur en eau de 12%) est empêché par sa liaison par collage au pli disposé perpendiculairement et dont le retrait longitudinal et proche de 0. Ainsi, les fissures apparaissent lorsque la déformation due au retrait engendre des contraintes supérieures à la résistance du matériau.

Cette déformation dépend des conditions de température, de teneur en eau et de la charge appliquée (pression surfacique) sur le panneau en fonction du temps.

On peut considérer que l'apparition des fissures est due à une combinaison de comportements élastique, visqueux et mécanosorptif. La déformation élastique du bois est connue, en fonction de la teneur en eau ou de la température. La formulation de la déformation visco-élastique intervient peu ici car les temps sont courts. Le couplage contraintes/variations hydriques du bois se traduit par un comportement mécanosorptif. Une première approche de ces mécanismes, inspirés notamment de différents travaux (J. Gril [94], J.-M. Husson [95], F. Dubois, ou M. Chaplain), permet d'ouvrir des pistes pour comprendre les phénomènes de mécanosorption ayant lieu lors de variations de température et de teneur en eau dans le bois. Il serait intéressant de continuer les recherches menant à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanosorptif, afin de déterminer le compromis temps de séchage / pression / temps permettant de réduire les fissures engendrées.

Liste des tableaux

1.1 *Détermination de la masse volumique anhydre d'un lot de déroulage de pin Maritime et rapport V_0/V_H associé pour un nombre n d'échantillons*[25] 27

1.2 *Propriétés d'un résineux standard en fonction de sa teneur en eau* [22, 27] 30

1.3 *Paramètres de collages définis pour l'adhésif polyuréthane Collano, de référence RP 1127* [30] 34

2.1 *Définition des niveaux et des facteurs du plan d'expériences* 49

2.2 *Paramètres de fabrication des panneaux* 50

2.3 *Procédés de pré-traitement des éprouvettes* effectués [48] 52

2.4 *Contraintes de cisaillement mesurées lors des tests* 54

2.5 *Analyses MINITAB® de la régression générale $t = f(G, MC)$ pour le traitement I* . 57

2.6 *Analyses MINITAB® de la régression générale $t = f(G, MC)$ pour le traitement II* . 59

2.7 *Comparaison des réponses expérimentales et modélisées au point central* 61

2.8 *Résultats obtenus en fonction des cycles de séchage* 69

2.9 *Comparaison du séchage de panneaux collés et non collés* 71

3.1 *Propriétés de surface des liquides utilisés* 81

3.2 *Paramètres thermodynamiques du bois en surface à différentes teneurs en eau* 82

3.3 *Propriétés de surface de différents adhésifs polyuréthane* 83

4.1 *Résultats de l'essai Arcan pour différents angles de sollicitation* 100

4.2 *Caractéristiques élastiques du contreplaqué collé à l'état vert testé avec le dispositif BOGUI* 114

4.3 *Caractéristiques de rupture du contreplaqué collé à l'état vert testé avec le dispositif BOGUI, selon x_1 (0°) et selon x_2 (90°)* 116

4.4 *Comparaison des valeurs expérimentales et simulées obtenues pour des panneaux 5 plis Valeurs expérimentales et valeurs simulées situées hors de l'intervalle de confiance* 121

Table des figures

1.1 *Répartition des différents matériaux utilisés pour la construction de bateaux de plaisance en France en 2009 [1]* 10

1.2 *Représentation des techniques (a) de moulage sous vide et (b) d'infusion. La Figure c) représente le stratifié polymérisé sous vide avant démoulage* 12

1.3 *Techniques de fabrication de bateaux bois : a) Strip-planking, b) bois moulé* [6] 13

1.4 *Illustration des étapes de fabrication d'un bordé de bateau en contreplaqué* (chantier naval Dubourdieu*)*. 14

1.5 *Schéma de fabrication du contreplaqué* [9] 16

1.6 *Présentation du procédé de déroulage de bois - Formation de fissures sur la face tendue ([10], A. Dupleix)* 16

1.7 *Composition d'un contreplaqué 5 plis symétrique. d1, d3, d5 ont l'angle du fil du bois parallèle à l'axe 1, d2 et d4 ont l'angle du fil perpendiculaire [11]. Direction 1= direction longitudinale des fibres du pli extérieur, 2 = tangentielle, 3 = perpendiculaire aux plans de collage* 17

1.8 *Opération de cintrage d'un panneau de contreplaqué sous presse* [4] 18

1.9 *Système utilisé lors de la mise en œuvre du moulage sous vide* 19

1.10 *Détermination de la courbure des panneaux. L_1 et L_2 sont respectivement les longueurs des fibres supérieures et inférieures de la pièce cintrée* 21

1.11 *Réalisation d'une coque en contreplaqué moulé - étape de pose des plis de bois* [18] . . 21

1.12 *Présentation de différentes méthodes utilisées pour mouler du bois sous vide* [16] . . . 23

1.13 *Structure du bois de résineux à différentes échelles* [10, 22, 23] 24

1.14 *Les trois états de l'eau dans le bois* **[10]** 26

1.15 *Evolution du module de rupture (MOR) en fonction de la teneur en eau* [20]. *A : traction parallèle au fil du bois, B : flexion, C : compression parallèle au fil du bois, D : compression perpendiculaire au fil du bois, E : traction perpendiculaire au fil du bois.* 28

1.16 *Evolution du MOE en fonction de la teneur en eau* [26] 29

1.17 *Effet couplé de la teneur en eau du bois et de la température sur le module d'élasticité relatif* [29] 31

2.1 *Schéma d'un panneau élémentaire de bordé sur la charpente* 41

2.2 *Rôle des différents acteurs dans le dimensionnement d'une structure navale* 42

2.3 *Etapes suivies pour la réalisation des panneaux* 43

2.4 *Inventaire des paramètres de fabrication des panneaux (facteurs contrôlés et non-contrôlés)* 45

2.5 *Représentation graphique du plan d'expérience défini* 49

2.6 *Configuration des échantillons de cisaillement (a) et essais mécaniques associés (b) selon la norme NF EN 314* [48] 53

2.7 *Evaluation du pourcentage de rupture cohésive apparente dans le bois* 53

2.8 *Traitement I : analyse statistique du collage en fonction du grammage et de la teneur en eau : a) graphique des effets principaux et b) graphique des interactions* 55

2.9 *Traitement II : analyse statistique du collage en fonction du grammage et de la teneur en eau : a) graphique des effets principaux et b) graphique des interactions* 55

2.10 *Corrélation de la contrainte de cisaillement numérique et expérimentale pour le traitement I* 59

2.11 *Surface et courbe de réponse pour les traitems I (a) et II (b) représentant la contrainte de cisaillement en fonction de G et MC* 60

2.12 *Evolution de la pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température* . 64

2.13 *Représentation des flux propres au séchage sous vide[66] ; FWBF (free water bulk flow) flux d'eau libre, VWBF (vapor water bulk flow) flux d'eau à l'état de vapeur* 65

2.14 *Cycle de séchage* 67

2.15 *Mécanisme d'adsorption du gel de silice* 67

2.16 *Déformation des plis suite au séchage à l'air libre (à gauche) sous vide avec cycles (à droite)* 68

2.17 *Panneau témoin (20°C, sans sels absorbants)* 69

2.18 *Comparaison des fentes créées lors d'un séchage cyclique à 65°C maximum (a) et d'un séchage constant à 70°C (b)* 70

2.19 *Paramètres de séchage définis* 70

3.1 *Séquences de collage et moyens de contrôle* 76

3.2 *a) Schématisation de la goutte de liquide sur le substrat bois, avec γ_{SV} l'énergie de surface du solide, γ_{LV} la tension de surface du liquide, γ_{SL} l'énergie d'interaction solide/liquide. b) 3 gouttes ont été appliquées à la surface simultanément, et ont été photographiées après 30 s. La goutte de gauche a un grand angle de contact, alors que celle de droite montre une meilleure mouillabilité avec un plus faible angle de contact* [20]. 77

3.3 *Photographie d'une goutte tombée au contact du substrat bois* 80

3.4 *Cosinus de l'angle de contact en fonction du temps pour une goutte de glycérol déposée sur la surface d'un bois à 100% de teneur en eau* 81

3.5 *Composante polaire de l'énergie de surface du bois g_S^P en fonction de sa teneur en eau (mouillant : glycérol)* 82

3.6 *Mesure d'angles de contact sur 6 échantillons de pin Maritime à MC= 30%, RP 2554.* 85

3.7 *Mesure des angles de contact formés entre l'adhésif RP 2554 et le substrat pin Maritime en fonction du temps et de la teneur en eau du pli de bois* 86

3.8 *Comparaison des angles de contact moyens à différentes teneurs en eau après 50 sec.* 86

3.9 *Energie de mouillage du bois avec la colle 2554 en fonction de sa teneur en eau* . . . 87

3.10 *Photos du joint de colle observé par microscopie optique - Barre d'échelle = 0,5 mm. Imprégnation de la colle (RP 2554) dans le bois (pin Maritime) : les flèches montrent les cellules remplies d'adhésif. a), b) Configurations 500-60%.* 88

3.11 *Photos du joint de colle observé par microscopie optique - Barre d'échelle = 0,5 mm. a) Morphologie du joint pour la configuration 500-12%, b) morphologie du joint pour la configuration 500-30%, c) morphologie du joint pour la configuration 500-60%, d) morphologie du joint pour la configuration 500-100%.* 89

3.12 *a) Principe d'acquisition d'images par microtomographie X. Cas d'une source conique. b) Image d'une projection de l'atténuation aux rayons X. c) Dimensions 2048×2048 pixels. Image de l'une des 2048 coupes longitudinales (parallèles aux faces) après reconstruction. Une zone d'intérêt est extraite dans l'image initiale (au centre ici) pour réduire en particulier la taille mémoire de l'échantillon.* 91

3.13 *Microtome X-Radia préparé pour l'acquisition d'images de l'échantillon placé au centre, ENSEIRB, 33400 Talence* 92

3.14 *Images acquises avec le microtomographe X-Radia et traitées grâce au logiciel ImageJ représentant deux coupes orthogonales selon l'axe 1 de l'échantillon observé. a) 16-bit, 1148×1770 pixels, soit 2296×3540 µm ; b) 16-bit, 1124×1770 pixels, soit 2248×3540µm* 93

3.15 *Schéma récapitulatif des propriétés de collage des panneaux en fonction de la teneur en eau du bois - compréhension des phénomènes observés* 94

4.1 *Propagation de fissures en mode I et mode II* 97

4.2 *Vue d'ensemble du montage :* a) *échantillon de contreplaqué représentant les directions orthotropes 1 (direction parallèle aux fibres des plis extérieurs), 2 (perpendiculaire aux fibres des plis extérieurs), 3 (perpendiculaire aux plans de colle b)* test *en cisaillement pur c) test en traction pure* 98

4.3 *Exemple de rupture lors de l'essai Arcan* 100

4.4 *Courbes d'état limite pour les 5 configurations (m ;n) étudiées : a) courbes hautes ; b) courbes moyennes ; c) courbes basses.* 101

4.5 *Courbe d'état limite résultante* 102

4.6 *a) Principe de l'essai de flexion 3 points b) Schéma RDM associé, T : effort tranchant, M : moment (NF EN 310)* 104

4.7 *a) Principe de l'essai de flexion 4 points (NF EN 789), b) schéma RDM associé, T : effort tranchant, M : moment* 105

4.8 *Particularité de l'essai de flexion 4 points ASTM D3043, méthode B [89]* 106

4.9 *Principe de l'essai BOGUI [90]* 107

4.10 *Définition des courburees pouvant apparaitre au cours de l'essai de flexion BOGUI* [7] 109

4.11 *Schématisation du panneau lors de l'essai BOGUI et notations correspondantes. 1 appui bloqué en rotation, 2 : onglet permettant la mesure de l'angle de rotation a, 3 : LVDT associé, 4 : LVDT transverse permettant la mesure de la flèche f_2, 5 : LVDT longitudinal permettant la mesure de la flèche f_1.* 110

4.12 *Mesure de la rotation - essai BOGUI* 112

4.13 *Exemple de cycles de charge/décharge obtenus pour une éprouvette sollicitée en flexion suivant x_1* 113

4.14 *Rupture d'un panneau de contreplaqué testé avec le dispositif BOGUI* 115

4.15 *Exemple de courbe force / déplacement traverse selon la direction x_1 au cours d'un essai de flexion BOGUI* 115

4.16 *Géométrie des éprouvettes de traction* 118

4.17 *Disposition de l'extensomètre dans la partie centrale de l'éprouvette* 119

4.18 *Exemple de rupture d'éprouvettes testées dans la direction des fibres (a) et dans la direction perpendiculaire au fil du bois (b)* 120

Bibliographie

[1] Conseil Supérieur de la navigation de plaisance et des sports nautiques : Nautisme et environnement – 2ème partie, les impacts liés au cycle de vie du bateau. Rapport technique, CSNPSN, 2009.

[2] AFNOR : *NF EN 12215-5 : Petits navires Construction de la coque et échantillonnage*, 2008.

[3] P. J. Nebesar : Molded boat hull, patent 2,617,126, 1952.

[4] D. Ngo et E. Pfeiffer : *The art of plywood furniture.* Princeton Architectural Press, New York, 2003.

[5] C.E. Chase : The cruising canoe and its outfit. *Harper's New Monthly Magazine*, (363):395–401, 1880.

[6] http ://www.ultramarine-yachts.com/main4f.html.

[7] F. Bos : *Influence des conditions limites sur la caractérisation mécanique élastique et différée des contreplaqués en flexion.* Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France, 1995.

[8] A. Daoui, J. Douzet, R. Marchal et A. Zerizer : Valorisation du bois de pin d'alep par déroulage : optimisation de son étuvage. *BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES*, 294(4):51–64, 2007.

[9] Association Forestière Finlandaise : www.smy.fi/smy/materiaalitdeve.nsf. 1998.

[10] P. Navi et F. Heger : *Comportement thermo-hydromécanique du bois. Application technologiques et dans les structures.* Presses Polytechniques et universitaires romandes, 2005.

[11] G. Steck : *Timber engineerign - STEP 1. Basis of design, material properties, structura components and joints.* Albere, Netherlands, 1995.

[12] W. C. Stevens et N. Turner : *Wood Bending Handbook.* Fox Chapel Publishing Company, USA, 2008.

[13] B. G. Heebink : Bag molding of plywood. Rapport technique 1431, U. S. department of agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison 5, Wisconsin, 1943.

[14] M. Gougeon : *Gougeon Brothers on Boat Construction : Wood and West System Materials.* Gougeon Brothers, fifth edition, 2005.

[15] GOUGEON BROTHERS : *Vacuum Bagging Techniques.* Gougeon Brothers Inc., 2010.

[16] B. G. Heebink : Fluid pressure molding of plywood. Rapport technique 1624, U. S. department of agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison 5, Wisconsin, 1953.

[17] R. E. Glavin : Molding and gluing press, patent 2,401,299, 1946.

[18] K. Hughes : Cylinder mold multihull construction.

[19] P. Jodin : *Le bois, matériau d'ingénierie.* Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, 1994.

[20] Wood handbook-wood as an engineering material. Gen. tech. rep. fpl–gtr–113., Forest Products Laboratory, Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.

[21] J. F. Siau : *Transport Processes in Wood.* Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 1984.

[22] D. Guitard : *Mécanique matériau bois et composites.* Cépaduès, 1987.

[23] Conseil d'Architecture d'Urbanisme et de l'environnement : L'arbre est un être vivant, 2009.

[24] J. Natterer, J. L. Sandoz et M. Rey : *Traité de Génie Civil : Construction en bois, Matériau, technologie et dimensionnement.* Presses Polytechniques et Univeritaires Romandes, Suisse, 2004.

[25] T. Daudruy : Etude du séchage des plis de bois verts afin de définir un procédé de mise en œuvre de ce matériau sous vide sur une coque de bateau. Stage de mastère, Université de Technologie de Troye, Bordeaux, 2012.

[26] M. Goulet et E. Ouellet : Effet de la teneur en humidité du bois sur sa résistance à la traction transversale. *Notes de recherches n° 1, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval, QUEBEC*, 1968.

[27] G. Pluvinage : *La rupture du bois et de ses composites.* 2854282922. Cépaduès, 1992.

[28] R. Rémond, J. Passard et P. Perré : The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood : A comprehensive model applied to drying and bending. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 26(3):558–572, 2007.

[29] P.H. Sulzberger : *The effect of temperature on the strength of wood, plywood and glued joints.* Melbourne Aeronautical Research Consultative Commitee, 1953.

[30] R. Pommier : *Compréhension de l'aboutage du bois vert : élaboration du procédé et principes physico-mécaniques appliqués au Pin maritime.* Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France, 2006.

[31] M. D. Strickler : End gluing of green lumber. *Forest product journal*, 20(9):47–51, 1970.

[32] G. E Troughton et S. Chow : Finger jointing kiln dried and unseasoned white spruce lumber using the WFPL method. *Forest product journal*, 30(12):48–49, 1980.

[33] J. R. Parker : Greenweld process for engineered wood products. in : The international panel and engineering wood technology exposition. 1994.

[34] M. Sterley : *Green gluing of wood.* Thèse de doctorat, KTH civil and architectural engineering, Stockholm, Suède, 2004.

[35] R. E. Kriebich, P. J. Steynberg et R.W. Hemingway : End jointing green lumber with SoyBond. pages 28–36, 1997.

[36] P. Morlier, B. De Jeso, G. Daude et G.Dimier : Composition adhésive pour matériau humide, brevet 2 842 818, 2002.

[37] Part 2 : Green gluing. *In Core document of the COST Action E34 Bonding of Timber*, pages 93–154. M. Dunky, B. Källander, M. Properzi, K. Richter, M. Van Leemput, 2008.

[38] D. Ren : *Moisture-Cure Polyurethane Wood Adhesives : Wood/Adhesive Interactions and Weather Durability.* Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginie, USA, 2010.

[39] S. Karastergiou, G. I. Mantanis et K. Skoularakos : Green gluing of oak wood (quercus conferta l.) with a one-component polyurethane adhesive. *Wood Material Science & Engineering*, 3(4):79–82, 2008.

[40] S. L. Wendler et C. E. Frazier : Effect of moisture content on the Isocyanate/Wood adhesive bondline by 15N CP/MAS NMR. *Journal of Applied Polymer Science*, 61:775–782, 1996.

[41] E. Serrano, J. Oscarsson, B. Enquist, M. Sterley, H. Petersson et B. Källsner : Green-glued laminated beams – high performance and added value. *In Proceedings*, Italy, 2010.

[42] F. A. Kamke et J. N. Lee : Adhesive penetration in wood - a review. *Wood and Fiber Science*, 39(2):205–220, 2007.

[43] P. Hass, F. K. Wittel, M. Mendoza, M. Stampanoni, H. J. Herrmann et P. Niemz : Adhesive penetration in beech wood : experiments. *Wood science and technology*, 46(1-3):243–256, 2012.

[44] I. Gavrilovic-Grmusa, J. Miljkovic, M. Diporovic-Momcilovic et G. Radošević : Penetration of urea formaldehyde adhesives in wood tissue : Part II - radial penetration of UF adhesives into silver fir. *Bulletin of the Faculty of Forestry*, 99:33–42, 2009.

[45] S. E. Johnson et F. A. Kamke : Quantitative analysis of gross adhesive penetration in wood using fluorescence microscopy,. *The Journal of Adhesion*, 40:47–61, 1992.

[46] Bureau Veritas : *Rules for the Classification and the Certification of Yachts NR500*, 2008.

[47] V.J. Papazoglou : Logiciels pour l'analyse et la conception de structures marines en composites : Problemes et perspectives. *In* IFREMER, éditeur : *La construction navale en composites*, volume 15, 1992.

[48] AFNOR : *NF-EN 314 : Contreplaqué : Qualité du collage*, 1993.

[49] D. T. Knuth et E. McCoy : Bacterial deterioration of pine logs in pond storage. American Society for Microbiology, 1961.

[50] H. F. Holmgren : Impregnation of water-logged pine. *Rec. Conv. Brit. Wood Press. Ass.*, 1961.

[51] J. A. Dunleavy et A. J. McQuire : The effect of water storage on the cell structure of sitka spruce (picea sitchensis) with reference to its perméability and preservation. *Journal of the Institute of Wood Science*, 5(2), 1970.

[52] H. H. Unligil : Effect of water storage and trichoderma infection on penetrability of wood. *Bibliography with abstracts*, 1969.

[53] R. Ille : Deep impregnation of refractory softwoods. *Die Holzindustrie*, 1957.

[54] O. Suolahti et A. Wallen : The effect of water storage on the water absorbtion capacity of pine sapwood. *Holz Roh-u Werkstoff*, 16(8), 1958.

[55] G. Elbez : *Le collage du bois.* CTBA, 2002.

[56] J. Poirier : Analyse de la variance et de la régression - plans d'expérience. *Techniques de l'ingénieur*, 1993.

[57] F. Louvet et L. Delplanque : *Les plans d'expérience : une approche pragmatique et illustrée.* Association Expérimentique, 2005.

[58] J. Goupy : Plans d'expériences. *Techniques de l'ingénieur*, 1997.

[59] F. Simon : *Endommagement et rupture des joints collés sollicités en traction ou cisaillement. Application au collage du bois.* Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France, 2001.

[60] C. Basilico et M. Martin : Approche expérimentale des mécanismes de transfert au cours du séchage convectif à haute température d'un bois résineux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27(5):657–668, 1984.

[61] J. F. Siau : Wood influence of moisture on physical properties/ kiln drying of lumber, 1995.

[62] S. S. Torres, W. Jomaa, J. R. Puigali et S. Avramidis : Multiphysics modeling of vacuum drying of wood. *Applied Mathematical Modelling*, 35:5006–5016, 2011.

[63] M. De La Cruz-Lefevre, D. Aleon, R Rémond et P. Perré : Reducing shrinkage defaults and/or time thanks to oscillating drying conditions. *FCBA*.

[64] T. A. G. Langrish : Comparing continuous and cyclic drying schedules for processing hardwood timber : The importance of mechanosorptive strain. *Drying Technology*, (31):1091–1098, 2013.

[65] Z. Chen et F. M. Lamb : Investigation of a boiling front during vacuum drying of wood. *Wood and fibre science*, 33(4):639–647, 2001.

[66] Z. Chen : *Primary Driving Force in Wood Vacuum Drying.* Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginie, USA, 1997.

[67] Z. Chen et F. M. Lamb : Vacuum drying process for green hardwood parts. *Drying Technology*, 22(3):577–595, 2004.

[68] Ouvrage collectif publié sous la direction de J.J. Meynis de Paulin : *Les colles et adhésifs et leurs emplois industriels. II-Les matières premières*, volume Tome 2. G. Le Prat, Paris, 1977.

[69] A. Pizzi et K. L. Mittal : *Handbook of Adhesive Technology.* M. Dekker, Inc, USA, second edition, revised and expansed édition, 2003.

[70] D.J. Gardner : Wood : Surface properties and adhesion. *In Encyclopedia of Materials : Science and Technology*, pages 9745–9748. Elsevier, Michigan, 2001.

[71] E. Brady et F. Kamke : Effect of hot-pressing parameters on resin penetration. *Forest Product Journal*, 38(11/12):63–68, 1988.

[72] E. Liptáková et J. Kúdela : Analysis of the wood-wetting process. *Holzforschung*, 48:139–144, 1994.

[73] M. Walinder : *Wetting phenomena on wood-Factors influencing measurements of wood wettability.* Thèse de doctorat, KTH-Royal Institute of Technology, Dept. of Manufacturing Systems Wood Technology and Processing, Stockholm, Suède, 2000.

[74] M. Scheikl et M. Dunky : Measurement of dynamic and static contact angles on wood for the determination of its surface tension and the penetration of liquids into the wood surface. *Holzforschung*, 52:89–94, 1998.

[75] M. Bouteau : *Propriétés de mouillage de surfaces chimiquement hétérogènes.* Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Laboratoire de physico-chimie des polymères et des interfaces, Cergy-Pontoise, France, 2007.

[76] G. Elbez : La mouillabilité : aspects théoriques et expérimentaux, ctba. Rapport technique, CTBA, 1996.

[77] M. Petrič, A. Kutnar, L. Rautkari, K. Laine et Hughes M. : Influence of surface densification of wood on its dynamic wettability and surface energy. *Advances in contact angle, wettability and adhesion*, 1(16), 2013.

[78] T. Dang-Vu et J. Hupka : Characterization of porous materials by capillary rise method. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 39:47–65, 2005.

[79] M. Arcan, Z. Hashin et A. Voloshin : A method to produce uniform plane stress states with applications to fiber reinforced materials. *Experimental Mechanics*, 18:141–146, 1978.

[80] R. Rikards : Interlaminar fracture behaviour of laminated composites. *Computers and structures*, 76:11–18, 2000.

[81] N. Choupani : Mixed-mode I/II interlaminar fracture of CF/PEI composite material. *Journal of aerospace science and technology*, 3(4):185–193, 2006.

[82] J. Y. Cognard, L. Sohier et P. Davies : A modified arcan test to analyze the behavior of composites and their assemblies under out-of-plane loadings. *Composites, Part A*, 42(1):111–121, 2011.

[83] J.-C. Devilliers, D. Coutellier, E. E. Deletombe et D. Delsart : Détermination des caractéristiques d'interfaces d'un composite verre / epoxy au moyen de l'essai arcan. *Matériaux*, 2002.

[84] P. Caumes : *Rupture d'un matériau anisotrope en conditions polymodales (le bois).* Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, France, 1987.

[85] S.H. Yoon et C.S. Hong : Interlaminar fracture toughness of graphite/epoxy composite under mixed-mode deformations. *Experimental Mechanics*, 3(30):234–239, 1990.

[86] F. Bos et D. Guitard : Validation expérimentale d'un outil de conception des contreplaqués. *Annales Sciences Forestières*, 52:423–431, 1995.

[87] AFNOR : *NF-EN 310 : Panneaux à base de bois - Détermination du module d'élasticité en flexion et de la résistance à la flexion*, 1993.

[88] AFNOR : *NF-EN 789 : Structures en bois - Méthodes d'essai : Détermination des propriétés mécaniques des panneaux à base de bois*, 2005.

[89] Annual Book of ASTM Standards : 4. construction, wood : Plywood in flexure. Designation D 3043 Method B, 1994.

[90] F. Bos et D. Guitard : Qualification expérimentale des contreplaqués en flexion quatre points. *Annales Sciences Forestières*, 54:761–770, 1997.

[91] J. Bodig et B. A. Jayne : *mechanics of wood and wood composites.* Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1982.

[92] M. Wilczyński et K. WarmBier : Elastic moduli of veneers in pine and beech plywood. *Drewno. Pr. Nauk. Donies. Komunik.*, 55(188), 2012.

[93] AFNOR : *NF EN 408 : Structures en bois : Bois de structure et bois lamellé collé, détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques*, 2004.

[94] J. Gril : *Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure.* Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Université Paris VI, Paris, France, 1988.

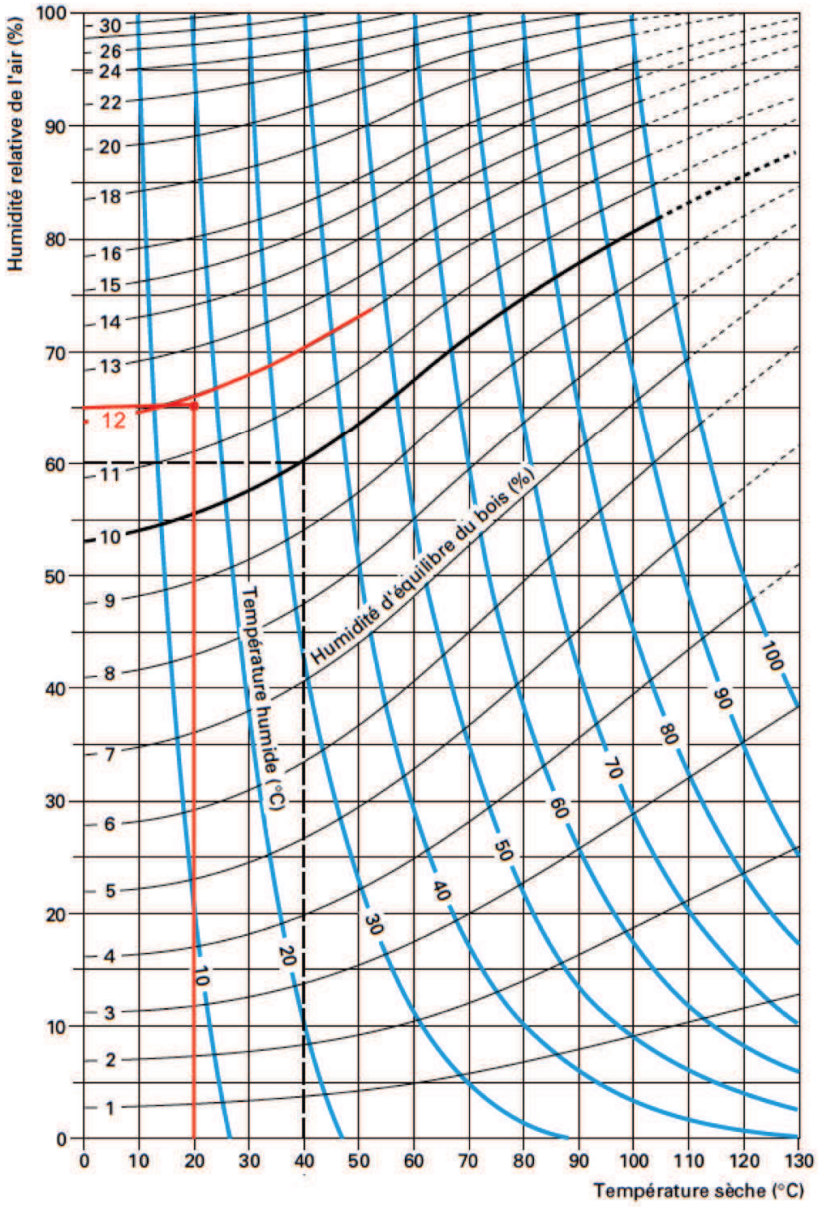
[95] J.-M. Husson : *Loi de comportement viscoélastique avec effet mémoire. Application à la mécanosorption dans le bois.* Thèse de doctorat, Université de Limoges, Limoges, France, 2009.

ANNEXES

ANNEXE 1

Courbes d'équilibre hygroscopique du bois

Ce diagramme permet de déterminer la teneur en eau d'équilibre d'un bois soumis à des conditions de température et d'humidité relative de l'air.



ANNEXE 2

Propriétés des colles utilisées

Les colles utilisées dans cette étude sont issues de l'adhésif de base utilisé pour l'aboutage du bois à l'état vert, de référence RP 1127. Cet adhésif a été modifié pour être utilisé lors de la fabrication de panneaux de contreplaqués, l'adhésif RP 2554 a ainsi été développé. Les propriétés techniques et d'utilisation de ces adhésifs sont exposées en 3 parties :

1) Fiche technique de l'adhésif RP 1127
2) Fiche technique de l'adhésif RP 2554
3) Rapport d'essai : caractérisation mécanique de la colle RP 2554 polymérisée

1) Collano RP 1127

Fiche technique provisoire

Caractéristiques du produit

Base:
Prépolymère isocyanate
Couleur:
Jaune
Densité:
Fluide
Taux de matières solides:
100%
Viscosité:
Env.7500 mPa·s à 20 °C
Stockage:
Dans les emballages d'origine non ouverts, au frais et au sec, 6 mois. Ne pas stocker en dessous de 10 °C

Données d'application

Quantité à appliquer:
De 150 g/m² à 350 g/m², sur l'une des deux surfaces à coller.
Temps ouvert:
Les surfaces à coller doivent être mises sous presse au plus tard 20 minutes après l'application de la colle, dans des conditions d'utilisation normales (20 °C et 65% d'humidité relative).
Le temps ouvert est fortement dépendant des conditions extérieures et de l'humidité du substrat. Il diminue lorsque la température et/ou l'humidité augmentent.
Attention: La colle ne doit pas réagir avant la mise sous presse
Temps de peau:
Env. 35 minutes (20 °C/65% HR)
Pression:
Elle doit être comprise entre 0,2 N/mm² et 0,8 N/mm².
Temps de pressage:
Il dépend de la température et de l'humidité de l'environnement.
Le temps de pressage minimum à 20 °C et 65% d'humidité relative est de 4 heures
Nettoyage:
Le produit non réagi peut être nettoyé avec du PUR Nettoyant tandis que le produit durci peut être éliminé avec du PUR Solvant. Il est nécessaire de s'assurer au préalable que les machines et les différents éléments utilisés résistent au PUR Solvant

Utilisation

Collano RP 1127 est une colle à un composant qui réagit avec l'humidité. Le produit s'applique directement, sans manipulation préalable.
Les surfaces à coller doivent impérativement être propres et dépourvues de substances limitant l'adhésion (graisse, huile, agent de démoulage...).
Les éléments de machine entrant en contact avec la colle doivent être enduits de Collano PUR Trenn.

Mise en oeuvre

Mesure de protection:
Veuillez tenir compte des indications mentionnées sur la fiche technique de sécurité.
Il est recommandé de porter des gants et des lunettes de protection lors de la manipulation du produit à l'état liquide.

Sollicitations

--

Contact

T +41 41 469 91 11
F +41 41 469 91 12
collano@collano.com

Garantie
Nous garantissons la qualité irréprochable et constante de ce produit fabriqué conformément aux normes de qualité ISO. Nos recommandations d'application et les conditions indiquées émanent d'une longue expérience et sont confirmées par la pratique. Les matériaux auxquels ce produit sera associé, de même que les conditions dans lesquelles il sera utilisé peuvent toutefois influer sensiblement sur ses propriétés. D'où la nécessité, pour ses utilisateurs, d'effectuer des essais préalables. Nous vous recommandons de consulter préalablement notre service technique pour toute application ou condition de mise en oeuvre s'écartant de nos recommandations. Les conditions générales de vente et de livraison de Collano sont appliquées.

2) Collano RP 2554

Fiche technique provisoire

Description

Collano RP 2554 est une colle polyuréthane monocomposante polymérisant par réaction avec l'humidité.
Conditionnement :
A convenir.
Base :
Polyuréthane

Utilisation conseillée

Collano RP 2554 est destinée aux collages résistants et aux intempéries de matériaux en bois.
D'autres applications sont possibles, des essais préliminaires sont alors indispensables.
Avant toute utilisation, s'assurer par des essais que le produit correspond bien à l'utilisation souhaitée.

Mise en œuvre

Préparation :
Les surfaces à coller doivent être propres (exemptes de graisse et de poussière).
Substrats :
Les colles polyuréthane mono-composant réagissent à l'humidité de l'air et du substrat. L'assemblage doit comporter au moins un substrat poreux, laissant passer l'humidité.
Quantité à appliquer :
150-350 g/m². La quantité déposée dépend des matériaux à assembler et du process de dépose utilisé.
Temps ouvert :
Environ 4 heures à 20 °C et 65% d'humidité atmosphérique.
La réactivité augmente avec la température et le taux d'humidité (et inversement).
Pression :
0.2-0.8 N/mm²
Temps de pressage :
Environ 12 heures à 20 °C et 65% d'humidité relative.
Le temps de pressage dépend de la réactivité du produit ainsi que de la température et de l'humidité de l'environnement.
Température d'application :
+10°C à +30°C.

Propriétés physiques et chimiques à l'état liquide

Extrait sec :
100%
Viscosité :
Env. 800-1000 mPas (Brookfield).
Viscosité mesurée après fabrication. Les valeurs peuvent subir des fluctuations à la hausse ou à la baisse lors du stockage du produit.
Inflammabilité :
Non inflammable.
Résistance:
Aux bases acides et solvants faibles.

Nettoyage

Collano RP 2554 fluide avec PUR Nettoyant.
Collano RP 2554 durci avec PUR Solvant 2.

Sécurité au travail

Consulter la fiche de sécurité avant utilisation. Nous vous recommandons de porter des vêtements appropriés, des gants et des lunettes de protection lors de la manipulation du produit à l'état liquide.

Stockage

Protéger de l'humidité.
Environ 3 mois dans nos emballages d'origine hermétiquement clos, stockés dans un local sec et tempéré (stockage entre 15 et 25 °C).

Contact

Collano Adhesives SA
Parc d'activités de la Mossig
F-67521 Marlenheim Cedex
Tel. + 33 (0)3 88 59 27 37
Fax +33 (0)3 88 87 67 93
collano.sa@collano.com

Garantie
Nous garantissons la qualité irréprochable et constante de ce produit fabriqué conformément aux normes de qualité ISO. Nos recommandations d'application et les conditions indiquées émanent d'une longue expérience et sont confirmées par la pratique. Les matériaux auxquels ce produit sera associé, de même que les conditions dans lesquelles il sera utilisé peuvent toutefois influer sensiblement sur ses propriétés. D'où la nécessité, pour ses utilisateurs, d'effectuer des essais préalables. Nous vous recommandons de consulter préalablement notre service technique pour toute application ou condition de mise en œuvre s'écartant de nos recommandations. Les conditions générales de vente et de livraison de Collano s'appliquent.

3) Rapport d'essai: caractérisation de la colle RP 2554

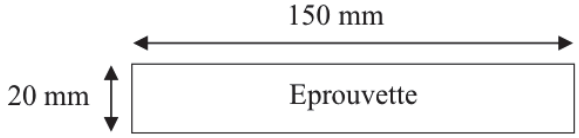
Date : 27/06/2011

Norme suivie : Test de traction selon la norme ISO 527-3 (1995)

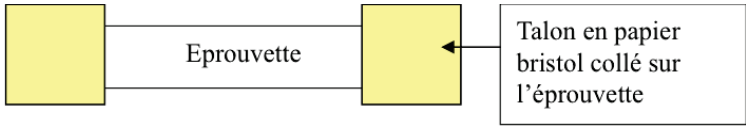
Nature de l'adhésif : Colle polyuréthane de référence Collano RP 2554 (fiche technique jointe), densité : 1010 kg/m^3.

Mode opératoire :

La colle a été appliquée de manière régulière sur un support rectangulaire de téflon, ayant des bords de 0,2 mm de haut. Une couche fine est nécessaire pour obtenir une polymérisation complète de cette colle au contact de l'air, pour des échantillons conditionnés à une température de 20°C et une humidité relative de l'air de 65%. Un film de colle polymérisé est obtenu, il est testé une semaine après avoir été réalisé.
Dimension des éprouvettes :



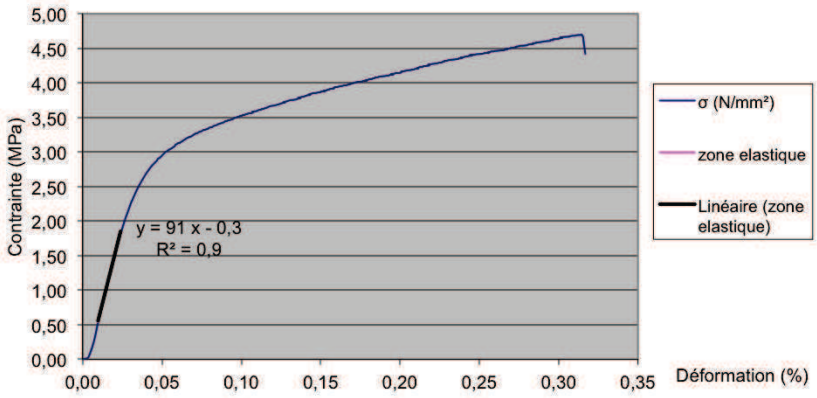
Distance entre les mâchoires : 100 mm
Epaisseur : 0,2 mm environ (mesuré pour chaque éprouvette)
Des talons sont collés de chaque côté de l'éprouvette pour garantir sa tenue dans les mors, et une rupture dans la partie utile de l'éprouvette.



Un capteur de force de 100 daN est utilisé pour la mesure de la force au cours de l'essai. Le déplacement de la traverse est réglé à 10 mm/min.
La déformation de l'échantillon testé est obtenue grâce à un vidéo-extensomètre.

Résultats :

Une courbe type est présentée ci-dessous. Le module d'élasticité MOE (MPa) est relevé. Il correspond à la pente de la zone élastique présentée sur le graphe contrainte/déformation. La contrainte à la rupture σ (MPa) est également calculée à partir de la force maximum relevée au cours de l'essai.



Courbe contrainte/déformation relevée au cours d'un essai de traction sur la colle RP 2554

	MOE (MPa)	Résistance moyenne en traction (MPa)
	91	4,7
	84	4,2
	62	3,9
	58	4,5
	70	4,6
	70	4,3
	-	4,2
	-	5,9
	-	4
	-	4,9
	-	3,7
Moyenne	72	4,5
Ecart type	12	0,68
COV	18%	15%

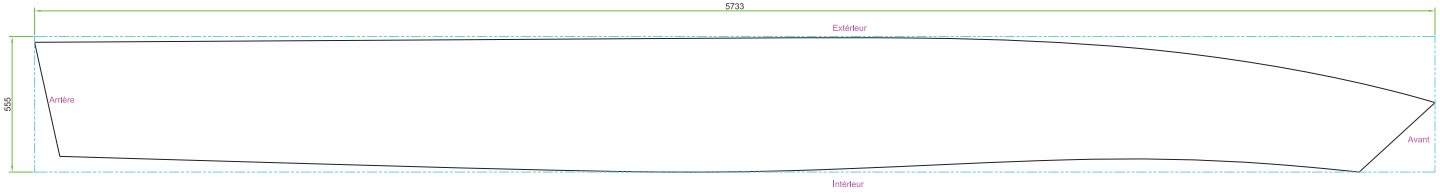
Tableau répertoriant les caractéristiques mécaniques de la colle RP 2554
(tests réalisés au laboratoire I2M, département MPI)

ANNEXE 3

Plans du Greencanot, démonstrateur de l'étude

Les plans présentés ici ont été réalisés par le bureau d'études Orion Engineering. Il s'agit d'un bateau de 6 m de long appelé Greencanot, qui a permis de tester la faisabilité du procédé développé, à travers la réalisation des panneaux du bordé de grandes dimensions (détaillés sur la première Figure ci-après). La seconde Figure montre l'ensemble des plans du bateau en question.

Muraille Bâbord



Fond Bâbord

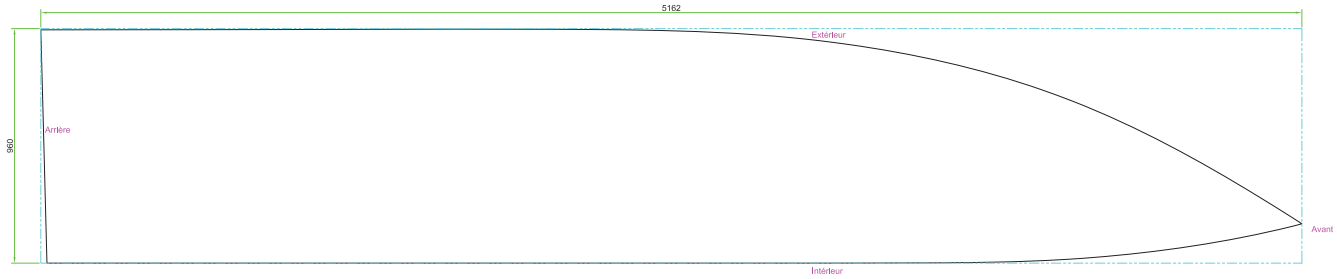
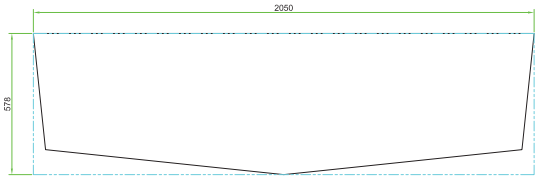
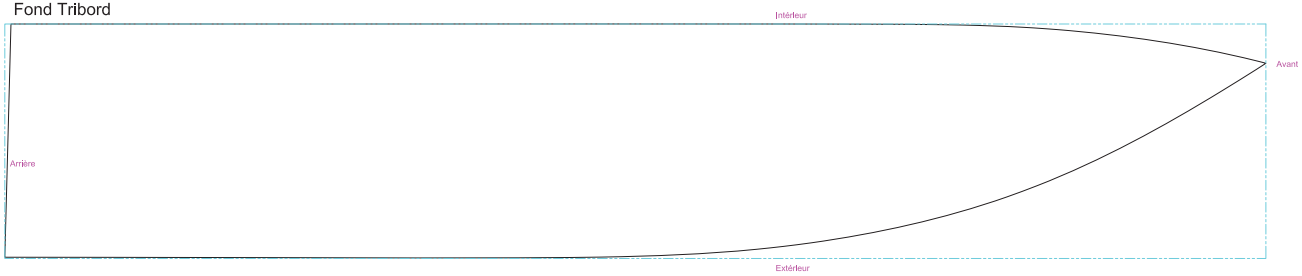


Tableau Arrière



Fond Tribord



Muraille Tribord

Caractiristiques du bateau :

Longueur hors tout.....5,50 m
Largeur hors tout.....2,06 m

Epaisseur de bordé prise en compte pour le développé.....12 mm
Epaisseur de quille prise en compte.....50 mm

INDICE	DATE	MODIFIÉ PAR	OBJET / OBSERVATIONS / MODIFICATIONS
A	31/01/2012	JC.R.	CREATION

DOSSIER : Green Canot

DOCUMENT : Plan de découpe
Fond, muraille et tableau arrière

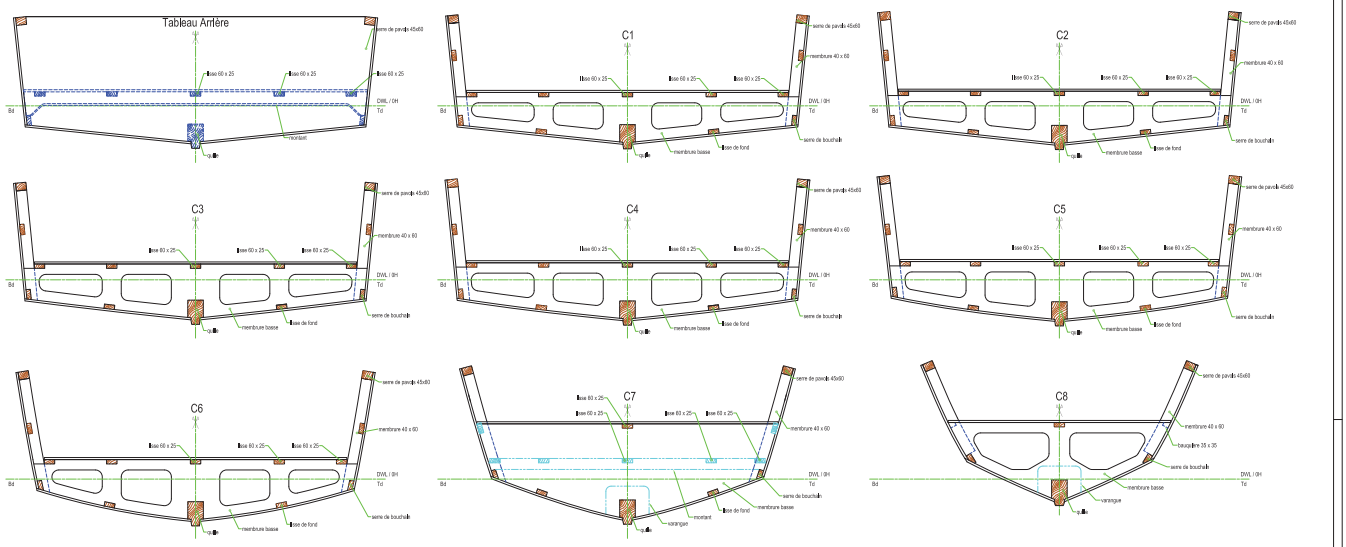
NUMÉRO : ONE--96.03.CUT01.Bordés+TA

ORION NAVAL ENGINEERING
14 Avenue Ferdinand de Lesseps
ZAC Actipolis, 33610 Cestas, France
Tél : 0(33) 5 57 12 83 39 / Fax : 0(33) 5 57 12 84 52
Email : orion-naval-engineering@orange.fr

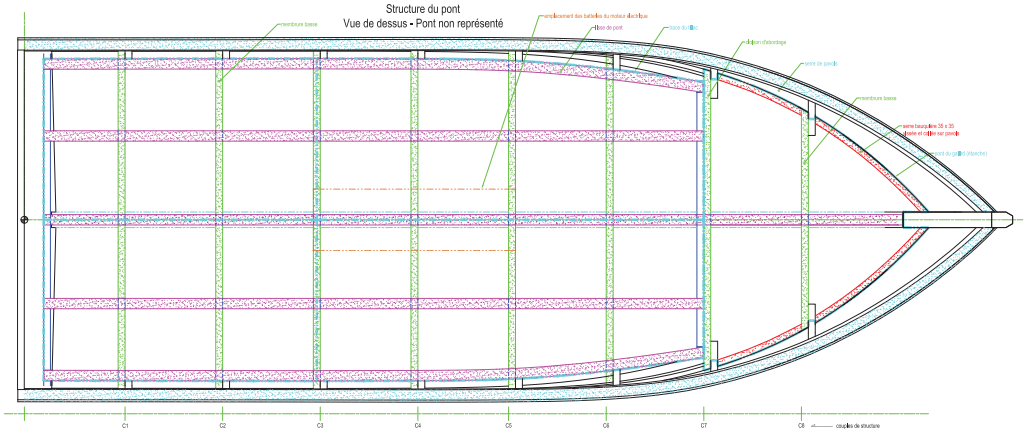
DESSINÉ PAR :	JC.R.	FORMAT :	A1	ECHELLE :	1/10
VERIFIÉ PAR :	L.M.	FOLIO :	1/1	INDICE :	A
DATE CRÉATION :	31/01/2012	DIFFUSION POUR : INFORMATION			

Ce document est la propriété de ORION NAVAL ENGINEERING et ne peut être utilisé ou reproduit en entier ou en partie sans un accord écrit préalable.
This document is the property of ORION NAVAL ENGINEERING and is not to be used or reproduced in whole or in part without written permission.

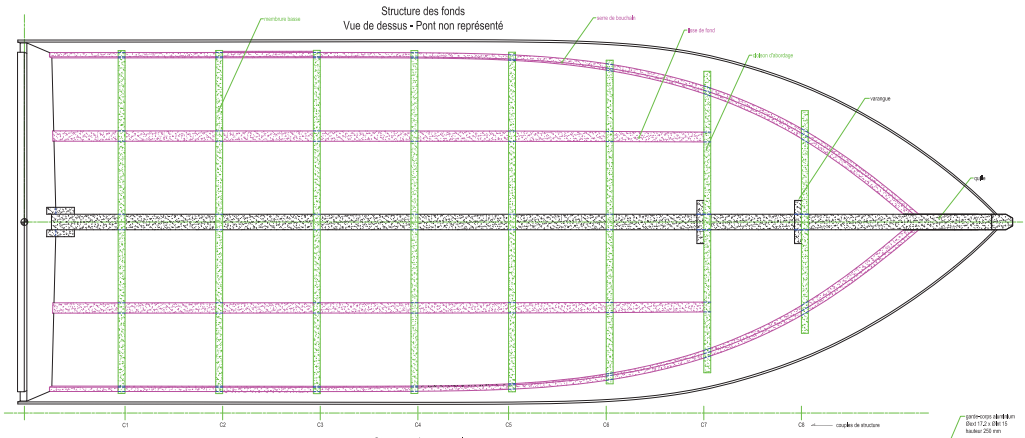
SECTIONS - VUES DE L'ARRIERE



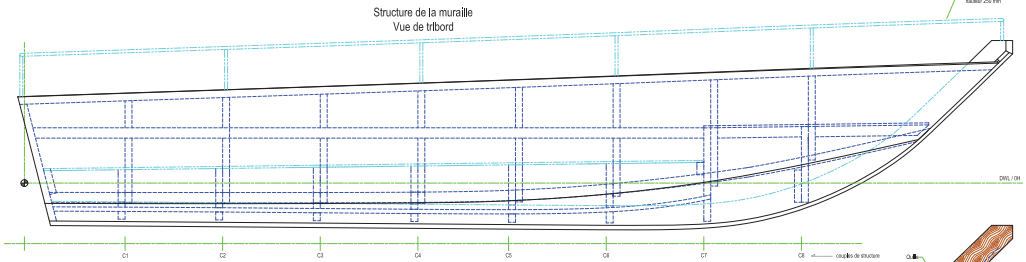
Structure du pont
Vue de dessus - Pont non représenté



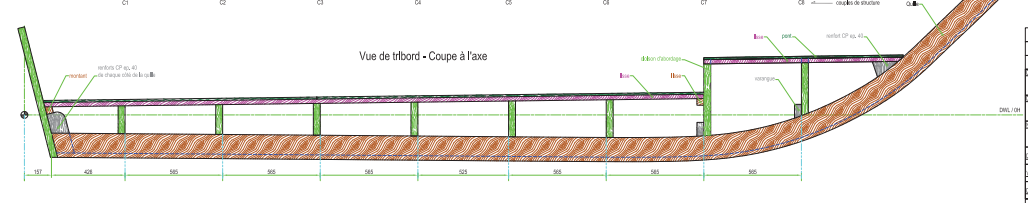
Structure des fonds
Vue de dessus - Pont non représenté



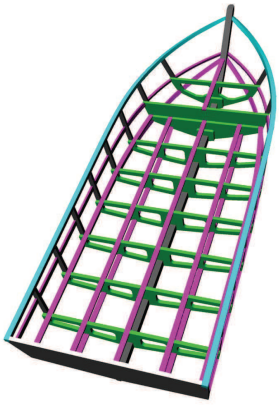
Structure de la muraille
Vue de tribord



Vue de tribord - Coupe à l'axe



Structure assemblée - Vue 3D



Caractéristiques du navire :

Longueur hors tout ..... 4,95 m
Largeur hors tout ..... 1,88 m
Creux ..... 0,87 m

Longueur à la flottaison ..... 4,71 m
Largeur à la flottaison ..... 1,67 m

Déplacement en charge ..... 200 kg
Tirant d'eau en ordre de charge ..... 191 mm
Nombre de personnes max. à bord 4

Echantillonnage et matériaux :

Lisses et serres ..... pin maritime
Bordés et pont ..... contreplaqué okoume ep. 12 mm
Membranes et baïbas intérieurs ..... contreplaqué okoume ep. 40 mm
Quille ..... pin lamellé-collé naval 3D

Assemblage des éléments :

Tableau arrière vissé sur la quille
Membranes basses collées et fixées par cavaliers sur la quille
Membranes hautes collées et clouées sur les membranes basses
Lisses collées et clouées sur les membranes
Bordé collé et cloué sur les préfaisceaux
Baugère de gabarit double en colle sur bordé
Pont du gabarit collé et cloué sur les préfaisceaux
Tableau maintenu par cale

PROTOTYPE DE DÉMONSTRATION

B	06/03/2012	J.C.R.	Pavois surélevé de 150 mm
A	06/03/2012	J.C.R.	CREATION
INDICE	DATE	MODIFIE PAR	OBJET / OBSERVATIONS - MODIFICATIONS

OUVRAGE : Green Canot

DOCUMENT : Plan de structure
Structure générale

NUMERO : ONE–96.01.STR01

RION NAVAL ENGINEERING
14 Avenue Ferdinand de Lesseps
ZAC Antipolis, 33610 Cavalaire, France
Tel. 0033 5 57 72 03 36 / Fax. 0033 5 57 72 04 52
Email : rione-naval-engineering@orange.fr

DESSINE PAR : J.C.R. | FORMAT : A0 | ECHELLE : 1/10
VERIFIE PAR : L.M. | FEUILLE : 1/1 | INDICE : B
DATE CREATION : 06/03/2012 | DESSIN EN COURS : INFORMATION

Le document est la propriété de RION NAVAL ENGINEERING et ne peut être utilisé ou reproduit sans l'accord écrit préalable.
This document is the property of RION NAVAL ENGINEERING and must not be used or reproduced without prior written permission.

ANNEXE 4

Matrice complète d'analyse du plan d'expériences

Le Tableau ci-après présente, dans les trois premières colonnes, les niveaux des paramètres étudiés ; le grammage et la teneur en eau du bois, et la réponse expérimentale obtenue pour chaque configuration au cours des tests de cisaillement (selon la norme NF EN 314, traitement I). La matrice du plan d'expériences sous forme de valeurs centrées réduites est ensuite présentée. La colonne "modèle" est obtenue grâce à l'équation définie au chapitre 2 :

$$\tau = 1,94 + 0,37G - 1,79MC - 0,54MC^2 - 0,33G.MC^2 + 1,64MC^3 \qquad (4.20)$$

Les "Résidus" correspondent aux écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs du modèle pour chaque échantillon testé.

Variables étudiées			Variables centrées réduites définissant la matrice du plan d'expériences						
Grammage G (g)	Teneur en eau MC (%)	Réponse exp. (Mpa)	G	MC	MC^2	MC^3	$G.MC^2$	Modèle	Résidu
250	100	1,11	-1	1	1	1	-1	1,21	0,10
250	100	1,16	-1	1	1	1	-1	1,21	0,05
250	100	1,23	-1	1	1	1	-1	1,21	-0,02
250	100	1,26	-1	1	1	1	-1	1,21	-0,05
250	100	1,29	-1	1	1	1	-1	1,21	-0,08
250	100	1,38	-1	1	1	1	-1	1,21	-0,17
250	100	1,38	-1	1	1	1	-1	1,21	-0,17
250	100	1,3	-1	1	1	1	-1	1,21	-0,09
250	100	1,33	-1	1	1	1	-1	1,21	-0,12
250	100	1,34	-1	1	1	1	-1	1,21	-0,13
500	100	0,94	1	1	1	1	1	1,29	0,35
500	100	1,11	1	1	1	1	1	1,29	0,18
500	100	1,12	1	1	1	1	1	1,29	0,17
500	100	1,05	1	1	1	1	1	1,29	0,24
500	100	1,13	1	1	1	1	1	1,29	0,16
500	100	1,18	1	1	1	1	1	1,29	0,11
500	100	1,41	1	1	1	1	1	1,29	-0,12
500	100	1,36	1	1	1	1	1	1,29	-0,07
500	100	1,37	1	1	1	1	1	1,29	-0,08
500	100	1,5	1	1	1	1	1	1,29	-0,21
250	60	1,69	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	-0,28
250	60	1,43	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	-0,02
250	60	1,4	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	0,01
250	60	1,51	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	-0,10
250	60	1,25	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	0,16
250	60	1,53	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	-0,12
250	60	1,32	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	0,09
250	60	1,44	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	-0,03
250	60	1,23	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	0,18
250	60	1,36	-1	0,09	0,01	0,00	-0,01	1,41	0,05
500	60	2,1	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	0,04
500	60	2,15	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	-0,01
500	60	2,22	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	-0,08
500	60	2,25	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	-0,11
500	60	2,06	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	0,08
500	60	2,31	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	-0,17
500	60	2,14	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	0,00
500	60	2,14	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	0,00
500	60	2,17	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	-0,03
500	60	1,85	1	0,09	0,01	0,00	0,01	2,14	0,29
250	30	2,41	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	-0,19
250	30	2,31	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	-0,09
250	30	2,58	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	-0,36
250	30	2,48	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	-0,26
250	30	2,19	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	0,03
250	30	1,64	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	0,58
250	30	2,12	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	0,10
250	30	2,26	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	-0,04
250	30	2,03	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	0,19
250	30	2,14	-1	-0,59	0,35	-0,21	-0,35	2,22	0,08
500	30	3,18	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	-0,45
500	30	3,24	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	-0,51
500	30	2,95	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	-0,22
500	30	2,46	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	0,27
500	30	2,37	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	0,36
500	30	2,61	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	0,12
500	30	2,71	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	0,02
500	30	2,59	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	0,14
500	30	2,75	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	-0,02
500	30	2,51	1	-0,59	0,35	-0,21	0,35	2,73	0,22
250	12	1,69	-1	-1	1	-1	-1	1,52	-0,17
250	12	1,76	-1	-1	1	-1	-1	1,52	-0,24
250	12	1,44	-1	-1	1	-1	-1	1,52	0,08
250	12	1,45	-1	-1	1	-1	-1	1,52	0,07
250	12	1,15	-1	-1	1	-1	-1	1,52	0,37
250	12	1,64	-1	-1	1	-1	-1	1,52	-0,12
250	12	1,26	-1	-1	1	-1	-1	1,52	0,26
250	12	1,17	-1	-1	1	-1	-1	1,52	0,35
250	12	1,3	-1	-1	1	-1	-1	1,52	0,22
250	12	1,6	-1	-1	1	-1	-1	1,52	-0,08
500	12	1,5	1	-1	1	-1	1	1,60	0,10
500	12	1,35	1	-1	1	-1	1	1,60	0,25
500	12	1,59	1	-1	1	-1	1	1,60	0,01
500	12	1,78	1	-1	1	-1	1	1,60	-0,18
500	12	1,87	1	-1	1	-1	1	1,60	-0,27
500	12	1,56	1	-1	1	-1	1	1,60	0,04
500	12	1,8	1	-1	1	-1	1	1,60	-0,20
500	12	1,46	1	-1	1	-1	1	1,60	0,14
500	12	1,78	1	-1	1	-1	1	1,60	-0,18
500	12	1,99	1	-1	1	-1	1	1,60	-0,39

ANNEXE 5

Méthode utilisée pour comparer des résultats expérimentaux aux valeurs calculées - test de Student

Nous utiliserons le test de Student pour comparer la moyenne des résultats expérimentaux à une valeur fixe déterminée par les calculs. Dans cette étude, nous avons des populations d'environ n=10 d'échantillons par configuration. Nous admettons l'hypothèse que ces résultats expérimentaux suivent une loi normale, condition indispensable à l'utilisation du test de Student (ce qu'il n'est pas possible de vérifier avec le faible nombre d'échantillons testés).

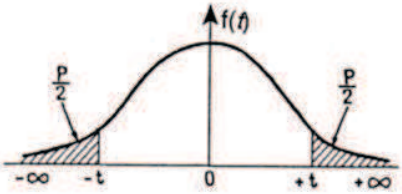
Mode opératoire du test :

1) Premièrement, il convient de définir les hypothèses du test suivantes : H_0= La modélisation numérique est conforme aux résultats obtenus expérimentalement avec un risque de 5% d'erreur. H_1= Il y a un écart significatif entre les valeurs mesurées expérimentalement et la valeur numérique calculée. L'objectif du test est de définir si H_0 est accepté ou rejetée.

2) Pour cela, on calcule le nombre de degré de libertés (dl) de la population expérimentale, (dl= n-1). On cherche la valeur de t_{test} correspondante dans la table de Student, dont un extrait est présenté ci-dessous.

Table de la loi de Student

Valeurs de t ayant la probabilité P d'être dépassées en valeur absolue



dl	P = 0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169

Source: probabilités et estimation statistique- Collection Express
Editeur: Dunod Auteur: M. Lethielleux

3) On définit les bornes entre lesquelles H_0 est vérifiée pour le risque considéré (p= 5%) avec la formule suivante : $t_{test} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} + m_{exp} < m_{mod} < -t_{test} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} + m_{exp}$ avec t_{test} la valeur lue dans la table de Student pour un risque p= 5%, σ l'écart type empirique, n le nombre d'échantillons de la population, m_{exp} la moyenne des résultats expérimentaux et m_{mod} la valeur modélisée.

Dans cet intervalle (appelé $I_{5\%}$ dans le corps de la thèse), on considère que l'écart entre la moyenne m_{exp} des essais expérimentaux et la valeur numérique m_{mod} est non significatif.

ANNEXE 6

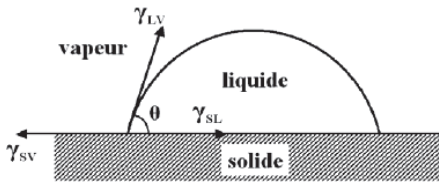
Procédures utilisées pour le clacul des enthalpies de surface et à l'interface des matériaux

Les trois étapes présentées dans la thèse permettant la détermination des propriétés de surface des matériaux sont décrites ici de manière schématique.

DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE DE SURFACE DU BOIS
(Référence: G. ELBEZ [76])

1ère étape: définition du problème

Méthode de la goutte sessile



La relation d'Young représente ce système à l'équilibre:

$$\cos\theta \times \gamma_{LV} = \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$$

Matériaux en présence

Liquide → Tension de surface

$$\gamma_L^D + \gamma_L^P = \gamma_{LV}$$

Bois → Energie de surface

$$\gamma_S^D + \gamma_S^P = \gamma_{SV}$$

Enthalpie de surface

E_{AD}

$$\gamma_S + \gamma_{LV} - \gamma_{SL}$$

DUPRE

$$I_{SL}^D + I_{SL}^P$$

$$I_{SL}^D = 2\sqrt{\gamma_S^D \times \gamma_L^D} \quad \text{et} \quad I_{SL}^P = 2\sqrt{\gamma_S^P \times \gamma_L^P}$$

FOWKES KAEBLE

L'énergie d'interaction solide/liquide, appelée énergie d'adhésion (E_{AD}), est définie comme la somme des énergies d'interaction d'origine dispersives ($I_{SL}{}^D$) et des énergies d'interaction d'origine polaires ($I_{SL}{}^P$). Elle correspond à "l'énergie qu'il faut fournir pour obtenir une séparation entre le liquide et le solide" (Elbez).

$$E_{AD} = \gamma_{LV}(\cos\theta + 1) = 2\sqrt{\gamma_S^D \times \gamma_L^D} + 2\sqrt{\gamma_S^P \times \gamma_L^P}$$

Angle associé

$$\cos\theta = 2\frac{\sqrt{\gamma_S^D \times \gamma_L^D}}{\gamma_{LV}} + \frac{I_{SL}^P}{\gamma_{LV}} - 1 \qquad (1)$$

A partir de cette équation, les composantes polaires et dispersives du bois en surface seront déterminées

2ème étape: Calcul de la composante dispersive de la surface : γ_S^D

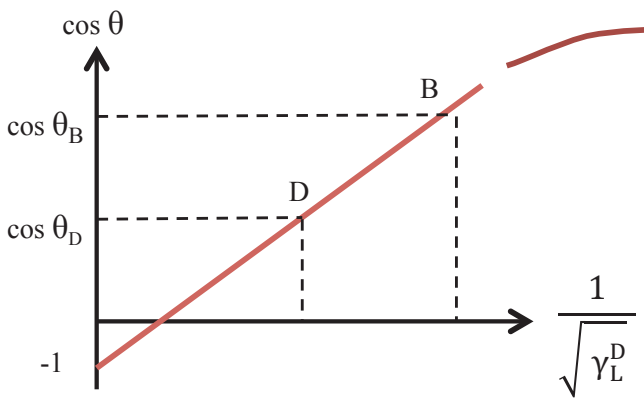
Principe: on utilise des liquide dispersifs, ayant une composante polaire nulle.

$$I_{SL}^P = 0\,;\ \gamma_L^P = 0 \quad \text{donc} \quad \gamma_{LV} = \gamma_L^D$$

D'après (1)

$$\cos\theta = 2\frac{\sqrt{\gamma_S^D}}{\sqrt{\gamma_L^D}} - 1$$

Droite des liquides apolaires



$2\sqrt{\gamma_S^D}$ = coefficient directeur de la droite des liquides apolaires

Obtention de γ_S^D

Liquides utilisés:

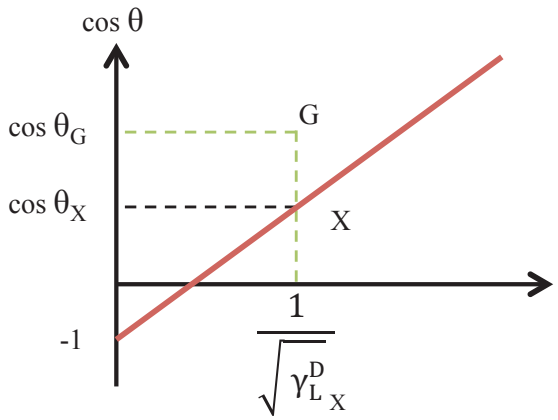
Liquides	γ_L^P (mJ/m^2)	γ_L^D (mJ/m^2)
Diiodométhane (D)	2,3	48,5
α-bromonaph-thalène (B)	0	44,6

On mesure l'angle de contact θ formé entre les différents liquides dispersifs connus et le bois. On trace la droite des liquides apolaires pour chaque teneur en eau étudiée

3ème étape: Calcul de la composante polaire de la surface : γ_S^P

Principe: on utilise des liquide ayant une composante polaire et une composante dispersive.

On mesure le cosinus de l'angle de contact θ_G formé entre la goutte de glycérol sur la surface du bois. Cet angle est placé sur le graphique construit précédemment:



$$\cos\theta_G = 2\frac{\sqrt{\gamma_S^D \times \gamma_{L\,G}^D}}{\gamma_{LV\,G}} + \frac{I_{SL}^P}{\gamma_{LV\,G}} - 1$$

$$\cos\theta_X = 2\frac{\sqrt{\gamma_S^D}}{\sqrt{\gamma_{L\,X}^D}} - 1$$

Exemple: le glycérol (G):
$\gamma_L^D = 37$ mJ/m², $\gamma_L^P = 26{,}4$ mJ/m²

Cos θ_X correspond au cosinus de l'angle de contact observé avec le liquide apolaire X pour lequel

$$\frac{1}{\sqrt{\gamma_{L\,X}^D}} = \frac{\sqrt{\gamma_{L\,G}^D}}{\gamma_{LV_G}}$$

$$\cos\theta_G - \cos\theta_X = \frac{I_{SL}^P}{\gamma_{LV}}$$

Obtention de I_{SL}^P

Or $I_{SL}^P = 2\sqrt{\gamma_S^P \times \gamma_L^P}$

$$\gamma_S^P = \frac{(I_{SL}^P(^2}{4 * \gamma_L^P}$$

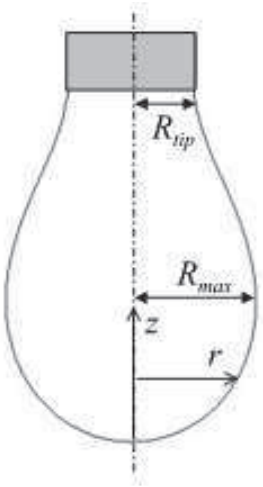
Obtention de γ_S^P

L'énergie de surface totale du bois peut ensuite être calculée: $\boldsymbol{\gamma_S^D + \gamma_S^P = \gamma_{SV}}$

DÉTERMINATION DE LA TENSION DE SURFACE DE LA COLLE
(Référence: http://cours.espci.fr/site.php?id=2&fileid=315)

1ère étape: définition du problème

Méthode de la goutte pendante



Le logiciel de d'analyse d'images intégré au goniomètre KRUSS donne les valeurs de la tension de surface totale γ_{LV} pour les liquides testés. Ce logiciel utilise l'équation de Laplace pour approcher le profil de la goutte:

$$\gamma\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)=\rho g z+\gamma\frac{2}{R_0}$$

ou R_1 et R_2 désignent les rayons de courbure principaux de l'interface et R_0 la courbure à l'extrémité inférieure de la goutte.

Obtention de γ_{LV}

Adhésif

Tension de surface

$$\gamma_L^D + \gamma_L^P = \gamma_{LV}$$

2ème étape: Calcul des composantes polaires et dispersives de l'adhésif

Méthode de la goutte sessile:

On mesure l'angle de contact formé entre une goutte d'adhésif sur une surface de teflon, matériau entièrement apolaire, de composante dispersive $\gamma_L^D = 19$ mJ/m² ; $\gamma_L^P = 0$

$$\gamma_{LV}(\cos\theta + 1) = 2\sqrt{\gamma_S^D \times \gamma_L^D} + 2\sqrt{\gamma_S^P \times \gamma_L^P}$$

Obtention de γ_L^D

La composante polaire de la tension de surface de l'adhésif peut ensuite être calculée: $\gamma_L^P = \gamma_{LV} - \gamma_L^D$

ANNEXE 7

Fiche technique - Contreplaqué Batipin - Smurfit Rol Pin

Smurfit
Rol Pin

FICHE TECHNIQUE

Batipin

NF EXTERIEUR CTB-X

CE - EN 13986

Description

Contreplaqué multiplis en pin maritime

Domaines d'emplois

Ouvrages de construction, menuiserie , agencement et mobilier.

Qualifications d'emploi

Milieux extérieurs

Selon NF EN 636 – 3
Homologué à la marque de qualité NF Extérieur CTBX.

Emplois structurels en construction

Attestation de conformité **système 2+**
selon **EN 13986** (exigence réglementaire)

Marquage : CE n° 380 – CPD – 011
(épaisseurs ≥ 9 mm)

Qualité des faces

Selon norme NF EN 635-3
Face classe I fermée, sans nœuds avec réparations bois.
Contreface classe II, fermée avec nœuds sains et réparations bois.
Les deux faces sont poncées.

Qualité du collage

Selon norme NF EN 314 – 2
Collage classe 3 « milieux extérieurs », résistant à l'eau et aux intempéries.

Construction

Plis croisés – Sens du fil du bois des faces dans le sens de la longueur du panneau.

Dimensions

Tolérances dimensionnelles
Selon norme NF EN 315

Format panneau : 250 x125 cm

Epaisseur (mm)	7	10	12	15	18	21	25	31	40
Nombre de plis	3	5	5	7	7	7	9	13	13

Masse volumique : 560 à 610 kg/m3

Dégagement de formaldéhyde
Classement E1
Selon norme NF EN 1084

Classement en réaction au feu : D-s2,d0

Conductivité thermique : λ = 0,13W/.K

Durabilité biologique

Essence pin maritime :
Classe 3 / 4 selon EN 350 partie 2

Teneur en pentachlorophenol (PCP) : < 5 ppm.

CARACTERISTIQUES MECANIQUES SELON NF EN 789/ EN 1058									
Epaisseur	7 mm	10 mm	12 mm	15 mm	18 mm	21 mm	25 mm	31 mm	40 mm
Plis	3	5	5	7	7	7	9	13	13
Module d'élasticité en flexion N/mm²- valeurs moyennes									
Em.0.50	11994	10200	9543	9311	7991	7923	8182	7457	7522
Em.90.50	606	2400	3057	3289	4609	4677	4418	5143	5078
Résistance en flexion N/ mm² Valeurs caractéristiques à 5 % d'exclusion									
fm.0.05	35.1	34.6	27.7	25.4	21.8	20.9	20.9	18.7	18,3
fm.90.05	4.9	5.9	14.2	13.5	17.5	17.2	14.6	15.4	14,8
* on dérive les modules à 5 % d'exclusion en multipliant les valeurs moyennes par : 0.645									

ANNEXE 8

Protocole de réalisation des panneaux

PROCEDURE

Référence: **PR-01**

Version: 1

Date de diffusion:

15/10/2013

PROCEDURE DE FABRICATION DE PANNEAUX DE CONTREPLAQUES EN PIN MARITIME COLLES A L'ETAT VERT SOUS VIDE

-

Application en construction navale

-

Matériel, Protocole Expérimental,
Mode Opératoire, Instructions

I2M, Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux,
Université de Bordeaux 1, Batiment A11 bis / Capforest,
351 Cours de la Libération, 33405 Talence Cedex
Secrétariat tél.: +33(0)5 40 00 27 92 - Fax: +33(0)5 40 00 35 95
Web: http://i2m.u-bordeaux.fr/

Chantier Naval Dubourdieu 1800
BP 11 port de Larros, 33470 Gujan-Mestras
Tél : +33(0)5 56 66 00 55 fax : +33(0)5 56 66 19 56
Mail : boat@dubourdieu.fr, Web: http://www.dubourdieu.fr/

Fabrication de contreplaqués en pin Maritime collé à l'état vert par procédé de moulage sous vide

OBJET: Réaliser des panneaux de contreplaqué à partir de pin Maritime à l'état vert pour une application en tant que bordé et agencement intérieur de bateaux.

La technologie du bois vert associée au procédé de moulage sous vide permet la réalisation de panneaux satisfaisant les fonctions suivantes:

- s'adapter à la forme de la charpente (sur mesure),
- être facile à mettre en œuvre par l'opérateur,
- prendre en compte de l'environnement,
- répondre aux exigences de qualité.

MATERIEL

Matière première:
Pin Maritime déroulé en 2,4 mm, non séché, à conserver sous eau
Colle polyuréthane développée pour le collage du bois à l'état vert, de référence Collano RP 2554

Pour la fabrication:
Humidimètre (exemple: Gann Hydromette M4050)
Raclette crantée pour étaler la colle
Balance
Pots pour doser la colle
Marqueur indélébile
Cutter / ciseaux

Pour la sécurité des personnes:
Gants, blouse, masque
chaussures de sécurité

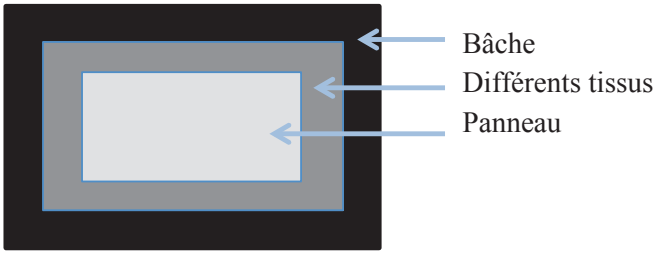
Pour le moulage sous vide:
Marbre
Tissu d'arrachage
Feutre de drainage
Tissu perforé
Membrane de mise sous vide
Mastic d'étanchéité
Cire anti-adhésive
Pompe à vide
Tuyaux et Embouts de mise sous vide
Couverture chauffante (température variable de 45 à 65°C)
Gel dessicant (gel de silice)
Minuteur

Fournisseur: Diatex
www.diatex.fr/-Moulage-sous-vide-.html

PROTOCOLE
Réalisation d'un contreplaqué 5 plis croisés à 0/90°

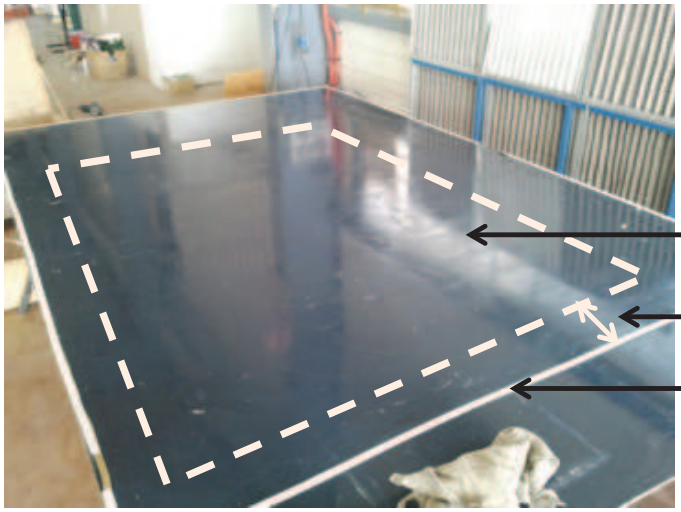
Stocker les plis de déroulage sous eau avant utilisation. Sortir les plis de l'eau 24h avant la fabrication des panneaux et les conditionner à une température entre 20°C - 25°C environ.

1) **Découper** deux pièces de tissu d'arrachage, 3 pièces de tissu absorbant, et une pièce de tissu perforé de dimension légèrement supérieures à la dimension du panneau à coller (au minimum 5 cm de plus en longueur et en largeur). Préparer également une bâche de plus grande dimension (environ 40 cm de plus que la dimension du panneau).



2) **Préparer les plis** de bois en les découpant aux dimensions souhaitées. Déterminer la teneur en eau des placages à l'aide d'un humidimètre de contact. La teneur en eau de surface des bois doit être comprise entre 30% et 60%. **Si elle est trop élevée, laisser sécher les plis à plat à température ambiante et mesurer régulièrement la teneur en eau.**

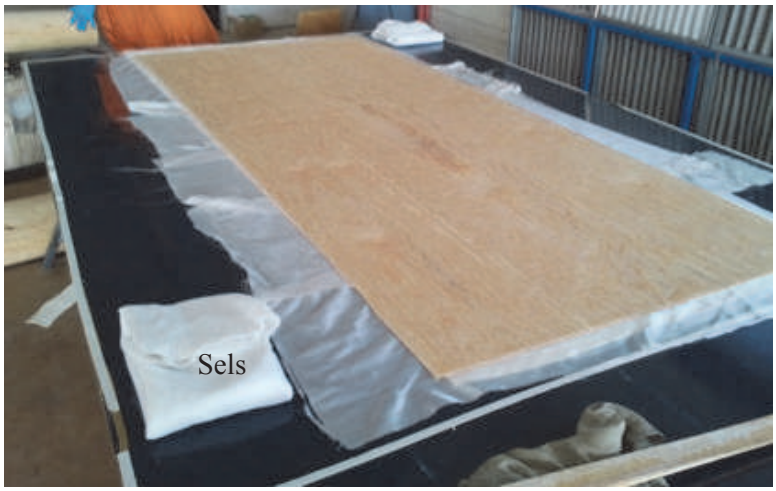
3) Pendant ce temps, **préparer le moule** en disposant le mastic d'étanchéité autour de la zone consacrée à la réalisation du panneau en laissant une marge d'au moins 10 cm entre le panneau et le mastic. Cirer l'emplacement du panneau pour éviter l'adhésion accidentelle et faciliter le démoulage. Effectuer 4 ou 5 cirages successifs et lustrer la surface entre chaque couche de cire.



Si la colle dégrade tout de même le moule, ajouter une épaisseur de bâche sur la surface pour éviter le contact de l'adhésif sur le support.

4) **Placer** une pièce de tissu absorbant sur le moule puis une couche de tissu d'arrachage. Préparer de petits sacs de sels absorbants à répartir sous les embouts de mise sous vide.

5) Quand les placages sont à une teneur en eau correcte, déposer un premier pli de bois sur les tissus.



Peser la quantité d'adhésif polyuréthane nécessaire et l'étaler en simple encollage à l'aide d'une raclette crantée de manière à en mettre 250 g/m^2. Réaliser les opérations suivantes rapidement pour éviter la polymérisation prématurée de la colle. Disposer le plis suivant de façon à ce que le fil du bois soit perpendiculaire au premier et répéter l'opération jusqu'à disposer dernier pli de bois.

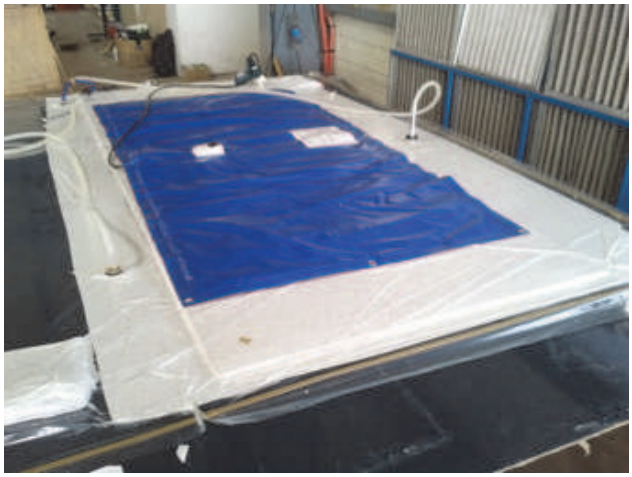
6) Disposer le tissu d'arrachage restant sur le panneau formé, le tissu perforé puis les deux pièces restantes de tissu absorbant.

Placer les poches de gel et les prises de vide à différents endroits du panneau avant de placer la bâche. Disposer plusieurs couches de tissu absorbant carrés sous l'embout pour éviter que de l'eau ou de la résine ne passe dans le tuyau de mise sous vide. Pour plus de sécurité, placer un

piège à résidus entre le matériau moulé et la pompe à vide. Coller la bâche sur le mastic en faisant le moins de plis possibles pour éviter les fuites. Face à chaque coin du panneau, réaliser des replis de bâche en ajoutant du mastic supplémentaire ("oreilles") pour prendre en compte l'épaisseur du panneau.

Bien jointer la bâche, brancher les embouts de vide aux tuyaux et procéder à la mise sous vide.

Vérifier qu'il n'y ait pas de fuites ou boucher les fuites existantes en ajoutant du mastic. Placer la couverture chauffante sur le panneau, en programmant le minuteur de manière à afficher la consigne 45°C pendant 95 min, puis la consigne 65°C pendant 45 min. Les cycles améliorent le séchage en créant des gradients provoquant un apport d'énergie. Ils permettent également d'améliorer la qualité des produits finis.



Laisser les panneaux 24h sous vide avec la couverture chauffante pour atteindre une teneur en eau de 15%. Puis, démouler et stocker les panneaux dans un endroit approprié.

APPLICATION SUR UN SUPPORT COURBE
Schéma récapitulatif du principe de moulage sous vide

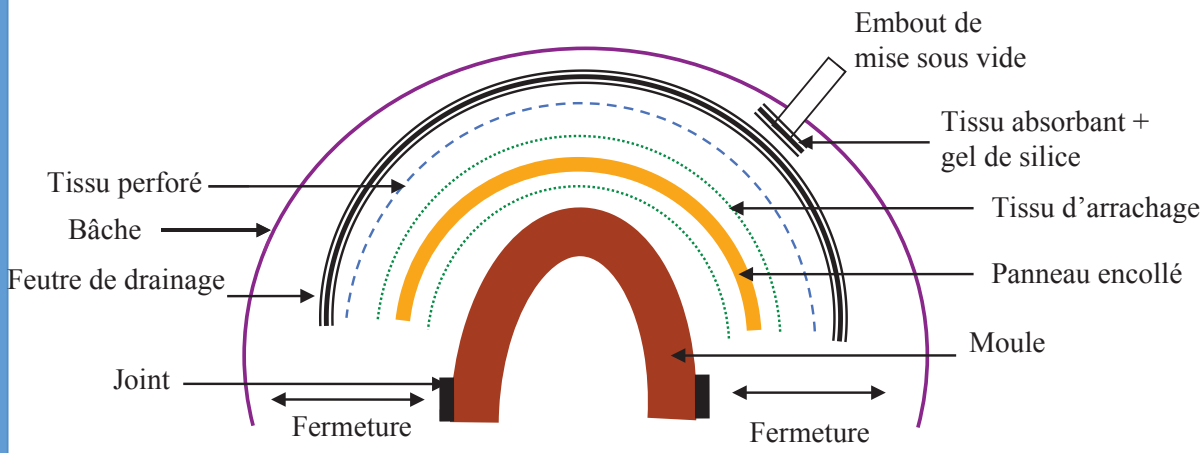
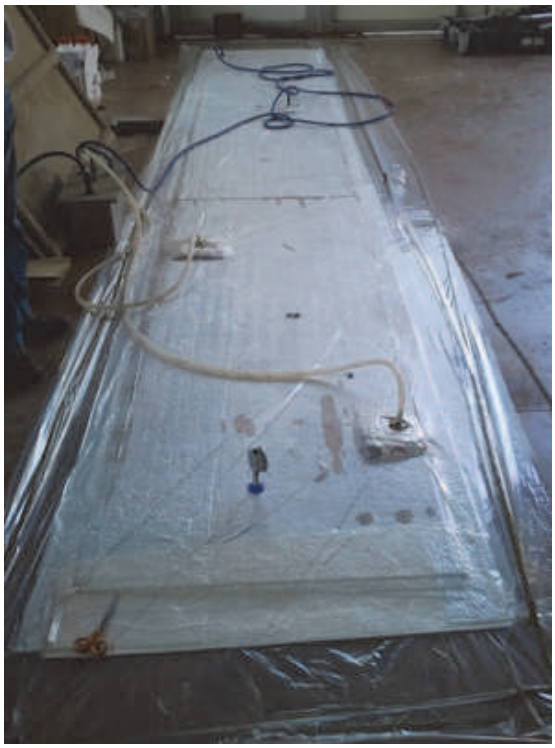


Schéma de principe démoulage du contreplaqué à l'état vert par procédé sous vide

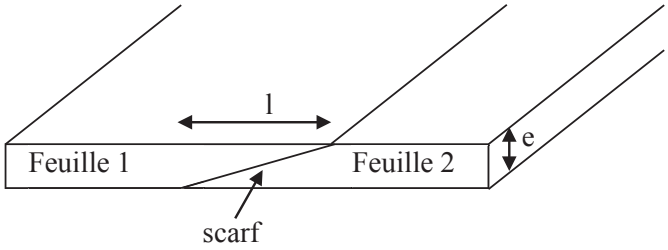
Démonstrateur réalisé selon cette technologie

APPLICATION A DES CONTREPLAQUES DE GRANDES DIMENSIONS
Particularité de réalisation des panneaux

Pour des panneaux de plus grande dimension, la bâche peut être utilisée comme une poche disposée sous le panneau et repliée par dessus pour faire le vide. La pose du mastic d'étanchéité est alors plus délicate.



Une attention particulière doit être portée lors de la réalisation de panneaux nécessitant des jointures entre les plis. Les jointures doivent être décalées entre les couches successives de bois pour éviter la fragilisation du panneau. Des scarfs (coupes en biseau) doivent également être réalisés aux extrémités des plis pour augmenter la longueur du recouvrement et optimiser la tenue du joint. Une longueur de recouvrement l égale à 10 fois l'épaisseur e convient.



DEVELOPPEMENT DE CONTREPLAQUES POUR LA CONSTRUCTION NAVALE: CARACTERISATION MULTI-ECHELLE ET COMPREHENSION DES PHENOMENES DE COLLAGE DU PIN MARITIME A L'ETAT VERT

Résumé:

L'objectif de cette thèse est de développer des panneaux de contreplaqué collés à l'état vert à destination des coques et de l'agencement de bateaux. La technologie du moulage sous vide est choisie pour former des panneaux constitués de plis de pin Maritime déroulés non séchés et collés à l'aide d'un adhésif polyuréthane. Une étude approfondie été réalisée dans le but de fixer les paramètres de collage permettant aux contreplaqués de répondre aux exigences requises dans la construction navale. L'influence des paramètres de fabrication du panneau sur ses propriétés mécaniques est déterminée à partir d'un plan d'expériences. La teneur en eau et le grammage d'adhésif appliqué sont particulièrement étudiés. Le comportement mécanique des différents échantillons de contreplaqué a été caractérisé grâce à des tests normalisés de cisaillement et des tests de flexion.
Des mesures de mouillabilité ainsi que des observations microscopiques des joints ont permis de mieux comprendre les résultats mécaniques, et d'expliquer les phénomènes physico-chimiques mis en jeu. Le matériau retenu à partir de cette étude est mis en œuvre dans un démonstrateur, pour validation du procédé utilisé.

Mots clés: contreplaqué, bois vert, adhésif polyurethane, coques de bateaux, mouillabilité, observations microscopiques

PLYWOOD MANUFACTURE FOR THE SHIPBUILDING INDUSTRY: MULTI-SCALE CHARACTERISATION AND UNDERSTANDING OF WET MARITIME PINE ADHESION PHENOMENA.

Abstract:

The subject of this work is the manufacturing of green-glued plywood panels for the interior and the plating of a ship. The vacuum-moulding process is chosen to produce panels by assembling maritime pine veneers in the wet state with polyurethane adhesive. A study has been done to fix the parameters for gluing so that the manufactured plywood can answer to the mechanical characteristics required by the shipbuilding sector. The effect of several gluing parameters on the panel's mechanical properties is determined by an experimental design method. The wood moisture content when gluing and the amount of adhesive applied are mainly studied. The plywood panels' mechanical characterisations are realised using standardised shear tests and bending tests.
In addition to the mechanical tests, wettability measures and bond lines microscopic observations provide a better understanding of the physic-chemical phenomena of green wood gluing. The material defined in this study is implemented in a boat hull prototype.

Key words: plywood, green wood, polyurethane adhesive, boat hulls, microscopic observations.