

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES CORNIÈRES MULTIFOLD® ET ÉTUDE DE L'EFFET DU TYPE  
DE PAPIER, DU TYPE D'ADHÉSIF ET DE L'HUMIDITÉ SUR LEURS PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA**

**MAÎTRISE EN INGÉNIERIE – CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE**

**PAR**

**SAMUEL HÉNAULT**

**AVRIL 2023**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**MAÎTRISE EN INGÉNIERIE – CONCENTRATION GÉNIE MÉCANIQUE (1542)**

**Direction de recherche :**

Mathilde Jean-St-Laurent

---

Prénom et nom

Directrice de recherche

Laurent Cormier

---

Prénom et nom

Codirecteur de recherche

**Jury d'évaluation :**

Mathilde Jean-St-Laurent

---

Prénom et nom

Directrice de recherche

Fonction du membre de jury

Luc Laperrière

---

Prénom et nom

Évaluateur interne

Fonction du membre de jury

Louis-Charles Forcier

---

Prénom et nom

Évaluateur externe

Fonction du membre de jury

## REMERCIEMENT

Tout d'abord, je tiens particulièrement à remercier ma directrice de recherche Mathilde Jean-St-Laurent et mon codirecteur de recherche Laurent Cormier. Je suis convaincu d'être tombé sur un duo gagnant pour me superviser. Merci pour vos conseils, votre patience et vos disponibilités. Malgré nos différents sur les meilleures séries de science-fiction, travailler avec vous a été un véritable plaisir.

Je tiens ensuite à remercier les personnes chez Abzac Canada de m'avoir donné l'opportunité de faire ce projet et leur soutien. Une équipe du tonnerre comme on en voit rarement.

Je remercie le professeur Lotfi Toubal et le personnel technique Jonathan St-Arnaud et Sébastien Lagacé de l'UQTR pour leur aide et leur expertise. Je remercie Philippe Blais de m'avoir introduit aux essais de corrélation d'image numérique. Je tiens également à remercier la professeure Marie-Laure Dano pour l'utilisation du laboratoire de l'Université Laval.

Je remercie l'organisme Mitacs pour le financement de ce projet.

Finalement, je remercie tous mes amis pour leur soutien et particulièrement Olivier Bergeron. Un ami comme il s'en fait trop rare et qui a cru dès le départ à ma réussite. Seul un véritable ami peut entendre le sens du *Power of Friendship* :

The image shows a musical score for a piece titled "Power of Friendship". The score is written on a single staff in treble clef, with a 4/4 time signature. The tempo is marked as quarter note = 140. The key signature has one sharp (F#). The score consists of 8 measures, numbered 1 through 8. Measure 1 starts with a double bar line and a first ending bracket. Measure 2 has a second ending bracket. Measure 3 has a slur over two notes. Measure 4 has a slur over two notes. Measure 5 has a slur over two notes. Measure 6 has a slur over two notes. Measure 7 has a slur over two notes. Measure 8 ends with a double bar line and a fermata over the final note.

## RÉSUMÉ

Les cornières en carton sont généralement utilisées pour protéger les marchandises durant leur manutention, en particulier pour améliorer la résistance à l'empilement des boîtes. Elles sont fabriquées par une combinaison de plusieurs papiers collés ensemble par un adhésif naturel ou synthétique, puis pliées à un angle de 90°.

L'industrie de l'emballage est de plus en plus sollicitée depuis les dernières années, l'une des raisons principales étant la grande accessibilité du commerce en ligne. De ce fait, la compagnie Abzac Canada a été motivée à développer une nouvelle génération de cornières offrant de meilleures propriétés mécaniques sans sacrifier la masse et le coût de fabrication.

Pour réaliser cet objectif, des cornières ont été produites avec une nouvelle méthode de pliage. Celles-ci ont été évaluées par des essais de compression longitudinale et de flexion trois-points après un conditionnement sec ou humide. Trois types de papiers recyclés et quatre formulations d'adhésif d'acétates de polyvinyle à différents taux de solides ont été étudiés suivant cette méthodologie. Les résultats ont montré que, pour certaines combinaisons de matières premières, la nouvelle génération de cornière offre des propriétés mécaniques plus élevées que celles de la génération actuelle pour une masse et des dimensions similaires. Les résultats suggèrent que le type de papier n'a pas d'effet significatif sur la résistance maximale en compression et en flexion à un conditionnement sec et humide. L'effet du papier n'est principalement visible que sur l'énergie absorbée en flexion dans le domaine inélastique. Le type d'adhésif ainsi que le taux massique d'humidité sont les paramètres ayant le plus grand impact sur le comportement élastique et inélastique des cornières en compression et en flexion. Une corrélation positive a été observée entre l'augmentation du taux de solides dans l'adhésif et la diminution de la résistance maximale des cornières en compression et en flexion. Cette propriété est également grandement réduite par l'augmentation du taux massique d'humidité dans les cornières.

Des essais de compression longitudinale avec corrélation d'image numérique (CIN) ont également été réalisés afin d'étudier les modes de défaillance des cornières. Trois différents modes ont été identifiés, mais aucune corrélation avec le comportement élastique n'a pu être

observée. De plus, les résultats avec CIN ont montré que le module d'élasticité en compression des nouvelles cornières est plus élevé en moyenne que celui des cornières actuelles.

Les résultats obtenus dans ce projet de recherche apportent plusieurs pistes de solutions afin de faire une sélection de matières premières qui optimise les performances mécaniques des cornières.

**Mots-clés :** Cornière en carton, papier recyclé, adhésif d'acétate de polyvinyle, taux massique d'humidité, caractérisation mécanique

## ABSTRACT

Cardboard angles are typically used to protect packages during handling, especially to improve the strength of stacked boxes. They are made from a combination of multiple sheets of papers that are glued together by a natural or synthetic adhesive and then fold into an L shape.

The packaging industry is more and more solicited over the past few years, largely due to the ease access to online commerce. Thereby, Abzac Canada was motivated to develop a new generation of cardboard angles that offer better mechanical properties without sacrificing weight and manufacturing cost.

To achieve this goal, cardboard angles were produced following a novel folding method. The angles have been tested under longitudinal compression and three-point bending loadings under dry or humid conditioning. Three types of recycled papers and four polyvinyl acetate adhesives were studied using this methodology. Results show that, for some raw material combinations, the new angles offer higher mechanical properties than the current angles with similar dimensions and mass. The type of paper does not seem to have a significant impact on maximum compressive or flexural strength under dry and humid conditioning. The effect of paper is mainly visible in the absorbed energy in the inelastic domain for bending load. The type of adhesive and moisture content are the parameters with the greatest impact on the elastic and inelastic behavior of cardboard angles for compression and three-point bending loadings. A positive correlation was observed between increasing the solids contents in the adhesive and the decrease of maximum compressive and flexural strength of cardboard angles for both conditioning. These properties are also greatly reduced by an increase of the moisture content in cardboard angles.

Longitudinal compression tests were also performed with digital image correlation (DIC) to study failure modes. Three different failure modes were identified, but no correlation with the elastic behavior of both generations of cardboard angles was observed. Moreover, DIC results show that the elastic modulus of new cardboard angles is higher compared to the current generation.

The results obtained in this research project provide several potential solutions for selecting raw materials that optimize the mechanical performance of cardboard angles.

**Keywords:** Cardboard angle, recycled paper, polyvinyl acetate adhesive, moisture content, mechanical characterization.

## Table des matières

<b>CHAPITRE 1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1.	Mise en situation	1
1.2.	Problématique	2
1.3.	Objectifs et division du mémoire	5
<b>CHAPITRE 2</b>	<b>REVUE DE LITTÉRATURE</b>	<b>7</b>
2.1.	Généralités sur les fibres de bois	7
2.1.1.	Structure microscopique des fibres de bois	7
2.1.2.	Composition chimique du bois	9
2.2.	Généralité sur les papiers	11
2.2.1.	Pâte à papier	11
2.2.2.	Fabrication du papier	16
2.2.3.	Classification des grades de papier	19
2.2.4.	Impact environnemental de la production de papier	21
2.3.	Adhésif dans les produits d'emballage	24
2.3.1.	Type d'adhésif dans l'industrie des pâtes et papiers	25
2.3.2.	Théories de l'adhésion	27
2.3.3.	Mécanismes de rupture des joints collés	28
2.4.	Effet de l'humidité sur le papier	30
2.4.1.	Hygroexpansion	30
2.4.2.	Propriétés mécaniques sous l'effet de l'humidité	32
2.5.	Caractérisation mécanique des produits en carton	33
<b>CHAPITRE 3</b>	<b>MÉTHODOLOGIE</b>	<b>36</b>
3.1.	Choix des matériaux	36
3.2.	Synthèse des essais	37
3.2.1.	Synthèse des essais de compression et de flexion trois-points	37
3.2.2.	Synthèse des essais de compression avec corrélation d'image numérique	38
3.3.	Fabrication des cornières	39
3.3.1.	Fabrication des cornières MF2.0	39
3.3.2.	Fabrication des cornières MF4.0	41
3.4.	Conditionnement	47

3.4.1.	Préconditionnement .....	49
3.4.2.	Coupage.....	50
3.4.3.	Code d'identification .....	51
3.4.4.	Conditionnement sec .....	52
3.4.5.	Conditionnement humide .....	53
3.5.	Essais mécaniques.....	54
3.5.1.	Essai de compression .....	55
3.5.2.	Essai de flexion trois-points.....	56
3.5.3.	Essai de compression avec corrélation d'image numérique .....	57
3.6.	Sélection des éprouvettes.....	60
3.6.1.	Randomisation des éprouvettes .....	60
3.6.2.	Informations supplémentaires .....	62
<b>CHAPITRE 4 EFFET DU TYPE DE PAPIER, DU TYPE D'ADHÉSIF ET DE L'HUMIDITÉ SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES CORNIÈRES.....</b>		<b>64</b>
4.1.	Épaisseur et masse moyenne des échantillons.....	64
4.1.1.	Épaisseur moyenne .....	64
4.1.2.	Masse moyenne .....	66
4.2.	Résultats des essais de compression .....	68
4.2.1.	Courbe force-déplacement .....	68
4.2.2.	Énergie surfacique.....	70
4.2.3.	Résistance.....	75
4.3.	Résultats des essais de flexion trois-points.....	77
4.3.1.	Courbe force-déplacement .....	78
4.3.2.	Énergie normalisée.....	81
4.3.3.	Résistance.....	85
4.4.	Discussion.....	88
4.4.1.	Effet du type de papier.....	88
4.4.2.	Effet du type d'adhésif .....	90
4.4.3.	Effet de l'humidité.....	91
4.4.4.	Comparaison des deux générations de cornières .....	92
4.4.5.	Application industrielle .....	93
4.5.	Conclusion.....	95

CHAPITRE 5	ESSAI DE COMPRESSION AVEC CORRÉLATION D'IMAGE NUMÉRIQUE ..	97
5.1.	Déformée .....	97
5.2.	Étude des déformations et évaluation du module d'élasticité en compression.....	103
5.3.	Discussion.....	106
5.4.	Conclusion.....	107
CHAPITRE 6	CONCLUSION.....	108
ANNEXE I	MISES EN PLAN .....	110
ANNEXE II	AUTRES RÉSULTATS .....	116
ANNEXE III	PROGRAMME MATLAB .....	118
ANNEXE IV	MOMENT D'INERTIE .....	120
LISTE DE RÉFÉRENCES.....		124

## Liste des figures

Figure 1.1 Production mondiale de pâte à papier. ....	1
Figure 1.2 Variation du prix du marché pour le medium semi-chimique et le kraft liner non blanchi. ....	2
Figure 1.3 Exemples d'application des cornières en carton. ....	3
Figure 1.4 Schéma d'une cornière Multifold. ....	4
Figure 2.1 Structure des fibres dans le de bois. ....	8
Figure 2.2 Conformation chaise de la structure chimique: du a) glucose, de la b) cellulose et d'une c) microfibrille formée de trois chaines de cellulose. ....	10
Figure 2.3 Étapes de fabrication de la pâte à papier. ....	12
Figure 2.4 Schéma d'un raffineur. ....	12
Figure 2.5 Schéma d'une machine de Fourdrinier: A) table de Fourdrinier, B) section de pressage, C) première section de séchage, D) application de l'ensimage, E) deuxième section de séchage, F) rouleaux de laminage et G) bobinage. ....	16
Figure 2.6 Processus d'hornification d'une fibre: a) fibre fibrillée non compressée et non séchée et b) fibre compressée et séchée. ....	19
Figure 2.7 Mouillabilité d'un liquide sur une surface : a) bonne mouillabilité et b) mauvaise mouillabilité. ....	28
Figure 2.8 Modes de rupture entre l'adhésif et le substrat : a) rupture adhésive, b) rupture cohésive de l'adhésif et c) rupture cohésive du substrat. ....	28
Figure 3.1 Dimensions de section des cornières MF2.0 et MF4.0. ....	39
Figure 3.2 Construction d'une cornière MF2.0. ....	40
Figure 3.3 Schéma du procédé industriel pour la fabrication des cornières MF2.0. ....	40
Figure 3.4 Schéma d'un encolleur. ....	41
Figure 3.5 Construction d'une cornière MF4.0. ....	42
Figure 3.6 Processus de fabrication des cornières MF4.0. ....	42
Figure 3.7 Machine d'empilement dans sa configuration 1. ....	43

Figure 3.8 Plieuse.....	44
Figure 3.9 Machine d'empilement dans sa configuration 2. ....	45
Figure 3.10 Méthodologie de conditionnement pour les essais de compression et de flexion..	48
Figure 3.11 Montage du gabarit pour limiter la diminution de l'angle entre les deux ailes durant le séchage. ....	49
Figure 3.12 Montage du gabarit pour limiter l'augmentation de l'angle entre les deux ailes durant le séchage. ....	50
Figure 3.13 Test d'écartement des ailes : a) mauvais collage et b) bon collage.....	51
Figure 3.14 Nomenclature du code servant à identifier les cornières MF2.0. ....	51
Figure 3.15 Nomenclature du code servant à identifier les cornières MF4.0. ....	52
Figure 3.16 Bac de conditionnement des cornières. ....	53
Figure 3.17 Localisation des points de mesure sur une aile de cornière.....	55
Figure 3.18 Dispositif de fixation des extrémités d'une cornière.....	56
Figure 3.19 Montage d'un essai de compression. ....	56
Figure 3.20 Appuis usinés pour les essais de flexion trois-points.....	57
Figure 3.21 Montage d'un essai de flexion trois-points.....	57
Figure 3.22 Exemple d'un moucheté sur un liner blanc d'une cornière.....	58
Figure 3.23 Essai de compression avec CIN : a) montage et b) vues résultantes de la caméra de gauche et de droite. ....	59
Figure 3.24 Zone d'étude des déformations et des déplacements. ....	60
Figure 3.25 Plan de randomisation pour les cornières MF2.0.....	61
Figure 3.26 Plan de randomisation pour les cornières MF4.0.....	62
Figure 4.1 Épaisseur des échantillons secs et humides évaluées en compression et en flexion.	64
Figure 4.2 Ordre croissant de l'épaisseur moyenne des échantillons MF4.0 en fonction du type d'adhésif pour deux types de papier : a) liner brun (L) et b) liner noir et blanc (B)...	65

Figure 4.3 Masse moyenne des échantillons évalués en compression aux conditions sèches et humides. ....	66
Figure 4.4 Masse moyenne des échantillons évalués en flexion trois-points aux conditions sèches et humides. ....	66
Figure 4.5 Gain de masse moyen lorsque l'on passe d'un conditionnement sec vers un conditionnement humide. ....	67
Figure 4.6 Courbes force-déplacement typique en compression des échantillons MF2.0 aux conditions sèches et humides. ....	68
Figure 4.7 Courbes force-déplacement typiques en compression des échantillons MF4.0 aux conditions sèches et humides. ....	69
Figure 4.8 Courbe force-déplacement de l'éprouvette BDR10-3. ....	71
Figure 4.9 Représentation du travail élastique et inélastique en compression sur la courbe de l'éprouvette LD106-2. ....	72
Figure 4.10 Énergie surfacique élastique des échantillons secs et humides évalués en compression. ....	73
Figure 4.11 Énergie surfacique inélastique des échantillons secs et humides évalués en compression. ....	73
Figure 4.12 Résistance en compression des échantillons aux conditions sèches et humides. ...	75
Figure 4.13 Résistance en compression en fonction du taux de solides pour les échantillons MF4.0 fabriqués avec le papier B et L. ....	76
Figure 4.14 Pourcentage de réduction de la résistance en compression d'un conditionnement sec vers un conditionnement humide. ....	77
Figure 4.15 Courbes force-déplacement typique en flexion des échantillons MF2.0 aux conditions sèches et humides. ....	78
Figure 4.16 Courbes force-déplacement typiques en flexion des échantillons MF4.0 aux conditions sèches et humides. ....	79
Figure 4.17 Différents cas d'une éprouvette assise sur les appuis du montage de flexion. ....	80
Figure 4.18 Angle entre les deux ailes des échantillons secs et humides évalués en flexion. ....	81
Figure 4.19 Représentation de l'énergie élastique et inélastique en flexion sur la courbe de l'éprouvette B-10-7. ....	82

Figure 4.20 Énergie normalisée élastique en flexion aux conditions sèches et humides.....	83
Figure 4.21 Énergie normalisée inélastique en flexion aux conditions sèches et humides.....	83
Figure 4.22 Distance c entre le centroïde G et le sommet de la cornière. ....	86
Figure 4.23 Résistance en flexion des échantillons aux conditions sèches et humides. ....	86
Figure 4.24 Résistance en flexion en fonction du taux de solides pour les échantillons MF4.0 fabriqués avec les papiers B et L. ....	87
Figure 4.25 Pourcentage de réduction de la résistance en flexion d'un conditionnement sec vers un conditionnement humide.....	88
Figure 5.1 Évolution des différentes déformées en compression : a) déformée 1 (éprouvette #1), b) déformée 2 (éprouvette #7) et c) déformée 3 (éprouvette #6). ....	98
Figure 5.2 Courbes force-déplacement des éprouvettes évaluées en compression avec CIN : a) REF et b) LDR. ....	99
Figure 5.3 Évolution du champ des déplacements résultants de l'éprouvette #7. ....	101
Figure 5.4 Localisation des points Aile 1, Aile 2 et Centre sur la surface étudiée de l'éprouvette #7. ....	102
Figure 5.5 Évolution du déplacement résultant entre le début des déformations élastiques et le premier maximum de l'éprouvette #7 ....	102
Figure 5.6 Champ de déformation longitudinale à 50 % du premier maximum de l'éprouvette #7. ....	103
Figure 5.7 Déformation longitudinale le long du sommet de l'éprouvette #7 à 50 % du premier maximum.....	104

## Liste des tableaux

Tableau 2.1 Dimensions des fibres après traitement pour plusieurs espèces d'arbres. ....	8
Tableau 2.2 Composition chimique du bois mou et du bois dur [14]. ....	9
Tableau 2.3 Pourcentage de rétention des composants dans le papier [14]. ....	13
Tableau 2.4 Diverses applications d'espèces de bois mous et de bois durs. ....	21
Tableau 2.5 Adhésifs à base naturelle dans l'industrie des pâtes et papiers. ....	26
Tableau 2.6 Adhésifs synthétiques dans l'industrie des pâtes et papiers. ....	26
Tableau 2.7 Théories d'adhésion et leur champ d'action. ....	27
Tableau 3.1 Caractéristiques des adhésifs à l'étude. ....	37
Tableau 3.2 Caractéristiques des papiers utilisés pour la fabrication des cornières. ....	37
Tableau 3.3 Synthèse des essais de compression et de flexion trois-points. ....	38
Tableau 3.4 Synthèse des essais pour l'étude avec la méthode de corrélation d'image sur les deux générations de cornières. ....	38
Tableau 3.5 Résultats qualitatifs des essais de pelage sur le medium avec les adhésifs D1, D2 et HE. ....	46
Tableau 3.6 Séquence de fabrication des lots de cornières MF4.0. ....	47
Tableau 5.1 Déformée, épaisseur et angle des éprouvettes évaluées en compression avec la méthode de CIN. ....	98
Tableau 5.2 Résistance et raideur des éprouvettes évaluées en compression avec CIN. ....	100
Tableau 5.3 Déformation longitudinale moyenne le long du centre des éprouvettes à 50 % du premier maximum. ....	105
Tableau 5.4 Module d'élasticité E en compression des éprouvettes évaluées avec la méthode de CIN. ....	105

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

### 1.1. Mise en situation

Depuis l'invention du carton, une très grande variété de produits d'emballage a vu le jour. Hormis les boîtes en carton corrugué, on peut citer notamment les mandrins en carton, les cornières, les fûts fibre, les sacs d'emballage, les boîtes de carton prédécoupées et les nids d'abeilles en carton. Les produits en carton sont offerts en plusieurs tailles et dimensions et les domaines d'application sont variés. On retrouve entre autres les mandrins en carton dans le domaine de la construction, les nids d'abeilles dans la fabrication des meubles et les boîtes prédécoupées dans la restauration rapide. Les produits en carton font partie de la vie quotidienne et ils ont l'avantage d'être biodégradables et sont pour la plupart recyclables. Les produits en carton s'inscrivent ainsi dans un processus de développement durable.

Depuis les 20 dernières années, la production de pâtes et papiers n'a pas cessé d'augmenter. En 2019, près de 430 millions de tonnes métriques de pâtes ont été produites, comparativement à 310 millions de tonnes en 1999. La Figure 1.1 présente la production mondiale de pâtes issue de fibres de bois, de fibres provenant d'autres sources que le bois et de papiers récupérés de 1999 à 2019 [1-3].

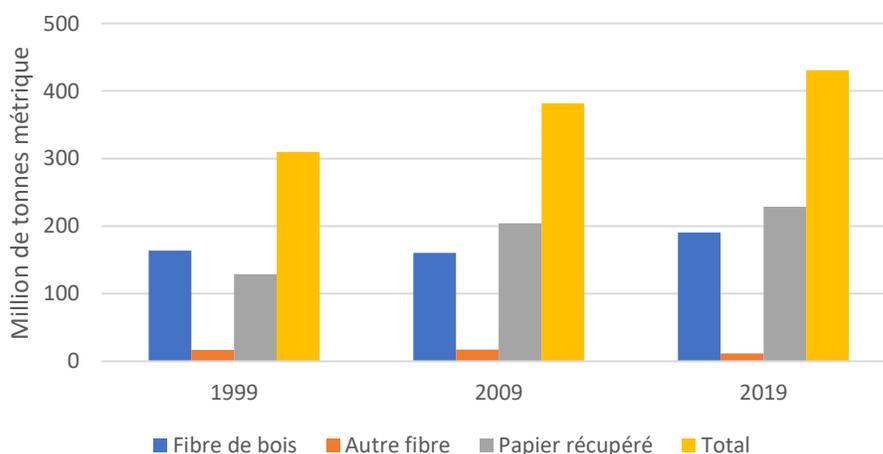


Figure 1.1 Production mondiale de pâte à papier.

L'industrie des pâtes et papiers fait actuellement face à des problèmes de pénurie de matières premières et à une montée des coûts de ces dernières. L'approvisionnement des produits en carton

repose sur une chaîne complexe très sensible aux changements. Qui plus est, l'habitude des consommateurs a grandement évolué durant les deux dernières décennies avec la montée du commerce en ligne.

Les événements de la COVID-19 ont démontré que le marché pouvait être très imprévisible. La chaîne d'approvisionnement a été lourdement impactée, provoquant un déséquilibre entre l'offre et la demande. La fermeture de plusieurs usines a conduit à une diminution du volume de production mondiale de pâtes et papiers. Les moulins d'Amérique du Nord en opération ont fonctionné à 91 % de leur capacité en avril 2021 et à 97 % pour le même mois de l'année suivante, mais cela n'a pas été suffisant pour subvenir à la demande [4]. En conséquence, on observe une augmentation des prix du marché des pâtes et des papiers sans parler de l'augmentation des coûts de transport. La Figure 1.2 présente l'évolution depuis 2017 des coûts de deux types de papiers utilisés dans la fabrication de carton corrugué.

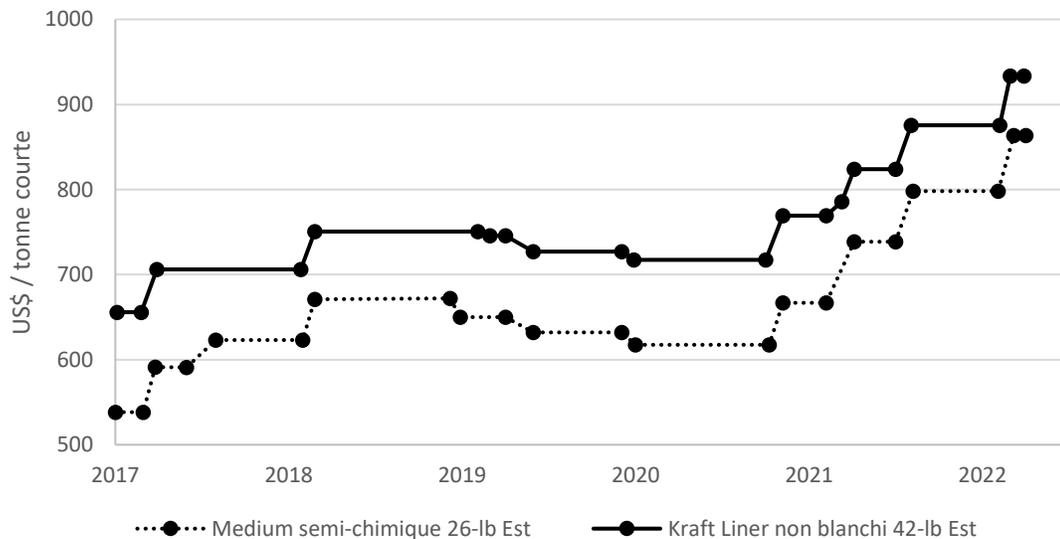


Figure 1.2 Variation du prix du marché pour le medium semi-chimique et le kraft liner non blanchi. Adapté de [5].

Dans ce contexte, l'entreprise Abzac Canada souhaite revoir la fabrication de ses produits d'emballage en carton afin de diminuer les coûts de production et de transport tout en offrant des produits aux performances mécaniques compétitives.

## 1.2. Problématique

L'usine d'Abzac Canada à Trois-Rivières se spécialise dans les cornières en carton. Une cornière est un stratifié composé, en règle générale, de plusieurs couches de papiers collées ensemble par un

adhésif synthétique ou naturel. Cet assemblage est plié de façon à obtenir une forme en L. Les cornières sont disponibles dans de nombreuses tailles et leur méthode de fabrication varie d'un fabricant à l'autre.

Les cornières ont pour rôle de protéger et de renforcer les marchandises durant leur manutention et leur entreposage. Il a été démontré à l'aide de jauges de déformation que lorsqu'une boîte de carton corrugué est soumise à une charge en compression, celle-ci est majoritairement répartie dans les coins de la boîte [6, 7]. Cette répartition de la charge aux coins souligne donc l'importance d'utiliser des cornières pour renforcer les marchandises. L'utilisation des cornières est également une solution peu coûteuse et celles-ci ont l'avantage d'être pour la plupart recyclables et biodégradables. La Figure 1.3 présente deux cas typiques d'application des cornières.

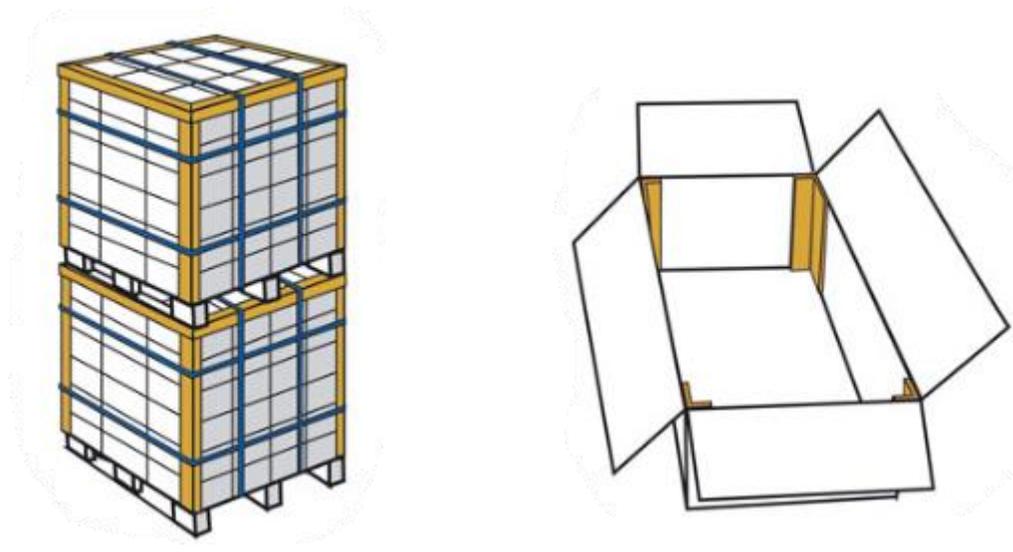


Figure 1.3 Exemples d'application des cornières en carton. Utilisation de l'image autorisée par le détenteur des droits d'auteur Abzac Canada [8].

Abzac Canada offre actuellement des cornières en carton pour lesquelles la méthode de pliage est tirée d'un brevet déposé par l'entreprise en 2014 [9]. Ce brevet présente diverses méthodes de pliage sous le nom de gamme Multifold®. Les cornières actuelles nécessitent l'utilisation de deux types de papiers, soit un carton à couverture (*liner*) et un carton gris (*chipboard*). Un carton à couverture est essentiellement un carton mince où la proportion de fibres recyclées peut varier. Un carton gris est quant à lui un carton épais généralement fait à 100 % de fibres recyclées. La méthode de pliage utilisée présentement consiste à utiliser  $N$  bandes de cartons gris pour le cœur de la cornière puis à envelopper le tout par  $N$  bandes de cartons à couverture qui se chevauchent sur elles-

mêmes comme illustré à la Figure 1.4. Optionnellement, le carton à couverture extérieur est parfois blanc.

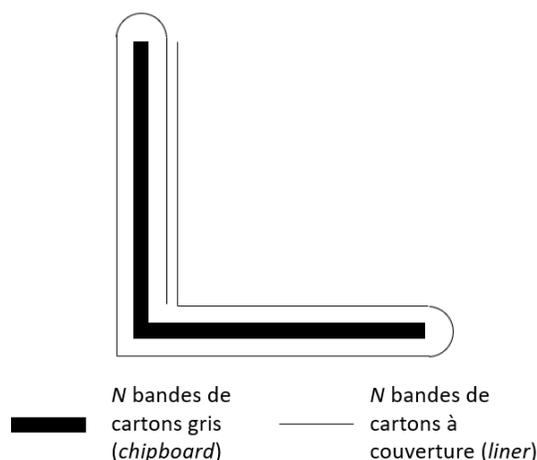


Figure 1.4 Schéma d'une cornière Multifold.

Abzac Canada a démontré avec une étude préliminaire qu'une réduction du nombre de cartons gris au profit d'un plus grand nombre de cartons à couverture améliore la résistance en compression des cornières Multifold, et ce pour une épaisseur similaire. Le rapport résistance/poids est donc bonifié par une meilleure utilisation de la matière première. Cependant, l'élimination totale du carton gris n'est pas possible avec l'équipement de production actuel en raison de la tension générée dans les papiers durant le processus de fabrication. La résistance en traction des bandes de carton gris compense le manque de résistance en traction des papiers protecteurs.

Afin d'améliorer ses produits, Abzac Canada est en processus de développement d'une nouvelle génération de cornières, toujours dans la gamme Multifold, offrant de meilleures propriétés mécaniques que la génération précédente. Cette nouvelle génération a comme particularité d'utiliser une nouvelle méthode de pliage qui ne nécessite qu'un seul type de papier. Dans le contexte actuel où les pénuries de papiers sont fréquentes, cette nouvelle génération facilite l'approvisionnement des matières premières. De plus, la nouvelle méthode de pliage a le potentiel de réduire davantage le poids des cornières, ce qui permettrait de réduire les coûts de transport des marchandises et les émissions de CO<sub>2</sub> qui en découlent.

Fort du potentiel de cette nouvelle gamme de cornières, l'entreprise souhaite pousser davantage son optimisation en évaluant l'influence des matières premières et du conditionnement sur les propriétés mécaniques des cornières de nouvelle génération.

### 1.3. Objectifs et division du mémoire

Des objectifs spécifiques à ce projet de recherche ont été définis afin de répondre aux besoins de l'entreprise Abzac Canada :

1. Étudier l'effet du type de papier sur la masse, l'épaisseur et les propriétés mécaniques en compression et en flexion trois-points des cornières de nouvelle génération ;
2. Étudier l'effet du type d'adhésif sur la masse, l'épaisseur et les propriétés mécaniques en compression et en flexion trois-points des cornières de nouvelle génération ;
3. Étudier l'effet de l'humidité sur la masse, l'épaisseur les propriétés mécaniques en compression et en flexion trois-points des deux générations de cornières ;
4. Comparer les propriétés mécaniques en compression et en flexion trois-points des cornières actuelles avec celles des cornières de nouvelle génération ;
5. Étudier les modes de défaillance en compression des cornières actuelles et ceux des cornières de nouvelle génération avec la méthode de corrélation d'image numérique (CIN).

Les essais de compression et de flexion trois-points ont été choisis pour caractériser mécaniquement les cornières puisque nous posons pour hypothèse que ce sont les types de chargement les plus fréquents sur des cornières en application réelle. Un chargement en compression peut être associé à un empilement de plusieurs boîtes les unes sur les autres où les cornières ont pour rôle d'apporter un support supplémentaire. Un chargement en flexion peut être associé au serrage d'une sangle autour d'une marchandise dans le but de maintenir en place une cornière.

Comme les deux méthodes de pliage font partie de la gamme Multifold®, une désignation spécifique à chacune des deux générations de cornières a été apportée à des fins de simplification dans ce mémoire. Ainsi, les cornières de génération actuelle sont désignées par MF2.0 et celles de nouvelle génération sont désignées par MF4.0. De plus, étant donné la forte tendance dans l'industrie à utiliser les termes anglais pour désigner les différents types de papier, les désignations anglaises ont été préférées aux désignations françaises pour la suite de ce mémoire. Ainsi, un carton à couverture est appelé *liner* et un carton gris est appelé *chipboard* selon ISO 4046-4 [10].

Le mémoire est divisé en six chapitres, le chapitre 1 étant l'introduction. Le chapitre 2 présente une revue de la littérature axée sur les objectifs de recherche. Le chapitre 3 présente la méthodologie adoptée pour répondre aux objectifs. Le chapitre 4 présente les résultats relatifs à l'effet du type de papier, du type d'adhésif et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en compression et en flexion

des cornières. Ce chapitre répond aux objectifs 1 à 4. Le chapitre 5 présente les résultats obtenus par des essais de compression avec la méthode de CIN. Ce chapitre répond aux objectifs 4 et 5. Finalement, le chapitre 6 présente la conclusion de ce projet.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Comme la littérature entourant les cornières en carton est très limitée, voire absente, la revue de littérature présente une vue d'ensemble de sujets reliés aux produits en carton. Le chapitre commence par introduire des généralités sur les fibres de bois et les papiers. Ensuite, divers types d'adhésifs naturels et synthétiques pour la fabrication de produits en carton sont présentés. Le chapitre enchaîne avec l'effet de l'humidité sur les fibres de bois et les papiers. Finalement, le chapitre se termine avec un survol des essais normalisés sur le carton.

### 2.1. Généralités sur les fibres de bois

Tous les types de papiers sont constitués principalement de fibres végétales. Les fibres utilisées pour la production des pâtes et des papiers proviennent de trois sources : les fibres de bois vierges, les fibres vierges provenant d'autres végétaux que le bois et les fibres recyclées provenant de papiers récupérés. Dans ce mémoire, l'emphasis est mise sur les papiers constitués de fibres de bois, vierges ou recyclées, puisque ces types de fibres sont le constituant principal des cornières en carton. Cette section présente la structure microscopique des fibres de bois ainsi que leur composition chimique.

#### 2.1.1. *Structure microscopique des fibres de bois*

Une fibre de bois peut être décrite comme un matériau composite naturel à plusieurs couches concentriques, soit le mur primaire P et les murs secondaires S1, S2 et S3. Ces couches sont composées principalement de cellulose. Un ensemble de plusieurs chaînes de cellulose est nommé microfibrille et un ensemble de celle-ci est nommé fibrille. L'orientation des microfibrilles varie en fonction de la couche. L'angle d'une microfibrille est décrit comme l'angle entre la direction longitudinale de la fibre de bois et l'orientation de la microfibrille. L'orientation des microfibrilles dans le mur primaire P est aléatoire tandis que dans les murs secondaires S1, S2 et S3, elle est relativement constante dans une même couche.

Le mur S2 est la couche la plus volumineuse et peut atteindre jusqu'à 90 % du volume total de la paroi des fibres chez certaines espèces de bois [11]. Cette couche est celle ayant le plus grand impact sur les propriétés mécaniques des fibres [12].

Dans le bois, les fibres sont majoritairement alignées dans la direction longitudinale du tronc de l'arbre. L'espace séparant les fibres se nomme la lamelle moyenne. Les fibres sont généralement décrites comme un tube creux de section rectangulaire où le creux est appelé lumen. La Figure 2.1 présente un schéma de l'arrangement des fibres de bois et des couches qui les composent.

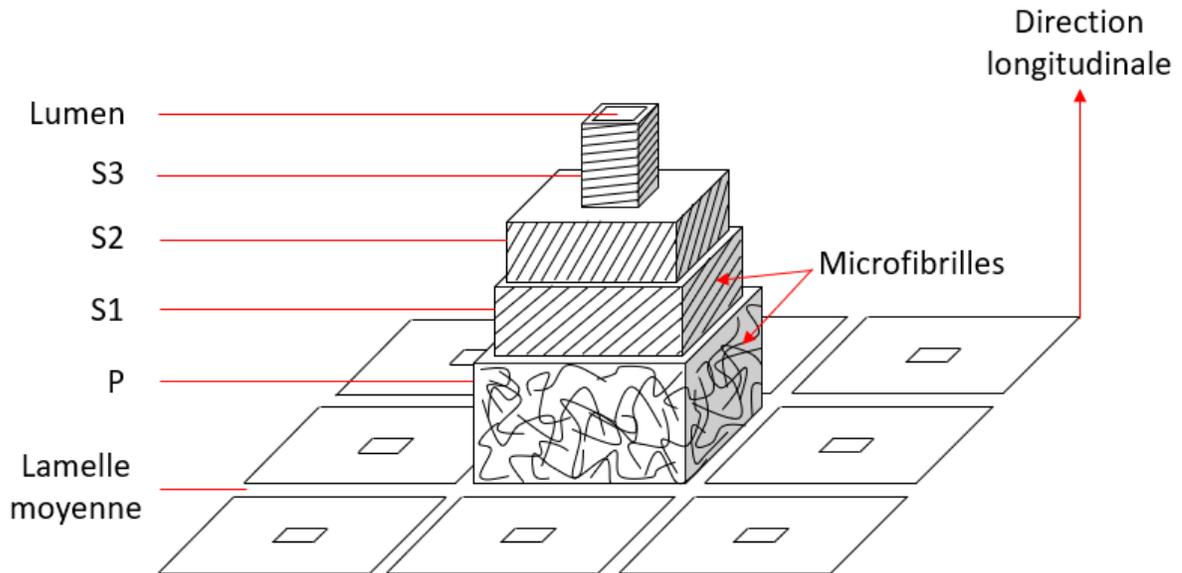


Figure 2.1 Structure des fibres dans le de bois. Adapté de [13].

Dans le domaine des pâtes et papiers, les espèces de bois sont classées en deux catégories : les bois mous et les bois durs. En moyenne, les fibres des bois mous sont plus longues que celles des bois durs. Le Tableau 2.1 présente les dimensions des fibres provenant de diverses espèces d'arbre après qu'elles ont été compressées et séchées.

Tableau 2.1 Dimensions des fibres après traitement pour plusieurs espèces d'arbres. Adapté de [14].

Type et espèce de bois	Longueur (mm)	Largeur ( $\mu\text{m}$ )	Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )
<i>Bois mous</i> : sapin baumier, pin sylvestre, sapin tordu, épinette de Norvège, épinette noire, épinette blanche	3 - 3,5	28 - 35	2,1 - 3
<i>Bois mous</i> : sapin de Douglas, pin à l'encens, pin de Slash, pin des marais, pin de Monterey, pruche de l'Ouest	3,5 - 4,2	35 - 40	2,6 - 4,2
<i>Bois durs</i> : bouleau, hêtre, eucalyptus, peuplier, tremble	0,9 - 1,3	10 - 35	2 - 5

### 2.1.2. Composition chimique du bois

Toutes les fibres du bois sont essentiellement composées de quatre composants, soit la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et les extractibles. La cellulose et l'hémicellulose composent la majeure partie de la paroi des fibres. La lignine est majoritairement présente dans la lamelle moyenne. La proportion de ces composants varie en fonction de l'espèce de l'arbre. Le Tableau 2.2 présente la proportion massique de ces composants en fonction du type de bois.

Tableau 2.2 Composition chimique du bois mou et du bois dur [14].

Composant	Bois mou (masse sèche %)	Bois dur (masse sèche %)
Cellulose	40 - 45	43 - 50
Hémicellulose	20 - 32	15 - 35
Lignine	23 - 35	16 - 30
Extractibles	0 - 5	0 - 10

#### 2.1.2.1. Cellulose

La cellulose est le composant qui occupe la plus grande proportion de la masse d'une fibre de bois. C'est ce composant qui donne la résistance, la flexibilité et la sensibilité à l'eau au papier [15]. La cellulose est un homopolymère linéaire de glucose, c'est-à-dire qu'elle est composée d'une chaîne de glucose dont le motif se répète. Le glucose est un sucre simple formé lors de la photosynthèse. On estime le degré de polymérisation, soit le nombre de monomères dans la chaîne, à 10 000 [16, 17].

La cellulose a la capacité de créer des liaisons hydrogène intramoléculaires et intermoléculaires dans une même microfibrille grâce aux groupes hydroxyles (-OH) [14]. La Figure 2.2 présente la structure chimique en conformation de chaise du glucose, de la cellulose et d'une microfibrille formée de trois chaînes de cellulose.

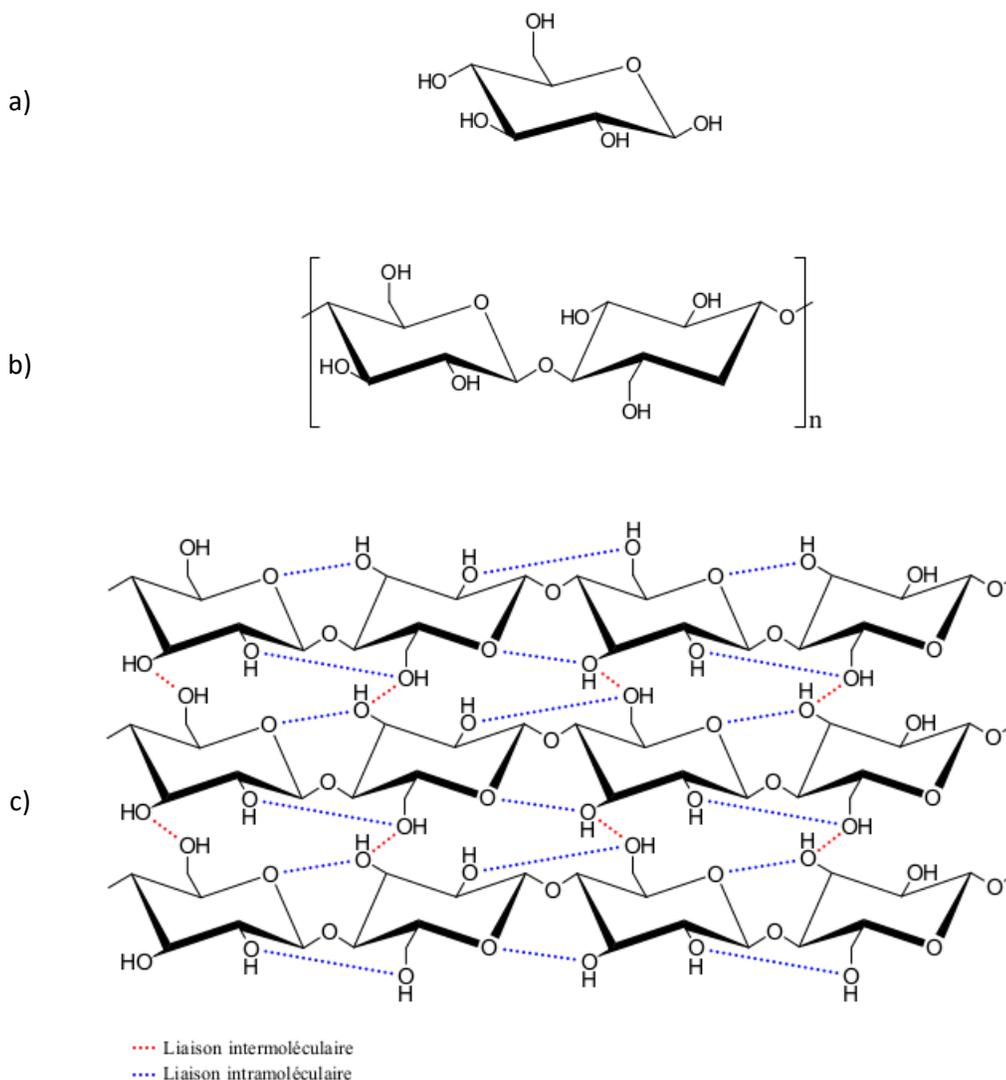


Figure 2.2 Conformation chaise de la structure chimique: du a) glucose, de la b) cellulose et d'une c) microfibrille formée de trois chaînes de cellulose.

#### 2.1.2.2. Hémicellulose

L'hémicellulose est formée de polymères produits dans les feuilles lors de la photosynthèse. Hormis le glucose, les feuilles produisent plusieurs autres sucres comme le mannose, le galactose, le xylose, l'arabinose, l'acide glucuronique et l'acide galacturonique. L'hémicellulose est un polysaccharide, soit une combinaison de plusieurs sucres simples. Sans entrer dans les détails, on distingue principalement quatre types d'hémicellulose dans les plantes: le glucane, le xylane, le mannane et le galactane. Le degré de polymérisation de l'hémicellulose est estimé entre 100 et 400 [14].

### 2.1.2.3. Lignine

La lignine peut être décrite comme un adhésif qui maintient ensemble et protège les fibres dans le bois. Les liaisons hydrogène formées entre la lignine, la cellulose et l'hémicellulose permettent d'apporter une certaine résistance aux bois. Cependant, la résistance du papier est attribuée à l'imbrication des fibres entre elles par des liaisons hydrogène et cette imbrication est limitée par la présence de la lignine [14]. Ce composant est un polymère complexe et totalement amorphe formé de trois monolignols : l'alcool paracoumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique.

### 2.1.2.4. Extractibles

Les extractibles sont des composants organiques ou inorganiques dans le bois qui peuvent affecter son odeur, sa couleur, sa résistance à la décomposition, sa densité, son hygroscopie et son inflammabilité. On peut citer notamment les tanins qui sont des composés phénoliques et les sels minéraux. Les extractibles sont présents en faible quantité et leur composition chimique ainsi que leur nature varient grandement.

## 2.2. Généralité sur les papiers

Les papiers sont des produits du quotidien. Bien qu'en apparence simple, leur processus de fabrication est complexe et leurs applications sont variées. Cette section présente un survol du processus de mise en pâte des fibres de bois et de la fabrication du papier. Une classification des types de papiers est ensuite présentée, suivie de l'impact environnemental de l'industrie des pâtes et papiers.

### 2.2.1. Pâte à papier

La production de pâte à papier est un processus en plusieurs étapes. D'abord, les fibres du bois sont séparées par un procédé mécanique, chimique ou semi-chimique. Le rendement, c'est-à-dire la masse de fibres obtenues par le procédé par rapport à la masse de bois initiale, est propre à chaque procédé. Une fois les fibres séparées, un blanchiment optionnel des fibres peut être effectué. Un battage est ensuite fait pour améliorer la surface des fibres. Finalement, des additifs sont ajoutés à la pâte pour améliorer certaines propriétés. La Figure 2.3 présente les étapes de production de la pâte à papier qui sont présentées en détail aux sections 2.2.1.1 à 2.2.1.6.

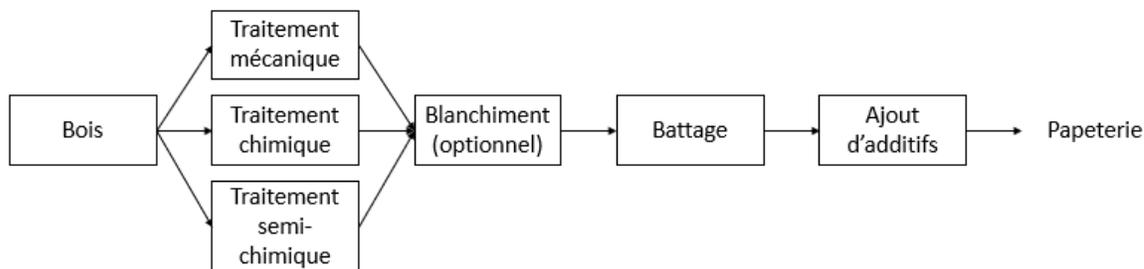


Figure 2.3 Étapes de fabrication de la pâte à papier. Adaptée de [14].

### 2.2.1.1. Traitement mécanique

Le traitement mécanique est le traitement avec le rendement de production le plus élevé. Il est estimé entre 85 % et 99 % [14, 17]. Deux principales méthodes sont employées pour séparer les fibres mécaniquement. La plus ancienne est l'utilisation d'une meule de pierre abrasive. La surface tangentielle de billots de bois est pressée contre une meule abrasive rotative. La chaleur générée, estimée à 120-130°C, fait ramollir la lignine, ce qui aide à détacher les fibres les unes des autres. Cependant, ce procédé endommage les fibres [14]. De plus, les résidus des scieries sont généralement trop petits pour pouvoir être séparés en fibres par une meule abrasive.

Cette méthode a été remplacée dans la majorité des usines par l'utilisation d'un raffineur qui consiste essentiellement à faire passer le bois entre deux disques rainurés dont l'un tourne et l'autre est stationnaire. Un schéma d'un raffineur est présenté à la Figure 2.4. Le raffineur a l'avantage de fonctionner avec n'importe quelle source de fibres, dont les résidus des scieries. Généralement, l'utilisation d'un raffineur est couplée avec un traitement thermomécanique où le bois est chauffé à la vapeur à environ 120-140°C avant de passer dans un raffineur [14]. Contrairement à la première méthode, le chauffage à la vapeur aide à séparer les fibres sans les endommager.

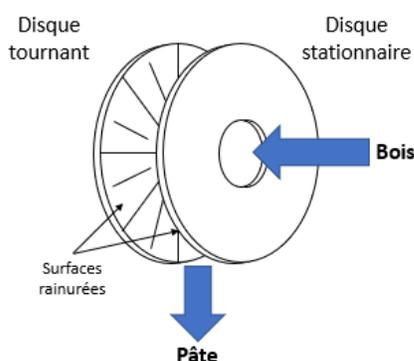


Figure 2.4 Schéma d'un raffineur.

Les traitements mécaniques sont les traitements les moins coûteux pour séparer les fibres, mais ils offrent malheureusement de gros désavantages. D'abord, la lignine n'est pas éliminée durant le procédé, ce qui limite la création de liaisons hydrogène entre les fibres dans le papier. Ensuite, le papier fabriqué avec de la pâte issue de cette méthode jaunie avec le temps en raison de la sensibilité de la lignine au rayonnement UV [18].

#### 2.2.1.2. Traitement chimique

Les traitements chimiques sont les traitements les plus employés pour produire de la pâte à papier. En 2019, 78 % de la pâte a été produite par un procédé chimique [1]. Bien que largement utilisés, ils ont le plus faible rendement, soit environ 40-55 % [14].

Avant de procéder au traitement chimique, le bois est préalablement dénué de son écorce et de divers contaminants avant d'être déchiqueté en fins morceaux de 2-5 mm d'épaisseur et de 10-30 mm de long [19]. Les morceaux de bois sont déposés dans un grand autoclave avec des agents chimiques. Le produit obtenu est appelé liqueur de cuisson. La majorité de la lignine et de l'hémicellulose sont dissoutes durant le traitement, permettant ainsi une bonne imbrication des fibres entre elles dans le papier par des liaisons hydrogène [19]. Le Tableau 2.3 présente le pourcentage de rétention des différents composants dans le papier en fonction du traitement employé.

Tableau 2.3 Pourcentage de rétention des composants dans le papier [14].

	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Extractible
Mécanique	100	100	100	25
Chimique	90 - 95	32	9 - 25	5

Il existe deux traitements chimiques pour séparer les fibres. Le premier est le procédé au sulfite qui utilise une combinaison d'acide sulfureux avec un agent chimique. L'agent chimique doit être choisi en fonction de l'espèce de bois puisque ce dernier affecte le rendement du procédé. Le magnésium et le sodium sont les agents chimiques les plus utilisés. Cette combinaison chimique dissout la lignine dans un milieu à faible pH compris entre 1,5 et 4.

Le second traitement est le procédé au sulfate, mieux connu sous le nom de procédé kraft. Il est de loin le procédé le plus utilisé pour isoler la cellulose. Les copeaux de bois sont mélangés dans un autoclave avec de l'hydroxyde de sodium et du sulfure de sodium. La liqueur de cuisson obtenue

présente un pH très élevé comparé au procédé au sulfite. Le procédé kraft a le principal avantage de pouvoir être utilisé avec n'importe quelle espèce de bois sans nuire au rendement.

#### *2.2.1.3. Traitement semi-chimique*

Un traitement semi-chimique est une combinaison d'un traitement mécanique et chimique. Il est similaire au traitement thermomécanique avec un raffineur, à l'exception que les copeaux de bois sont préalablement traités chimiquement dans un autoclave durant une courte durée au lieu d'être chauffés à la vapeur. Le procédé semi-chimique le plus utilisé est le procédé au sulfite neutre. Son rendement se situe entre 65 % et 85 % [14, 17].

Pour le traitement semi-chimique, la lignine n'est pas dissoute autant qu'avec un traitement totalement chimique, mais le rendement est plus important. De plus, l'élimination partielle de la lignine durant le traitement chimique diminue la consommation d'énergie nécessaire à la séparation des fibres par le procédé mécanique.

#### *2.2.1.4. Blanchiment*

Le blanchiment est une étape optionnelle dans le traitement de la pâte. L'objectif de cette étape est essentiellement de supprimer la lignine restante qui est responsable de la couleur brune du papier. Ceci est notamment nécessaire pour les papiers d'impression et les papiers hygiéniques afin de les rendre plus résistants. Le procédé est également efficace pour éliminer le restant de l'hémicellulose et des extractibles. Il faut souligner toutefois que ce n'est pas tous les papiers blancs qui ont été blanchis. Une pigmentation peut également être utilisée pour obtenir un papier blanc.

Le blanchiment consiste en un cycle circulaire de mélange-nettoyage. La pâte est mélangée dans une tour avec un agent chimique, souvent de l'oxygène ou du peroxyde d'hydrogène, puis le tout est filtré pour enlever les impuretés.

#### *2.2.1.5. Battage*

L'objectif du battage est de modifier la surface des fibres en démêlant les microfibrilles à la surface par frottement, c'est ce qu'on appelle la fibrillation. La fibrillation permet d'augmenter le contact entre les fibres en favorisant la création de liaisons hydrogène. Le battage est un procédé mécanique qui requière souvent l'utilisation d'un raffineur conique fonctionnant de façon similaire

à celui présenté à la Figure 2.4. La durée du battage est ajustée en fonction du type des fibres et des traitements précédents.

Gharehkhani et coll. [20] ont publié en 2015 une revue de littérature traitant des effets du battage sur les fibres. Lors du battage, les fibres deviennent plus souples à cause de la délamination du mur primaire P et des murs secondaires S1 et S2 (Figure 2.1). Le battage a aussi l'effet indésirable de réduire la longueur des fibres durant le procédé. La délamination et le coupage des fibres créent également des agrégats formés des murs primaires et secondaires qui ralentissent l'absorption des liquides par le papier.

#### 2.2.1.6. Ajout d'additifs

Avant d'entamer la fabrication du papier, des additifs peuvent être ajoutés à la pâte dans le but d'améliorer certaines propriétés. Ces derniers sont des minéraux ou des produits chimiques. On distingue principalement comme additifs les remplisseurs (*filler*), les liants (*binder*) et les agents d'ensimage (*sizing agent*).

Les remplisseurs ont pour rôle principal de réduire la porosité du papier, mais ils offrent également plusieurs autres bénéfices. Ils peuvent entre autres améliorer la brillance du papier, augmenter son opacité, réduire son temps de séchage, réduire ou augmenter son coefficient de friction et contrôler son taux de combustion [21]. Dans une certaine mesure, les remplisseurs peuvent servir également de pigments pour donner une couleur blanche au papier. Le plus utilisé est l'argile en raison de son faible coût et parce qu'il peut être utilisé avec n'importe quel agent d'ensimage. Comme autre remplisseur, on peut citer le carbonate de calcium qui est moins cher que l'argile, mais qui réagit avec certains agents d'ensimage conventionnels. Le dioxyde de titane est un autre remplisseur employé pour son excellente opacité et brillance, mais il est relativement dispendieux. Celui-ci est parfois mélangé avec l'argile dans le but de réduire les coûts de fabrication. Pour les *liners* blancs, souvent utilisés pour les produits d'emballage, le papier est formé d'environ 10 % d'argile et 3 % de dioxyde de titane [19].

Les liants sont utilisés afin d'améliorer la résistance du papier. Ils peuvent également réduire le taux d'absorption de l'eau. L'amidon, un dérivé du glucose, est le liant le plus utilisé pour son faible coût [14]. Tout comme la cellulose, l'amidon possède plusieurs groupes hydroxyles, ce qui lui permet de se lier entre deux chaînes de cellulose par des liaisons hydrogène. L'amidon est généralement extrait du maïs, de la patate, du blé ou du tapioca. Seulement 21 % de l'amidon utilisé dans la fabrication

du papier est utilisé comme additif dans la pâte, le reste étant utilisé pour des applications à la surface du papier [22].

Les agents d'ensimage ont comme rôle principal de ralentir l'absorption et la pénétration des liquides dans le papier. Il existe plusieurs agents d'ensimage, mais ils ont tous comme point commun d'être hydrophobes. Ils peuvent être ajoutés directement dans la pâte à papier ou à la surface du papier. Dans des environnements humides, l'ensimage seul est rarement suffisant pour limiter l'absorption des liquides par le papier. D'autres types d'additifs sont souvent ajoutés pour limiter l'absorption de l'humidité [14].

### 2.2.2. Fabrication du papier

Une fois la pâte obtenue et les additifs ajoutés, la pâte est prête à être transformée en papier à l'aide d'une machine de Fourdrinier. Des traitements de surface peuvent également être faits sur le papier pendant et après le procédé de Fourdrinier.

#### 2.2.2.1. Machine de Fourdrinier

Une machine Fourdrinier est essentiellement divisée en sept sections : la table de Fourdrinier, la section de pressage, la première section de séchage, l'application de l'ensimage, la seconde section de séchage, les rouleaux de laminage et la bobine [14, 23]. La Figure 2.5 présente un schéma de la machine de Fourdrinier.

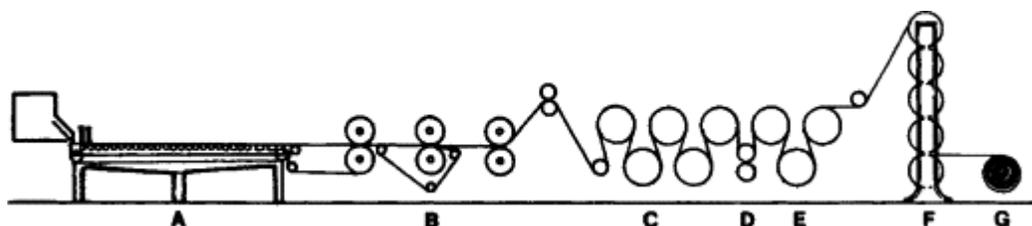


Figure 2.5 Schéma d'une machine de Fourdrinier: A) table de Fourdrinier, B) section de pressage, C) première section de séchage, D) application de l'ensimage, E) deuxième section de séchage, F) rouleaux de laminage et G) bobinage. Utilisation de l'image autorisée par le détenteur des droits d'auteur Elsevier [24].

La pâte obtenue précédemment est d'abord diluée dans de l'eau jusqu'à atteindre un ratio d'environ 1 % de pâte et 99 % d'eau. Elle est ensuite déposée dans une boîte d'alimentation à l'entrée de la machine. Cette boîte s'assure de déposer uniformément la mixture sur la table de Fourdrinier. La vitesse du dépôt de la mixture est ajustée avec la vitesse de la table.

La table de Fourdrinier sert de filtre afin de drainer une grande portion de l'eau et ainsi rendre le papier suffisamment résistant pour les prochaines étapes. Le papier quitte la table avec une teneur en eau de 80 % puis passe dans la section de pressage. Le pressage sert à soustraire encore plus d'eau de la feuille jusqu'à une teneur de 40-50 %. La feuille passe ensuite dans la section de séchage où elle est chauffée et l'eau est évacuée sous forme de vapeur. La teneur d'eau durant le séchage se situe entre 5 % et 10 %. Dans cette même section, de l'ensimage de surface peut être appliqué sur les deux côtés du papier ou un seul, faisant augmenter la teneur en eau à environ 20 %. Le papier est de nouveau séché après l'application de l'ensimage. Durant le séchage, la feuille est contrainte afin d'éviter un effet de rétrécissement et obtenir une bonne planéité.

Une fois sec, le papier passe dans une série de rouleaux de laminage. Cette section sert à lisser, compresser et uniformiser l'épaisseur du papier. Finalement, le papier est enroulé autour d'une bobine. Un couchage peut être appliqué sur le papier avant l'embobinage ou appliqué sur une autre machine.

Dans la littérature, il est fréquent de distinguer la direction machine (*machine direction* - MD) et la direction transversale (*cross direction* - CD). La direction MD est définie comme la direction vers laquelle le papier se déplace dans la machine de Fourdrinier. La direction CD fait référence à la direction transversale du parcours du papier.

#### 2.2.2.2. Couchage et traitement de surface

Le principal objectif des couchages (*coating*) et des traitements de surface est d'améliorer la qualité de surface du papier dont le lustre, l'opacité, la rugosité, l'imprimabilité et les propriétés barrières. Le papier peut également être coloré par des colorants ou des pigments.

De nos jours, des cires et des films de polymères sont couramment utilisés comme couchages pour les produits d'emballage dans le secteur alimentaire en raison de leurs bonnes propriétés barrières contre les graisses. Malheureusement, ce type de couchages est difficilement recyclable puisqu'il ne se désintègre pas dans l'eau. Gleen et coll. [25] ont publié en 2021 un article focalisant sur le travail qui a été fait pour trouver des alternatives biodégradables dans ce domaine.

### 2.2.2.3. Papier recyclé

Un papier recyclé est un papier fabriqué en totalité ou partiellement à partir de papiers récupérés. Les papiers récupérés sont classés en plusieurs grades et sous-grades en fonction du type, de la qualité et de l'usage. Il n'existe cependant pas de terminologie universelle pour la classification du papier récupéré entre les pays. Les principales institutions pour la classification du papier récupéré sont l'*Institute of Scrap Recycling Industries* (ISRI) pour l'Amérique du Nord, la *Confederation of European Paper Industries* (CEPI) pour l'Europe et l'*Australian Council of Recycling* (ACOR) pour l'Australie.

Pour obtenir du papier recyclé, des papiers récupérés sont d'abord mis sous forme de pâte en les déchiquetant en fins morceaux et en les mélangeant avec de l'eau. Un désencrage est ensuite effectué pour séparer les contaminants tels que l'encre, les couchages et les additifs. La pâte est ensuite nettoyée des contaminants. La pâte obtenue à ce stade peut alors être mélangée avec de la pâte fabriquée à partir de fibres vierges. Un battage est ensuite effectué sur la pâte. Finalement, la pâte est réutilisée dans une machine de Fourdrinier où elle sera compressée et séchée pour former une feuille de papier [26].

Plusieurs études ont été réalisées sur l'effet du recyclage sur les propriétés des fibres traitées chimiquement. Hubbe et coll. [27] ont publié en 2007 une revue de la littérature portant sur l'effet du processus de fabrication du papier sur des fibres recyclées. Il est connu que le papier recyclé possède des propriétés mécaniques moins intéressantes que le papier fait à partir de fibres vierges. La cause principale est l'hornification irréversible des fibres qui correspond à la réduction de la capacité des fibres à créer des liaisons hydrogène après qu'elles ont été compressées et séchées comme schématisées à la Figure 2.6 [28]. Lorsque compressé et séché, le volume de la fibre diminue et les microfibrilles libres sur la surface des parois vont créer des liaisons hydrogène avec les microfibrilles de la même fibre. Lorsque de nouveau en contact avec l'humidité, plusieurs de ces liaisons ne sont pas détruites, réduisant ainsi la capacité à créer des liaisons avec d'autres fibres. Selon l'*American Forest & Paper Association* (AF&PA), les fibres de papiers peuvent être réutilisées entre cinq et sept fois.

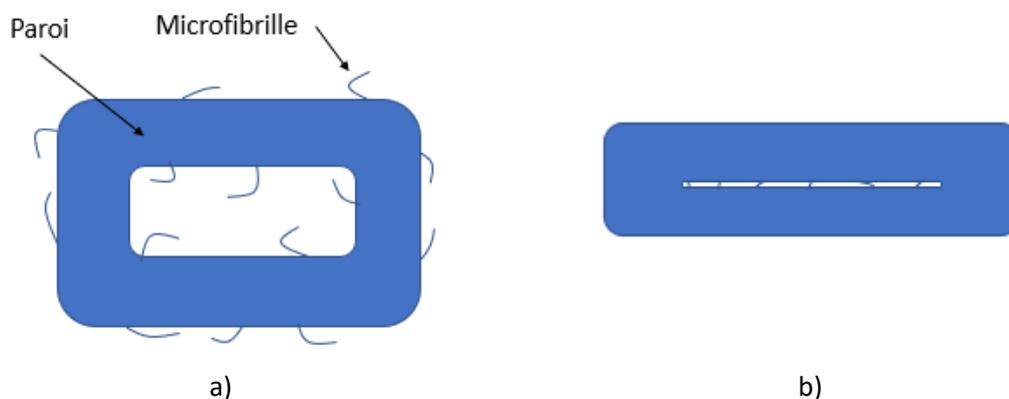


Figure 2.6 Processus d'hornification d'une fibre: a) fibre fibrillée non compressée et non séchée et b) fibre compressée et séchée.

Howard et Bichard [29] ont étudié en laboratoire l'effet de plusieurs cycles de recyclage sur 11 pâtes à papier mécaniques et chimiques provenant de différentes espèces de bois du Canada. Ils ont observé que les pâtes ne réagissent pas toutes de la même façon au recyclage selon leur type. Les papiers recyclés faits de pâte mécanique voient leur flexibilité, leur densité et leur résistance augmenter légèrement après quelques cycles. Ils expliquent ceci par le fait que les fibres sont aplaties davantage durant le recyclage, augmentant ainsi la densité du papier. Ces résultats sont en contradiction avec les travaux de Cui [30] qui n'a observé aucun changement dans la résistance du papier recyclé fait avec des fibres mécaniques après quelques cycles de recyclage.

Pour les papiers recyclés faits de pâte chimique au sulfate ou au sulfite, la résistance en traction des papiers diminue à chaque cycle de recyclage. Howard et Bichard [29] ont constaté que les pâtes traitées au sulfate voient notamment leur résistance en traction diminuer de 50 % au quatrième cycle de recyclage par rapport à leur résistance originale. La plus grande perte se produit durant les deux premiers cycles. Il n'est ainsi pas rare de voir que de la pâte chimique recyclée soit mélangée à de la pâte mécanique pour compenser la diminution des propriétés mécaniques. Cette perte de résistance est attribuée au traitement chimique qui détériore les parois des fibres en endommageant le mur primaire P et les murs secondaires S1 et S2 (Figure 2.1). L'endommagement des parois réduit davantage le nombre de microfibrilles non affectées par l'effet d'hornification.

### 2.2.3. Classification des grades de papier

Le terme « papier » peut être utilisé de façon générale pour désigner autant les papiers que les cartons. À un niveau plus spécifique, les papiers ont une épaisseur allant jusqu'à environ 12 points où 1 point équivaut à 0,0254 mm. Les cartons, quant à eux, ont une épaisseur allant jusqu'à environ

60 points. Cependant, l'épaisseur seule n'est pas une information suffisante pour dire si un matériau est un papier ou un carton [14].

Les papiers et les cartons peuvent être décrits selon un ou plusieurs des critères suivants : l'application, la composition principale et le procédé de fabrication. La *Technical Association of Pulp and Paper Industry* (TAPPI) a défini 10 catégories de papier et catégorisé plus de 600 grades de produits [31]. Les catégories sont les suivantes :

1. Papier non couché à base de bois: Papier sans couchage principalement fait de pâte mécanique. Le grammage varie entre 24 g/m<sup>2</sup> et 75 g/m<sup>2</sup>. (Ex: journal) ;
2. Papier couché à base de bois : Papier avec couchage fait avec au moins 10 % de pâte mécanique. Le grammage varie de 45 g/m<sup>2</sup> à 130 g/m<sup>2</sup>. (Ex : magazine) ;
3. Papier non couché et sans bois : Papier sans couchage fait avec moins de 10 % de pâte mécanique. (Ex : papier de bureau) ;
4. Papier couché et sans bois: Papier avec couchage fait avec moins de 10 % de pâte mécanique. Le grammage varie entre 70 g/m<sup>2</sup> et 170 g/m<sup>2</sup>. (Ex : couverture de livre) ;
5. Papier d'emballage : Les papiers dans cette catégorie servent principalement de sacs de transport. Le grammage varie entre 50 g/m<sup>2</sup> et 134 g/m<sup>2</sup>. Les papiers peuvent être blanchis ou non. (Ex : papier kraft spécialisé) ;
6. Carton blanchi : Carton blanchi fait de pâte chimique au sulfate. Près de la moitié des produits de cette catégorie sont couchés. Le grammage varie entre 200 g/m<sup>2</sup> et 500 g/m<sup>2</sup>. (Ex : assiette et gobelet en carton, *chipboard*) ;
7. Carton non blanchi : Carton non blanchi fait de pâte chimique au sulfate ou semi-chimique au sulfite neutre. Le grammage varie entre 130 g/m<sup>2</sup> et 450 g/m<sup>2</sup>. (Ex : *liner* fait de fibres vierges, *medium* fait avec un faible taux de matière recyclé et *liner* blanc de recouvrement) ;
8. Carton recyclé : Carton fait de pâte provenant de papiers récupérés. (Ex : *liner* et *medium*) ;
9. Tissue : Produit blanchi fait avec 50 % ou plus de pâte mécanique. Le grammage varie entre 13 g/m<sup>2</sup> et 75 g/m<sup>2</sup>. (Ex : essuie-tout, papier hygiénique) ;
10. Pâte commerciale : Pâte catégorisée en fonction de l'espèce de l'arbre, du procédé de mise en pâte et du blanchiment. (Ex : pâte de bambou) ;
11. Autre : Grade de papier ne correspondant pas aux autres catégories. Ils représentent moins de 5 % de la production mondiale de papier. (Ex : papier à cigarette).

Il convient de noter que la désignation « sans bois » pour les catégories 3 et 4 fait seulement référence à la lignine qui est partiellement ou totalement éliminée dans la pâte. De plus, le grammage est un terme fréquemment employé dans l'industrie des pâtes et papiers. Il est défini comme la densité surfacique d'un papier ou d'un carton.

En 2019, près de 85 % du papier produit aux États-Unis a été fabriqué à partir de fibres de bois mous [1]. Ces fibres sont généralement utilisées pour des applications où la résistance du produit final est un enjeu. Leur longueur permet une meilleure imbrication des fibres entre elles, donnant ainsi une meilleure résistance au papier [32]. Les fibres de bois durs sont généralement utilisées pour des papiers nécessitant une bonne qualité d'impression. Les fibres courtes permettent d'augmenter la densité du papier et ainsi avoir un meilleur fini de surface. Le Tableau 2.4 présente diverses applications d'espèces de bois mous et de bois durs.

Tableau 2.4 Diverses applications d'espèces de bois mous et de bois durs. Adapté de [14].

	Bois mou	Bois dur
Espèces d'arbre	Pin	Chêne
	Sapin	Érable
	Cèdre	Bouleau
	Séquoia	Noyer Cerisier
Application dans les produits d'emballage	Papier kraft, <i>Liner</i> , Caisse légère, palette	<i>Medium</i> , Caisse, Palette, Tonneau
Autres applications	Matériau de construction, Papier d'impression	Fourniture, Papier d'impression

#### 2.2.4. Impact environnemental de la production de papier

Les papiers d'emballage, incluant les cartons, sont souvent vus par le grand public comme des produits écoresponsables. La nature cellulosique du papier favorise effectivement sa biodégradation lorsqu'il est soumis à des conditions extérieures ou envoyé dans des sites d'enfouissement. Malheureusement, les fibres du papier en elle-même ne sont pas suffisantes pour répondre aux diverses fonctions d'utilisation. Pour cette raison, des additifs et des traitements de surface sont appliqués aux papiers d'emballage. Cela, non seulement complique la biodégradation, mais en plus génère plusieurs polluants lors de la fabrication.

Tomberlin et coll. [33] ont comparé la production de CO<sub>2</sub> biogénique et d'équivalent de CO<sub>2</sub> de plusieurs usines de pâtes et papiers situées aux États-Unis en 2018. Ils ont considéré plusieurs facteurs tels que les différentes étapes de fabrication du papier, les énergies utilisées, le transport, etc. Ils ont conclu que l'industrie des pâtes et papiers aux États-Unis a produit près de 80 millions de tonnes métriques d'équivalents de CO<sub>2</sub> et 104 millions de tonnes métriques de CO<sub>2</sub> biogénique. Une tonne d'équivalent de CO<sub>2</sub> est une unité de mesure mesurant l'impact des gaz à effet de serre en utilisant comme référence le CO<sub>2</sub>. Une tonne de CO<sub>2</sub> biogénique est une unité de mesure qui décrit la quantité de CO<sub>2</sub> produite par des sources biologiques, comme la décomposition du papier. Dépendant du procédé de fabrication du papier, l'émission d'équivalents de CO<sub>2</sub> varie entre 608 kg et 1978 kg par tonne métrique de produits. À titre de comparaison, l'*Environment Protection Agency* (EPA) a estimé que les industries aux États-Unis, tous secteurs confondus, ont produit près de 1470 millions de tonnes métriques d'équivalents de CO<sub>2</sub> en 2018.

Hormis la production de gaz à effet de serre, l'industrie des pâtes et papiers est également responsablement d'une grande production de déchet liquide et solide. Les eaux usées sont principalement attribuables au nettoyage du bois et de la pâte et au système de récupération des agents chimiques. Olli et coll. [34] ont estimé que la consommation en eau potable pour la fabrication du papier varie entre 5 m<sup>3</sup>/tonne US à 100 m<sup>3</sup>/tonne US. La consommation dépend entre autres du type de production, des matières premières et de la technologie employée. Les principaux déchets solides découlant de la production du papier sont des résidus de bois, des résidus boueux du traitement des eaux usées, des vieux papiers, des résidus inorganiques et des cendres [35]. Plusieurs de ces déchets sont réutilisés dans d'autres secteurs. Les résidus ou copeaux de bois sont utilisés dans la construction de mobilier. Les résidus boueux peuvent être utilisés comme produits de compostage puisqu'ils sont composés en grande partie de matière organique. Les cendres peuvent être utilisées pour l'amendement des sols ou comme fertilisant.

Actuellement, il y a quatre tendances pour disposer des déchets de papiers : le recyclage, les sites d'enfouissement, la récupération d'énergie et le compostage. Aux États-Unis, près de 42 millions de tonnes métriques de papiers recyclés ont été générées en 2018. Environ 4 millions de tonnes ont été utilisées pour produire de l'énergie par combustion et 16 millions de tonnes de papiers ont fini dans des sites d'enfouissement [36].

Le recyclage du papier apporte plusieurs avantages comparativement à l'utilisation des fibres vierges. Le plus évident est bien entendu la diminution de l'exploitation forestière. En termes

d'énergie, Bajpai [37] a listé plusieurs autres avantages . Il cite entre autres que la production de papiers recyclés requiert près 30 000 L d'eau et 3000-4000 kWh d'électricité en moins pour chaque tonne métrique par rapport à la production de papiers avec des fibres vierges. La production de fibres recyclées implique entre 28 % et 70 % moins d'énergie puisque la plus grande portion d'énergie requise avec les fibres vierges provient de la séparation des fibres dans le bois. La production de papier recyclé génère également entre 20 % et 50 % moins de CO<sub>2</sub> que la production de papier vierge.

En 2018, la CEPI [38] a estimé que le taux de recyclage du papier est de 72 % en Europe, 68 % en Amérique du Nord, 54 % en Asie, 47 % en Amérique latine et 39 % en Afrique. Le taux de recyclage est décrit suivant l'équation 2.1.

$$\text{Taux de recyclage} = \frac{\text{masse du papier récupéré utilisée pour le recyclage}}{\text{masse du papier généré}} \quad 2.1$$

L'AF&PA [39] a également estimé que plus de 40 % du papier recyclé est utilisé pour la fabrication de boîtes en carton. Shmulsky et Jones [17] ont identifié cinq raisons pourquoi le papier n'est pas entièrement recyclé :

- Les papiers trop endommagés ou contaminés ne sont pas utilisés pour le recyclage ;
- Certains types de papiers ne sont pas compatibles avec le recyclage, comme les papiers hygiéniques ;
- Le papier est parfois utilisé pour des applications de long terme, comme les livres ;
- Certains composés inorganiques utilisés comme additif ou couchage ne sont pas recyclables ;
- Les fibres ne peuvent pas être recyclées indéfiniment.

Holik [22] ajoute également que l'adhésif, utilisé pour la fabrication des produits en carton, peut compliquer le recyclage du papier. Si l'adhésif ne résiste pas suffisamment à des conditions humides, il se désintègre complètement en fines particules lors de la remise en pâte, rendant très difficile l'extraction des particules durant le nettoyage et le filtrage. Les adhésifs doivent donc être conçus pour se désintégrer en de larges particules de façon à ce qu'elles puissent être retirées par des procédés mécaniques.

Anthony et coll. [40] ont comparé la dégradation de divers produits d'emballage en carton dans des conditions d'enfouissement. Tous les produits ont montré une perte en résistance et en grammage

significative après 10 semaines, mais à des taux différents. Les produits avec un couchage de polyéthylène (verre en carton pour liquide chaud, carton de lait, carton pour surgelé) se dégradent beaucoup plus lentement. Alvarez et coll. [41] sont également arrivés à la conclusion que les papiers couchés se dégradent plus lentement. Ils ont notamment estimé que pour le papier kraft couché (sac d'épicerie, sac à fruit, carton corrugué), la biodégradation est de seulement 36 % du poids initial après 45 jours dans certaines conditions de compostage. À titre de comparaison, les papiers blancs de bureau et les papiers recyclés évalués dans leur étude présentent pour la même durée d'exposition une biodégradation de 65 % et 61 % respectivement.

### 2.3. Adhésif dans les produits d'emballage

Dans les produits d'emballage faits de papiers, il est fréquent d'utiliser un adhésif afin de combiner deux papiers en une seule structure. De façon générale, un adhésif est une substance naturelle ou synthétique qui sert à coller deux surfaces ensemble. Les adhésifs industriels doivent permettre une liaison rapide et sécuritaire du matériel tout en garantissant l'intégrité du produit final durant son cycle de vie. Pour assurer un bon joint, une combinaison appropriée de température et de pression doit être appliquée le temps que l'adhésif se solidifie suffisamment pour concrétiser les liaisons avec le substrat. Il existe trois mécanismes de solidification et ce dernier dépend du type d'adhésif [42]:

- Réaction chimique due à une combinaison de chaleur, de pression ou d'un agent durcisseur ;
- Refroidissement à partir d'un liquide fondu ;
- Séchage par évaporation du solvant.

On peut citer quelques propriétés importantes des adhésifs dans le domaine des produits d'emballage [43]:

- Adhésion : habilité de l'adhésif à se lier à un substrat ;
- Cohésion : habilité de l'adhésif à maintenir son intégrité ;
- Pégosité : habilité de l'adhésif à s'accrocher à une surface au contact initial ;
- Viscosité : habilité de l'adhésif à s'étendre sur une surface ;
- Temps de solidification : Temps nécessaire à l'adhésif pour atteindre sa solidification.

### 2.3.1. Type d'adhésif dans l'industrie des pâtes et papiers

Dans la littérature, il n'y a pas de règle universelle pour la classification des adhésifs, mais ils sont le plus souvent présentés en deux catégories : les adhésifs à base naturelle et les adhésifs synthétiques. Les adhésifs peuvent venir sous plusieurs formes, les plus fréquentes étant les adhésifs à base d'eau et les thermofusibles.

Les adhésifs à base d'eau regroupent autant des adhésifs naturels que synthétiques. Ils comprennent entre autres l'amidon et ses dérivés, la caséine, l'acétate de polyvinyle (PVA) et certains polyuréthanes et acryliques. La solidification de ces adhésifs se fait par évaporation de l'eau. L'amidon et ses dérivés sont les adhésifs les plus utilisés dans l'industrie des pâtes et papiers, suivis des PVA [44]. L'amidon, qui est de source naturelle, a l'avantage d'être peu dispendieux. Cependant, le temps de séchage pour ce type d'adhésif est généralement long puisque son taux de solides est peu élevé, soit de 20-30 %. La dextrine, un dérivé de l'amidon, se dissout plus facilement dans l'eau ce qui lui permet d'avoir un plus haut taux de solides de 40-50 % réduisant ainsi son temps de séchage. Les adhésifs naturels à base d'eau sont principalement utilisés pour leur faible coût, leur facilité de nettoyage et la possibilité d'obtenir une adhérence rapide dépendant du substrat [45]. Les PVA sont des adhésifs synthétiques avec un taux de solides se situant généralement entre 50 % et 80 %, ce qui leur permet un séchage rapide [14]. Les PVA peuvent être utilisés sur une plus grande variété de surface que les adhésifs naturels à base d'eau [45].

Les adhésifs thermofusibles sont des thermoplastiques et regroupent des adhésifs à base naturelle et des adhésifs synthétiques. Ceux-ci ont la particularité d'avoir un taux de solides de 100 % et ne sont pas composés d'un solvant. Ils sont souvent offerts en granules ou en bâtonnets. Leur utilisation requiert de la chaleur pour les amener sous forme liquide afin de les appliquer sur le produit où ils redeviennent ensuite sous forme solide par refroidissement. Les thermofusibles peuvent être utilisés à de très grande vitesse de production comparée aux adhésifs à base d'eau, soit quelques centaines de mètres par minute [45]. Cependant, ce type d'adhésive est généralement plus coûteux et son application requiert plus d'énergie.

Ashley et coll. [45] ont proposé une classification des adhésifs utilisés dans les produits d'emballage en fonction de leur rôle dans le produit. Le Tableau 2.5 et le Tableau 2.6 présentent respectivement des adhésifs à base naturelle et synthétiques issus de leurs travaux. Les catégories sont les suivantes :

1. Adhésifs utilisés pour former la structure du produit d'emballage par la combinaison de substrats. On peut citer par exemple l'adhésif utilisé pour coller un *liner* et un *medium* pour former un carton corrugué. Les adhésifs utilisés pour fabriquer les cornières s'inscrivent également dans cette catégorie.
2. Adhésifs utilisés pour assembler des produits d'emballage dans leur géométrie finale. On peut citer par exemple un adhésif de type thermofusible utilisé pour former une boîte composée de panneaux de carton corrugué.
3. Adhésifs utilisés pour les étiquettes et diverses opérations comme le revêtement par extrusion, le laquage et les rubans adhésifs.

Tableau 2.5 Adhésifs à base naturelle dans l'industrie des pâtes et papiers. Adapté de [45].

Type	Forme	Catégorie
Amidon - PVA	Pâte aqueuse	1
Amidon modifié	Pâte aqueuse	1, 3
Amidon non-modifié	Fluide aqueux	1
Amidon prégélatiné	Poudre blanche soluble dans l'eau	1, 2
Adhésif d'origine animal	Solide, gelée, liquide	2, 3
Caoutchouc naturel	Latex aqueux	2, 3
Caséine	Pâte aqueuse	1, 3
Cire (naturelle et synthétique)	Thermofusible	1
Colophane	Thermofusible	3
Dérivée de cellulose	Solution organique	1
Dextrine (naturelle et synthétique)	Pâte, latex	1, 2, 3
Silicate de sodium	Solution aqueuse	1

Tableau 2.6 Adhésifs synthétiques dans l'industrie des pâtes et papiers. Adapté de [45].

Type	Forme	Catégorie
Acétate de vinyle (copolymère d'éthylène)	Dispersion aqueuse	1, 2, 3
Acrylique (acrylate, méthacrylate et copolymères)	Émulsion aqueuse, solution organique	1, 3
Alcool polyvinylique	Dispersion aqueuse	1, 3
Éthylène-acétate de vinyle	Thermofusible	2
Acétate de polyvinyle	Dispersion aqueuse	1, 2
Polyoléfine modifié	Thermofusible co-extrudable	1
Polyuréthane	Solution organique, dispersion aqueuse, thermofusible	1
Styrène-butadiène et styrène isoprène	Solution organique, dispersion aqueuse, thermofusible	3

### 2.3.2. Théories de l'adhésion

Il existe plusieurs théories expliquant l'adhésion entre deux matériaux. Dans la pratique, il est difficile d'attribuer le mécanisme d'adhésion à une seule théorie. Une combinaison de celles-ci est plus adéquate pour expliquer au mieux le phénomène. On note couramment trois théories dominantes de l'adhésion, présentées au Tableau 2.7, expliquant l'adhésion entre un papier et un adhésif. Le champ d'action de ces théories varie du niveau atomique au niveau microscopique.

Tableau 2.7 Théories d'adhésion et leur champ d'action. Adapté de [42].

Théorie	Champs d'action
Verrouillage mécanique	Microscopique
Mouillage/thermodynamique	Moléculaire
Liaison chimique	Atomique

La théorie du verrouillage mécanique explique l'adhésion par un ancrage purement physique entre l'adhésif et le substrat au niveau microscopique. L'irrégularité de surface et la porosité du solide contribuent à la pénétration de l'adhésif. La pénétration de l'adhésif dépend également de sa viscosité, de sa tension de surface et de l'énergie de surface du substrat. Lorsque l'adhésif se solidifie, un ancrage mécanique se forme.

La théorie du mouillage, ou théorie thermodynamique, explique l'adhésion par le contact moléculaire entre deux matériaux et les forces surfaciques de type Van der Waals qui en résulte. Ce type de force a un champ d'action très faible de l'ordre de la distance intermoléculaire. Pour que ce type d'adhésion soit efficace, il faut que la surface de contact entre les deux matériaux soit suffisante, d'où le concept de mouillage. Le mouillage est la capacité d'un liquide à s'étendre sur une surface. Physiquement, il peut être observé par l'angle de contact  $\theta$  entre un liquide et un solide. Plus l'angle de contact entre le liquide et le substrat est faible, plus la surface de contact est élevée et vice-versa, comme illustrée à la Figure 2.7. Pour qu'une bonne mouillabilité puisse opérer, il faut que la force d'attraction entre le liquide et le substrat soit supérieure à la tension de surface du liquide [14, 42].

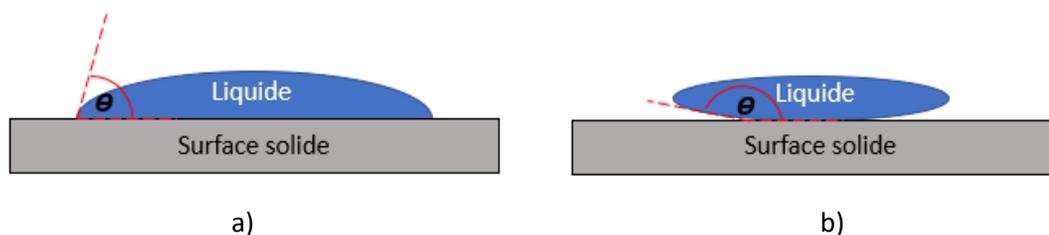


Figure 2.7 Mouillabilité d'un liquide sur une surface : a) bonne mouillabilité et b) mauvaise mouillabilité.

La théorie de la liaison chimique résulte des forces d'attraction des molécules de l'adhésif et du substrat. Dans le cas des pâtes et papiers, cela implique principalement les liaisons hydrogène [14]. Comme expliqué précédemment, le papier est majoritairement composé de cellulose et celle-ci présente plusieurs groupes hydroxyle (-OH). Une liaison hydrogène, dans ce cas précis, est un type d'interaction dipôle-dipôle, c'est-à-dire une force qui résulte de l'attraction entre la charge positive de l'atome d'hydrogène et la charge négative de l'atome d'oxygène. Plusieurs adhésifs, dont les acétates de polyvinyle, contiennent également des groupes hydroxyles pouvant former des liaisons hydrogène avec les groupes hydroxyles de la cellulose [46].

### 2.3.3. Mécanismes de rupture des joints collés

Lorsqu'une structure, formée de deux substrats liés par un adhésif, est soumise à un effort, on distingue principalement deux types de rupture : adhésive et cohésive. Une rupture adhésive survient lorsqu'il y a un détachement à l'interface de l'adhésif et d'un substrat comme illustrée à la Figure 2.8.a. Une rupture cohésive est une rupture qui se produit à l'intérieur même de l'adhésif ou de l'un des substrats comme illustrés respectivement à la Figure 2.8.b et à la Figure 2.8.c. On parle alors d'une rupture cohésive de l'adhésif ou d'une rupture cohésive du substrat.

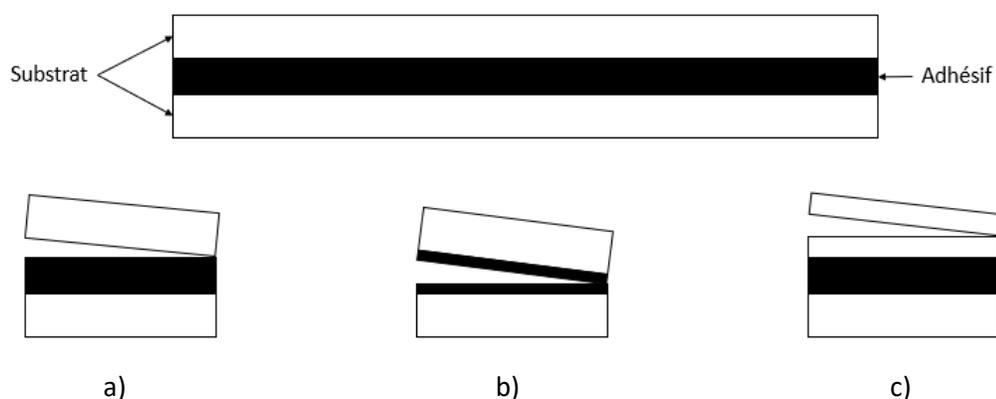


Figure 2.8 Modes de rupture entre l'adhésif et le substrat : a) rupture adhésive, b) rupture cohésive de l'adhésif et c) rupture cohésive du substrat.

Dans les produits des pâtes et papiers, la résistance de la liaison adhésif-papier doit être au moins aussi résistante que les forces cohésives du papier et de l'adhésif séparément. Une rupture cohésive du substrat est préférable afin de garantir l'intégrité de la structure et d'éviter que le point faible soit l'interface adhésif-papier [14]. On souligne toutefois qu'il y a certains types de produits qui sont conçus spécifiquement pour obtenir une rupture adhésive. On peut penser notamment à une simple feuille d'autocollants (*post-it*).

Korin et coll. [47] ont étudié différents modes de rupture à l'interface entre un carton et un adhésif de type thermofusible. L'adhésif a été appliqué entre deux cartons puis ceux-ci ont été pelés par un appareil, nommé *Y-peel*. Ils ont déterminé que les ruptures abruptes sont dues à une rupture adhésive entre l'adhésif et le carton. Ils ont associé l'apparition de plusieurs maximums dans la courbe force-déplacement à des microfissures, bien que la rupture finale ne se situe pas nécessairement aux mêmes endroits que les microfissures. Ils ont aussi montré qu'un dépôt important d'adhésif résulte toujours en une rupture cohésive du carton.

Dans une autre étude, Korin et coll. [48] ont étudié l'effet des traitements de surface du carton sur la résistance mécanique d'un joint entre un adhésif thermofusible et un carton. Ils ont déterminé que la rugosité surfacique du carton est affectée par les traitements de surface et que plus celle-ci est élevée, plus la liaison entre l'adhésif et le carton est forte. Cela pourrait confirmer la théorie du verrouillage mécanique. Cependant, l'interaction entre les produits chimiques utilisés pour le traitement de surface et l'adhésif n'a pas été étudiée.

Roman et coll. [49] ont étudié l'effet de la quantité d'adhésif sur la résistance maximale en compression d'un carton corrugué. Dans cette étude, ils ont comparé plusieurs adhésifs dont une formulation standard d'amidon à 25 % de solides, un PVA à 41 % de solides et du silicate de sodium à 48 % de solides. En moyennes, l'amidon standard et le silicate de sodium ont offert les meilleures performances. L'influence du taux de solides n'a pas été étudiée. Tous les adhésifs ont présenté une corrélation positive entre l'augmentation de la résistance en compression et l'augmentation du dosage d'adhésif. Les auteurs ont également émis l'hypothèse que la quantité de fibres pourrait être réduite au profit d'un dosage d'adhésif plus élevé tout en conservant la résistance requise pour une application réelle. Cependant, ils notent que l'augmentation du dosage augmente également le temps de séchage, ce qui n'est pas souhaitable sur une chaîne de production.

## 2.4. Effet de l'humidité sur le papier

Les produits de pâtes et papiers sont composés majoritairement de celluloses, ce qui les rend hydrophiles par nature. Le papier absorbe ou désorbe l'humidité ambiante jusqu'à atteindre un taux massique d'humidité (TMH) en équilibre avec son environnement. Le TMH est décrit selon la formule suivante :

$$TMH = \frac{\text{masse humide} - \text{masse sèche}}{\text{masse sèche}} \times 100 \% \quad 2.2$$

Le comportement global de la diffusion de l'humidité dans le papier peut être expliqué par les lois de Fick. Les particules d'eau se déplacent du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré en eau. Le taux de diffusion est directement proportionnel au gradient de concentration. Toutefois, la diffusion de particules d'eau dans le papier n'a pas systématiquement un comportement Fickien. La température, les couchages ainsi que la structure du papier ont également une influence sur le taux de diffusion de l'humidité dans le papier [50].

L'absorption ou désorption de l'humidité a pour conséquence de changer les dimensions et les propriétés mécaniques du papier. Le changement de dimension du papier est appelé hygroexpansion. Concernant les propriétés mécaniques, il est de coutume de préciser le TMH ou l'humidité relative (HR) de conditionnement à laquelle les résultats ont été obtenus puisque les propriétés en sont fortement dépendantes. L'augmentation du TMH a pour effet de réduire plusieurs propriétés mécaniques du papier, dont sa résistance et sa rigidité.

### 2.4.1. Hygroexpansion

L'importance de l'hygroexpansion, reliée à l'absorption de l'humidité, dépend de plusieurs facteurs, dont l'espèce du bois, les additifs, les traitements mécaniques ou chimiques sur la pâte, les traitements de surface et les couchages sur le papier. Lindner [13] a publié une revue de la littérature portant sur les facteurs affectant l'hygroexpansion du papier. L'absorption de l'humidité est due aux groupes hydroxyles de la cellulose qui favorise la création de liaisons hydrogène entre les particules d'eau et les fibres. On peut ainsi observer que le papier gonfle quand il devient humide.

On peut observer physiquement l'effet de la désorption de l'eau dans le papier par le rétrécissement de celui-ci. Une ondulation se produit quand le papier a été préalablement mouillé puis séché. Le TMH initial dans le papier a une forte influence sur le rétrécissement final [51]. Durant la désorption,

les forces d'attraction reliées à la tension de surface de l'eau poussent les fibres les unes vers les autres, favorisant ainsi la création de liaisons hydrogène entre les fibres. C'est pour cette raison que les papiers, fabriqués avec une machine de Fourdrinier, sont restreints durant le séchage. De cette manière, on évite la contraction du papier, mais cela crée des contraintes internes reliées à la déformation de la structure des fibres [52]. Les travaux de Setterholm et Chilson [53] ont démontré qu'un séchage avec restriction améliore les propriétés en traction du papier. Également, un papier préalablement séché avec restriction puis mouillé et ensuite séché sans restriction, ne retrouve pas sa résistance en traction et sa rigidité initiales. Tous leurs essais ont été effectués après un conditionnement à 23 °C à 50 % HR.

La composition chimique des fibres a son importance sur l'hygroexpansion du papier puisque la cellulose, l'hémicellulose et la lignine n'ont pas la même capacité d'absorption. Comme le souligne Lindner [13] dans sa revue de littérature, le TMH dans les composants du bois est naturellement de 5-10 % pour la cellulose, 10-20 % pour l'hémicellulose et 2,5-7,5 % pour la lignine. La proportion de ces trois principaux composants dans le papier est non seulement dépendante de l'espèce de bois, mais également du procédé de fabrication. Les traitements chimiques sont bien plus efficaces pour éliminer l'hémicellulose et la lignine que les traitements mécaniques. Le blanchiment permet de réduire davantage la proportion de lignine. Les liants utilisés comme additifs permettent de réduire le taux d'absorption de l'eau. L'ajout d'agent d'ensimage ou d'un couchage permet également au papier d'être partiellement hydrophobe, réduisant l'absorption de l'eau.

Comme mentionné précédemment, les parois des fibres sont divisées en quatre sections : le mur primaire P et les murs secondaires S1, S2 et S3 (Figure 2.1). Chacun de ces murs est caractérisé par une épaisseur et une orientation moyenne des microfibrilles. Le mur S2 occupe le plus grand volume et les microfibrilles de cette paroi ont en moyenne un angle plus faible que les microfibrilles des autres parois. Les groupes hydroxyles libres sont disposés principalement radialement autour d'une microfibrille. Comme les fibres sont majoritairement alignées dans la direction MD lors de la fabrication du papier, l'hygroexpansion du papier est plus importante dans la direction CD. Ceci a été démontré dans les travaux de Neagu et coll. [54]. Selon Courchene et coll. [11], l'orientation des microfibrilles est un facteur déterminant de l'hygroexpansion du papier ainsi que de sa résistance et de sa rigidité.

Niskanen et coll. [55] ont étudié la dynamique de l'hygroexpansion de quatre papiers différents, soit un *medium* et trois *liners*. Les papiers ont été conditionnés par des cycles successifs de 30 % HR et

90 % HR et les dimensions des papiers ont été mesurées lorsque celles-ci étaient stabilisées. Tous les papiers ont montré une déformation plus importante dans la direction CD que la direction MD aux deux extrêmes du cycle de conditionnement. Ils ont également observé que le taux de déformation dans les deux directions du plan obéit à un effet d'hystérésis. Le taux de déformation est plus lent durant l'absorption de l'humidité que durant sa désorption.

Mayeli [56] a étudié l'influence de plusieurs facteurs sur le rétrécissement sans restriction de papiers faits de fibres de bois mous et d'autres faits de fibres de bois dur. Il a déterminé que le facteur ayant le plus grand impact sur le rétrécissement est l'épaisseur des parois des fibres. Les fibres avec une paroi épaisse offrent un papier plus résistant au rétrécissement que les fibres à paroi mince. L'augmentation du grammage augmente aussi le rétrécissement et celui-ci est plus important pour les papiers faits de fibres de bois dur.

#### *2.4.2. Propriétés mécaniques sous l'effet de l'humidité*

Entreposer du papier dans des conditions humides a pour conséquence de diminuer drastiquement ses propriétés mécaniques. De nombreux articles ont été publiés traitant de l'effet de l'humidité sur le papier et tous arrivent à cette conclusion [57-61]. Cette diminution des propriétés mécaniques est expliquée par le fait qu'en présence d'humidité, les liaisons hydrogène formées entre les groupes hydroxyles de la cellulose sont détruites en partie, réduisant l'interaction entre les fibres [14, 58].

L'humidité a aussi un effet au niveau moléculaire. Les travaux de Cousins [62, 63] ont permis de déterminer que le module d'élasticité de l'hémicellulose et de la lignine sont fortement influencés par la teneur en humidité. Lorsque le TMH augmente de 3,6 % à une saturation de 14 %, le module d'élasticité de la lignine diminue de 6,7 GPa à 2,8 GPa. Pour l'hémicellulose, le module d'élasticité est d'environ 8 GPa à un faible TMH, entre 0 % et 10 %, et de 10 MPa à une saturation de 70 %. Le module d'élasticité de la cellulose cristallisée est quant à lui peu ou pas affecté par la teneur en humidité. Il est estimé à 130-170 GPa [64].

Rhim [58] a étudié les propriétés mécaniques en traction de divers papiers sous l'effet de l'humidité. Plus spécifiquement, il a étudié l'allongement à la rupture et la résistance à la traction d'un papier parchemin, d'un papier kraft et d'un papier blanchi traité au sulfate. L'augmentation du TMH a pour effet de diminuer la résistance à la traction et d'augmenter l'allongement à la rupture. Pour les trois papiers, l'effet de l'humidité sur les propriétés en traction est plus important dans la direction CD.

L'allongement à la rupture augmente de manière significative lorsque le TMH augmente de 2 % à 15 %. Pour le papier kraft par exemple, l'allongement à la rupture dans la direction CD est passé en moyenne de 4 % pour 2 % TMH, à 8 % pour 15 % TMH. Pour le même papier dans la direction MD, l'allongement à la rupture en traction est passé en moyenne d'un peu moins de 3 % pour 2 % TMH à un peu moins de 4 % pour 15 % TMH. Allaoui et coll. [59] ont analysé la résistance maximale et l'allongement à la rupture en traction de papiers qui composent un carton corrugué, soit un *medium* et un *liner*. Ils sont arrivés à des conclusions très similaires à Rhim [58] où l'allongement à la rupture est plus important dans la direction CD.

Navaranjan et coll. [60] ont comparé l'effet de l'humidité sur du carton corrugué composé de fibres recyclées et vierges. La résistance en compression et la rigidité des cartons corrugués ont été étudiées à deux conditionnements : 50 % HR et 90 % HR. Pour les deux types de fibres, la résistance à la compression et la rigidité sont supérieures dans la direction MD que dans la direction CD. De plus, ces deux propriétés sont plus faibles à 90 % HR qu'à 50 % HR. Cependant, la diminution des propriétés mécaniques est inférieure en proportion pour le carton recyclé. Ils ont conclu que le potentiel d'absorption de l'eau est supérieur pour les fibres vierges. Ceci est possiblement relié au fait que les fibres vierges ont un plus grand nombre de groupes hydroxyles libres.

Strömberg [61] a comparé les propriétés en compression et en traction de plusieurs *liners* et *mediums* sous l'effet de l'humidité. Les *liners* et les *mediums* ont été évalués à un conditionnement de 50 % HR et 90 % HR. En comparant les résultats obtenus aux deux conditionnements, Strömberg constate que la rigidité en compression et en traction des deux papiers diminue à 90 % et que la rétention de la rigidité est similaire pour les deux papiers. La résistance en compression et en traction a chuté d'environ 50 % à 90 % HR par rapport à un conditionnement de 50 % HR pour tous les papiers. La résistance en traction est supérieure à la résistance en compression aux deux conditionnements. Cependant, la rigidité en compression dans les directions MD et CD est supérieure à la rigidité en traction à 90 % HR. À 50 %, la rigidité en compression et en traction sont comparables pour chacun des papiers. Strömberg n'a pas observé de corrélation entre le mécanisme de rupture du papier et l'humidité relative.

## 2.5. Caractérisation mécanique des produits en carton

Il existe une très grande variété d'essais normalisés concernant les produits à base de cellulose tels que les cartons corrugués, les tubes, les cartons nid d'abeille, les pâtes et les papiers.

En raison de la sensibilité des fibres végétales à l'humidité, les essais normalisés spécifient généralement l'utilisation d'une norme de conditionnement avant de réaliser les essais afin d'obtenir des résultats comparables. On peut citer entre autres les normes TAPPI T402, ASTM D685 et ISO 187, ainsi que les normes ASTM D4332 et ISO 2233 spécifiques aux produits d'emballage [14]. Pour une utilisation à des conditions atmosphériques standards, les normes TAPPI T402 et ISO 187 fixent une température de conditionnement de  $23,0\text{ °C} \pm 1,0\text{ °C}$  à 50 % HR [65, 66]. Dans ces conditions, le TMH du papier atteint approximativement 5 % à l'équilibre. Ces deux normes suggèrent également un préconditionnement de 24 heures à une température ne dépassant pas  $40\text{ °C}$  et à une humidité relative comprise entre 10 % et 35 % afin de considérer l'effet d'hystérésis.

Les types d'essais sont adaptés en fonction de la structure du produit. On retrouve entre autres des essais de compression, de traction, de flexion, de perforation servant à caractériser le comportement mécanique et plusieurs autres servant à déterminer les propriétés des papiers et cartons tels que le grammage, l'épaisseur, l'imperméabilité, l'absorption et le coefficient de friction.

Pour des essais de compression sur des cartons corrugués, il est commun d'utiliser un guide ou un renfort. La norme ISO 3037 [67] concernant un chargement en compression sur le chant d'un carton corrugué spécifie que des guides doivent être utilisés le long des deux côtés de l'éprouvette pour éviter un flambement élastique. La norme ASTM D6484 [68] présente un cas similaire pour un essai de compression sur un matériau composite. La norme ISO 13821 [69] quant à elle spécifie que les bords d'un carton corrugué sur lesquels le chargement est appliqué doivent être renforcés avec de la cire de paraffine afin d'éviter leur rupture prématurée.

La détermination de la rigidité en flexion des papiers et des cartons se fait fréquemment par des essais de flexion en porte-à-faux. On peut citer notamment les normes TAPPI T489 et TAPPI T566 [14]. L'une des extrémités de l'éprouvette est serrée alors qu'un nez de chargement applique une force sur l'extrémité libre. Le moment de flexion nécessaire pour dévier l'extrémité libre à un angle de  $7,5^\circ$  ou  $15^\circ$ , dépendant de l'épaisseur de l'éprouvette, est calculé afin d'obtenir la rigidité. Pour déterminer la rigidité en flexion d'un carton corrugué, la norme ISO 5628 [70] recommande des essais de flexion quatre-points.

Au meilleur de nos connaissances, il n'existe qu'une seule norme de caractérisation mécanique pour des cornières en carton : la norme européenne EN 13393 [71]. Celle-ci décrit à la fois une méthodologie d'essai de compression et une méthodologie d'essai de flexion trois-points pour des

épreuves d'une longueur de 230 mm. La norme souligne qu'elle se limite aux profilés ayant une épaisseur comprise entre 1,5 mm et 6 mm et une largeur d'aile allant de 35 mm à 100 mm.

La méthodologie d'essai de compression décrite dans la norme EN 13393 spécifie que l'éprouvette est simplement déposée entre deux plateaux, dont l'un est fixe et l'autre mobile. Le plateau mobile applique une charge à une vitesse constante de 10 mm/min dans la direction longitudinale de l'éprouvette. La méthodologie décrite n'utilise ni support pour guider l'éprouvette, ni renfort pour les extrémités durant le chargement. Cette méthodologie est peu représentative d'une application réelle. Les cornières sont généralement maintenues par des sangles et appuyées contre une marchandise. Considérant la longueur des éprouvettes et les conditions aux appuis décrites dans cette norme, il est probable d'observer un flambement global de l'éprouvette ou bien un écrasement aux appuis, deux modes de défaillance non souhaitable pour ce type d'essai.

La méthodologie de flexion trois-points décrite dans la norme EN 13393 spécifie que l'éprouvette est déposée sur deux appuis latéraux séparés d'une distance de 200 mm. Un nez de chargement, d'une largeur de 18 mm, applique une charge au centre de l'éprouvette à une vitesse constante de 400 mm/min. Aucun autre détail n'est donné sur la géométrie du sommet des appuis en contact avec l'éprouvette. La norme se contente d'illustrer le montage par un schéma où les appuis et le nez de chargement épousent la forme du profil d'une cornière. Les paramètres de l'essai (distance entre les appuis, vitesse d'essai, longueur d'éprouvette) ne sont pas ajustés en fonction des dimensions du profilé. Ceci peut amener une certaine préoccupation quant à l'importance des contraintes de cisaillement pour une éprouvette dont le rapport entre la distance entre les appuis et l'inertie de surface est trop faible. Dans la norme ASTM D7264 [72], le rapport entre l'épaisseur d'un échantillon de section rectangulaire et la distance entre les appuis est notamment pris en compte pour déterminer la rigidité en flexion trois-points d'un composite. De plus, la vitesse d'essai très élevée de l'essai de flexion présentée dans la norme EN 13393 amène une autre préoccupation quant à l'effet du chargement dynamique sur les propriétés mécaniques d'une cornière.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Les objectifs du projet sont multiples. D'abord, l'effet du type de papier et du type d'adhésif sur les propriétés mécaniques d'une nouvelle génération de cornières est évalué suivi de l'effet de l'humidité sur les deux générations de cornières. Ensuite, les modes de défaillance en compression des deux générations de cornières sont évalués. Finalement, le comportement ainsi que les propriétés mécaniques des deux générations de cornières sont comparés.

Pour répondre à ces objectifs, une méthodologie a été développée. Cette section présente le choix des matériaux pour la fabrication des cornières, la synthèse des essais, la méthode de fabrication des cornières, le conditionnement, les paramètres des essais mécaniques ainsi que la méthode de sélection des éprouvettes.

### 3.1. Choix des matériaux

Les cornières MF2.0 sont fabriquées avec trois types de papier : un *chipboard* (C), un *liner* brun (L) et un *liner* blanc de recouvrement (R). Le tout est collé ensemble par l'adhésif synthétique drybond 636 (DR) de type PVA. Il s'agit des matières premières employées pour une fabrication standard des cornières offertes actuellement par Abzac Canada.

L'étude de l'effet du type de papier et du type d'adhésif est réalisée seulement sur les matières premières utilisées pour la fabrication des MF4.0. Un seul type de papier et un seul type d'adhésif sont nécessaires pour fabriquer ce type de cornière. La sélection des matières premières a été faite antérieurement par Abzac Canada en se basant sur un rapport d'expertise réalisé par un tiers indépendant durant l'été 2020 :

- Trois papiers ont été retenus : un *medium* (M), un *liner* brun (L) et un *liner* noir et blanc (B). Tous ces papiers sont produits avec 100 % de fibres recyclées. Ils ont été sélectionnés en fonction de leur prix, leur disponibilité et leurs propriétés. Le *liner* brun est aussi utilisé pour la fabrication des cornières MF2.0.
- Quatre adhésifs synthétiques de type PVA ont été retenus : drybond 636 (DR), dural G 3245 (D1), dural G 3245M (D2) et henkel CG 070A (HE). Les adhésifs D1, D2 et HE ont été sélectionnés pour leur temps de séchage très rapide. L'adhésif DR a été sélectionné comme adhésif de référence.

Le Tableau 3.1 et le Tableau 3.2 présentent respectivement les différentes caractéristiques des adhésifs et des papiers utilisés pour la fabrication des cornières MF2.0 et MF4.0. Lorsque disponibles, les écarts-types sont présentés entre parenthèses. Les données sur les adhésifs et les papiers utilisés pour la fabrication des cornières MF4.0 proviennent du rapport d'expertise réalisé par le tiers indépendant.

Tableau 3.1 Caractéristiques des adhésifs à l'étude.

	Drybond 636 (DR)	Dural G 3245 (D1)	Dural G 3245M (D2)	Henkel CG 070A (HE)
pH	4,9	5,1	5,2	4,4
Viscosité à 23°C (cPs)	1440	2350	1400	2000
Solide* (%)	19,4	67,8	67,8	56,7

\*Taux de solides massique

Tableau 3.2 Caractéristiques des papiers utilisés pour la fabrication des cornières.

	Medium (M)	Liner brun (L)	Liner noir et blanc* (B)	Chipboard (C)	Liner blanc de recouvrement (R)	
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	165,9 (3,2)	169,4 (3,2)	211,8 (1,9)	513	205	
Épaisseur (µm)	282,6 (7,4)	265,7 (4,1)	258,3 (2,8)	889	254	
Porosité (sec./100 ml)	20 (1)	25 (1)	197 (12)	N/A	N/A	
Rugosité (SU)	Dessus	N/A	388 (5)	152 (20)	N/A	N/A
	Dessous	393 (4)	396 (3)	197 (25)	N/A	N/A
TMH** (%)	7,0	7,1	7,0	7,0	7,0	

\*Pour le *liner* noir et blanc, le côté blanc est le dessus et le côté noir est le dessous.

\*\*TMH auquel le grammage, l'épaisseur, la porosité et la rugosité des différents papiers ont été obtenus.

## 3.2. Synthèse des essais

### 3.2.1. Synthèse des essais de compression et de flexion trois-points

Le Tableau 3.3 présente la synthèse des essais de compression et de flexion trois-points. Afin d'alléger le texte, une étiquette a été attribuée à chaque combinaison de papier et d'adhésif. Neuf répétitions par conditions de test ont été effectuées pour les MF2.0. Le nombre de répétitions par condition de test a été limité à trois pour les MF4.0 en raison du temps de fabrication élevé.

Tableau 3.3 Synthèse des essais de compression et de flexion trois-points.

Méthode de pliage	Papier	Adhésif	Étiquette	Compression		Flexion trois-points	
				Sec	Humide	Sec	Humide
MF2.0	L, C et R	DR	REF	9	9	9	9
	M	DR	MDR	3	3	3	3
MF4.0	B	DR	BDR	3	3	3	3
		D1	BD1	3	3	3	3
	D2	BD2	3	3	3	3	
	HE	BHE	3	3	3	3	
	L	DR	LDR	3	3	3	3
		D1	LD1	3	3	3	3
D2		LD2	3	3	3	3	
	HE	LHE	3	3	3	3	
Total : 144 éprouvettes							

Abréviations : *liner* brun (L) ; *chipboard* (C) ; *liner* blanc de recouvrement (R) ; *medium* (M) ; *liner* noir et blanc (B) ; drybond 636 (DR) ; dural G 3245 (D1) ; dural G 3245M (D2) ; henkel CG 070A (HE).

### 3.2.2. Synthèse des essais de compression avec corrélation d'image numérique

Pour les cornières MF4.0, seul l'échantillon LDR a été évalué en compression avec CIN puisque parmi toutes les combinaisons de papier et d'adhésif, c'est la construction qui se rapproche le plus des cornières MF2.0 (REF) en termes de matières premières. Cela permet donc de mieux évaluer et comparer les modes de défaillances des deux générations de cornières en limitant le nombre de paramètres différents.

Le Tableau 3.4 présente la synthèse des essais. Huit éprouvettes ont été évaluées pour un total de deux échantillons, soit un échantillon pour les MF2.0 et un échantillon pour MF4.0. Toutes les éprouvettes d'un même échantillon proviennent du même lot de fabrication. Toutes les éprouvettes ont été évaluées à un conditionnement sec.

Tableau 3.4 Synthèse des essais pour l'étude avec la méthode de corrélation d'image sur les deux générations de cornières.

Méthode de pliage	Papier	Adhésif	Étiquette	Compression
MF2.0	L, C et R	DR	REF	5
MF4.0	L	DR	LDR	3
Total : 8 éprouvettes				

Abréviations : *liner* brun (L) ; *chipboard* (C) ; *liner* blanc de recouvrement (R) ; drybond 636 (DR).

### 3.3. Fabrication des cornières

Les procédés de fabrication respectifs des deux générations de cornières diffèrent grandement l'un de l'autre. Les MF2.0 sont produites par un processus industriel alors que les MF4.0 sont fabriquées manuellement à l'aide d'outils développés spécifiquement pour ce projet.

Les dimensions nominales des cornières étudiées ont été fixées à 51 mm x 51 mm x 4 mm comme illustrées à la Figure 3.1. Cette taille de cornière a été choisie parce qu'il s'agit de la plus vendue par Abzac Canada en termes de volume de production.

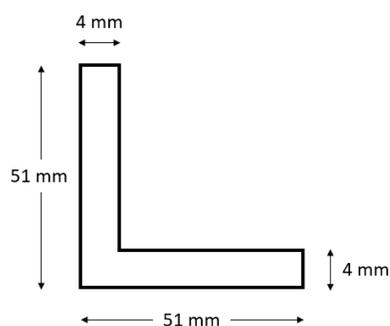


Figure 3.1 Dimensions de section des cornières MF2.0 et MF4.0.

#### 3.3.1. Fabrication des cornières MF2.0

Les cornières MF2.0 sont composées de trois types de papier. Le cœur de la cornière est formé de trois *chipboards* (C). Deux *liners* bruns (L) sont enroulés autour des *chipboards*. Ensuite, un *liner* blanc de recouvrement englobe le tout. Le stratifié obtenu est finalement plié à 90° comme illustré à la Figure 3.2.

Le *liner* brun (L) et le *liner* blanc de recouvrement (R) ont une largeur de 200 mm. Le *chipboard* (C) a une largeur de 90 mm. Ces largeurs de papiers sont spécifiques à la fabrication des cornières MF2.0 de taille 51 mm x 51 mm x 4 mm. L'adhésif DR est appliqué sur un seul côté de chaque bande de papiers durant la fabrication.

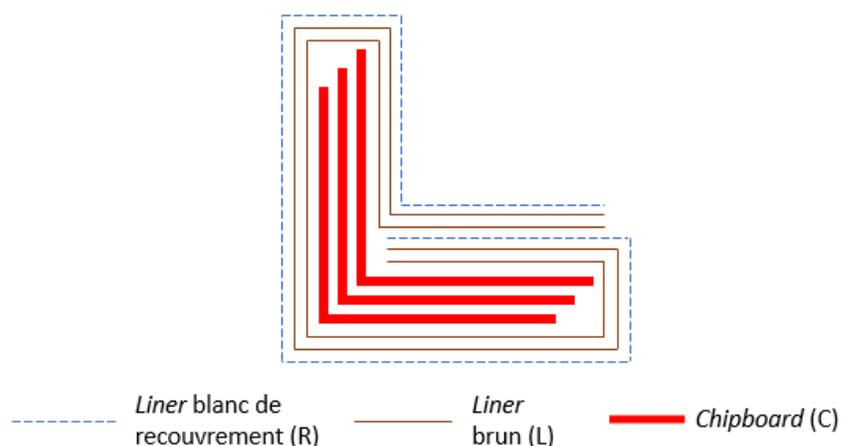


Figure 3.2 Construction d'une cornière MF2.0.

Le procédé industriel pour la fabrication des cornières MF2.0 est schématisé à la Figure 3.3. Ce procédé est divisé en quatre sections : l'alimentation, l'encolleur, le formeur et le coupeur. Deux cornières superposées sont fabriquées en parallèle. Elles sont nommées respectivement cornière du haut et cornière du bas.

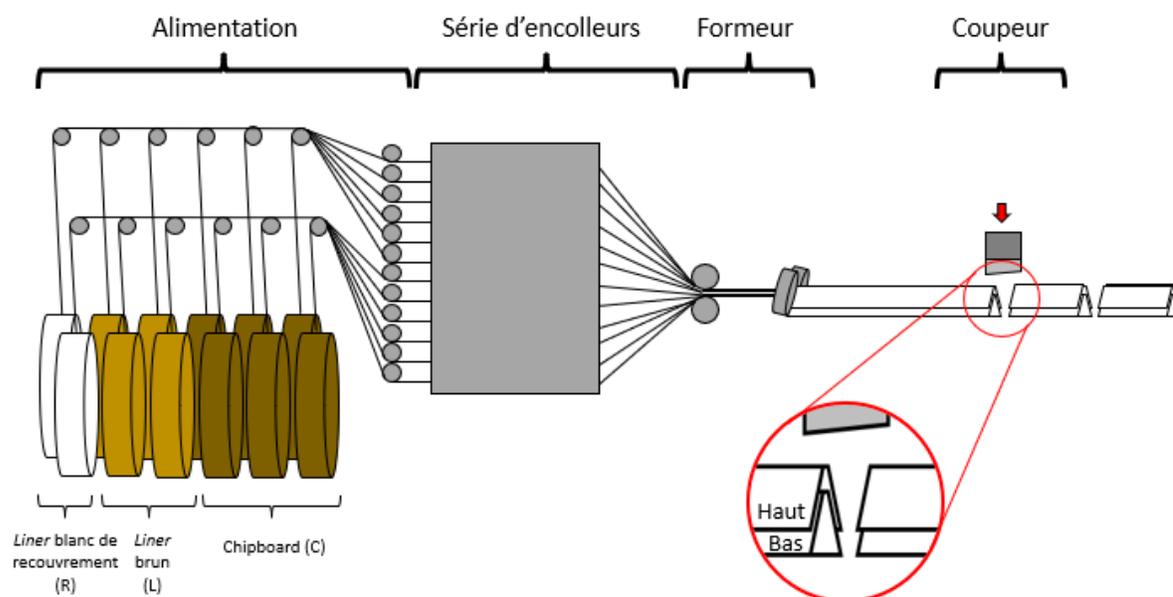


Figure 3.3 Schéma du procédé industriel pour la fabrication des cornières MF2.0.

L'alimentation de la machine est composée de deux séries indépendantes de bobines de papier. Le nombre de bobines, le type de papier ainsi que la largeur des bobines varient en fonction du type de cornières souhaité.

Chaque bande de papier passe sur un encolleur qui applique une couche d'adhésif sur un seul côté du papier. Un encolleur est composé principalement d'un rouleau motorisé, d'un rouleau entraîné et d'un réservoir d'adhésif comme schématisé à la Figure 3.4.

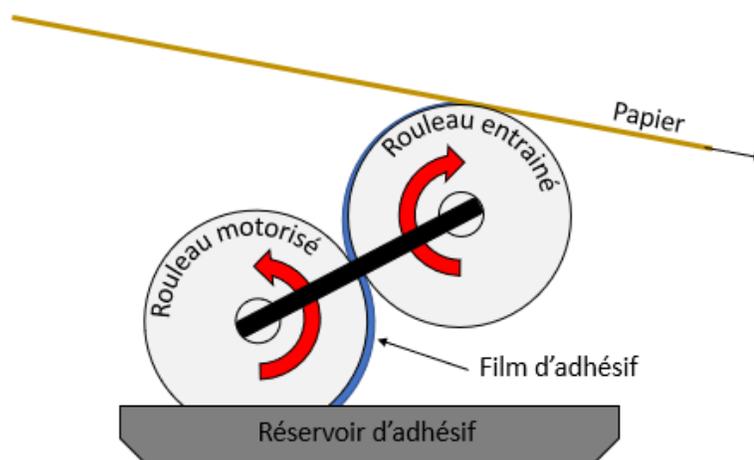


Figure 3.4 Schéma d'un encolleur.

Le rouleau motorisé est en contact avec l'adhésif dans le réservoir. Lorsque ce rouleau est en rotation, un film d'adhésif est entraîné, ce qui entraîne à son tour le second rouleau qui dépose l'adhésif sur le papier. L'adhésif est chauffé pour réduire sa viscosité. Il est en constante circulation par un système de pompage. Le jeu entre les deux rouleaux peut être ajustée de façon à contrôler la quantité d'adhésif déposée sur le papier. Dans une production normale chez Abzac Canada, ce jeu se situe entre 0,0381 mm et 0,0635 mm.

Un formeur s'occupe ensuite de compresser les bandes pour former deux stratifiés en parallèle. Ceux-ci sont ensuite pliés à un angle de 90°.

Finalement, les cornières sont coupées par une lame mobile ajustée à la vitesse de production. Cette vitesse dépend de plusieurs facteurs, dont la longueur de coupe, l'épaisseur des cornières, l'expérience des opérateurs, le type d'adhésif, les conditions ambiantes, la vitesse de retour du coupeur, etc. De manière générale, la vitesse de production pour des cornières 51 mm x 51 mm x 4 mm varie entre 55 m/min et 65 m/min.

### 3.3.2. Fabrication des cornières MF4.0

Les cornières MF4.0 sont composées de cinq feuilles du même type de papier ayant chacune une largeur de 270 mm. La méthode de pliage conduit à la vue de coupe illustrée à la Figure 3.5.

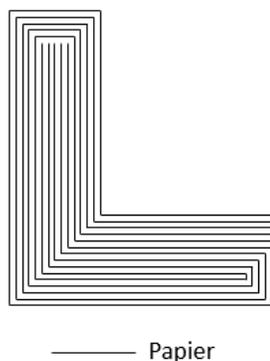


Figure 3.5 Construction d'une cornière MF4.0.

La fabrication des cornières MF4.0 est un processus manuel qui comporte six étapes : l'empilement initial, le coupage, le pré-pliage, l'application d'adhésif, le recouvrement et le pliage. Les étapes de fabrication sont schématisées à la Figure 3.6 et expliquées en détail dans les sections suivantes.

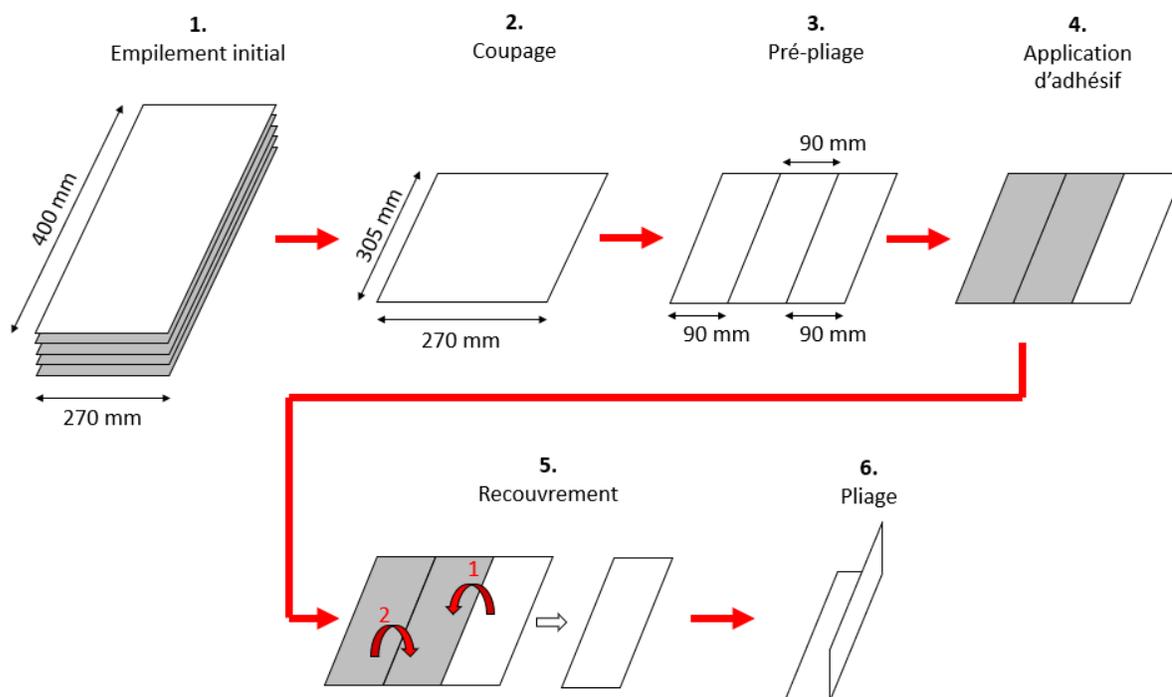


Figure 3.6 Processus de fabrication des cornières MF4.0.

### 1. Empilement initial

Pour fabriquer une cornière MF4.0, cinq feuilles de papier du même type sont d'abord collées ensemble avec l'aide de la machine d'empilement dans sa configuration 1 illustrée à la Figure 3.7. Cette machine a été conçue spécifiquement par Abzac Canada pour ce projet de recherche.

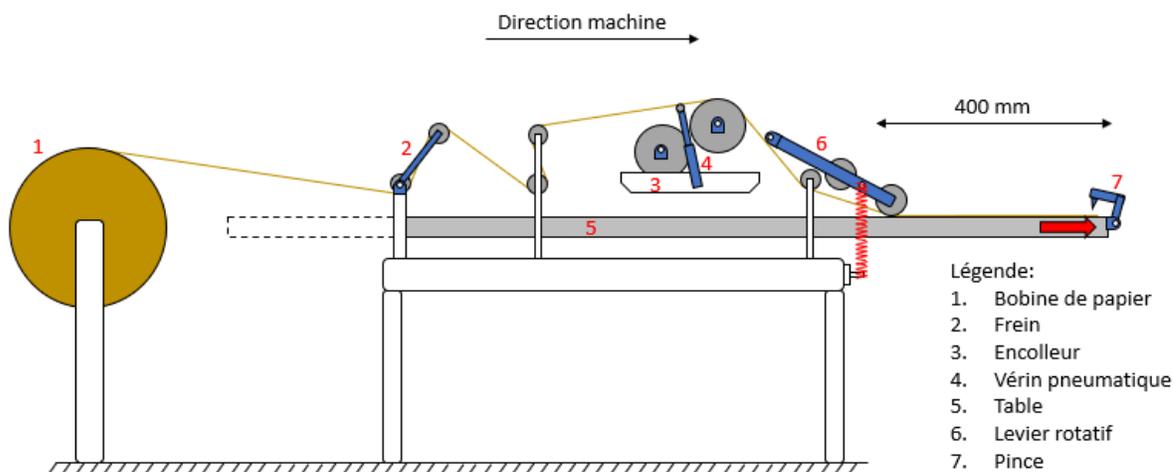


Figure 3.7 Machine d'empilement dans sa configuration 1.

Une première feuille de 400 mm de long est déposée directement sur l'extrémité de la table (5). La feuille est maintenue en place par la pince (7). La table est ensuite poussée complètement vers la bobine (1). La feuille subséquente, provenant de la bobine, passe dans une série de rouleaux jusqu'à l'extrémité de la table où elle est maintenue en place par la même pince que la feuille précédente. Durant cette manipulation, un vérin pneumatique (4) est enclenché pour soulever légèrement la feuille afin d'éviter le contact avec l'encolleur (3). La tension dans la feuille est ajustée manuellement avec un frein (2) et une pression est appliquée sur la feuille par un levier rotatif (6) à l'aide de ressorts situés de chaque côté de la table.

Le système de l'encolleur est identique à ceux utilisés pour la fabrication des cornières MF2.0. Cependant, l'adhésif n'est ni en circulation par un système de pompage, ni chauffé. Il repose simplement dans un réservoir. Le jeu entre les rouleaux de l'encolleur est fixé manuellement à 0,127 mm. Ce jeu a été sélectionné en fonction de résultats d'essais préliminaires présentés à la section 3.3.2.1.

Ensuite, le vérin pneumatique est désenclenché de façon à ce que la feuille entre en contact avec l'encolleur. La table est ensuite tirée manuellement. Comme la feuille est en contact avec l'encolleur

après l'abaissement du vérin, une couche d'adhésif est déposée uniformément sous la feuille assurant ainsi un collage avec la feuille déjà en place sur la table. Une fois la table complètement tirée, la seconde feuille est coupée à une longueur de 400 mm et la table est repoussée vers la bobine avant de recommencer avec une nouvelle feuille.

Au total, cinq feuilles sont ainsi collées ensemble pour former un stratifié.

## *2. Coupage*

Le stratifié d'une longueur de 400 mm est coupé à une longueur de 305 mm à l'aide d'un massicot pour éliminer les extrémités du stratifié qui sont dépourvues d'adhésif.

## *3. Pré-plier*

Un pré-plier doit être effectué sur le stratifié avant l'application de l'adhésif afin d'éviter d'étendre de l'adhésif sur la pliure illustrée à la Figure 3.8. Durant cette étape, le stratifié est plié en trois sections de 90 mm de large avec la pliuse. Cet outil a été conçu par Abzac Canada pour ce projet de recherche.



*Figure 3.8 Pliuse.*

## *4. Application d'adhésif*

La machine d'empilement est mise dans sa configuration 2 comme illustrée à la Figure 3.9. Le stratifié est passé manuellement de manière décalée entre l'encolleur (3) et le levier rotatif (6). Ceci permet d'appliquer l'adhésif sur deux des trois sections pré-pliées comme illustré à l'étape 4 de la Figure 3.6.

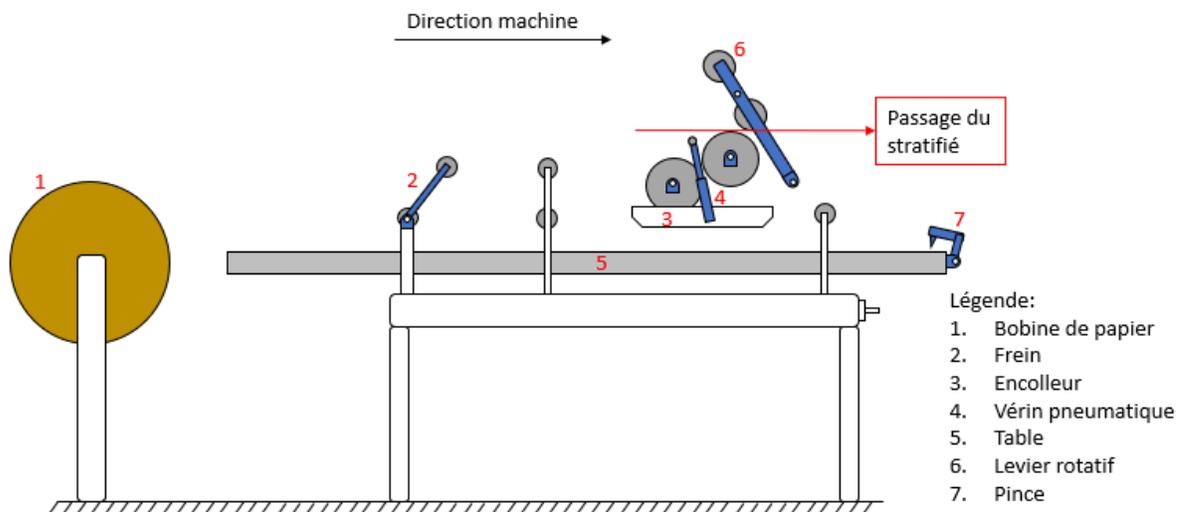


Figure 3.9 Machine d'empilement dans sa configuration 2.

Dans le cas où les deux sections latérales n'ont pas la même largeur, l'adhésif est déposé sur la section centrale et sur la section latérale la plus large pour éviter des problèmes de pliage à l'étape suivante.

Puisqu'il est difficile d'appliquer l'adhésif uniformément dans cette configuration, cette étape est répétée deux fois. Cette solution a été privilégiée à augmenter le jeu entre les rouleaux de l'encolleur puisque cela nécessite un ajustement de l'encolleur qui pose deux problèmes. D'abord, un réajustement de l'encolleur nécessite quelques minutes de manipulation. Comme les adhésifs sèchent rapidement, il est crucial de minimiser la durée de fabrication des cornières. Ensuite, l'ajustement de l'encolleur est fait à l'aide d'une jauge d'épaisseur à lames. La présence de l'adhésif dans l'encolleur ne permet pas de mesurer précisément le jeu entre les rouleaux avec la jauge.

##### 5. Recouvrement

Les sections latérales du stratifié sont pliées manuellement vers le centre. La section latérale dépourvue d'adhésif est d'abord pliée vers le centre, suivie de l'autre section latérale comme illustrée à l'étape 5 de la Figure 3.6.

##### 6. Pliage

La plieuse est de nouveau utilisée pour plier à 90° le stratifié en son centre donnant sa forme à la cornière.

### 3.3.2.1. Résultats des essais préliminaires pour l'ajustement de l'encolleur

Le jeu optimal entre les rouleaux de l'encolleur a été étudié lors d'essais préliminaires. Ces essais consistent à coller deux bandes de *medium* (M) par l'adhésif D1, D2 ou HE en faisant varier le jeu entre les rouleaux. Le jeu est mesuré avec une jauge d'épaisseur à lames où la plus petite épaisseur mesurable est de 0,0381 mm.

Après séchage, les bandes sont pelées manuellement et une observation qualitative du collage est effectuée sur la zone de pelage. Une rupture cohésive du papier est associée à un bon collage. Une rupture adhésive est associée à un mauvais collage.

Seul le *medium* est utilisé lors de ces tests dus à sa grande porosité. En effet, un papier poreux absorbe plus d'adhésif qu'un papier dense. Le collage de deux papiers poreux est donc plus susceptible à un mauvais collage advenant un dosage d'adhésif insuffisant. De plus, seuls les adhésifs D1, D2 ou HE sont utilisés lors de ces essais en raison de leur taux de séchage très rapide. Ceci est expliqué par le fait que leur taux de solides est très élevé comparativement à l'adhésif DR. Si le dosage d'adhésif est insuffisant, non seulement le collage sera mauvais, mais en plus il sera difficile de terminer la fabrication d'une cornière avant que l'adhésif sèche complètement.

La synthèse des résultats est présentée au Tableau 3.5. Un jeu de 0,0635 mm semble approprié pour coller efficacement deux feuilles de *mediums*. Toutefois, il s'est avéré que ce jeu n'est pas applicable pour la fabrication manuelle d'une cornière en raison du temps de séchage trop rapide des adhésifs et du temps de fabrication des cornières relativement long. Pour ces raisons, le jeu entre les rouleaux a été fixé à 0,127 mm. Cet espacement permet un dépôt plus important d'adhésif sur le papier et donc un temps de séchage plus long qui facilite la fabrication.

Tableau 3.5 Résultats qualitatifs des essais de pelage sur le *medium* avec les adhésifs D1, D2 et HE.

	Jeu entre les rouleaux de l'encolleur (mm)				
	0,0381	0,0635	0,127	0,254	0,635
Dural 3245 (D1)	Mauvais	Bon	Bon	Bon	Bon
Dural 3245M (D2)	Mauvais	Bon	Bon	Bon	Bon
Henkel CG 070 (HE)	N/A	Bon	Bon	Bon	Bon

### 3.3.2.2. Séquence de fabrication des éprouvettes MF4.0

Pour l'étude de l'effet du type de papier, du type d'adhésif et de l'humidité sur les propriétés mécaniques des cornières MF4.0 (chapitre 4), neuf lots ont été fabriqués. L'ordre séquentiel ainsi que les matières premières utilisées pour chacun des lots sont présentés au Tableau 3.6. Chaque lot a été fabriqué, conditionné puis évalué en compression et en flexion avant d'entreprendre la fabrication du lot suivant.

Tableau 3.6 Séquence de fabrication des lots de cornières MF4.0.

# Lot	Papier	Adhésif	Étiquette
1	B	DR	BDR
2	L	DR	LDR
3	M	DR	MDR
4	L	D1	LD1
5	B	D1	BD1
6	L	HE	LHE
7	B	HE	BHE
8	L	D2	LD2
9	B	D2	BD2

Durant la fabrication d'un lot, l'adhésif est renouvelé deux fois et un nettoyage complet de la machine d'empilement est effectué entre chaque renouvellement de l'adhésif. Comme les cornières sont fabriquées dans un milieu poussiéreux, le renouvellement est fait pour limiter le dépôt de poussière dans l'adhésif.

Pour l'étude des modes de défaillance des cornières en compression avec CIN (chapitre 5), un seul lot de cornières MF4.0 a été fabriqué après les neuf lots précédents. Les cornières de ce dernier lot sont composées de *liners* bruns (B) et de l'adhésif drybond 636 (DR).

## 3.4. Conditionnement

Après la fabrication, les cornières ont un taux massique d'humidité se situant entre 10 % et 12 %. Il est nécessaire de conditionner à un taux spécifique les éprouvettes avant d'effectuer un essai mécanique puisque les propriétés mécaniques du papier sont très sensibles à l'effet de l'humidité.

Comme les éprouvettes ont été conditionnées dans le laboratoire d'Abzac Canada et que celui-ci n'est pas équipé d'une chambre de conditionnement pouvant contrôler la température et l'humidité

relative, une méthodologie de conditionnement a été développée spécifiquement pour ce projet. Ainsi, pour évaluer l'effet de l'humidité, un conditionnement sec et un conditionnement humide ont été définis. Les éprouvettes atteignent un conditionnement sec ou humide lorsque leur TMH est respectivement de  $6 \pm 0,5 \%$  et  $10 \pm 0,5 \%$ . Ces taux ont été sélectionnés par suggestion du partenaire industriel Abzac Canada et pour se rapprocher des conditionnements observés dans la littérature. Un intervalle de tolérance de  $\pm 0,5 \%$  a été appliqué aux deux conditionnements puisqu'il est difficile de contrôler précisément le TMH des éprouvettes avec la méthodologie développée.

Le conditionnement se fait au travers de cinq étapes : le préconditionnement, le coupage, l'inscription du code d'identification, le conditionnement sec et le conditionnement humide. Ces étapes sont décrites en détail dans les sections suivantes.

On souligne ici que la méthodologie de conditionnement employée pour les éprouvettes servant à caractériser les effets du papier, de l'adhésif et de l'humidité sur le comportement en compression et en flexion (CHAPITRE 4) et celle pour les éprouvettes servant à étudier le comportement en compression avec CIN (CHAPITRE 5) n'est pas la même. Dans le cas des éprouvettes pour les essais avec CIN, seul le préconditionnement a été nécessaire pour obtenir un taux massique d'humidité dans les éprouvettes de  $6 \pm 0,5 \%$ . Ceci est attribuable aux conditions ambiantes durant la saison printanière qui étaient plus favorables à la diminution du TMH des éprouvettes après la fabrication. La Figure 3.10 présente les étapes de conditionnement employées aux chapitres 4 et 5.

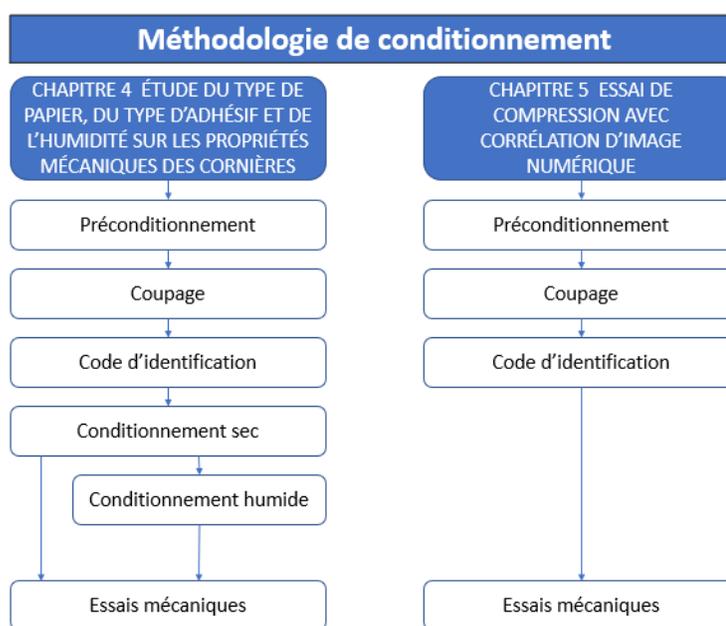


Figure 3.10 Méthodologie de conditionnement pour les essais de compression et de flexion.

### 3.4.1. Préconditionnement

Pour le preconditionnement, chaque cornière repose d'abord durant un minimum de 48h dans un local où les conditions ambiantes sont partiellement contrôlées par un système d'air climatisé. Un capteur Extech RHT10 enregistre toutes les cinq minutes la température ambiante et l'humidité relative du local afin d'identifier la température et l'humidité relative moyennes.

Durant des essais de fabrication de cornières MF4.0, il a été observé que l'angle entre les deux ailes d'une cornière varie durant le preconditionnement si la cornière n'est pas contrainte. Les cornières fabriquées avec l'adhésif DR voient leur angle diminuer en dessous de 90°. Les cornières fabriquées avec les adhésifs D1, D2 ou HE voient leur angle augmenter au-dessus de 90°.

Pour contraindre les cornières MF4.0 durant le preconditionnement, un gabarit a été conçu. Celui-ci est adapté en fonction de l'adhésif utilisé. Le gabarit est essentiellement composé de deux pièces en acide polylactique (PLA) faites par impression 3D, de deux barres en acier, de quatre pinces ainsi que de quatre espaceurs. De petits aimants ont été incrustés dans les pièces en PLA pour maintenir en place les pièces en acier.

Pour une cornière fabriquée avec l'adhésif DR, le gabarit est adapté pour limiter la diminution de l'angle entre les deux ailes. La Figure 3.11 présente le matériel utilisé ainsi que le montage. Les espaceurs ne sont pas utilisés dans cette configuration. Les barres en acier sont d'abord déposées sur les pièces en PLA. La cornière est ensuite déposée sur ce montage et les quatre pinces sont installées autour pour appliquer une pression.

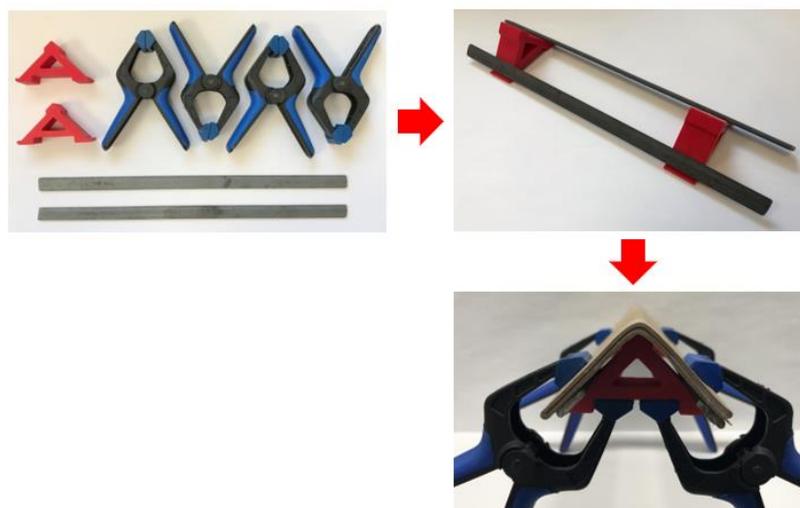


Figure 3.11 Montage du gabarit pour limiter la diminution de l'angle entre les deux ailes durant le séchage.

Pour une cornière fabriquée avec les adhésifs D1, D2 ou HE, le gabarit est adapté pour limiter l'augmentation de l'angle entre les deux ailes. La Figure 3.12 présente le matériel et le montage du gabarit pour cette configuration. Les espaceurs sont d'abord déposés sur les pièces en PLA puis la cornière est déposée sur le montage. Les barres en acier sont déposées par-dessus la cornière le long des ailes. Finalement, les quatre pinces sont installées autour pour maintenir une pression.

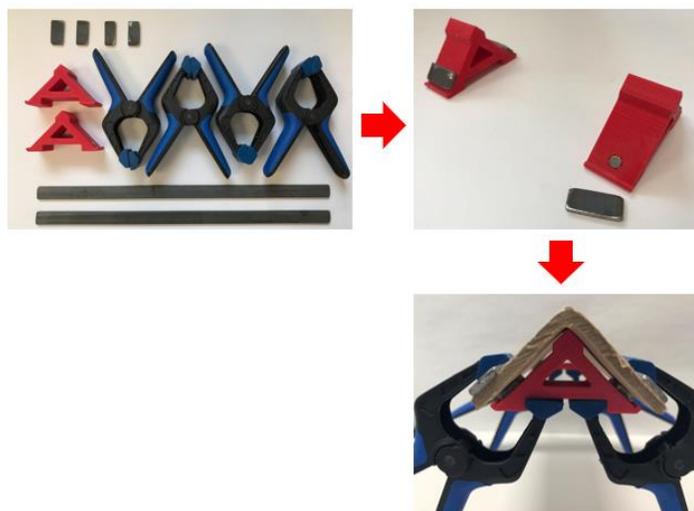


Figure 3.12 Montage du gabarit pour limiter l'augmentation de l'angle entre les deux ailes durant le séchage.

#### 3.4.2. Coupage

Après le préconditionnement, chaque cornière est coupée avec une scie à onglet afin d'obtenir les éprouvettes aux dimensions requises. La scie à onglet a une vitesse de rotation de 6000 tours par minute. La lame utilisée a un diamètre de 10 po et est pourvue de 180 dents. Cette lame a été choisie pour son nombre élevé de dents qui permet d'obtenir une coupe nette. Les cornières sont déposées sur la table de la scie à onglet et la lame est descendue manuellement à une vitesse modérée. De plus, les deux extrémités d'une cornière sont systématiquement coupées.

Après le coupage, un test d'écartement est effectué sur les excédents d'une cornière afin de vérifier la qualité du collage. Ce test consiste à ouvrir manuellement la cornière à un angle de 180° et de faire une observation qualitative. Un mauvais collage est généralement observé lorsque la cornière oppose peu de résistance lors de l'écartement et que la délamination est importante. La rupture est principalement adhésive. Un bon collage est observé lorsque la délamination est faible et que la cornière oppose une certaine résistance au moment de l'écartement. Des traces de ruptures cohésives du papier sont observées par un détachement des fibres du papier. Un exemple d'un

mauvais et d'un bon collage est présenté à la Figure 3.13. Aucun mauvais collage n'a été observé après le préconditionnement pour les cornières évaluées en compression et en flexion.

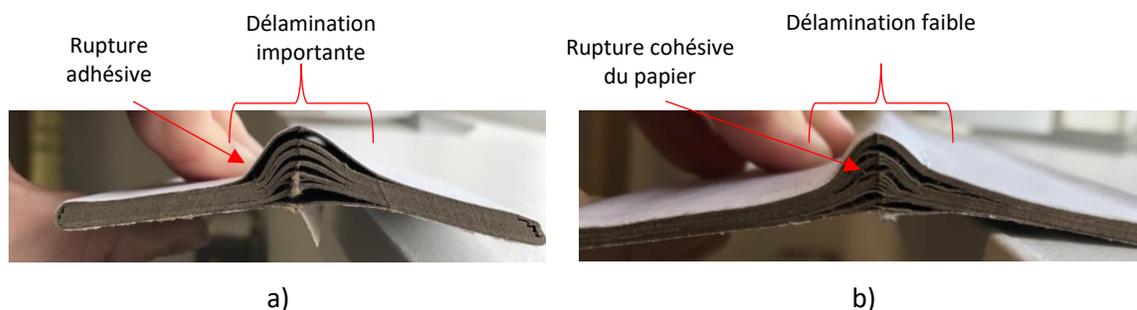


Figure 3.13 Test d'écartement des ailes : a) mauvais collage et b) bon collage.

### 3.4.3. Code d'identification

Après le coupage, un code d'identification est inscrit avec un feutre *Sharpie* à pointe fine sur l'extrémité de chaque éprouvette.

Pour les cornières MF2.0, le code indique la position de la cornière sur la ligne de production, le taux massique d'humidité visé et le numéro séquentiel de fabrication. La nomenclature de ce code est présentée à la Figure 3.14.

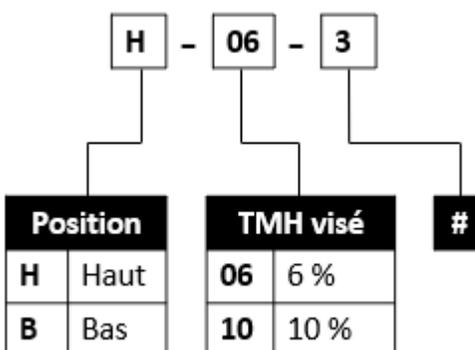


Figure 3.14 Nomenclature du code servant à identifier les cornières MF2.0.

Dans le cas des cornières MF4.0, le code d'identification indique respectivement le type de papier, le type d'adhésif, le taux massique d'humidité visé et le numéro séquentiel de fabrication. La nomenclature de ce code est présentée à la Figure 3.15.

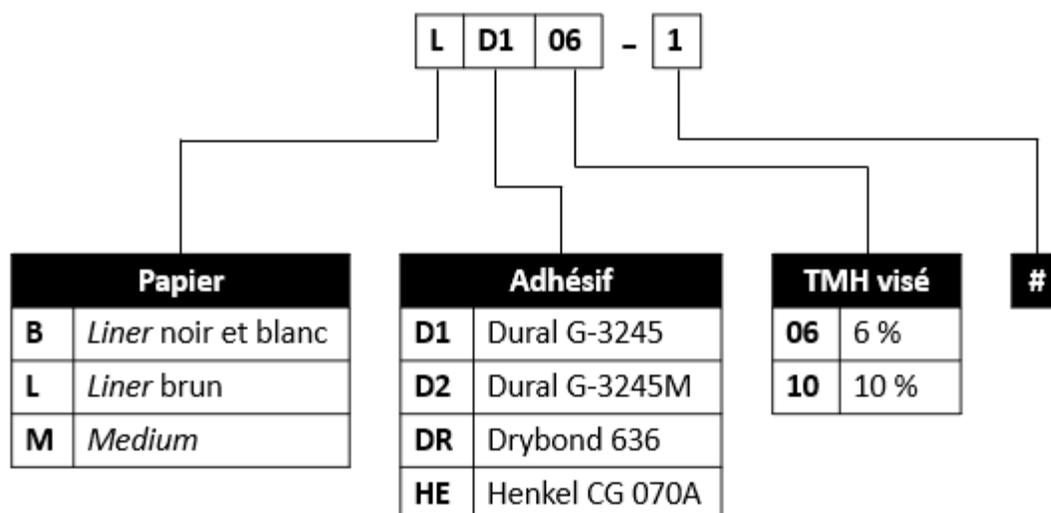


Figure 3.15 Nomenclature du code servant à identifier les cornières MF4.0.

#### 3.4.4. Conditionnement sec

Le conditionnement sec est atteint lorsque le TMH d'une éprouvette diminue pour atteindre  $6 \pm 0,5$  %. Le TMH est mesuré avec un capteur Delmhorst P-2000 à une distance de 25 mm d'une des extrémités de l'éprouvette. Le capteur est conçu spécifiquement pour mesurer le TMH du carton par contact direct. Les deux pointes du capteur sont insérées dans l'éprouvette à mi-épaisseur. L'appareil mesure la résistance électrique entre les deux pointes ce qui permet d'obtenir le TMH. Puisque cette méthode est invasive, l'utilisation d'une éprouvette sacrificielle a été privilégiée pour ne pas endommager les éprouvettes avant les essais. L'éprouvette sacrificielle a été fabriquée dans le même lot que les éprouvettes conditionnées. Le TMH des éprouvettes évaluées en compression et en flexion est uniquement mesuré avant d'effectuer les essais mécaniques.

Pour diminuer le TMH des éprouvettes à  $6 \pm 0,5$  %, celles-ci sont déposées sur une grille à l'intérieur d'un four Fisher Scientific Isotemp 615F sans le gabarit de séchage. Le montage du gabarit étant trop volumineux, ce dernier ne peut pas entrer dans le four. La durée d'utilisation du four dépend du taux massique d'humidité de l'éprouvette sacrificielle pour laquelle le TMH est mesuré avant le conditionnement sec. Des essais préliminaires ont permis de déterminer qu'une durée d'une heure dans le four à 40°C est nécessaire pour diminuer de 1 % le TMH d'une éprouvette à l'exception de celles fabriquées avec le *liner* noir et blanc (B). Les éprouvettes fabriquées avec le papier B nécessitent une durée d'utilisation du four d'environ une heure et demie pour diminuer de 1 % le taux d'humidité.

À la sortie du four, les éprouvettes sont déposées dans un sac hermétique avec des sachets déshydratants en gel de silice durant 20 minutes. Cela permet de faire baisser la température des éprouvettes à température ambiante afin de ne pas fausser la lecture du capteur Delmhorst P-2000. Cette durée a été déterminée avec des essais préliminaires en utilisant une caméra thermique Flir TG165. Cette caméra permet de visualiser la température surfacique des éprouvettes. Comme le refroidissement des éprouvettes se fait à travers toutes leurs surfaces et qu'elles sont relativement minces, nous posons pour hypothèse que la température est constante à travers les éprouvettes après un délai de 20 minutes. Après ce délai, le TMH de l'éprouvette sacrificielle est mesuré pour s'assurer que le conditionnement sec est adéquat.

#### 3.4.5. Conditionnement humide

Le conditionnement humide consiste à augmenter le TMH des éprouvettes de  $6\% \pm 0,5\%$  à  $10 \pm 0,5\%$ . Les éprouvettes sont déposées avec un récipient d'eau dans un bac en plexiglas doté d'un couvercle amovible. Le gabarit de séchage n'est pas utilisé avec les éprouvettes. Deux ventilateurs 5 V de 80 mm de diamètre assurent une circulation de l'air dans le bac. Un capteur Extech RHT10, fixé sur une paroi intérieure du bac, enregistre l'évolution des conditions ambiantes toutes les cinq minutes. L'évaporation de l'eau augmente l'humidité relative dans le bac, ce qui augmente le TMH des éprouvettes par absorption. Après quelques heures d'exposition, l'humidité relative autour des éprouvettes varie entre 90 % et 99 %.

Le TMH de l'éprouvette sacrificielle est mesuré après 24 heures dans le bac, puis à intervalle de 2 heures. Une fois que cette cornière a atteint le conditionnement humide souhaité, les éprouvettes sont retirées du bac. Le bac de conditionnement est illustré à la Figure 3.16.



Figure 3.16 Bac de conditionnement des cornières.

### 3.5. Essais mécaniques

Afin de répondre aux objectifs du projet, deux types d'essais mécaniques quasi statiques ont été réalisés : des essais de compression et de flexion trois-points. Pour les essais de compression, des essais supplémentaires ont été réalisés avec un système de CIN. La méthodologie des essais de compression et de flexion est présentée aux sections 3.5.1 et 3.5.2 respectivement, alors que les aspects méthodologiques propres aux essais de compression avec le système de CIN sont abordés à la section 3.5.3.

La norme EN 13393 sur les cornières en carton n'a pas été utilisée pour les essais mécaniques de compression et de flexion trois-points. En effet, les conditions aux appuis, la vitesse d'essai ainsi que la longueur des éprouvettes décrites dans cette norme ont été jugées inadéquates pour répondre aux objectifs du projet. Pour ces raisons, les paramètres des essais ainsi que les montages ont été établis à l'aide d'essais préliminaires.

Plusieurs données sur chacune des éprouvettes sont consignées avant d'effectuer les essais mécaniques. La prise de données de l'éprouvette suivante est seulement entamée lorsque l'essai précédent est terminé. Les données consignées avant l'essai sont les suivantes :

- L'épaisseur moyenne est calculée à partir de neuf points disposés sur chaque aile selon la Figure 3.17 et mesurés avec un micromètre Mitutoyo 547-520S ;
- L'angle moyen est calculé à partir de trois mesures prises avec un biseau en T de modèle General Tools 828 ;
- La date de fabrication et de l'essai ;
- La largeur moyenne des deux ailes est mesurée avec une règle Ultrapro de 305 mm de longueur dotée d'une graduation de 1 mm ;
- Le TMH est mesuré avec un capteur Delmhorst P-2000 à une distance de 25 mm d'une des extrémités de l'éprouvette.

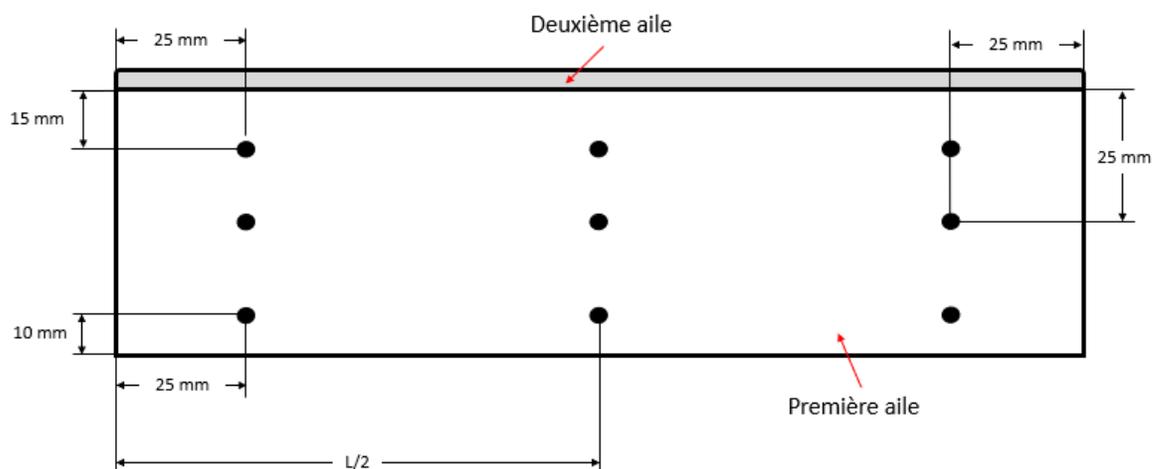


Figure 3.17 Localisation des points de mesure sur une aile de cornière.

La masse des éprouvettes à un conditionnement sec ou humide a été mesurée avec une balance ayant une précision au centième de gramme. La mesure de ces masses a été prise de 9 à 12 mois après avoir effectué les essais de compression et de flexion trois-points. Entretemps, les éprouvettes ont été entreposées dans un local à conditions ambiantes. Afin de procéder à la mesure de la masse des éprouvettes, celles-ci ont été de nouveau conditionnées au TMH auquel elles ont été testées suivant la méthodologie présentée aux sections 3.4.4 et 3.4.5.

### 3.5.1. Essai de compression

Les essais de compression sont réalisés avec une machine de test universel à deux colonnes Ametek LD10. Une cellule de charge de 10 kN est utilisée pour l'acquisition de la force. Les essais sont effectués dans la direction longitudinale des éprouvettes à une vitesse constante de 2 mm/min. Un dispositif de fixation en aluminium 6061-T6 est placé à chaque extrémité de l'éprouvette afin d'empêcher le glissement et l'écrasement des bords. Ce dispositif, présenté à la Figure 3.18, a été conçu pour pouvoir s'ajuster en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette et de l'angle entre les deux ailes. La mise en plan de ce dispositif est présentée à l'annexe I.

L'effet de la longueur des éprouvettes sur le comportement en compression a été étudié lors d'essais préliminaires. Une longueur de 102 mm a été choisie afin de limiter le flambage élastique de l'éprouvette durant l'essai.



Figure 3.18 Dispositif de fixation des extrémités d'une cornière.

L'éprouvette munie de deux dispositifs de fixation est placée entre les deux plateaux de la machine d'essai. La Figure 3.19 présente le montage en compression sur la machine d'essai.

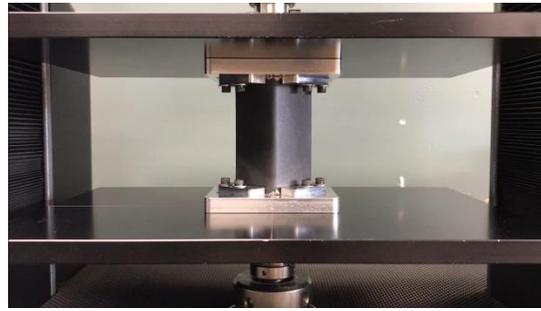


Figure 3.19 Montage d'un essai de compression.

Au démarrage de l'essai, une précharge de 9 N est appliquée avant de faire une mise à zéro du déplacement de la traverse afin de reprendre les jeux entre le montage et l'éprouvette. Le déplacement ainsi que la force sont continuellement enregistrés à une fréquence de 14 Hz. L'essai est interrompu lorsque la traverse a effectué un déplacement d'au moins 10 mm.

### 3.5.2. Essai de flexion trois-points

Les essais de flexion trois-points sont réalisés avec une machine de test universelle à deux colonnes Ametek LD10. Une cellule de charge de 10 kN est utilisée pour l'acquisition de la force. L'essai est effectué à une vitesse constante de 2 mm/min. Pour ces essais, une éprouvette d'une longueur de 254 mm repose sur deux appuis latéraux. La distance centre-centre entre les appuis latéraux est de 234 mm. Les deux appuis et le nez de chargement sont en aluminium 6061-T6 et ont été usinés de façon à épouser l'angle de 90° d'une cornière comme illustré à la Figure 3.20. Les mises en plan de ces appuis sont présentées à l'annexe I. Le dessus de ces appuis est de forme cylindrique avec un rayon de 10 mm afin d'avoir un contact de type ligne entre les appuis et l'éprouvette.

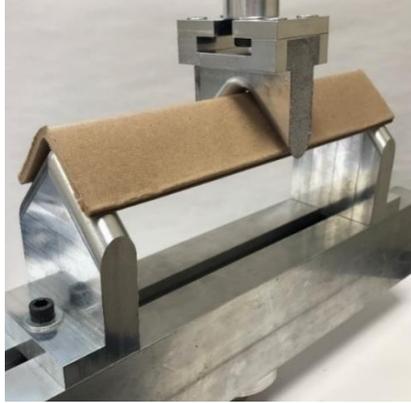


Figure 3.20 Appuis usinés pour les essais de flexion trois-points.

Au démarrage de l'essai, une précharge de 9 N est appliquée avant d'effectuer une mise à zéro du déplacement de la traverse afin de reprendre les jeux entre le montage et l'éprouvette. Le déplacement ainsi que la force sont enregistrés continuellement durant l'essai à une fréquence de 14 Hz. L'essai est interrompu lorsque la traverse a effectué un déplacement d'au moins 5 mm après l'apparition d'une déchirure sur l'éprouvette. Si aucune déchirure n'est observée après que la traverse ait effectué un déplacement de 40 mm, l'essai est interrompu. La Figure 3.21 présente le montage de l'essai de flexion.



Figure 3.21 Montage d'un essai de flexion trois-points.

### 3.5.3. Essai de compression avec corrélation d'image numérique

Les essais de compression avec CIN sont réalisés avec une machine de test universelle à deux colonnes MTS Insight 100 SL. Une cellule de charge de 100 kN est utilisée pour l'acquisition de la force. Les essais sont effectués dans la direction longitudinale des éprouvettes à une vitesse constante de 2 mm/min. Le même dispositif présenté à la Figure 3.18 est appliqué à chaque extrémité d'une éprouvette.

La capacité de la cellule de charge va bien au-delà de ce qui est nécessaire pour des essais de compression sur des cornières en carton. Cela peut avoir comme conséquence de créer du bruit dans le signal de la force mesurée. Cependant, il s'agissait de la seule cellule de charge disponible au moment des essais.

Afin d'utiliser la méthode de CIN, une peinture aérosol noir matte de marque Rust-Oleum est utilisée pour appliquer le plus uniformément possible un moucheté sur les éprouvettes. Un exemple de moucheté est présenté à la Figure 3.22. La couleur de la peinture a été sélectionnée par des essais préliminaires de façon à offrir le meilleur contraste entre le moucheté et le *liner* blanc de recouvrement (MF2.0) ou le *liner* brun (MF4.0).

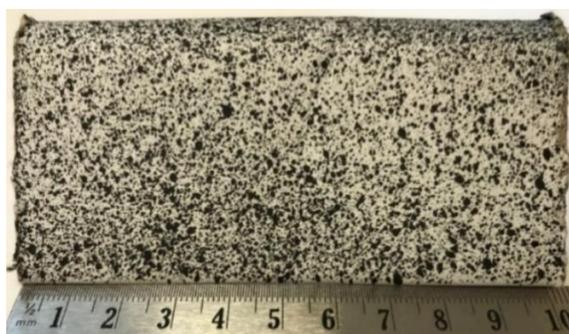


Figure 3.22 Exemple d'un moucheté sur un liner blanc d'une cornière.

Un système ARAMIS muni de deux caméras synchronisées est utilisé pour visualiser la zone mouchetée de l'éprouvette durant l'essai. L'utilisation de deux caméras permet d'étudier une surface en trois dimensions, ce qui est nécessaire dans le cas des cornières qui ont une géométrie complexe. La Figure 3.23 présente le montage de compression avec le système ARAMIS et les vues résultantes des deux caméras.

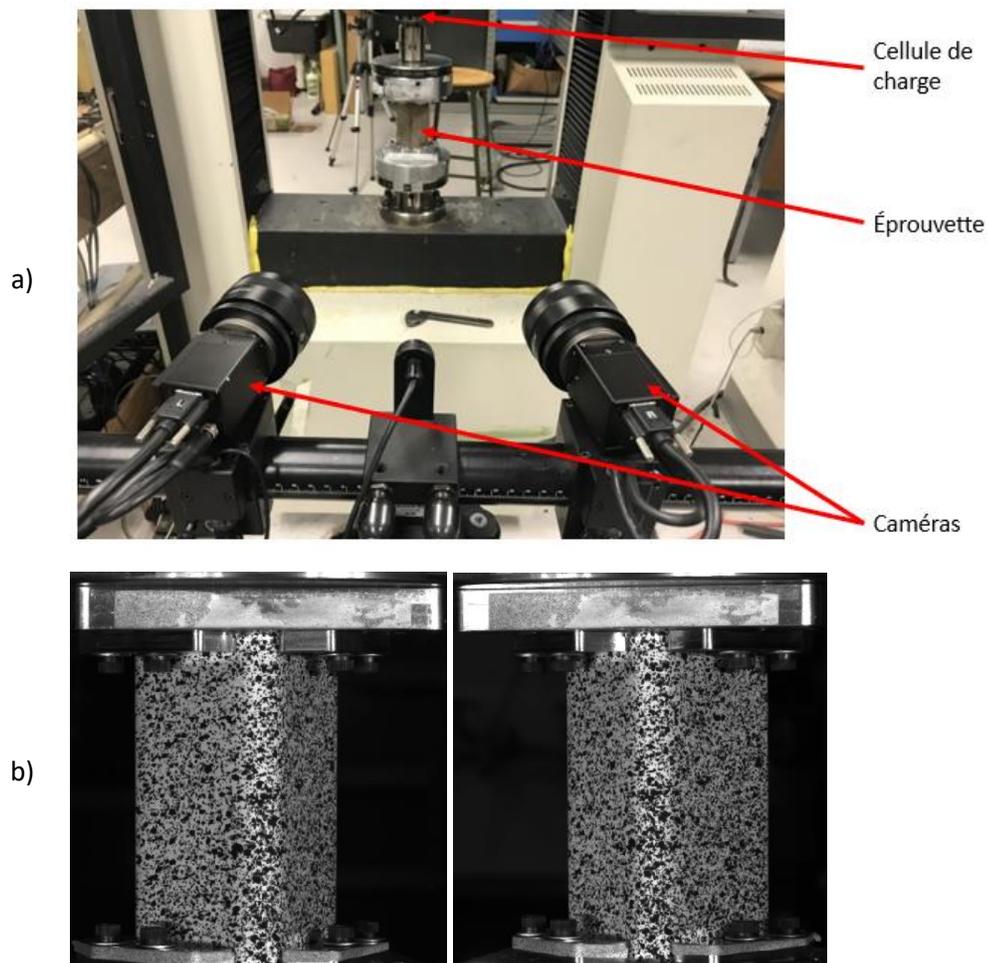


Figure 3.23 Essai de compression avec CIN : a) montage et b) vues résultantes de la caméra de gauche et de droite.

Au démarrage de l'essai, une précharge de 10 N est appliquée avant de faire une mise à zéro du déplacement de la traverse. Le déplacement ainsi que la force sont enregistrés par la machine MTS à une fréquence de 5 Hz. L'essai est arrêté à un déplacement de la traverse de 4 mm.

Durant l'essai, les caméras prennent une photo à une fréquence de 2 Hz. De plus, la cellule de charge envoie continuellement un signal en volt vers le système ARAMIS. Ce dernier traduit le signal en une force qui est ensuite corrélée aux photos enregistrées.

Finalement, en observant les photos avec la version 3.0 du logiciel GOM Correlate, une zone d'étude est délimitée sur la surface mouchetée des éprouvettes en excluant les bords et les zones près des appuis. Un système d'axes de référence est fixé comme illustré à la Figure 3.24. Pour éviter un effet de discontinuité sur la surface d'étude, la taille des *subsets* est adaptée en fonction de la grossièreté du moucheté. Ainsi, pour les mouchetés plus fin, la taille des *subsets* est fixée à 21 x 21 pixels avec

un chevauchement de 10 pixels. Pour les mouchetés plus grossiers, la taille est fixée à 31 x 31 pixels avec un chevauchement de 15 pixels.

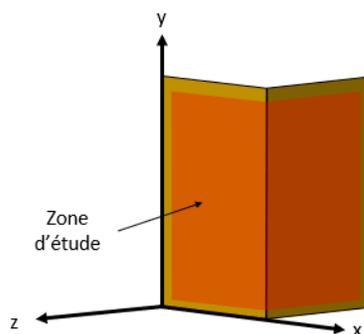


Figure 3.24 Zone d'étude des déformations et des déplacements.

### 3.6. Sélection des éprouvettes

Une randomisation des éprouvettes a été effectuée dans les limites du possible afin de minimiser l'impact des paramètres non contrôlés sur les résultats des essais.

#### 3.6.1. Randomisation des éprouvettes

Les cornières MF2.0 sont prélevées par groupe de trois de façon aléatoire sur la ligne de production. Les trois cornières dans un même groupe proviennent de la même position sur la ligne de production, soit haute ou basse. Elles ont toutes une longueur nominale de 1016 mm. Chaque cornière MF2.0 prélevée sur la ligne de production permet de produire quatre éprouvettes : deux pour les essais de compression (longueur de 102 mm) et deux pour les essais de flexion (longueur de 254 mm). Une fois coupées à la longueur souhaitée pour les essais, les éprouvettes sont séparées pour un conditionnement sec ou humide comme illustré à la Figure 3.25. On souligne ici que toutes les éprouvettes MF2.0 passent préalablement par un conditionnement sec. Seule la moitié d'entre elles passent ensuite à un conditionnement humide.

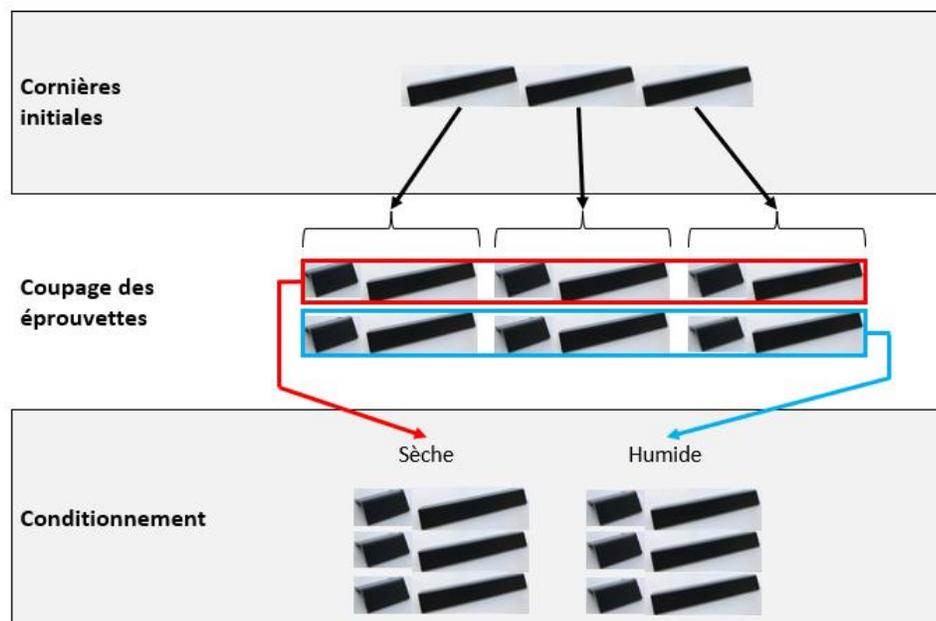


Figure 3.25 Plan de randomisation pour les cornières MF2.0.

Pour les adhésifs D1, D2 et HE utilisés pour la fabrication des cornières MF4.0, une seule chaudière de 20 L par adhésif a été utilisée. Ceci est dû au fait que ces adhésifs sont spécifiquement formulés pour ce projet et donc que le traitement d'une demande pour une seule chaudière nécessite plusieurs semaines, voire quelques mois. La durée de péremption de ces adhésifs est de six mois après leur ouverture. Chaque chaudière a été utilisée dans un délai d'une semaine suivant son ouverture. À chaque utilisation, le contenu de la chaudière est adéquatement mélangé manuellement de façon à obtenir une substance homogène. Les chaudières sont entreposées à conditions ambiantes dans le même local servant au préconditionnement des éprouvettes (section 3.4.1).

La fabrication de l'adhésif DR est réalisée en mélangeant une poudre avec un solvant. Cet adhésif est fabriqué par Abzac Canada directement dans l'usine. Il a donc été possible de changer de lot de production à chaque utilisation de cet adhésif.

Les adhésifs ont été étudiés un seul à la fois puisqu'il n'y a aucune garantie que les chaudières de D1, D2 et HE soient fermées de manière hermétique une fois le couvercle remis en place après utilisation. En procédant ainsi, la dégradation des adhésifs par l'air ambiant a été limitée.

Les papiers sont entreposés à conditions ambiantes dans l'entrepôt de l'usine. Une seule bobine d'un diamètre de 1,5 m par type de papier est utilisée pour la fabrication des cornières MF4.0. Cela est

dû au fait que le traitement d'une demande pour obtenir une bobine de 270 mm de large peut prendre plusieurs semaines puisqu'il ne s'agit pas d'une largeur standard. Également, une bobine complète procure beaucoup plus de matière première que nécessaire pour la fabrication des éprouvettes. Le gaspillage de matière est donc limité en utilisant qu'une seule bobine par type de papier.

Les cornières MF4.0 sont fabriquées par lot de 10 unités. Un numéro séquentiel temporaire de 1 à 10 leur est attribué. Les cornières du lot sont coupées (section 3.4.2) puis séparées pour un conditionnement sec ou humide comme illustré à la Figure 3.26. La cornière #10 est utilisée comme cornière sacrificielle pour la mesure du TMH lors du conditionnement sec et humide. Aucun essai mécanique n'est effectué sur la cornière sacrificielle. On souligne ici que toutes les éprouvettes MF4.0 d'un lot passent préalablement par un conditionnement sec. Seule la moitié d'entre elles passent ensuite à un conditionnement humide.

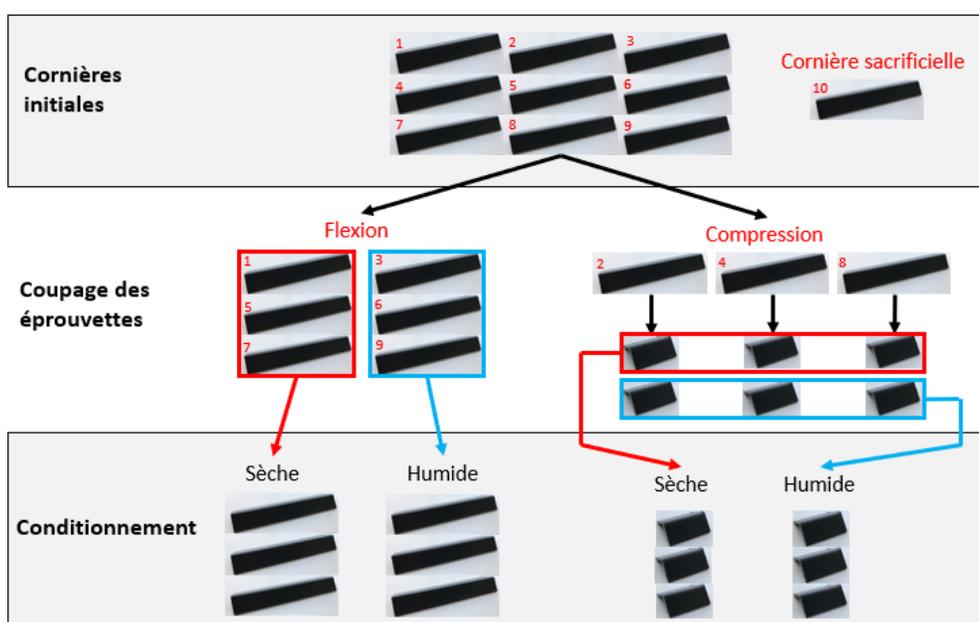


Figure 3.26 Plan de randomisation pour les cornières MF4.0.

### 3.6.2. Informations supplémentaires

Deux points importants sont à souligner concernant les éprouvettes fabriquées :

- Durant la fabrication des cornières MF2.0, un problème d'approvisionnement de papier hors de notre contrôle est survenu empêchant la fabrication des cornières selon une fabrication standard. Pour contourner le problème, un *liner* noir et blanc (B) a été utilisé pour remplacer

l'un des trois *liners* bruns (L) utilisés dans une fabrication standard. Sur les neuf éprouvettes par conditions de tests (Tableau 3.3), six d'entre elles ont été fabriquées avec un *liner* noir et blanc (B). Les cornières MF2.0 évaluées en compression avec CIN ont toutes été fabriquées suivant une fabrication standard ;

- Pour les cornières MF4.0, le papier M a seulement été combiné avec l'adhésif DR. La combinaison de ce papier avec les adhésifs D1, D2 ou HE crée systématiquement une déchirure au moment de la fabrication rendant impossible la fabrication d'éprouvettes avec ces combinaisons.

## CHAPITRE 4 EFFET DU TYPE DE PAPIER, DU TYPE D'ADHÉSIF ET DE L'HUMIDITÉ SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES CORNIÈRES

Ce chapitre se concentre sur les résultats des essais de compression et de flexion trois-points. Ces essais ont permis de répondre aux objectifs de recherche 1 à 4 définis au CHAPITRE 1. Les sections suivantes présentent l'épaisseur et la masse moyenne des échantillons, les résultats des essais de compression et de flexion, une discussion commune aux deux essais et les conclusions importantes.

### 4.1. Épaisseur et masse moyenne des échantillons

Cette section présente l'épaisseur et la masse moyenne des échantillons évalués en compression et en flexion trois-points.

#### 4.1.1. Épaisseur moyenne

L'épaisseur  $e$  moyenne des échantillons évalués en compression et en flexion sont présentés à la Figure 4.1. Les barres d'erreur correspondent à  $\pm 1$  écart-type. Le TMH moyen des échantillons aux deux niveaux de conditionnement est présenté en détail au Tableau I.1 à l'annexe II.

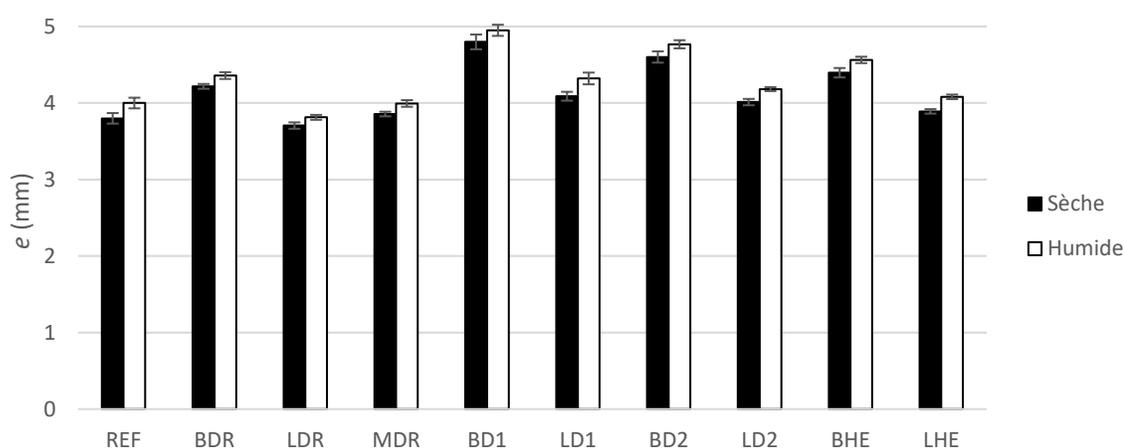


Figure 4.1 Épaisseur des échantillons secs et humides évaluées en compression et en flexion.

On observe une augmentation moyenne de 2 % à 6 % de l'épaisseur des éprouvettes lorsque l'on passe d'un conditionnement sec à un conditionnement humide pour tous les échantillons.

Les échantillons MF4.0 fabriqués avec le papier B (BDR, BD1, BD2 et BHE) sont plus épais en moyenne que ceux fabriqués avec le même adhésif et un autre type de papier, et ce peu importe le conditionnement. Les échantillons LDR et MDR, fabriqués avec l'adhésif DR et les papiers L et M respectivement, ont quant à eux une épaisseur similaire pour un conditionnement sec et humide. Les cornières MF2.0 (REF) ont une épaisseur se rapprochant des échantillons LDR, MDR et LHE pour un conditionnement sec et humide.

Le taux de solides contenu dans les adhésifs semble également avoir un effet sur l'épaisseur. Pour les deux conditionnements, l'épaisseur augmente avec le taux de solides dans l'adhésif. Le taux de solides dans les adhésifs DR, HE, D1 et D2 est respectivement de 19,4 %, 56,7 %, 67,8 % et 67,8 % (Tableau 3.1). Les adhésifs D1 et D2 ont le même taux de solides, mais les échantillons fabriqués avec D1 sont en moyenne plus épais que ceux fabriqués avec D2 au même conditionnement. Afin de mieux visualiser cet effet, les échantillons MF4.0 sont classés à la Figure 4.2 en ordre croissant d'épaisseur en fonction du type d'adhésif, et ce pour deux types de papier. Les flèches indiquent la direction dans laquelle l'épaisseur moyenne augmente.

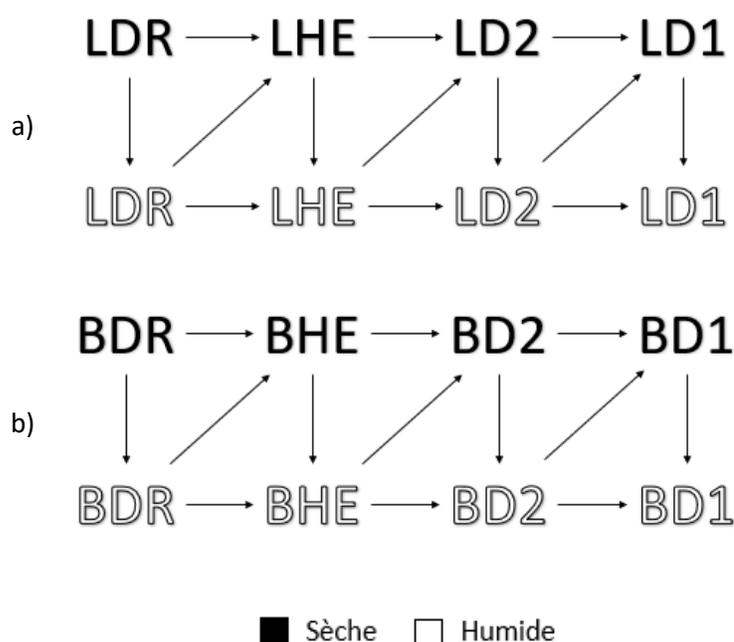


Figure 4.2 Ordre croissant de l'épaisseur moyenne des échantillons MF4.0 en fonction du type d'adhésif pour deux types de papier : a) liner brun (L) et b) liner noir et blanc (B).

#### 4.1.2. Masse moyenne

La masse moyenne des échantillons est présentée à la Figure 4.3 et à la Figure 4.4 pour les essais de compression et de flexion respectivement. Les barres d'erreur dans ces deux figures correspondent à  $\pm 1$  écart-type. La Figure 4.5 présente le gain de masse moyen lorsque le TMH augmente de 6 % à 10 % pour les échantillons évalués en compression et en flexion trois-points. Le TMH moyen des échantillons avant la prise de la masse est présenté au Tableau I.2 à l'annexe II. Le gain de masse a été calculé selon la formule 4.1.

$$\text{Gain de masse} = \frac{\text{Masse humide moyenne} - \text{Masse sèche moyenne}}{\text{Masse sèche moyenne}} \times 100\% \quad 4.1$$

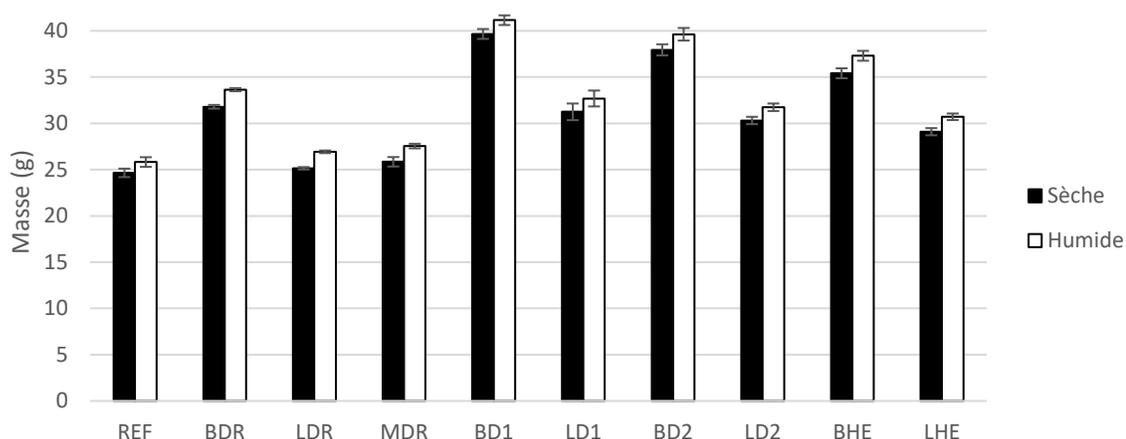


Figure 4.3 Masse moyenne des échantillons évalués en compression aux conditions sèches et humides.

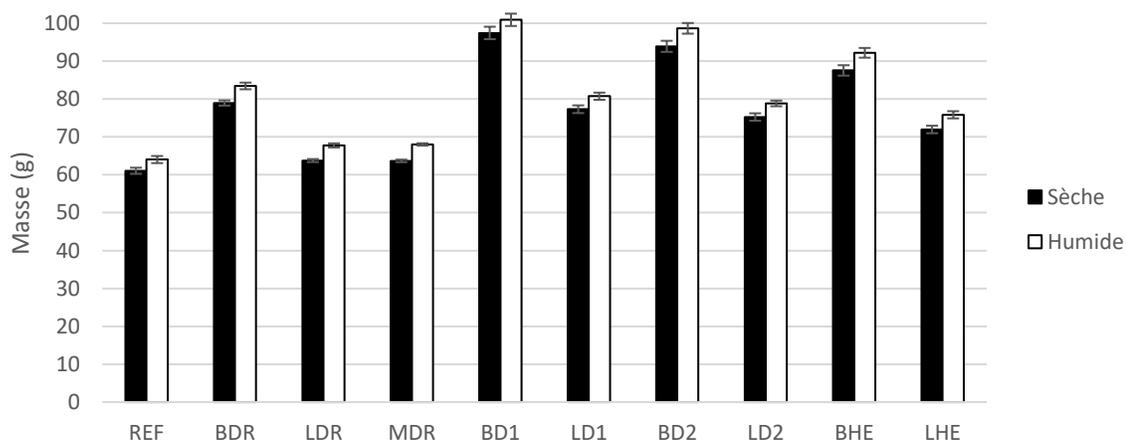


Figure 4.4 Masse moyenne des échantillons évalués en flexion trois-points aux conditions sèches et humides.

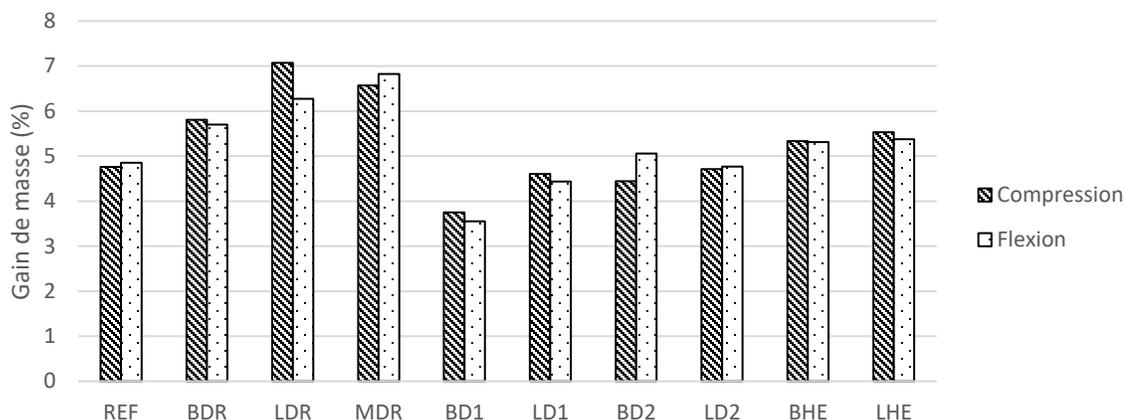


Figure 4.5 Gain de masse moyen lorsque l'on passe d'un conditionnement sec vers un conditionnement humide.

Bien que la précision de la scie à onglet, qui est estimée à  $\pm 2$  mm, sur la longueur de coupe des éprouvettes puisse avoir un impact sur les résultats, ceux-ci semblent suivre une tendance claire. Les conclusions s'apparentent à celles obtenues avec l'analyse des épaisseurs. Ces conclusions s'appliquent aux deux longueurs d'éprouvette (102 mm pour les essais de compression et 254 mm pour les essais de flexion trois-points) :

- La masse moyenne des échantillons augmente entre 3,5 % et 7 % lorsque l'on passe d'un conditionnement sec vers un conditionnement humide ;
- Les échantillons MF4.0 fabriqués avec l'adhésif DR (BDR, LDR et MDR) ont un gain de masse plus important que ceux fabriqués avec les autres adhésifs ;
- Les résultats suggèrent que le type d'adhésif a un effet sur le gain de masse plus important que le type de papier ;
- Les échantillons MF4.0 fabriqués avec le papier B (BDR, BD1, BD2 et BHE) présentent une masse moyenne plus élevée que ceux fabriqués avec le papier L ou M de même conditionnement et de même adhésif ;
- La masse des cornières décroît en diminuant le taux de solides dans l'adhésif. Les cornières fabriquées avec l'adhésif D1 sont plus lourdes en moyenne, suivies de celles fabriquées avec les adhésifs D2, HE et DR.
- Le gain de masse des cornières semble augmenter en diminuant le taux de solides dans l'adhésif.

Les cornières MF2.0 de référence (REF), qui sont fabriqués avec l'adhésif DR, ont en moyenne la masse la plus faible parmi tous les échantillons, suivies de très près par celle des échantillons MF4.0

LDR et MDR, et ce peu importe le conditionnement. À titre d'exemple, la masse moyenne sèche  $\pm 1$  écart-type des échantillons REF, LDR et MDR évalués en compression est de  $24,65 \pm 0,46$  g,  $25,15 \pm 0,13$  g et  $25,85 \pm 0,51$  g respectivement.

L'échantillon le plus lourd est BD1. Pour cet échantillon évalué en compression, la masse moyenne est de  $39,67 \pm 0,53$  g et  $41,15 \pm 0,52$  g pour le conditionnement sec et humide respectivement.

## 4.2. Résultats des essais de compression

Cette section présente les résultats des essais de compression. Pour chaque échantillon, les résultats suivants sont présentés : la courbe force-déplacement typique, l'énergie surfacique lors de l'essai et la résistance en compression. Le TMH moyen de chaque échantillon testé en compression est présenté au Tableau I.1 à l'annexe II.

### 4.2.1. Courbe force-déplacement

La Figure 4.6 et la Figure 4.7 présentent les courbes force-déplacement typiques en compression des échantillons aux conditions sèches et humides pour les MF2.0 et MF4.0 respectivement. Le déplacement de la traverse ainsi que la force sont exprimés en valeurs absolues. Les courbes ont été regroupées en fonction du type d'adhésif et du conditionnement.

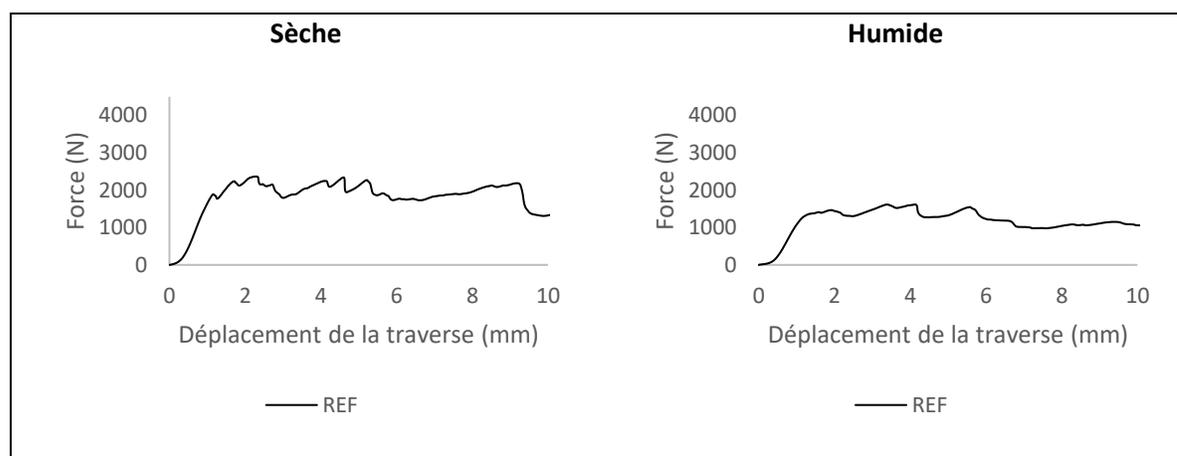


Figure 4.6 Courbes force-déplacement typique en compression des échantillons MF2.0 aux conditions sèches et humides.

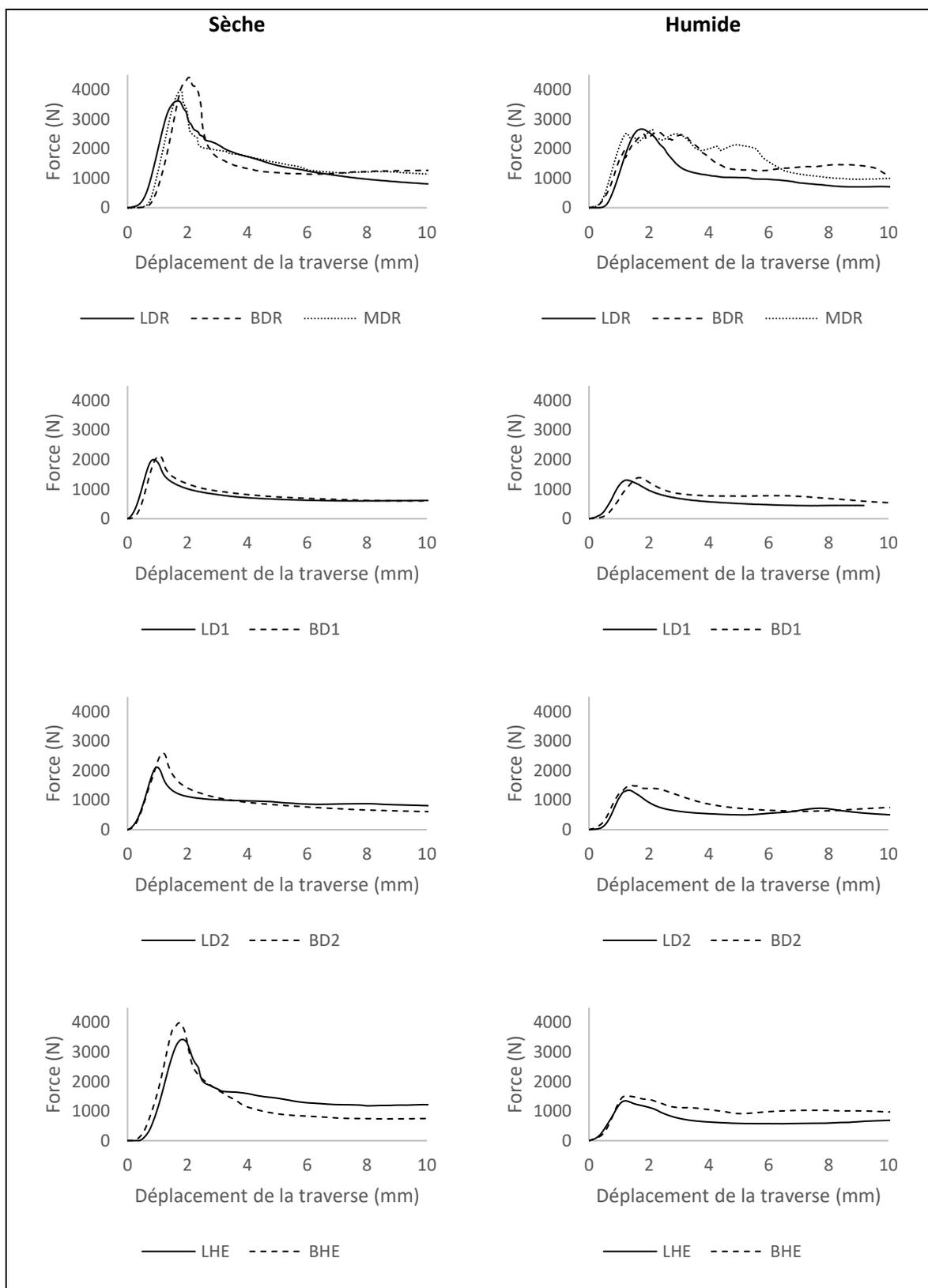


Figure 4.7 Courbes force-déplacement typiques en compression des échantillons MF4.0 aux conditions sèches et humides.

Pour les deux générations de cornières, le début des courbes est caractérisé par une zone non linéaire qui est associée à la reprise des jeux entre l'éprouvette et les appuis du montage. La précharge appliquée au début de l'essai n'est pas suffisante pour éliminer complètement les jeux. Ensuite, on observe un comportement linéaire avant d'arriver à un maximum local de la courbe. Cette zone linéaire correspond à une déformation élastique de l'éprouvette.

Après la zone linéaire, les cornières MF2.0 (REF) présentent un comportement en compression relativement différent des MF4.0. Là où la courbe de ces dernières présente généralement un maximum bien distinct avant de voir la force chuter, la courbe des cornières de l'échantillon REF présente plusieurs maximums locaux consécutifs. De plus, le premier maximum ne correspond pas systématiquement au maximum absolu. On note cependant deux exceptions chez les cornières MF4.0. La courbe des éprouvettes des échantillons humides BDR et MDR a également montré plusieurs maximums consécutifs. Pour ces échantillons, l'adhésif utilisé est le même que pour les cornières de références (REF). La zone située après le comportement linéaire de la courbe force-déplacement est associée à une déformation inélastique de l'éprouvette.

#### 4.2.2. Énergie surfacique

Le travail transmis par la machine Ametek LD10 lors des essais de compression a été calculé à partir des courbes force-déplacement par un programme développé dans Matlab. Ce programme est fourni à l'annexe III. Le travail est l'énergie transmise par la machine d'essai pour effectuer le déplacement de la traverse. Plus concrètement, il correspond à l'aire sous la courbe force-déplacement.

Le calcul du travail en compression a été divisé en deux parties :

- Le travail élastique  $W_{élas,c}$ , qui est l'aire sous la courbe du domaine élastique ;
- Le travail inélastique  $W_{iné,c}$ , qui est l'aire sous la courbe du domaine inélastique.

Avant de calculer le travail transmis, la force maximale  $F_{max,c}$  a d'abord été identifiée pour chaque éprouvette à partir des courbes force-déplacement. Les résultats de  $F_{max,c}$  moyen pour chaque échantillon de cornières sont présentés en détail au Tableau I.3 à l'annexe II. La force maximale est décrite comme le premier maximum local rencontré sur la courbe. Une seule exception a été faite à cette règle avec l'éprouvette BDR10-3 où la courbe force-déplacement est présentée à la Figure 4.8.

Cette éprouvette a été fabriquée avec le *liner* noir et blanc (B), l'adhésif drybond 636 (DR) et conditionnée à un TMH de 10 %.

Pour l'éprouvette BDR10-3,  $F_{max,c}$  a été attribué au second maximum de la courbe force-déplacement au lieu du premier pour trois raisons :

1. Le premier maximum mesuré sur les deux autres éprouvettes BDR humides est similaire au second maximum de BDR10-3 ;
2. Au premier maximum de la courbe de BDR10-3, la force chute subitement verticalement ;
3. Avant et après le premier maximum de BDR10-3, la courbe conserve sa pente.

Pour ces raisons, le premier maximum a été attribué à une défaillance locale et non globale qui n'est pas responsable de l'initiation de l'instabilité de l'éprouvette.

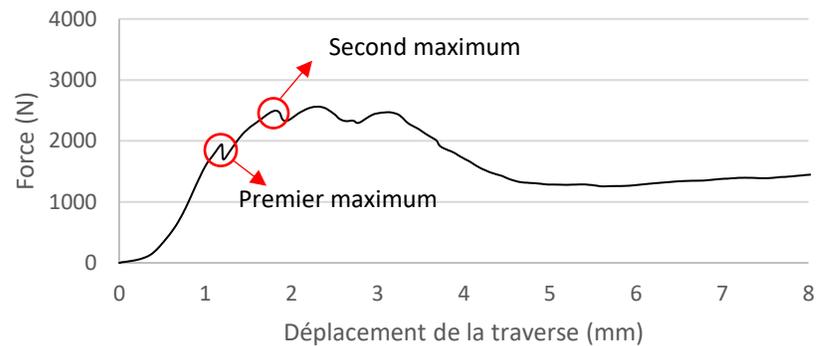


Figure 4.8 Courbe force-déplacement de l'éprouvette BDR10-3.

$W_{élas,c}$  et  $W_{iné,c}$  sont calculés selon les formules suivantes :

$$W_{élas,c} = \sum_{i=x_{0,1 \times F_{max,c}}}^{x_{F_{max,c}-1}} F(x_i) \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad 4.2$$

$$W_{iné,c} = \sum_{i=x_{F_{max,c}}}^8 F(x_i) \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad 4.3$$

La fonction  $F(x)$  correspond à la force mesurée en fonction du déplacement de la traverse  $x$ . Le calcul de  $W_{élas,c}$  commence au déplacement qui correspond à 10 % de  $F_{max,c}$  afin d'ignorer le début de la courbe qui est non linéaire. Le déplacement total considéré pour le calcul de l'énergie est de 8 mm.

Afin de simplifier le calcul, nous posons pour hypothèse que  $F_{max,c}$  est le point délimitant la fin du domaine élastique et le début du domaine inélastique. Il est possible qu'entre la fin du comportement linéaire de la courbe et  $F_{max,c}$ , l'éprouvette ait subi des endommagements causant des déformations permanentes. Toutefois, comme cette portion est relativement courte par rapport au déplacement total considéré de 8 mm, nous posons pour hypothèse que l'inclusion de cette portion dans  $W_{élas,c}$  ne change pas l'ordre de grandeur des résultats et que ceux-ci restent évaluables sur une base comparable.

La Figure 4.9 présente un exemple du résultat calculé par Matlab où la portion verte correspond à  $W_{élas,c}$  et la portion en rouge correspond à  $W_{iné,c}$ . Les travaux sont exprimés en millijoule (mJ).

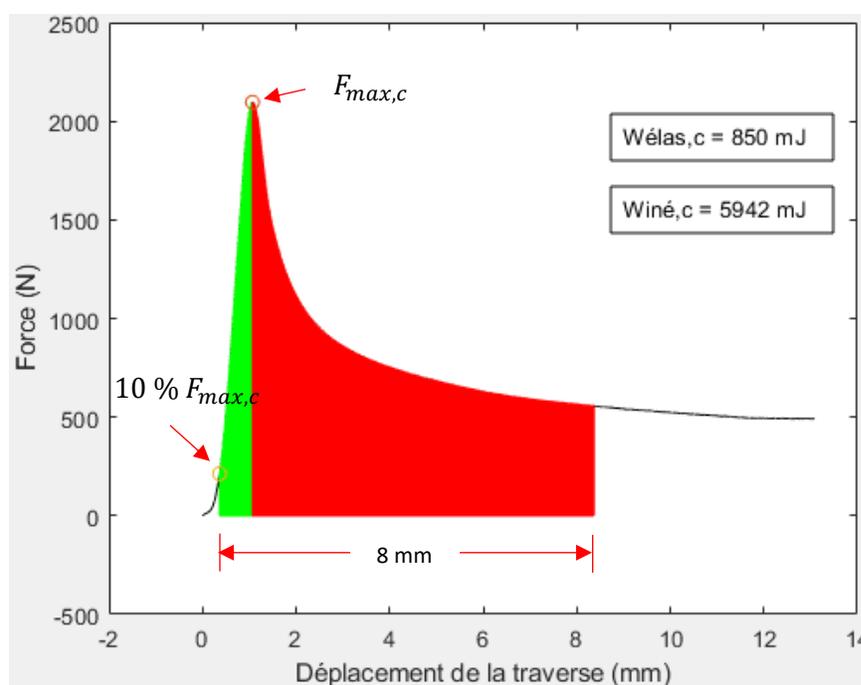


Figure 4.9 Représentation du travail élastique et inélastique en compression sur la courbe de l'éprouvette LD106-2.

Afin d'évaluer les échantillons sur une base comparable, les travaux ont été normalisés en divisant  $W_{élas,c}$  et  $W_{iné,c}$  par l'aire de la section de l'éprouvette associée. Nous posons pour hypothèse que l'aire de la section est constante durant l'essai. Ainsi, les variables suivantes sont définies :

- $W'_{élas,c}$  : énergie surfacique élastique en compression ;
- $W'_{iné,c}$  : énergie surfacique inélastique en compression.

La Figure 4.10 et la Figure 4.11 présentent respectivement  $W'_{\text{élas},c}$  et  $W'_{\text{iné},c}$  moyen pour chaque échantillon d'éprouvettes. Les barres d'erreur correspondent à  $\pm 1$  écart-type. Les résultats sont exprimés en millijoule par millimètre carré ( $\text{mJ}/\text{mm}^2$ ).

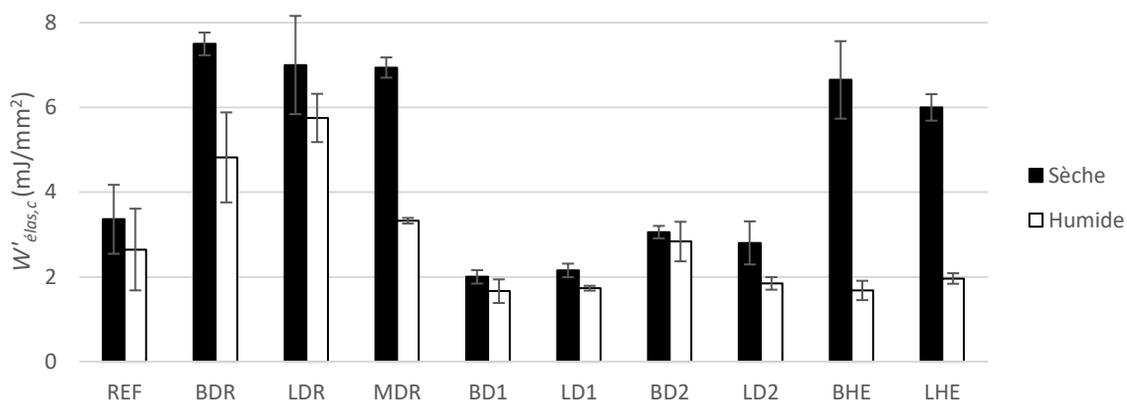


Figure 4.10 Énergie surfacique élastique des échantillons secs et humides évalués en compression.

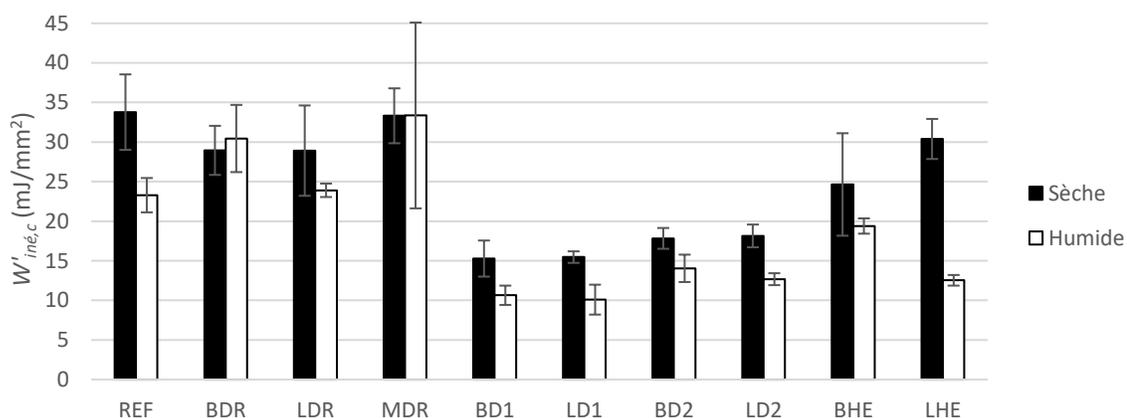


Figure 4.11 Énergie surfacique inélastique des échantillons secs et humides évalués en compression.

Dans un premier temps, on constate que  $W'_{\text{iné},c}$  est toujours supérieur à  $W'_{\text{élas},c}$  pour un même échantillon. Ceci est dû au fait que le domaine élastique est court par rapport à la région du chargement qui est associé au domaine inélastique, soit un déplacement de la traverse de moins de 2 mm contre un déplacement total de 8 mm considéré dans le calcul.

Le type de papier semble avoir un effet limité sur  $W'_{\text{élas},c}$  et  $W'_{\text{iné},c}$ . En général, les échantillons de cornières MF4.0 secs et utilisant le même adhésif ne montrent pas une différence significative entre eux. À titre d'exemple, les échantillons secs BHE, et LHE (tous deux fabriqués avec l'adhésif HE) présentent une énergie surfacique élastique et une énergie surfacique inélastique par unité de

surface similaire en considérant l'écart-type. Pour un conditionnement humide toutefois, on note quelques différences importantes. Par exemple,  $W'_{\text{élas},c}$  est plus élevé pour l'échantillon BD2 que pour l'échantillon LD2. Pour  $W'_{\text{iné},c}$ , les résultats suggèrent que les paires d'échantillons BDR-LDR et BHE-LHE sont significativement différentes. Le papier B permet d'absorber plus d'énergie par unité de surface pour ces cas spécifiques.

Le type d'adhésif a un effet considérable sur l'énergie surfacique. À un conditionnement sec, autant pour  $W'_{\text{élas},c}$  et  $W'_{\text{iné},c}$ , l'adhésif offrant l'énergie surfacique la plus élevée en moyenne est DR, suivi des adhésifs HE, D2 et D1. À titre d'exemple, les échantillons MF4.0 LDR, LHE, LD2 et LD1 (tous fabriqués avec le papier L) ont une énergie surfacique élastique moyenne de  $7,00 \pm 1,16$  MJ/mm<sup>2</sup>,  $6,00 \pm 0,31$  MJ/mm<sup>2</sup>,  $2,80 \pm 0,51$  MJ/mm<sup>2</sup> et  $2,15 \pm 0,16$  MJ/mm<sup>2</sup> respectivement. Les échantillons secs MF4.0 fabriqués avec le papier B (BDR, BD1, BD2 et BHE) montrent le même constat. Pour les échantillons secs MF4.0 fabriqués avec un même papier, l'adhésif DR et l'adhésif HE permettent d'absorber une quantité d'énergie inélastique comparable en considérant l'écart-type.

Après un conditionnement humide, l'adhésif DR offre aux échantillons de cornières MF4.0 une énergie surfacique élastique et inélastique supérieure à celle des autres échantillons de cornières MF4.0 et ce peu importe le type de papier. Les adhésifs D2 et D1 offrent aux échantillons humides MF4.0 l'énergie surfacique élastique et inélastique la plus faible. Pour les échantillons MF4.0 fabriqués avec l'adhésif HE (BHE et LHE), on observe que  $W'_{\text{élas},c}$  à un conditionnement humide diminue largement par rapport aux résultats obtenus à un conditionnement sec, soit une réduction de près de 70 %. Cette forte réduction de l'énergie élastique suggère que l'adhésif HE est plus sensible à l'augmentation du TMH que les autres adhésifs.

Pour l'échantillon de référence REF à un conditionnement sec, son énergie surfacique élastique est plus faible que celle de cornières MF4.0 fabriquées avec le même adhésif DR (BDR, LDR et MDR). À un conditionnement humide, l'énergie surfacique élastique de REF est inférieure à celle de BDR et LDR, mais comparable à celle de MDR. Pour ce qui est de l'énergie surfacique inélastique de REF à un conditionnement sec et humide, elle est comparable à celle des échantillons BDR, LDR et MDR. Cette observation peut être expliquée par le comportement de la courbe-force déplacement. Pour les courbes des REF, le premier maximum est inférieur à ceux des courbes des MF4.0. L'aire sous la courbe force-déplacement de la portion élastique est donc inférieur pour les REF. Après le premier maximum, le comportement en compression de l'échantillon REF est caractérisé, dans le domaine

inélastique, par un plateau de la force alors que pour les cornières MF4.0, on observe plutôt une diminution de la force suivie d'un plateau.

#### 4.2.3. Résistance

Afin d'évaluer et d'étudier la résistance en compression des échantillons sur une base comparable, les résistances en compression  $R_{comp}$  ont été calculées selon la formule suivante :

$$R_{comp} = \frac{F_{max,c}}{A} \quad 4.4$$

où :

- $F_{max,c}$  = Force maximale mesurée au premier maximum (N) ;
- $A$  = Aire de la section ( $\text{mm}^2$ ) ;
- $R_{comp}$  = Résistance en compression (MPa).

La formule repose sur l'hypothèse que l'aire de la section  $A$  reste constante et que la déformation est uniforme dans l'éprouvette jusqu'à  $F_{max,c}$  de la courbe force-déplacement. L'aire  $A$  a été calculée à partir de l'épaisseur et de la largeur des ailes moyennes pour chaque éprouvette et les rayons ont été négligés.

La Figure 4.12 présente la résistance en compression pour les différents échantillons aux deux conditionnements. Les barres d'erreur correspondent à  $\pm 1$  écart-type.

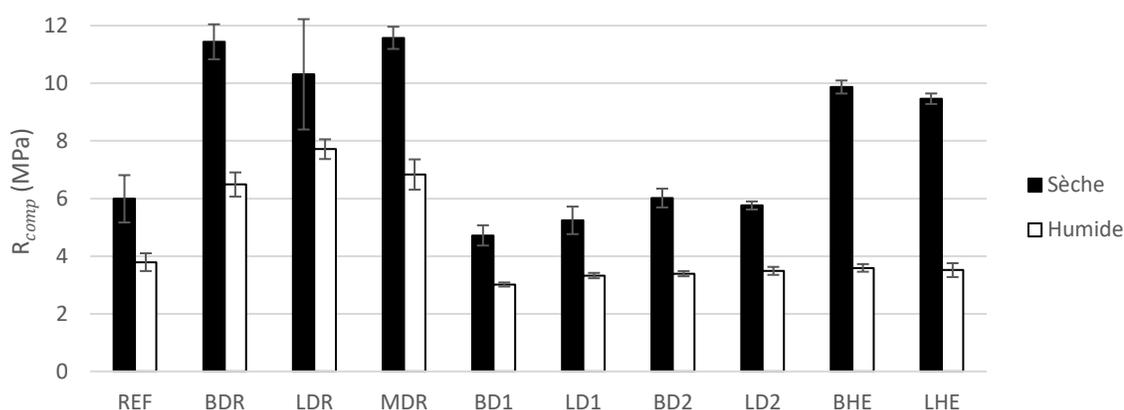


Figure 4.12 Résistance en compression des échantillons aux conditions sèches et humides.

En tenant compte de l'écart-type, on constate que le type de papier a peu d'effet sur la résistance maximale en compression. Les échantillons secs de BDR, LDR et MDR (tous fabriqués avec l'adhésif

DR) montrent une résistance comparable tout comme les paires BD1-LD1, BD2-LD2 et BHE-LHE. Le même constat s'applique à un conditionnement humide.

Le type d'adhésif montre un effet important sur la résistance maximale en compression des cornières MF4.0. À un conditionnement sec, les échantillons fabriqués avec l'adhésif DR sont ceux offrant la résistance la plus élevée en moyenne, suivis de ceux fabriqués avec l'adhésif HE, D2 et D1. À titre d'exemple, les échantillons secs BDR, BHE, BD2 et BD1 (tous fabriqués avec le papier B) montrent respectivement une résistance en compression de  $11,44 \pm 0,61$  MPa,  $9,87 \pm 0,23$  MPa,  $6,02 \pm 0,33$  MPa et  $4,72 \pm 0,35$  MPa. Toutefois, à un conditionnement humide, les échantillons fabriqués avec les adhésifs D1, D2 et HE montrent des résistances comparables entre eux et ce peu importe le type de papier. Quant à ceux fabriqués avec l'adhésif DR (BDR, LDR et MDR), ceux-ci montrent une résistance nettement supérieure aux autres échantillons MF4.0 à un conditionnement humide. Par exemple, les échantillons humides LDR, LHE, LD2 et LD1 (tous fabriqués avec le papier L) montrent respectivement une résistance de  $7,71 \pm 0,34$  MPa,  $3,52 \pm 0,24$  MPa,  $3,49 \pm 0,14$  MPa et  $3,33 \pm 0,09$  MPa.

Les résultats mettent en évidence que le taux de solides dans les adhésifs a un impact considérable sur la résistance maximale à un conditionnement sec. Plus le taux de solides est faible, plus la résistance maximale en compression tend à être élevée. Les adhésifs DR, HE, D2 et D1 ont respectivement un taux de solides de 19,4 %, 56,7 %, 67,8 % et 67,8 % (Tableau 3.1). Afin de mieux visualiser cet effet, les résistances moyennes sont présentées en fonction du taux de solides à la Figure 4.13 pour les échantillons MF4.0 fabriqués avec les papiers L et B.

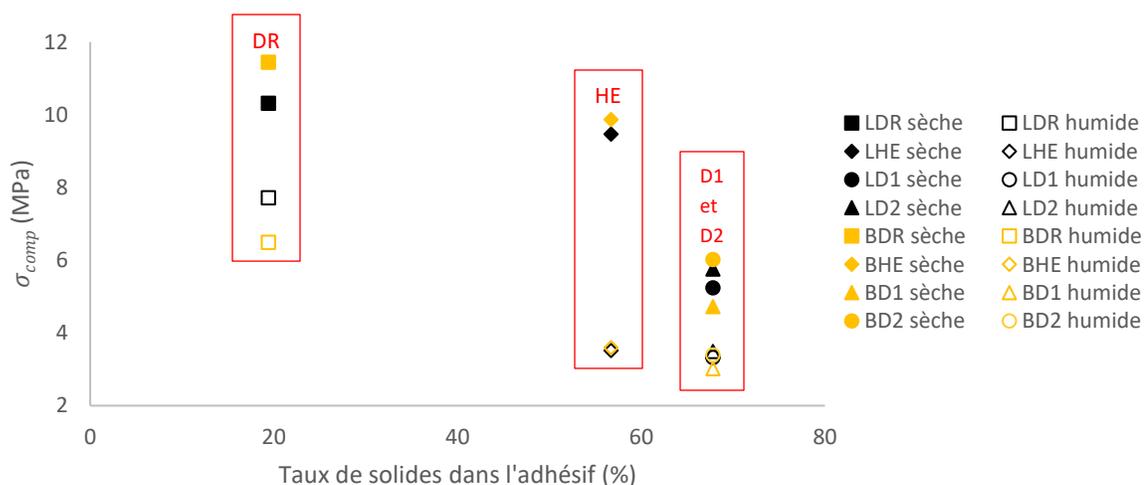


Figure 4.13 Résistance en compression en fonction du taux de solides pour les échantillons MF4.0 fabriqués avec le papier B et L.

L'effet de l'humidité est très apparent pour tous les échantillons. L'augmentation du TMH diminue drastiquement la résistance en compression des échantillons. De plus, l'écart-type sur la résistance est généralement plus faible pour les échantillons humides que pour les échantillons secs de même construction. On note cependant que l'écart-type pour l'échantillon LDR sec est largement supérieur à ceux des autres échantillons. Ceci est expliqué par le fait qu'après le conditionnement sec des éprouvettes de cet échantillon, l'une des trois éprouvettes a présenté des signes de délamination à une extrémité. Cet endommagement a fait en sorte que cette éprouvette a moins bien performé durant l'essai comparativement aux deux autres éprouvettes de même construction, d'où l'écart-type élevé.

Les résultats mettent également en lumière que l'adhésif HE est plus affecté par l'humidité que les autres adhésifs. Les échantillons fabriqués avec cet adhésif (LHE et BHE) voient leur résistance maximale chuter de 63 % lorsque le TMH augmente de 6 % à 10 % comparativement aux autres échantillons MF4.0 où la réduction est inférieure à 45 %. La Figure 4.14 présente pour chacun des échantillons le pourcentage de réduction de  $R_{comp}$  lorsque le TMH augmente de 6 % à 10 %.

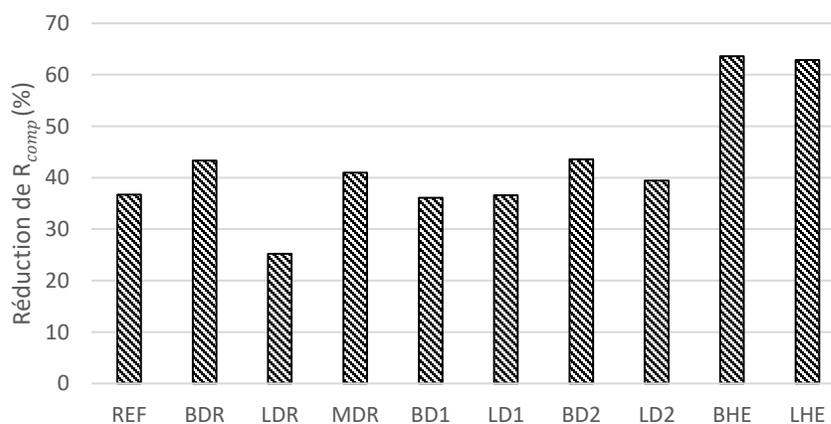


Figure 4.14 Pourcentage de réduction de la résistance en compression d'un conditionnement sec vers un conditionnement humide.

### 4.3. Résultats des essais de flexion trois-points

Cette section présente les résultats des essais de flexion trois-points. Pour chaque échantillon, les résultats suivants sont présentés : la courbe force-déplacement typique, l'énergie normalisée lors de l'essai et la résistance en flexion. Le TMH pour lequel les résultats ont été obtenus dans cette section est présenté au Tableau I.1 à l'annexe II.

#### 4.3.1. Courbe force-déplacement

La Figure 4.15 et la Figure 4.16 présentent les courbes force-déplacement typiques en flexion des échantillons MF2.0 et MF4.0 respectivement. La force ainsi que le déplacement de la traverse sont en valeur absolue. Les courbes sont organisées en fonction du conditionnement et du type d'adhésif.

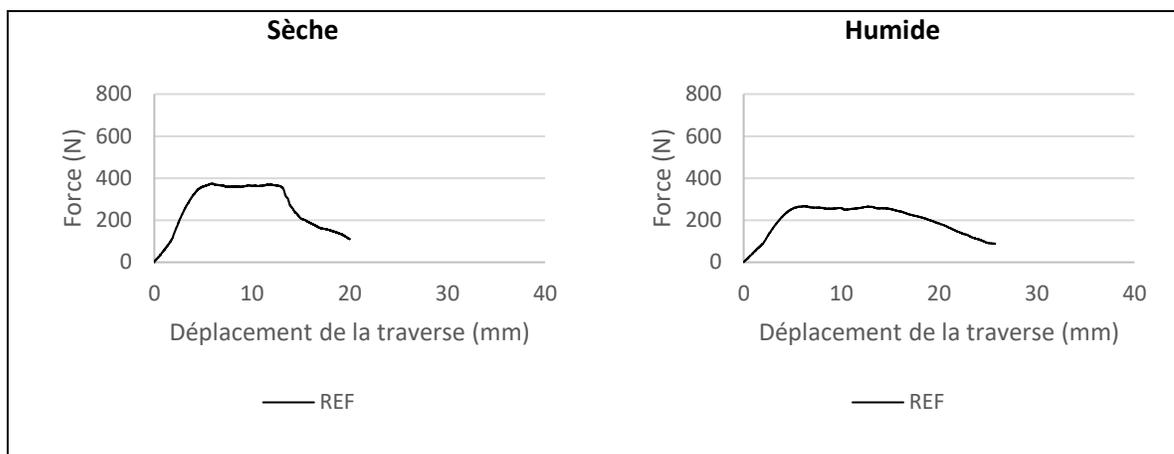


Figure 4.15 Courbes force-déplacement typique en flexion des échantillons MF2.0 aux conditions sèches et humides.

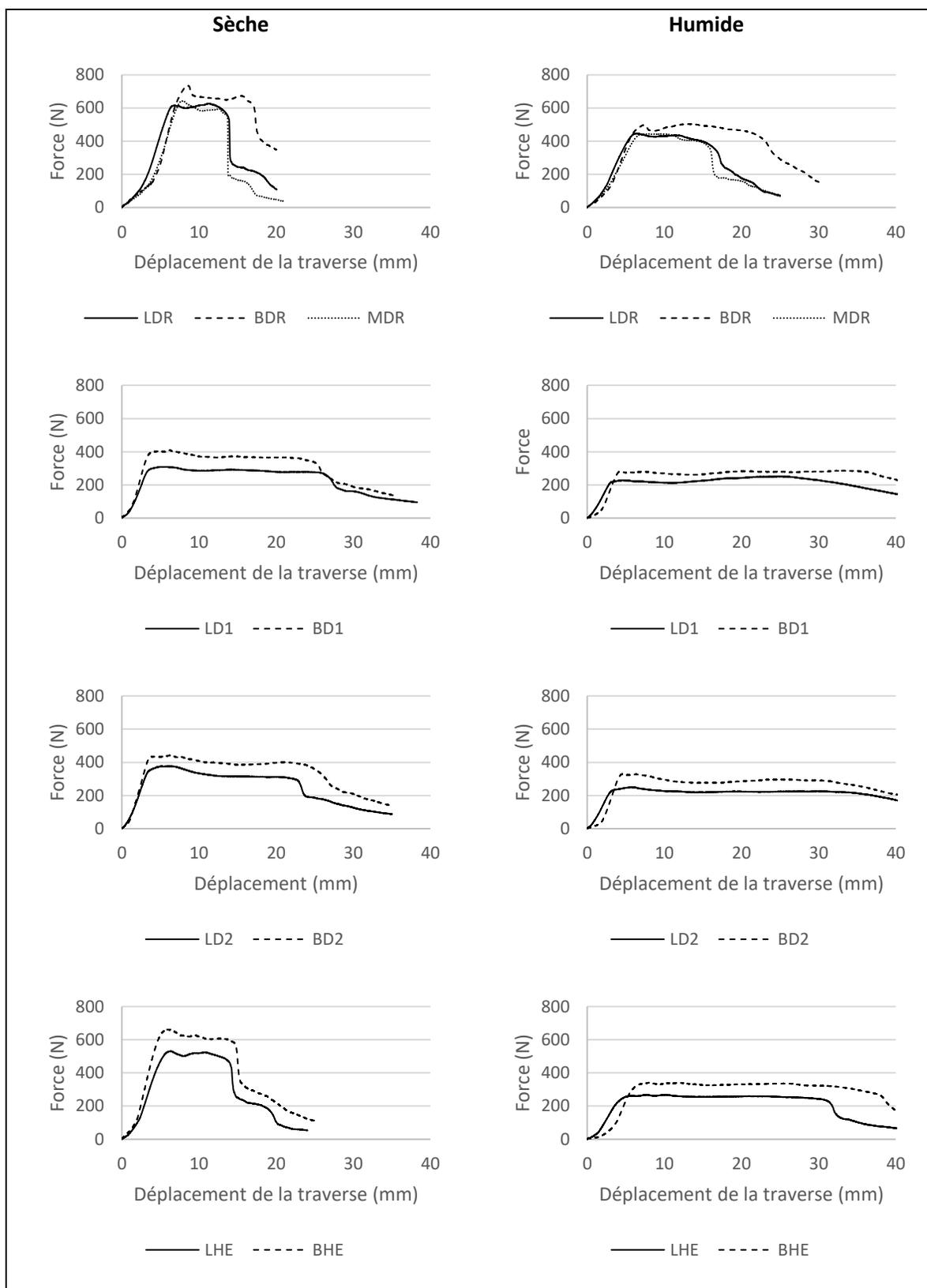


Figure 4.16 Courbes force-déplacement typiques en flexion des échantillons MF4.0 aux conditions sèches et humides.

Le début des courbes de flexion est marqué par une grande portion non linéaire. Ceci est expliqué par la suppression progressive des jeux entre les appuis et l'éprouvette. Les deux appuis latéraux et le nez de chargement du montage de flexion ont tous un angle de profil de  $90^\circ$ . Toutefois, l'angle entre les deux ailes d'une éprouvette n'est pas systématiquement de  $90^\circ$  comme illustré à la Figure 4.17. Plus l'angle de l'éprouvette s'éloigne de  $90^\circ$ , plus l'élimination des jeux est longue.

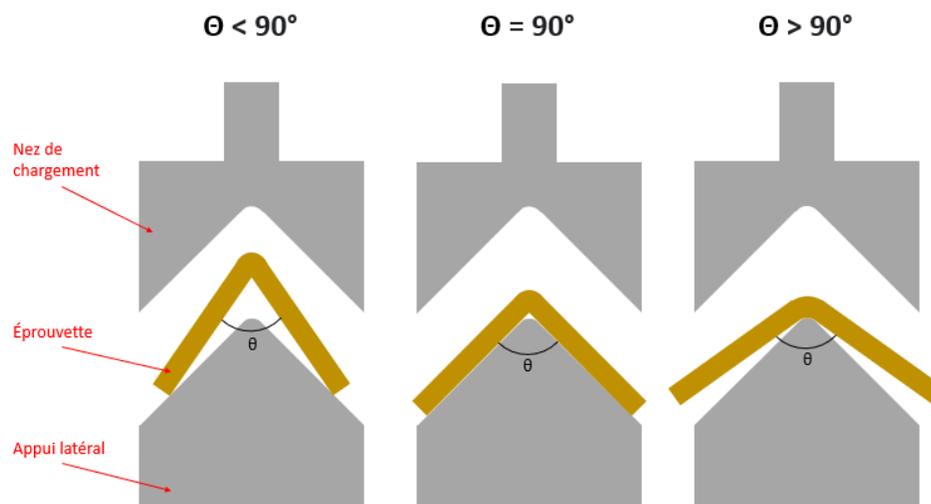


Figure 4.17 Différents cas d'une éprouvette assise sur les appuis du montage de flexion.

Les gabarits de séchage sont efficaces pour maintenir un angle de  $90^\circ$  entre les deux ailes d'une éprouvette durant le préconditionnement. Cependant, les tailles du four et du bac sont trop petites pour pouvoir conditionner les éprouvettes avec les gabarits.

À la sortie du four pour le conditionnement sec, il a été observé que l'angle entre les deux ailes d'une éprouvette diminue en dessous de  $90^\circ$ . De plus, pour toutes les éprouvettes durant le conditionnement humide, l'angle augmente. Ceci est probablement dû au relâchement des contraintes résiduelles dans le papier qui ont été induites durant la fabrication. Au début des essais de flexion, la précharge appliquée n'est pas suffisante pour assoir complètement les éprouvettes sur les appuis.

La Figure 4.18 présente l'angle  $\theta$  moyen entre les deux ailes pour les échantillons secs et humides. Les barres d'erreur correspondent à  $\pm 1$  écart-type. L'angle a été mesuré avant d'effectuer les essais. En faisant le parallèle avec les courbes de la Figure 4.16, les échantillons ayant l'angle le plus éloigné de  $90^\circ$  sont ceux dont la portion non linéaire du début de la courbe est la plus longue.

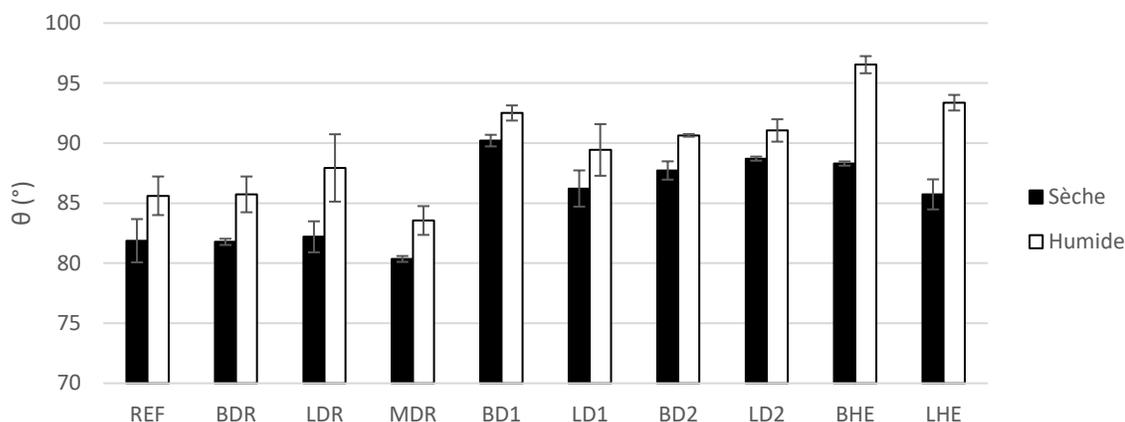


Figure 4.18 Angle entre les deux ailes des échantillons secs et humides évalués en flexion.

Après la portion non linéaire des courbes force-déplacement, les courbes entament une portion linéaire puis atteignent une force maximale avant de chuter légèrement pour former un plateau. La fin du plateau est caractérisée par une chute de la force qui coïncide généralement avec le déchirement de l'éprouvette en traction. Dans tous les cas, cette chute se fait plus tardivement pour les échantillons humides que les échantillons secs de même construction.

Pour les échantillons humides MF4.0 fabriqués avec les adhésifs D1 et D2 (LD1, LD2, BD1 et BD2), aucune déchirure n'a été observée après un déplacement de la traverse de 40 mm. Pour ces échantillons, la chute de la force est très progressive. Elle est attribuée au glissement de l'éprouvette sur les appuis et non à une déchirure visible sur sa surface externe.

#### 4.3.2. Énergie normalisée

Le travail fourni par la machine Ametek LD10 lors des essais de flexion a été calculé à partir des courbes force-déplacement par un programme développé dans Matlab. De la même manière que pour le travail calculé pour les essais de compression, le travail en flexion a été divisé en deux parties, soit le travail élastique  $W_{élas,f}$  et le travail inélastique  $W_{iné,f}$ .

Afin de calculer  $W_{élas,f}$  et  $W_{iné,f}$ , la force maximale  $F_{max,f}$  a été identifiée sur chacune des courbes force-déplacement en flexion afin de délimiter la fin du domaine élastique et le début du domaine inélastique. Pour chacune des courbes force-déplacement,  $F_{max,f}$  correspond au premier maximum rencontré sur la courbe. Les résultats de  $F_{max,f}$  moyen en flexion pour chaque échantillon sont présentés en détail au Tableau I.3 à l'annexe II.

Les travaux  $W_{\text{élas},f}$  et  $W_{\text{iné},f}$  sont calculés selon les formules suivantes :

$$W_{\text{élas},f} = \sum_{i=x_{0,25 \times F_{\text{max},f}}}^{x_{F_{\text{max},f}-1}} F(x_i) \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad 4.5$$

$$W_{\text{iné},f} = \sum_{i=x_{F_{\text{max},f}}}^{15} F(x_i) \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad 4.6$$

La fonction  $F(x)$  correspond à la force mesurée en fonction du déplacement de la traverse  $x$ . Pour les essais de flexion, la portion non linéaire au début de la courbe est relativement importante par rapport à  $F_{\text{max},f}$ , c'est pourquoi le calcul de  $W_{\text{élas},f}$  commence à 25 % de  $F_{\text{max},f}$  afin d'ignorer complètement cette portion. Le déplacement total considéré dans le calcul est de 15 mm.

La Figure 4.19 présente un exemple du résultat calculé par Matlab où la portion verte correspond à  $W_{\text{élas},f}$  et la portion rouge correspond à  $W_{\text{iné},f}$ . Les travaux sont exprimés en millijoule (mJ).

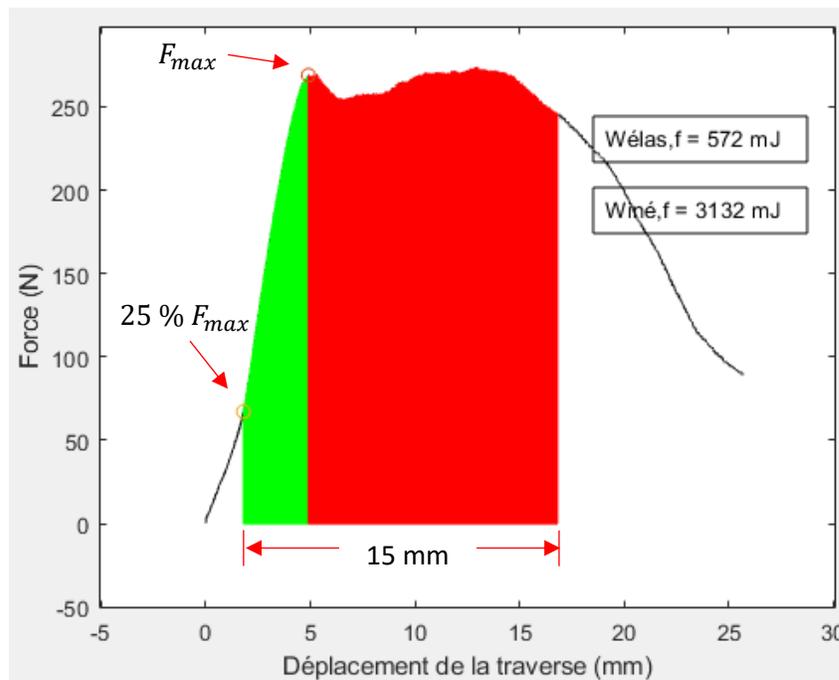


Figure 4.19 Représentation de l'énergie élastique et inélastique en flexion sur la courbe l'éprouvette B-10-7.

Afin d'évaluer les échantillons sur une base comparable, les travaux ont été normalisés en divisant  $W_{\text{élas},f}$  et  $W_{\text{iné},f}$  par le rapport  $I_{z'}/c$ . Le second moment d'inertie  $I_{z'}$  est calculé selon la méthode présentée à l'annexe IV. La distance  $c$  est la distance normale entre le coin extérieur de l'éprouvette

et le centroïde G de la section comme illustrée à la Figure 4.22. Nous posons pour hypothèse que le second moment d'inertie et la distance  $c$  sont constants durant l'essai. Ainsi, les variables suivantes sont définies :

- $W''_{\text{élas},f}$  : énergie élastique normalisée en flexion ;
- $W''_{\text{iné},f}$  : énergie inélastique normalisée en flexion.

La Figure 4.20 et la Figure 4.21 présentent respectivement  $W''_{\text{élas},f}$  et  $W''_{\text{iné},f}$  moyen pour chaque échantillon d'éprouvettes. Les barres d'erreur correspondent à  $\pm 1$  écart-type. Les résultats sont exprimés en millijoule par millimètre cube ( $\text{mJ}/\text{mm}^3$ ).

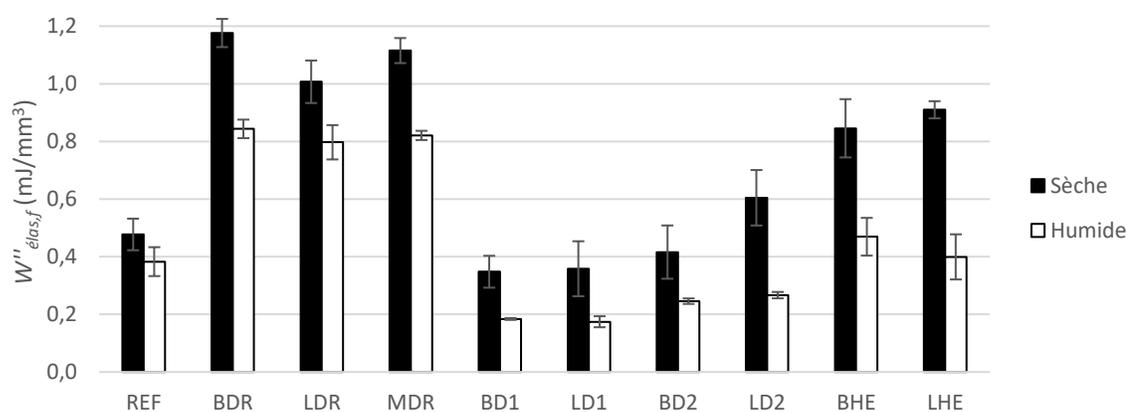


Figure 4.20 Énergie normalisée élastique en flexion aux conditions sèches et humides.

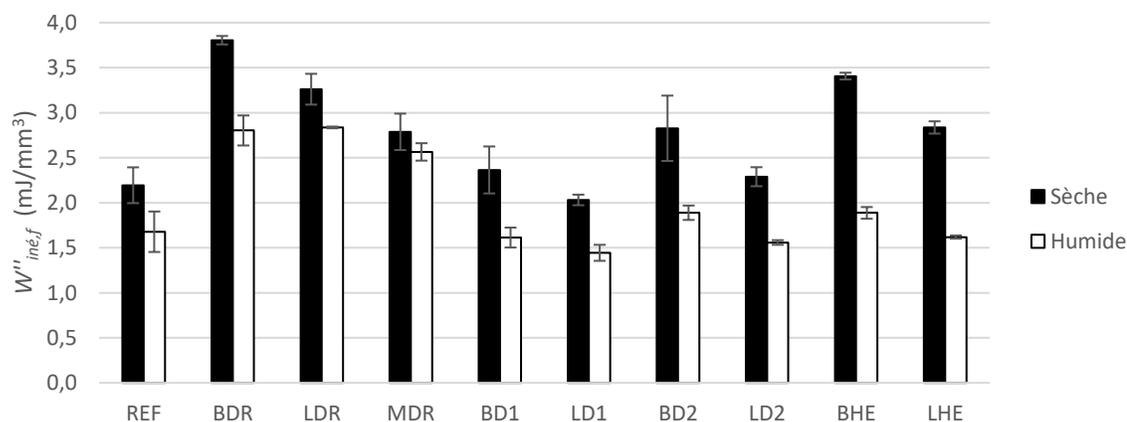


Figure 4.21 Énergie normalisée inélastique en flexion aux conditions sèches et humides.

Tout d'abord,  $W''_{\text{élas},f}$  est toujours inférieure à  $W''_{\text{iné},f}$  pour tous les échantillons. Comme le domaine élastique occupe moins de 5 mm du déplacement total de 15 mm considéré dans le calcul

et que les courbes force-déplacement suivent un plateau après avoir atteint  $F_{max,f}$ , il est normal d'observer cet écart. De plus, l'augmentation du TMH a pour effet de diminuer  $W''_{élas,f}$  et  $W''_{iné,f}$  pour tous les échantillons.

Le type de papier ne semble pas avoir d'effet significatif sur l'énergie élastique normalisée  $W''_{élas,f}$  pour les échantillons MF4.0 et ce pour les deux conditionnements. À titre d'exemple, l'énergie élastique normalisée des échantillons BDR, LDR et MDR (tous fabriqués avec l'adhésif DR) est similaire pour les deux conditionnements en considérant l'écart-type. On retrouve le même constat pour les paires d'échantillons BD1-LD1, BD2-LD2 et BHE-LHE.

Toutefois, les résultats suggèrent que le type de papier a un effet notable sur l'énergie inélastique normalisée  $W''_{iné,f}$ . Les résultats montrent que les échantillons MF4.0 fabriqués avec le papier B (BDR, BD1, BD2 et BHE) ont une énergie inélastique normalisée supérieure à celle des échantillons MF4.0 fabriqués avec un même adhésif et un papier différent, et ce aux deux conditionnements. De plus, l'échantillon LDR a une énergie inélastique normalisée supérieure à celle de l'échantillon MDR peu importe le conditionnement. Cela suggère que le papier M est le papier permettant d'absorber le moins d'énergie.

À un conditionnement sec, le type d'adhésif a un effet important sur  $W''_{élas,f}$  et  $W''_{iné,f}$  pour les échantillons de cornières MF4.0. L'adhésif offrant aux échantillons l'énergie normalisée élastique et inélastique la plus élevée en moyenne est DR, suivi des adhésifs HE, D2 et D1. À titre d'exemple, les échantillons secs LDR, LHE, LD2 et LD1 (tous fabriqués avec le papier L) ont une énergie élastique normalisée moyenne de  $1,01 \pm 0,07 \text{ mJ/mm}^3$ ,  $0,91 \pm 0,03 \text{ mJ/mm}^3$ ,  $0,60 \pm 0,10 \text{ mJ/mm}^3$  et  $0,36 \pm 0,10 \text{ mJ/mm}^3$  respectivement.

À un conditionnement humide, l'adhésif DR est l'adhésif offrant aux échantillons de cornières MF4.0 l'énergie normalisée élastique et inélastique la plus élevée. L'adhésif D1 est celui offrant la plus faible énergie normalisée élastique et inélastique aux cornières. À un conditionnement sec, les résultats suggèrent que l'adhésif HE permet aux cornières d'absorber plus d'énergie inélastique que l'adhésif D2 de manière significative. Toutefois, à un conditionnement humide, les adhésifs HE et D2 permettent d'absorber une quantité d'énergie inélastique comparable. Cela suggère que l'adhésif HE est plus sensible à l'augmentation du TMH que les autres adhésifs. À titre d'exemple, les échantillons de cornières humides MF4.0 BDR, BHE, BD2 et BD1 (tous fabriqués avec le papier B) ont

une énergie normalisée inélastique moyenne de  $3,80 \pm 0,05 \text{ MJ/mm}^3$ ,  $3,41 \pm 0,04 \text{ MJ/mm}^3$ ,  $2,83 \pm 0,36 \text{ MJ/mm}^3$  et  $2,36 \pm 0,26 \text{ MJ/mm}^3$  respectivement.

L'échantillon de référence REF, qui est fabriqué avec l'adhésif DR, présente des résultats intermédiaires. Son énergie normalisée élastique  $W''_{\text{élas},f}$  pour les deux conditionnements est supérieure à celles des échantillons de cornières fabriqués avec les adhésifs D1 et D2 (LD1, BD1, LD2 et BD2), mais inférieure à celle des échantillons de cornières fabriqués avec les adhésifs DR et HE (LDR, BDR, MDR, LHE et BHE).

#### 4.3.3. Résistance

La résistance en flexion  $R_{flex}$  a été calculée selon la formule suivante :

$$|R_{flex}| = \frac{F_{max,f} \cdot L \cdot c}{4 \cdot I_{z'}} \quad 4.7$$

où :

- $F_{max,f}$  = Force maximale mesurée (N) ;
- $L$  = Longueur centre-centre entre les appuis latéraux (mm) ;
- $c$  = distance entre le sommet de la section et le centroïde G (mm) ;
- $I_{z'}$  = Second moment d'inertie ( $\text{mm}^4$ ) ;
- $R_{flex}$  = Résistance en flexion (MPa).

On suppose que l'angle entre les deux ailes de l'éprouvette est de  $90^\circ$  au moment où  $F_{max,f}$  est atteint et que l'aire de la section  $A$  est constante durant l'essai. Le second moment d'inertie  $I_{z'}$  est calculé selon la méthode présentée à l'annexe IV. La distance  $c$  est la distance normale entre le coin extérieur de l'éprouvette et le centroïde G de la section comme illustrée à la Figure 4.22. La contrainte calculée se situe sur le coin extérieur de l'éprouvette. Elle est donc en compression, mais elle est présentée en valeur absolue.

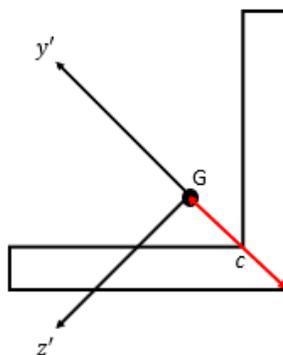


Figure 4.22 Distance  $c$  entre le centroïde  $G$  et le sommet de la cornière.

La Figure 4.23 présente la résistance en flexion de chacun des échantillons aux deux conditionnements. Les barres d'erreur correspondent à  $\pm 1$  écart-type.

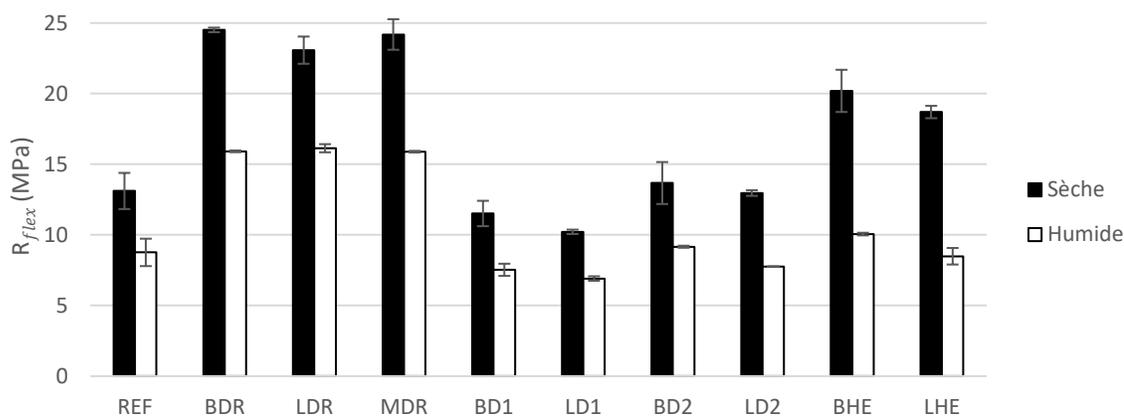


Figure 4.23 Résistance en flexion des échantillons aux conditions sèches et humides.

Le type de papier semble avoir peu ou pas d'effet significatif sur la résistance en flexion des MF4.0 à un conditionnement sec. À titre d'exemple, la résistance en flexion pour les échantillons secs MF4.0 de BDR, LDR et MDR (tous fabriqués avec l'adhésif DR) est respectivement de  $24,51 \pm 0,16$  MPa,  $23,08 \pm 0,96$  MPa et  $24,19 \pm 1,08$  MPa. Pour un conditionnement humide, on souligne un effet prononcé du type de papier sur la résistance en flexion, mais seulement pour les échantillons MF4.0 fabriqués avec les adhésifs D1, D2 et HE. L'écart maximal obtenu entre la résistance en flexion de deux échantillons humides fabriqués avec le même adhésif, mais de deux papiers distincts, est d'au plus 15 %. Par exemple, les échantillons humide BD2 et LD2 (tous deux fabriqués avec l'adhésif D2) présentent respectivement une résistance moyenne de  $9,16 \pm 0,07$  MPa et  $7,75 \pm 0,02$  MPa.

Les résultats montrent que l'adhésif offrant la résistance en flexion la plus élevée aux échantillons MF4.0 est l'adhésif DR, suivi de HE, D2 et D1 et ce pour un conditionnement sec et humide. Par exemple, les échantillons secs MF4.0 BDR, BHE, BD2 et BD1 (tous fabriqués avec le papier B) montrent respectivement une résistance moyenne en flexion de  $24,51 \pm 0,16$  MPa,  $20,19 \pm 1,49$  MPa,  $13,67 \pm 1,48$  MPa et  $11,51 \pm 0,90$  MPa. Ces résultats suggèrent que l'augmentation du taux de solides contribue à diminuer la résistance des cornières. Pour mieux visualiser cet effet, les résistances en flexion des échantillons MF4.0 fabriqués avec le papier L et B sont présentées en fonction du taux de solides à la Figure 4.24.

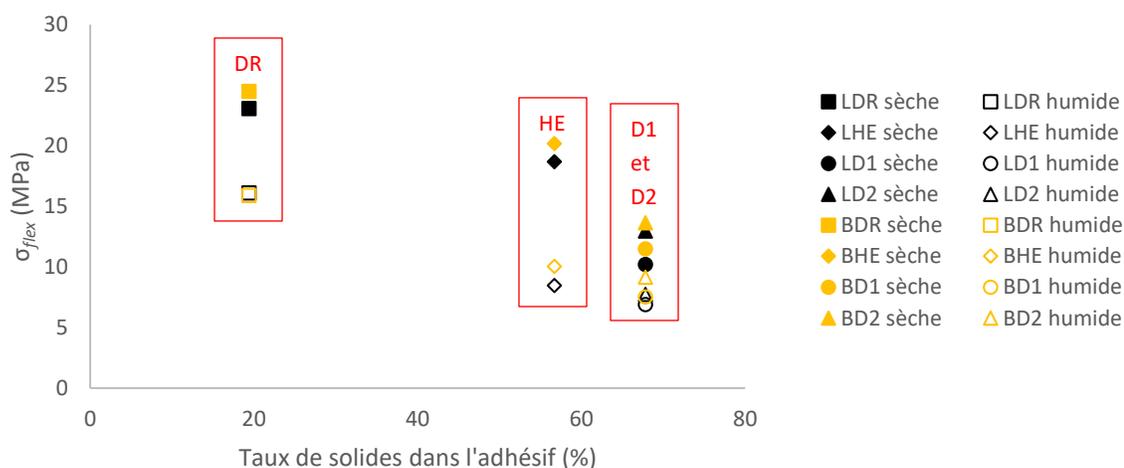


Figure 4.24 Résistance en flexion en fonction du taux de solides pour les échantillons MF4.0 fabriqués avec les papiers B et L.

L'augmentation du TMH diminue drastiquement la résistance en flexion de tous les échantillons. On souligne également que l'écart-type est plus faible pour les échantillons humides que pour les échantillons secs de même construction. En proportion, le pourcentage de réduction de la résistance des échantillons MF4.0 fabriqués avec l'adhésif HE (BHE et LHE) est plus prononcé que pour les échantillons fabriqués avec un autre adhésif. Le pourcentage de réduction de la résistance en flexion des échantillons fabriqués avec les adhésifs DR, D1 et D2 se situe entre 30 % et 40 %. Le pourcentage de réduction des échantillons BHE et LHE est d'au moins 50 %. Cela suggère que l'adhésif HE est plus sensible à l'humidité que les autres adhésifs. La Figure 4.25 montre le pourcentage de réduction de la résistance en flexion pour tous les échantillons après augmentation du TMH de 6 % à 10 %.

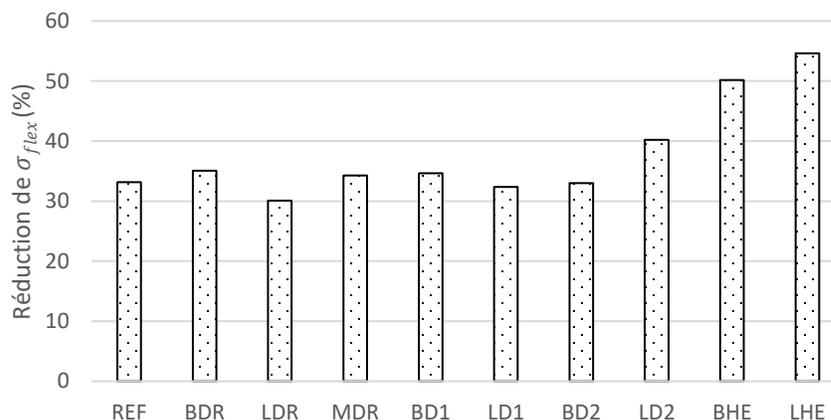


Figure 4.25 Pourcentage de réduction de la résistance en flexion d'un conditionnement sec vers un conditionnement humide.

## 4.4. Discussion

Les effets du type de papier, du type d'adhésif et de l'humidité sur les propriétés mécaniques des cornières sont très similaires pour les essais de compression et de flexion. La discussion est donc commune aux deux essais.

### 4.4.1. Effet du type de papier

Tout d'abord, il est important de rappeler que l'étude du papier M a été limitée puisqu'il n'a pas été possible de le combiner avec les adhésifs D1, D2 et HE. En effet, lors de la fabrication d'éprouvette MF4.0 avec l'un de ces trois adhésifs, le papier M déchire systématiquement lors du pliage, rendant impossible la fabrication. Plusieurs tentatives infructueuses de modification du dosage d'adhésif n'ont pas suffi à régler le problème. Ce problème vient possiblement du fait que le papier M, un *medium*, est fait de fibres courtes contrairement aux papiers L et B qui sont fait de fibres longues. Les *mediums* sont connus dans la littérature pour avoir une résistance à la traction moins importante que celle des *liners*, bien qu'il ait été reporté que la rigidité à la traction des *mediums* est parfois supérieure [59, 73]. De plus, les adhésifs D1, D2 et HE sèchent très rapidement, contrairement à l'adhésif DR, à cause de leur taux élevé de solides. Lorsque l'adhésif est appliqué sur le papier et que celui-ci est ensuite plié, plusieurs phénomènes complexes se produisent dans une très courte période. On peut en citer deux importants. D'abord, l'eau contenue dans l'adhésif détériore les liaisons hydrogène entre les fibres du papier. Ensuite, les adhésifs D1, D2 et HE cristallisent rapidement en consolidant des liaisons hydrogène entre les fibres et les particules solides de l'adhésif. Comme les fibres du papier M sont courtes, le nombre de groupes hydroxyles

disponibles pour faire des liaisons hydrogène entre deux fibres est moins important que pour les papiers B et L. Lors du pliage, la tension engendrée dans le papier M suffit à détruire les liaisons hydrogène restantes entre les fibres. Malgré tout, le papier M n'est pas nécessairement un mauvais choix de matière première pour la fabrication d'une cornière. D'ailleurs, les échantillons LDR, BDR et MDR ont montré une résistance en compression et en flexion comparable. Dans un procédé industriel, où la vitesse de production est largement supérieure à celle du procédé manuel, il serait tout à fait envisageable que l'on puisse combiner le papier M avec un adhésif ayant un plus haut taux de solides puisque le pliage s'effectuerait avant la cristallisation de l'adhésif.

Un autre point de discussion relatif au type de papier est la masse des éprouvettes. Selon le Tableau 3.2, le *liner* noir et blanc (B) est le papier dont l'épaisseur est la plus faible, mais dont le grammage est le plus élevé. Ce papier possède également, et de loin, la plus faible porosité. Le papier B est donc plus dense que les autres papiers étudiés. Comme le même dosage d'adhésif a été appliqué à chaque éprouvette, il est normal d'observer que les échantillons fabriqués avec le papier B (BDR, BD1, BD2 et BHE) soient plus lourds que les échantillons fabriqués avec un même adhésif et un papier différent. De plus, un papier peu poreux offre une surface de contact entre les fibres et les adhésifs réduite. On peut donc émettre l'hypothèse que le papier B a un moins bon potentiel d'absorption des adhésifs que les papiers L et M.

Le résultat le plus inattendu de ce projet de recherche est que le type de papier montre peu d'effet sur la résistance en compression et en flexion des cornières. Pour un conditionnement sec, il n'y a pas de différence significative sur la résistance entre des échantillons fabriqués avec un même adhésif et un papier différent. L'effet du papier devient apparent sur la résistance en flexion des cornières pour un conditionnement humide, mais seulement lorsque le papier est en combinaison avec les adhésifs D1, D2 et HE. Un écart sur la résistance en flexion d'au plus 15 % est observé entre les échantillons fabriqués avec un même adhésif et un papier différent pour un conditionnement humide. Il est probable que le type de sollicitation mécanique et l'interface papier-adhésif jouent un rôle important dans cette observation. Dans le cas d'un chargement en flexion, différents types de chargement sont à l'œuvre. En négligeant les contraintes de cisaillement, l'éprouvette est chargée à la fois en compression et en traction. En tension, la rupture des stratifiés de papier est gouvernée par le comportement des fibres et est associée à la déchirure du papier. Pour un conditionnement humide, l'adhésif se détériore, il est donc probable que la déchirure du papier associé au chargement en tension joue un rôle plus important sur le comportement de l'éprouvette.

Dans un même ordre d'idée, il a été observé que le type de papier a un effet notable sur l'énergie normalisée inélastique en flexion aux deux conditionnements. Lorsque le domaine inélastique est atteint, l'éprouvette s'endommage progressivement. On peut imaginer qu'à ce stade, la structure présente des signes de délamination et que le rôle de l'adhésif s'amenuise. La charge est reprise en tension et en compression par les papiers. Comme le papier B est fait de fibres longues et qu'il est très dense, l'énergie moyenne absorbée des échantillons fabriqués avec ce papier est plus importante que celle des échantillons fabriqués avec un autre papier. Le papier M a une densité similaire au papier L, mais contrairement à ce dernier, il est fait de fibres courtes. Cela explique possiblement pourquoi l'échantillon fabriqué avec le papier M (MDR) a une énergie normalisée inélastique en flexion inférieure à celle de l'échantillon fabriqué avec le papier L et le même adhésif (LDR).

Bien que les résultats suggèrent que le type de papier a peu ou pas d'effet sur la résistance en compression et en flexion, il faut souligner que seulement trois papiers ont été étudiés et qu'ils sont tous fait de fibres recyclées à 100 %. Dans la revue de littérature, il a été reporté que les papiers, particulièrement ceux traités chimiquement, se dégradent après le recyclage [29]. Il est donc plausible qu'un *liner* fait de fibres vierges confèrerait de meilleures performances mécaniques aux cornières. Toutefois, du point de vue du partenaire industriel, il n'y a pas de réel avantage à utiliser un papier fait de fibres vierges puisque les papiers recyclés ont l'avantage d'être plus économiques et offrent des propriétés suffisantes. De plus, du point de vue du développement durable, l'utilisation d'un papier recyclé est souhaitable puisque sa fabrication nécessite moins d'énergie et de ressource [37].

#### 4.4.2. Effet du type d'adhésif

D'après les résultats, le taux de solides dans les adhésifs peut être corrélé à plusieurs effets sur les cornières. Plus le taux de solides est élevé, plus l'épaisseur et la masse augmentent alors que la résistance en compression et en flexion diminue.

En ce qui concerne l'épaisseur et la masse, l'explication est simple. Un taux de solides élevé implique nécessairement qu'une plus faible quantité de solvant s'évapore durant le séchage pour ne laisser que les particules solides qui ont une masse volumique plus importante que celle du solvant. Cependant, il est difficile d'expliquer pourquoi les échantillons fabriqués avec l'adhésif D1 sont plus lourds et épais en moyenne que ceux fabriqués avec l'adhésif D2 puisque ces deux adhésifs ont le

même taux de solides (Tableau 3.1). Pour expliquer ce résultat, on peut émettre l'hypothèse que la pégosité et la viscosité de l'adhésif aient un effet sur son absorption par le papier et sur la quantité d'adhésif déposée sur le papier. La pégosité de l'adhésif D1 est peut-être supérieure à celle de l'adhésif D2. La pégosité plus élevée de l'adhésif D1 pourrait ainsi favoriser un transfert d'adhésif plus important de l'encolleur vers le papier au contact initial pour un même jeu entre les rouleaux de l'encolleur. De plus, selon les données du Tableau 3.1, la viscosité à 23 °C pour l'adhésif D1 est de 2350 cPs contre 1400 cPs pour l'adhésif D2. La forte viscosité de l'adhésif D1 limite possiblement son absorption par le papier, créant ainsi une accumulation de solides plus importante entre deux papiers et crée donc une épaisseur plus importante.

Un autre point qui a été observé est la sensibilité à l'humidité des échantillons fabriqués avec l'adhésif HE. Les résultats suggèrent que l'adhésif HE est bien plus sensible à l'augmentation du TMH que les trois autres adhésifs étudiés. Ce phénomène est particulièrement visible avec les résultats de résistance en compression et en flexion et de la variation de l'angle entre les deux ailes d'une cornière. Malheureusement, il n'a pas été possible d'obtenir plus d'information sur la composition chimique des adhésifs auprès des manufacturiers qui aurait pu aider à mieux comprendre ce comportement. De plus, aucun essai n'a été effectué sur les matières premières individuellement. L'effet de l'interaction entre les papiers et les adhésifs sur leurs propriétés mécaniques respectives est inconnu.

Concernant les résistances en compression et en flexion, on observe que celles-ci diminuent en augmentant le taux de solides. Il est difficile de comprendre le phénomène, mais on peut émettre l'hypothèse que le papier atteint la saturation lorsque le taux de solides est élevé et que les solides n'ayant pas formé de liaison avec les fibres s'accumulent pour former une couche qui résulte en une faiblesse lors d'un chargement. Pour les adhésifs D1 et D2 qui ont le même taux de solides, l'adhésif D2 offre une meilleure résistance en compression et en flexion que l'adhésif D1. Il est possible que la viscosité élevée de l'adhésif D1 limite l'encrage mécanique entre le papier et l'adhésif.

#### *4.4.3. Effet de l'humidité*

De par la nature hydrophile du papier, l'humidité a un grand impact sur ses propriétés mécaniques et sa géométrie. L'augmentation du TMH augmente notamment l'épaisseur et la masse des éprouvettes et diminue fortement leur résistance et l'énergie absorbée pour les deux types de chargement étudiés.

Certains questionnements peuvent être soulevés quant à la précision des résultats due à une tolérance élevée lors du conditionnement sec ( $6 \pm 0,5$  % TMH) et humide ( $10 \pm 0,5$  % TMH). Cette tolérance a été nécessaire en raison d'un manque de matériel de laboratoire de précision. En effet, aucune chambre de conditionnement pouvant contrôler à la fois la température et l'humidité relative n'a pu être utilisée. Il n'a donc pas été possible de conditionner les cornières de sorte que leur TMH soit en équilibre avec leur environnement ambiant. L'objectif du projet est certes d'étudier l'effet de l'humidité sur les propriétés mécaniques des cornières, mais ce projet s'inscrit également dans une application industrielle. Dans ce contexte, la tolérance appliquée dans la méthodologie de conditionnement est jugée suffisante pour évaluer l'effet global de l'humidité sur les propriétés mécaniques des cornières, mais limite l'analyse pouvant être produite.

#### 4.4.4. Comparaison des deux générations de cornières

L'une des différences flagrantes entre les deux générations de cornières est le comportement durant l'essai de compression, plus précisément sur les courbes force-déplacement. Dans un produit constitué de cartons et d'adhésif, les apparitions de ruptures adhésives (délamination) et/ou de ruptures cohésives (bris du papier ou de l'adhésif) sous l'effet d'une charge en compression sont responsables de l'initiation de l'instabilité et de l'effondrement [14]. Or, dans le cas des MF2.0, les nombreux maximums mesurés sur les courbes en compression suggèrent un endommagement progressif dans l'éprouvette, mais sans pour autant amener aussitôt son effondrement. Un comportement similaire chez les MF4.0 a seulement été observé sur les échantillons fabriqués avec l'adhésif DR à un conditionnement humide (BDR et MDR).

On peut émettre l'hypothèse que le comportement observé est relié au différent dosage d'adhésif entre les deux générations de cornières. Bien que la différence de dosage entre les deux procédés n'ait pas été quantifiée en termes de masse par unité de surface, le jeu entre les rouleaux de l'encolleur est supérieur pour le procédé manuel, offrant ainsi aux MF4.0 un dosage possiblement plus important. Il est donc possible que le plus faible dosage d'adhésif dans les cornières MF2.0 contribue à l'apparition de plusieurs endommagements locaux.

L'un des objectifs du projet est de comparer les propriétés mécaniques des deux générations de cornière. L'effet de la méthode de pliage sur les cornières est une question sensible puisque la méthode de fabrication (vitesse de production, tension dans le papier, dosage de l'adhésif, etc.) diffère pour les deux types de cornières. Tout ceci sans parler du fait que les MF2.0 utilisent

également du *chipboard* et un *liner* blanc de recouvrement, deux papiers qui n'ont pas été étudiés. De plus, plusieurs des cornières MF2.0 évaluées en compression et en flexion ont été fabriquées avec un *liner* noir et blanc en raison d'un manque de matière première durant le projet. L'utilisation de ce papier pour ce type de cornière n'est pas conforme à une fabrication standard par Abzac Canada. Il est donc très difficile d'évaluer l'effet de la méthode de pliage sur les propriétés mécaniques des cornières.

À un conditionnement sec et humide, les échantillons MF4.0 LDR et MDR ont montré une résistance en compression et en flexion de plus de 70 % supérieure à celle des cornières MF2.0 (REF), fabriquées avec le même adhésif DR, pour une épaisseur et une masse similaire. Toutefois, les derniers points cités nous dictent qu'il est préférable d'user de prudence pour en tirer une conclusion. Ainsi, on se contentera de conclure que la nouvelle génération de cornière peut offrir des propriétés mécaniques au moins aussi élevées que celles de la génération précédente, et même probablement supérieures.

#### 4.4.5. *Application industrielle*

Dans un contexte industriel, il est important de maximiser les propriétés mécaniques des cornières en sélectionnant des matières premières qui permettent de les fabriquer de manière économique, avec une haute capacité de production et en minimisant leur masse.

Comme expliqué précédemment, le type de papier semble avoir peu d'impact sur les propriétés mécaniques en compression et en flexion des cornières. En fait, l'effet du papier n'est principalement visible que sur l'énergie normalisée inélastique en flexion. En application réelle, il est préférable de sélectionner une taille de cornière pouvant supporter la charge tout en restant dans le domaine élastique. Le choix du type de papier parmi ceux étudiés pour la fabrication devrait donc se faire en fonction de critères économiques et de disponibilité.

Le type d'adhésif joue un rôle crucial non seulement sur les propriétés mécaniques des cornières, mais également sur la capacité de production. En effet, un taux élevé de solides contribue à accélérer le séchage de l'adhésif. Cela permet de diminuer le temps d'entreposage des cornières et donc d'augmenter la production sur une chaîne industrielle. D'après des observations qualitatives, les adhésifs à haut taux de solides (HE, D1 et D2) sèchent beaucoup plus rapidement à l'air ambiant que l'adhésif DR utilisé actuellement pour la production des cornières MF2.0. Toutefois, l'utilisation des adhésifs HE, D1 et D2 diminue également la résistance et l'énergie absorbée en compression et en flexion des cornières MF4.0. Il est possible qu'utiliser un plus faible dosage d'adhésif avec un taux

élevé de solides puisse aider à augmenter la résistance des cornières en diminuant les dépôts de solides. Malheureusement, il n'a pas été possible de vérifier cette hypothèse puisque le temps élevé de fabrication manuelle des éprouvettes MF4.0 nécessite un dosage d'adhésif plus élevé. Cette hypothèse pourrait éventuellement être vérifiée dans un contexte de fabrication automatisée sur la ligne de production. Par la même occasion, le gain sur la capacité de production en utilisant un adhésif à haut taux de solides pourrait être quantifié. Si l'optimisation des propriétés mécaniques des cornières est l'enjeu principal, alors l'adhésif DR devrait être privilégié pour la fabrication en se basant sur les résultats de cette étude.

Concernant l'optimisation des coûts de transport et du nombre maximal de cornières pouvant être transportées sur une palette, la masse et l'épaisseur des cornières sont des paramètres importants. Selon les résultats obtenus, la combinaison des papiers L ou M avec l'adhésif DR permet d'obtenir une cornière MF4.0 avec une masse et une épaisseur comparable à une cornière MF2.0 et ce à un conditionnement sec et humide. Toutes autres combinaisons de papier et d'adhésif entraînent une augmentation de la masse et de l'épaisseur des cornières MF4.0.

Enfin, les cornières MF2.0 disponibles sur le marché répondent aux besoins des applications actuelles. Les résultats obtenus dans ce projet suggèrent que les cornières MF4.0 peuvent être meilleures en termes de résistance pour une masse et une épaisseur comparable. Or, il pourrait être judicieux d'évaluer l'effet de la réduction du nombre de papiers pour une fabrication industrielle des cornières MF4.0, qui est dans cette étude au nombre de cinq, sur leurs propriétés mécaniques. Cela pourrait permettre d'obtenir des cornières MF4.0 ayant une résistance en compression et en flexion similaire à celles des MF2.0, tout en étant plus légères et fines. Toutefois, l'effet d'autres paramètres de production (vitesse de production, tension du papier, dosage d'adhésif, etc.) devrait également être pris en compte pour l'optimisation des propriétés mécaniques des cornières. L'étude de ces paramètres sur une ligne de production peut poser un défi de taille puisque les conditions atmosphériques dans l'usine ne sont pas contrôlées. De plus, il subsiste de faibles variations entre les différents lots de matières premières qui n'ont pas été démontrées dans ce mémoire. Il est probable qu'une interaction entre divers paramètres contrôlés et non contrôlés complique l'interprétation des résultats. L'étude de l'effet des paramètres de production sur les propriétés des cornières devrait donc être réalisée de manière rigoureuse.

## 4.5. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'évaluer les effets du type de papier, du type d'adhésif et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en compression et en flexion trois-points des cornières. Les MF2.0 ont été fabriquées selon une construction standard de Abzac Canada. Les MF4.0 ont été fabriquées suivant une nouvelle méthode de pliage combinant un seul type papier et un adhésif. Les deux générations de cornières ont été évaluées à un conditionnement sec et humide.

Les paramètres de fabrication et de conditionnement ont montré des effets similaires pour les essais de compression et de flexion trois-points. Les conclusions les plus importantes sont résumées ci-dessous en fonction des axes de recherche.

Effet du type de papier :

- Le type de papier montre peu ou pas d'effet sur la résistance en compression et en flexion des cornières ;
- Le type de papier a un effet important sur la masse et l'épaisseur des cornières. Plus la densité du papier est élevée, plus la masse des cornières est élevée.

Effet du type d'adhésif :

- Le type d'adhésif a un effet important sur la résistance en compression et en flexion. L'adhésif offrant les meilleures performances mécaniques aux cornières MF4.0 est l'adhésif DR, suivi des adhésifs HE, D2 et D1 ;
- Le type d'adhésif a un effet important sur l'épaisseur et la masse des cornières. Plus le taux de solides dans l'adhésif est élevé, plus ces derniers sont élevés ;
- Parmi les adhésifs étudiés, il y a une corrélation négative entre l'augmentation de la résistance en compression et en flexion et le taux de solides dans l'adhésif.

Effet de l'humidité :

- L'augmentation du taux massique d'humidité de 6 % à 10 % diminue de 30 % à 60 % la résistance en compression et en flexion des deux générations de cornières ;
- L'augmentation du taux massique d'humidité de 6 % à 10 % augmente de 3,5 % à 7 % la masse et de 2,0 % à 6 % l'épaisseur des deux générations de cornières.

Comparaison des deux générations de cornières :

- Les cornières MF4.0 peuvent offrir une résistance en compression et en flexion au moins aussi bonne que celle des MF2.0 à un même conditionnement ;
- Les cornières MF4.0 fabriquées avec le papier L ou M et l'adhésif DR ont une épaisseur et une masse similaire aux cornières MF2.0.

## CHAPITRE 5      ESSAI DE COMPRESSION AVEC CORRÉLATION D'IMAGE NUMÉRIQUE

Ce chapitre présente les résultats obtenus avec les essais de compression avec CIN. L'analyse fait office d'étude exploratoire du comportement élastique et des modes de défaillance en compression pour les échantillons de cornières MF2.0 (REF) et MF4.0 (LDR) à un conditionnement sec. Cette analyse permet ainsi de répondre aux objectifs 4 et 5 définis au CHAPITRE 1.

Un total de huit éprouvettes a été étudié avec la méthode de CIN en compression. Les déformées des éprouvettes ont d'abord été observées jusqu'à un déplacement de 3 mm de la traverse afin de voir comment évolue les déformées dans le domaine inélastique. Les déformations élastiques longitudinales ont ensuite été étudiées afin d'évaluer le module d'élasticité en compression des deux générations de cornières.

### 5.1. Déformée

Au total, trois déformées différentes ont été observées en compression parmi les huit éprouvettes. Les déformées sont définies comme suit :

- Déformée 1 : flambement unilatéral ;
- Déformée 2 : déversement latéral ;
- Déformée 3 : flambement symétrique des deux ailes.

La Figure 5.1 présente l'évolution typique de ces trois cas de déformée à trois moments de la courbe force-déplacement: à 50 % du premier maximum, au premier maximum et à un déplacement de 3 mm de la traverse.

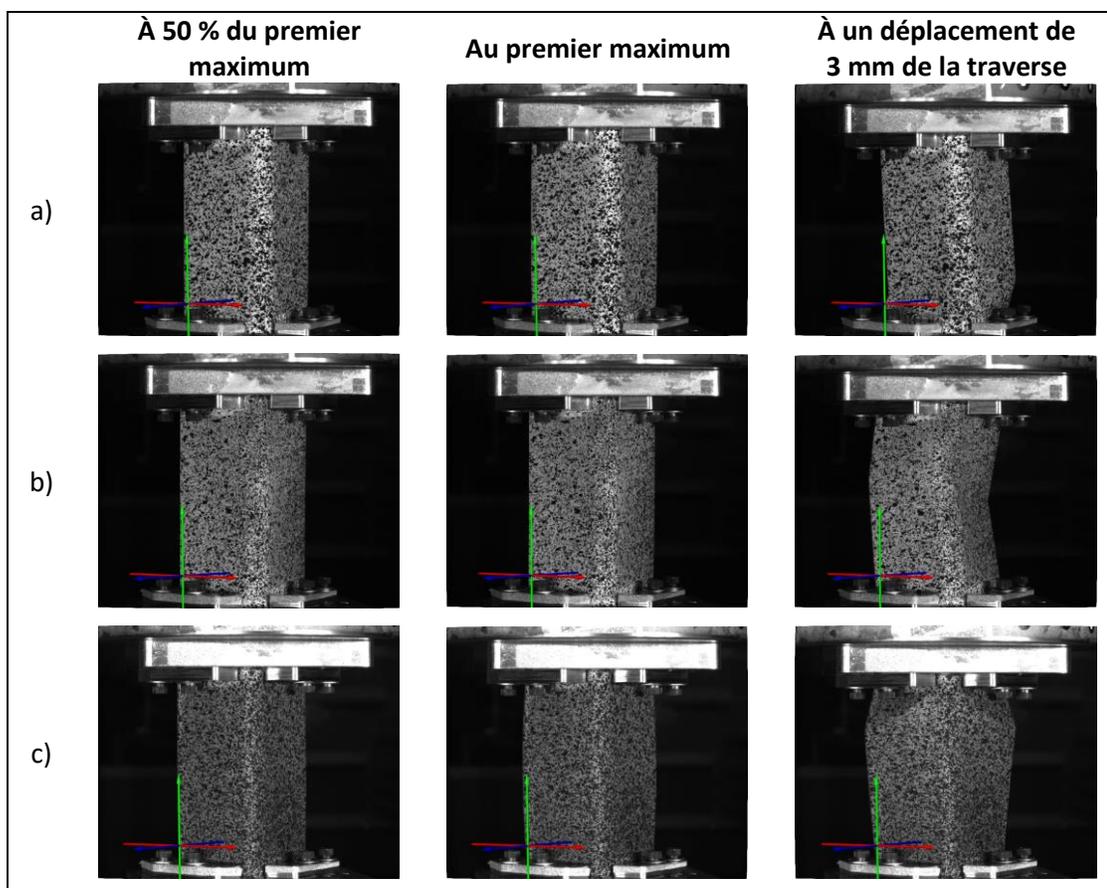


Figure 5.1 Évolution des différentes déformées en compression : a) déformée 1 (éprouvette #1), b) déformée 2 (éprouvette #7) et c) déformée 3 (éprouvette #6).

Le Tableau 5.1 présente l'épaisseur, l'angle entre les deux ailes et le type de déformée observé pour chacune des éprouvettes.

Tableau 5.1 Déformée, épaisseur et angle des éprouvettes évaluées en compression avec la méthode de CIN.

#	Méthode de pliage	Étiquette	Épaisseur (mm)	Angle (°)	Déformée
1			3,66	75,4	1
2			3,58	76,6	2
3	MF2.0	REF	3,66	76,6	1
4			3,69	75,1	2
5			3,66	76,0	2
6			3,77	87,8	3
7	MF4.0	LDR	3,72	85,0	2
8			3,73	85,2	2

La déformée 2 a été la plus fréquemment observée à un déplacement de 3 mm de la traverse. La déformée 1 n'est survenue que parmi deux éprouvettes REF et la déformée 3 a seulement été observée sur une éprouvette LDR.

Dans un premier temps, les déformées des éprouvettes ont été évaluées par rapport à leur courbe force-déplacement respective. Les courbes obtenues par la machine d'essai MTS Insight 100 SL sont présentées à la Figure 5.2.

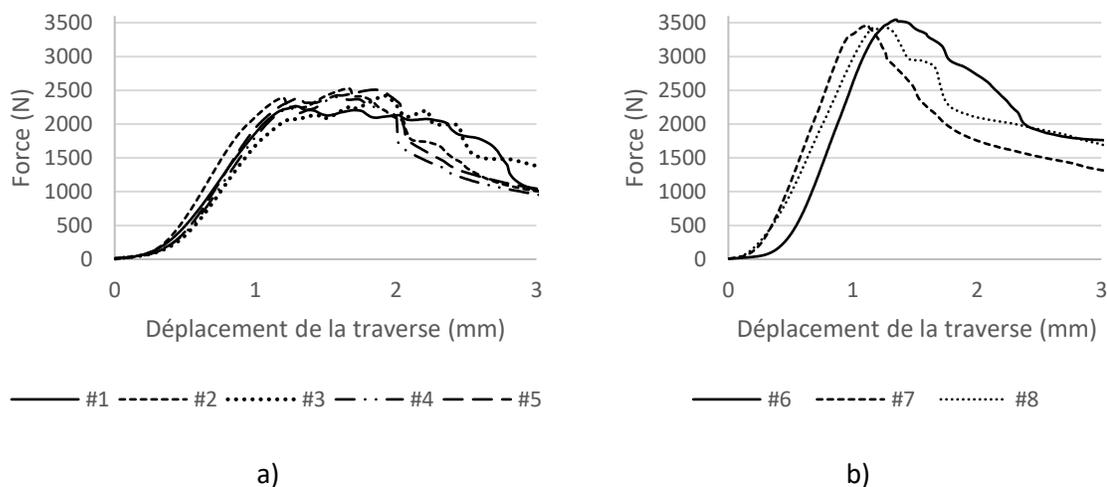


Figure 5.2 Courbes force-déplacement des éprouvettes évaluées en compression avec CIN : a) REF et b) LDR.

Les types de déformée n'est associé à aucun effet distinct sur le comportement global de la courbe force-déplacement et sur le premier maximum pour les deux échantillons d'éprouvettes.

Dans un second temps, la résistance en compression ainsi que la raideur des éprouvettes ont été calculées à partir des courbes force-déplacement afin de vérifier s'il existe une corrélation entre ces deux propriétés mécaniques et le type de déformée. La raideur correspond à la force nécessaire à la machine d'essai MTS pour déplacer de 1 mm la traverse dans le domaine élastique. Celle-ci a été obtenue en faisant une régression linéaire sur la portion linéaire de la courbe force-déplacement où la pente, correspondant à la raideur, a été isolée. Entre 25 et 40 points ont été utilisés pour calculer la raideur. La résistance en compression a été calculée suivant la formule 4.4 présentée à la section 4.2.3. La raideur et la résistance en compression des éprouvettes sont présentées au Tableau 5.2. Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

Tableau 5.2 Résistance et raideur des éprouvettes évaluées en compression avec CIN.

#	Méthode de pliage	Étiquette	Résistance (MPa)	Raideur (N/mm)	Déformée	Résistance moyenne (MPa)	Raideur moyenne (N/mm)
1			6,29	2952,3	1		
2			6,77	3482,4	2		
3	MF2.0	REF	6,72	2937,8	1	6,61	3148,8
4			6,62	3055,5	2	(0,19)	(240,4)
5			6,65	3316,4	2		
6			10,42	4936,3	3		
7	MF4.0	LDR	10,30	4868,4	2	10,30	4623,6
8			10,19	4066,1	2	(0,12)	(484,0)

On peut soulever ici que la résistance en compression obtenue pour l'échantillon LDR évalué avec CIN est similaire à celle de l'échantillon LDR présenté au CHAPITRE 4, soit  $10,30 \pm 0,12$  MPa et  $10,31 \pm 1,91$  MPa. Ces deux échantillons de même construction ont été fabriqués à environ dix mois d'intervalles. Toutefois, l'analyse de la répétabilité des résultats n'a pas été étudiée plus en profondeur.

Pour une même déformée, on obtient des résultats très différents pour des éprouvettes d'un même échantillon. À titre d'exemple, la raideur de l'éprouvette LDR #7 est 20 % supérieure à celle de l'éprouvette LDR #8 alors qu'elles présentent toutes deux la même déformée. Pour les deux générations de cornières, la déformée n'est pas associée à une tendance claire sur la résistance et la raideur en compression.

Ensuite, les déplacements résultants dans le domaine élastique jusqu'au premier maximum de la courbe force-déplacement ont été analysés dans le but de comprendre comment évoluent les déplacements avec l'augmentation du chargement. Afin de simplifier la présentation des résultats, le cas de l'éprouvette MF4.0 LDR #7 est présenté, puis l'analyse des résultats est faite en considérant toutes les éprouvettes. La Figure 5.3 présente le champ de déplacement résultant de l'éprouvette #7 à deux moments de la courbe force-déplacement : à 50 % du premier maximum et au premier maximum.

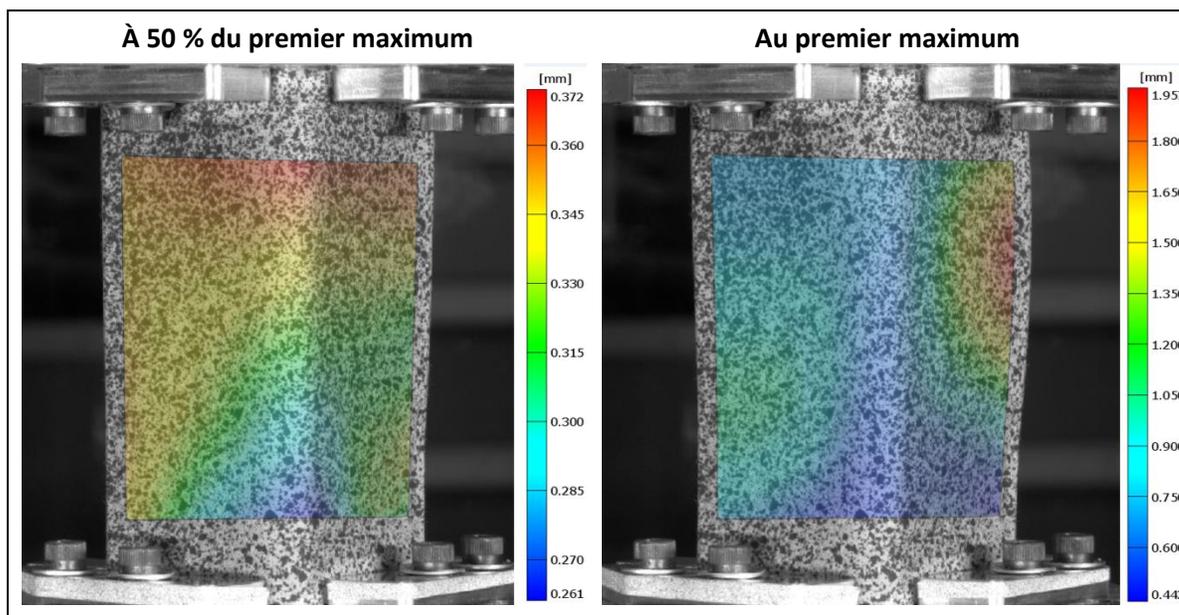


Figure 5.3 Évolution du champ des déplacements résultants de l'éprouvette #7.

Sur la surface étudiée, les résultats ne montrent pas une distribution uniforme du champ de déplacement résultant à 50 % du premier maximum ni une distribution symétrique au premier maximum. Ces résultats sont représentatifs de toutes les éprouvettes évaluées. L'une des raisons principales expliquant la distribution non uniforme des déplacements à 50 % du premier maximum peut être attribuée à une distribution non uniforme de la charge due à un défaut de parallélisme des deux plateaux du montage et/ou des extrémités de l'éprouvette. Au premier maximum, les déplacements sont plus faibles le long du sommet de l'éprouvette. Ceci peut être expliqué par l'initiation de l'instabilité des ailes.

L'évolution des déplacements résultants a ensuite été observée en trois points, nommés respectivement Aile 1, Centre et Aile 2, toujours pour l'éprouvette #7. Ces points ont été positionnés verticalement au milieu des éprouvettes comme illustré à la Figure 5.4.

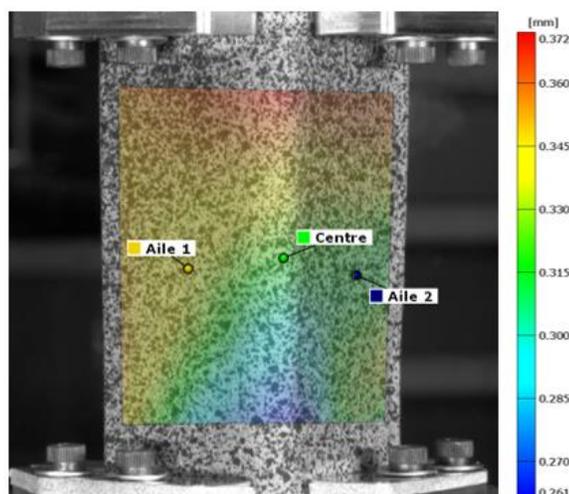


Figure 5.4 Localisation des points Aile 1, Aile 2 et Centre sur la surface étudiée de l'éprouvette #7.

La Figure 5.5 présente l'évolution des déplacements résultants des trois points en fonction de la force. La portion étudiée se limite entre le début du domaine élastique et le premier maximum. Le domaine élastique a été identifié par la portion linéaire de la courbe force-déplacement.

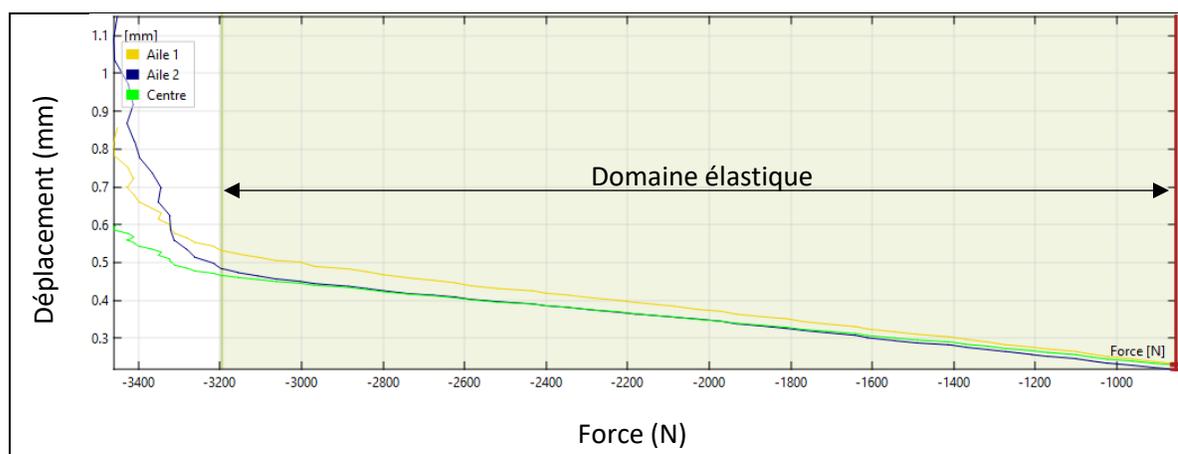


Figure 5.5 Évolution du déplacement résultant entre le début des déformations élastiques et le premier maximum de l'éprouvette #7

Pour tous les points observés, les déplacements résultants progressent de façon linéaire dans le domaine élastique. Cette observation s'applique peu importe le type de déformée observé pour l'éprouvette. Une fois le domaine élastique terminé, l'éprouvette entre dans le domaine inélastique et on observe un changement du taux de déplacement drastique pour tous les points.

## 5.2. Étude des déformations et évaluation du module d'élasticité en compression

Pour l'analyse des déformations longitudinales en compression, le champ de déformation a d'abord été observé dans le domaine élastique. À titre d'exemple, le champ de déformation longitudinale ( $\varepsilon_{yy}$ ) à 50 % du premier maximum est présenté à la Figure 5.6 pour l'éprouvette #7.

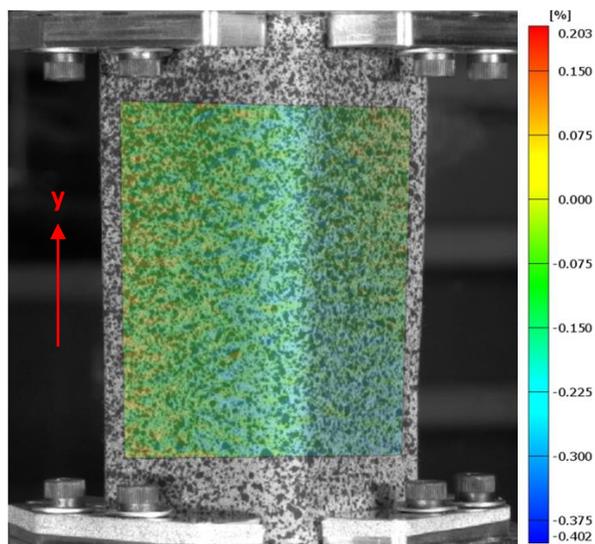


Figure 5.6 Champ de déformation longitudinale à 50 % du premier maximum de l'éprouvette #7.

Lors de l'observation du champ de déformation  $\varepsilon_{yy}$ , il a été constaté que les déformations dans le domaine élastique ne sont pas uniformes sur la surface étudiée, et ce pour toutes les éprouvettes. Des déformations plus importantes ont été observées le long du sommet des éprouvettes. Comme pour le champ de déplacement non uniforme, cela peut être attribué à un défaut de parallélisme des deux plateaux du montage et/ou des extrémités des éprouvettes.

Afin d'évaluer la variabilité des résultats, les déformations longitudinales ont été observées sur plusieurs points distribués le long d'une courbe positionnée sur le sommet des éprouvettes. La Figure 5.7 présente la position de cette courbe, d'une longueur approximative de 58 mm, sur l'éprouvette #7 et les valeurs de  $\varepsilon_{yy}$  en fonction de la position à 50 % du premier maximum.

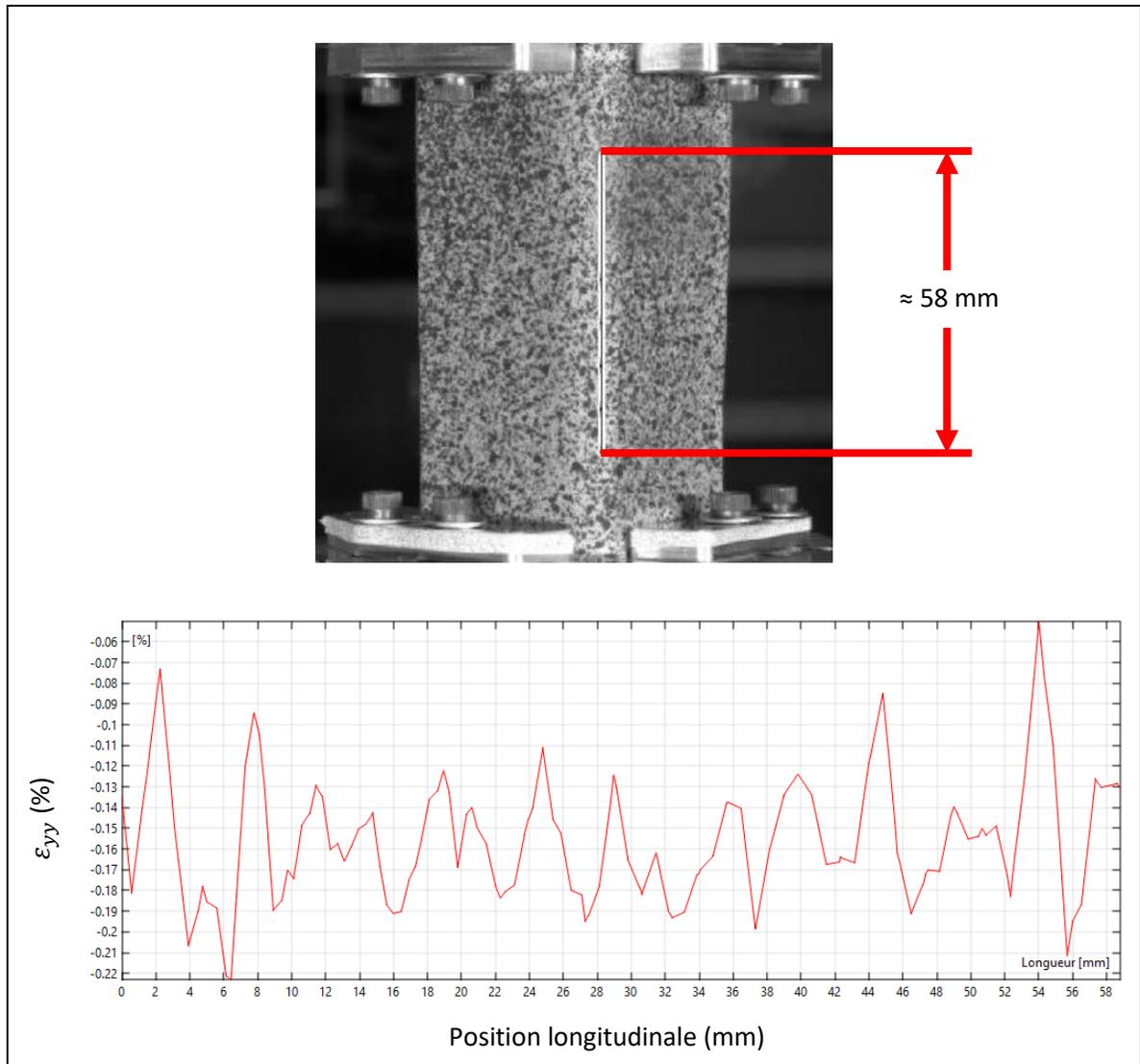


Figure 5.7 Déformation longitudinale le long du sommet de l'éprouvette #7 à 50 % du premier maximum.

Malgré la variabilité des déformations longitudinales le long du sommet, la dispersion des résultats est relativement stable autour d'une médiane, et ce pour toutes les éprouvettes. On souligne toutefois que la dispersion des résultats est plus importante près des appuis. Le Tableau 5.3 présente la déformation moyenne longitudinale des éprouvettes le long du centre à 50 % du premier maximum. L'écart-type est indiqué entre parenthèses. Ce tableau présente également le coefficient de variation, soit le rapport de l'écart-type sur la moyenne exprimé en pourcentage.

Tableau 5.3 Déformation longitudinale moyenne le long du centre des éprouvettes à 50 % du premier maximum.

#	Méthode de pliage	Étiquette	Déformation longitudinale moyenne (%)	Coefficient de variation (%)
1			- 0,109 (0,032)	29
2			- 0,121 (0,026)	21
3	MF2.0	REF	- 0,106 (0,033)	31
4			- 0,108 (0,026)	24
5			- 0,123 (0,036)	29
6			- 0,133 (0,039)	29
7	MF4.0	LDR	- 0,155 (0,030)	19
8			- 0,223 (0,031)	14

Puisque la dispersion des résultats se trouve près de la médiane, la déformation  $\varepsilon_{yy}$  moyenne de la zone étudiée a été calculée par GOM Correlate en chaque instant de l'essai afin d'évaluer le module d'élasticité  $E$ . Les contraintes aux mêmes instants ont été calculées en divisant la force mesurée par l'aire de la section de l'éprouvette en posant pour hypothèse que l'aire de la section est constante. La force utilisée dans ce calcul est celle calculée à partir du signal en volt envoyé de la cellule de charge vers le système ARAMIS.

La courbe contrainte-déformation a ensuite été tracée pour le domaine élastique. Une régression linéaire a été faite afin d'obtenir la pente qui relie les contraintes aux déformations et qui correspond au module d'élasticité  $E$  en utilisant entre 15 et 25 points. Le module d'élasticité  $E$  moyen des deux échantillons à un conditionnement sec est présenté au Tableau 5.4. L'écart-type est indiqué entre parenthèses.

Tableau 5.4 Module d'élasticité  $E$  en compression des éprouvettes évaluées avec la méthode de CIN.

Étiquette	$E$ (GPa)
REF	3,14 (0,25)
LDR	4,32 (0,74)

En moyenne, le module d'élasticité moyen de LDR est environ 35 % plus élevé que celui de REF, mais avec un écart-type jusqu'à près de trois fois supérieur. Les éprouvettes MF4.0 (LDR) sont donc plus rigides en moyenne que les éprouvettes MF2.0 (REF), mais les résultats ne semblent pas montrer que leur module sont significativement différents.

### 5.3. Discussion

Il est raisonnable de penser que l'angle entre deux ailes et l'épaisseur ont une influence sur la déformée après flambage puisque ces paramètres influencent directement l'inertie de l'éprouvette. En théorie, une éprouvette de section quelconque devrait se déformer dans la direction où l'inertie de section est la plus faible. Or, toutes les éprouvettes étudiées se sont déformées dans la direction où l'inertie de section est la plus élevée, à l'exception de l'éprouvette #6. Les déformés observés laissent plutôt à penser que les éprouvettes se déforment en fonction de l'inertie individuelle des ailes. Dans un tel cas, les ailes se déforment effectivement dans l'une des deux directions perpendiculaires à leur plan de surface où leur inertie respectivement est la plus faible. Toutefois, la direction vers laquelle une aile se déforme (direction perpendiculaire positive ou négative au plan) n'est pas constante. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ce constat, dont on peut citer par exemple :

- Un défaut de parallélisme entre les deux extrémités d'une éprouvette et/ou des deux plateaux du montage de compression ;
- Un défaut de fabrication dans l'éprouvette ;
- Un serrage inégal entre les dispositifs de fixation des extrémités d'une éprouvette ;
- Les degrés de liberté permis par le montage.

Ces facteurs pourraient être à l'origine de distribution non uniforme de la charge et de concentration de contraintes dans l'éprouvette. On obtient ainsi des déformées imprévisibles et un champ de déformation non uniforme. Malheureusement, dû au faible nombre d'éprouvettes étudiées avec la méthode de CIN, il n'est pas possible de conclure sur un type de déformée global dans le contexte du montage de compression utilisé.

Les résultats les plus importants de ces essais sont les modules d'élasticité obtenus pour les deux échantillons où les MF4.0 (LDR) sont plus rigides en moyenne que les MF2.0 (REF). Ceci peut être expliqué par la quantité d'adhésif plus élevée utilisée lors de la fabrication des éprouvettes LDR qui contribue à augmenter leur rigidité. Toutefois, un plus grand nombre d'essais devrait être effectué afin de vérifier si la différence est significative. Roman et coll. [49] ont évalués l'effet du dosage d'adhésif sur les résultats d'essais de compression sur les bords de cartons corrugués. Ils ont conclu que l'augmentation du dosage d'adhésif augmente la résistance et la rigidité du carton corrugué.

Comme expliqué à la section 4.4.4, il est imprudent de conclure que la nouvelle génération de cornières possède de meilleures propriétés mécaniques que la génération actuelle. Leur méthode de fabrication respective diffère grandement. Le procédé de fabrication manuel des éprouvettes LDR comporte possiblement plus de facteurs incontrôlés que le procédé industriel servant à fabriquer les éprouvettes REF. Ceci pourrait expliquer le plus grand écart-type sur le module d'élasticité moyen de l'échantillon LDR. L'effet de la tension du papier, de la vitesse de production et du dosage d'adhésif n'ont pas été étudiés. La contribution de ces paramètres de production sur les propriétés mécaniques des cornières en compression est inconnue. Il est donc préférable de conclure que cette nouvelle génération de cornière peut offrir des propriétés mécaniques au moins aussi intéressantes que celles de la génération actuelle.

#### 5.4. Conclusion

Les deux générations de cornière ont été analysées en compression avec la méthode de corrélation d'image numérique à un conditionnement sec. L'objectif de ces essais était d'évaluer les modes de défaillance et d'évaluer le module d'élasticité en compression des deux générations de cornières.

Les modes de défaillance se sont traduits par trois déformées différentes. Toutefois, aucune corrélation significative entre le comportement élastique, la résistance en compression et les déformées n'a été observée pour les deux générations de cornières. De plus, les résultats ne permettent pas de conclure si les deux générations de cornières ont un mécanisme de défaillance distinct.

L'analyse des déformations longitudinales a permis de déterminer que le module d'élasticité en compression est plus élevé en moyenne pour les cornières de nouvelle génération, sans toutefois être significatif.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer l'effet du type de papier, du type d'adhésif et de l'humidité sur les propriétés mécaniques (résistance et énergie absorbée) en compression et en flexion d'une nouvelle génération de cornières en carton et de comparer leurs performances à celles des cornières de génération actuelle. Cet objectif de recherche s'inscrit dans un contexte où l'industrie des pâtes et papiers fait face à des difficultés d'approvisionnement de matières premières et où les coûts de fabrication et de transport sont en constante augmentation. L'amélioration des propriétés mécaniques de cette nouvelle génération de cornières par une meilleure sélection des matières premières peut permettre sur le long terme de faire des économies substantielles.

Afin de réaliser cet objectif, trois types de papier et quatre adhésifs de type acétate de polyvinyle ont préalablement été sélectionnés pour la fabrication des cornières utilisant une nouvelle méthode de pliage brevetée par Abzac Canada s'inscrivant dans la gamme Multifold®. Cette nouvelle méthode de pliage a la particularité de n'utiliser qu'un seul type de papier pour la fabrication d'une cornière. La méthode de pliage actuelle, également brevetée par Abzac Canada, nécessite deux types de papiers.

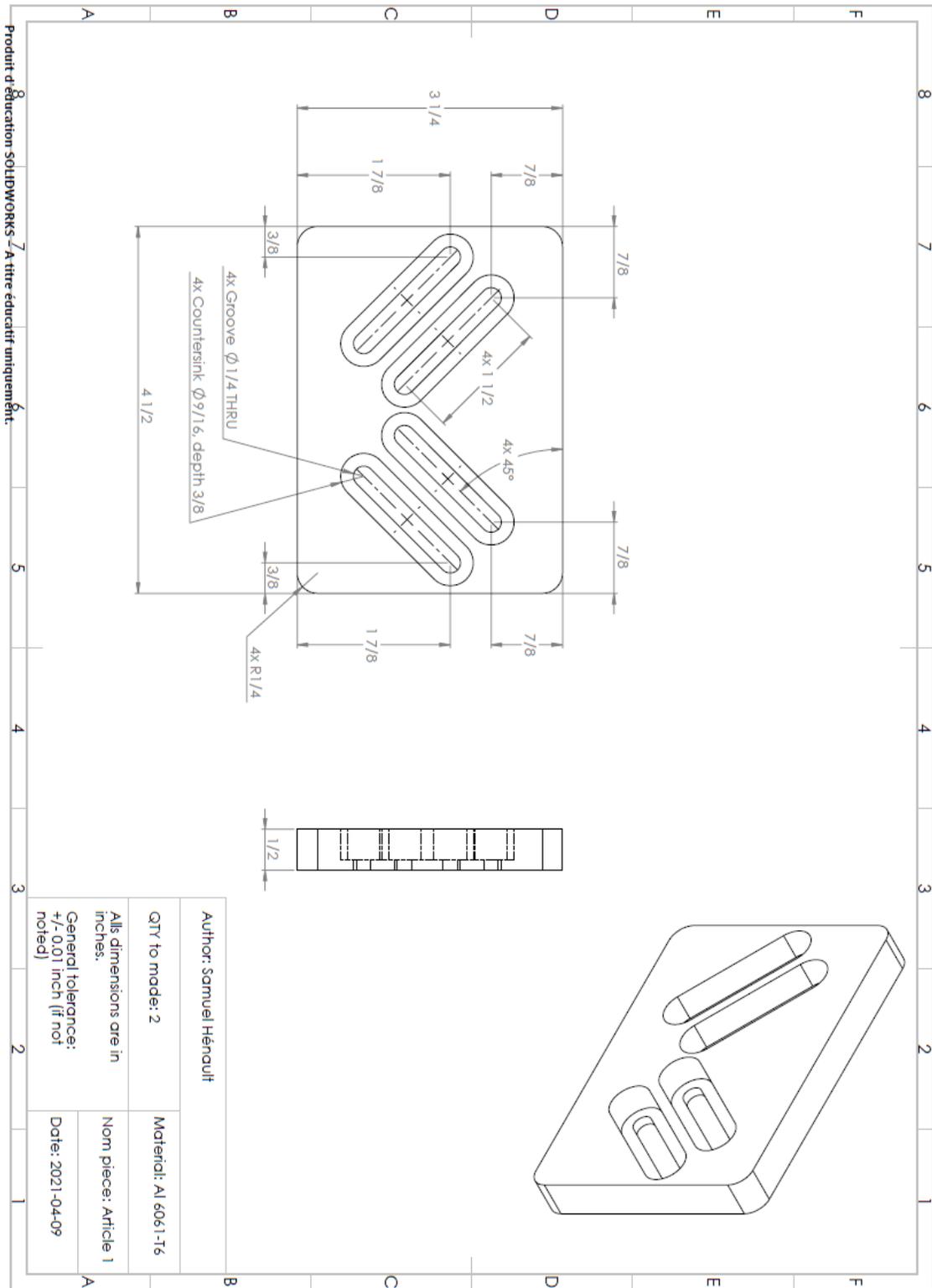
Plusieurs cornières ont été fabriquées manuellement suivant la nouvelle méthode de pliage par une combinaison d'un papier et d'un adhésif parmi ceux qui ont été sélectionnés. Des cornières de génération actuelle ont été fabriquées suivant un procédé industriel en continu. Les deux générations de cornières ont ensuite été évaluées par des essais de compression et de flexion trois-points à un conditionnement sec ( $6 \pm 0,5 \%$ ) et humide ( $10 \pm 0,5 \%$ ). La méthodologie de conditionnement ainsi que celle des essais mécaniques ont été développées spécifiquement pour ce projet de recherche. De plus, des essais supplémentaires de compression à un conditionnement sec ont été menés avec la méthode de corrélation d'image numérique afin d'étudier les modes de défaillance des deux générations de cornières.

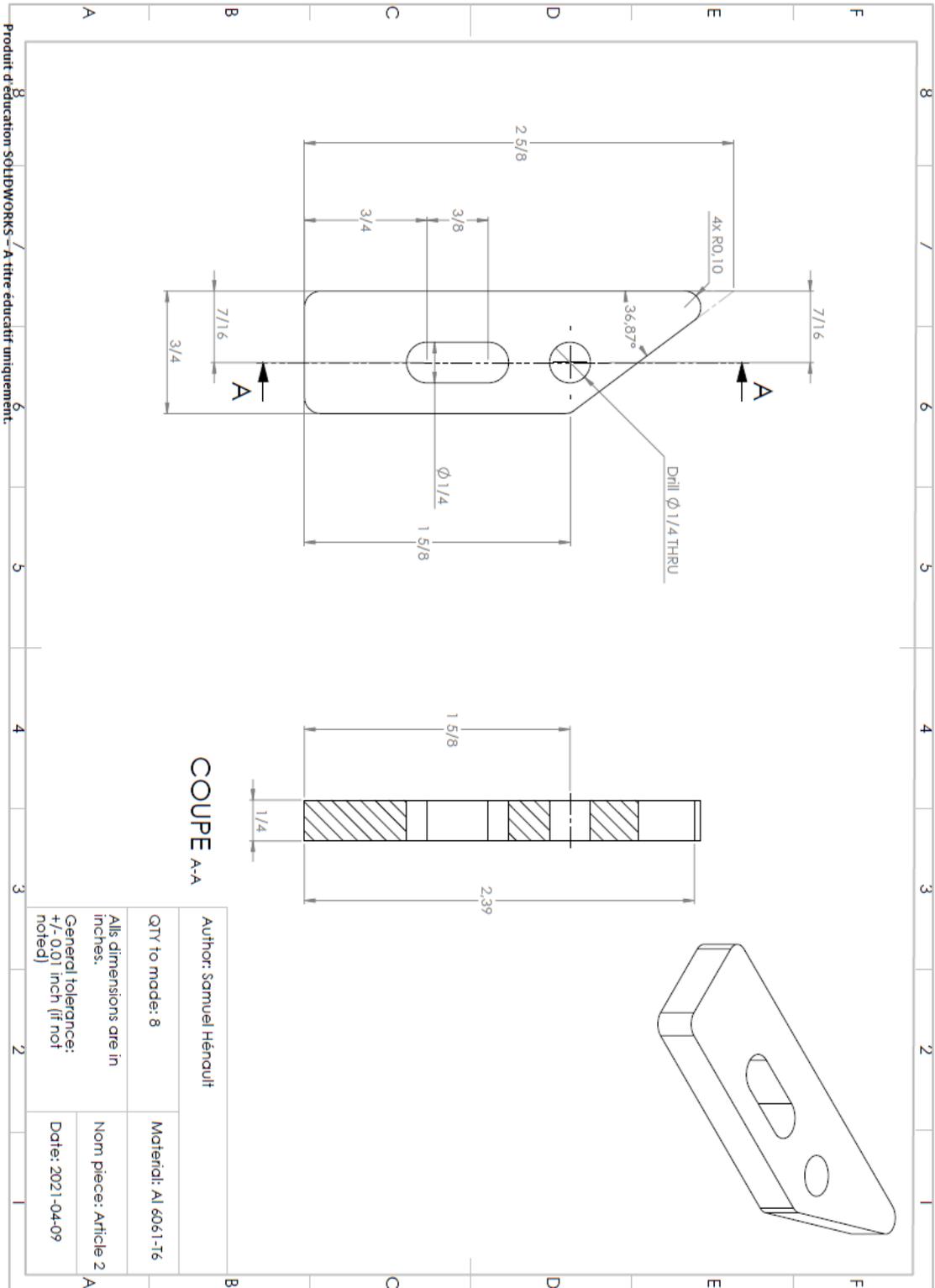
Les conclusions les plus importantes sont les suivantes :

- Parmi les papiers étudiés, le type de papier semble avoir peu ou pas d'effet significatif sur les propriétés mécaniques en compression et en flexion des cornières de nouvelle génération, et ce à un conditionnement sec et humide ;
- Le type d'adhésif et le taux d'humidité sont les principaux facteurs affectant les performances mécaniques des cornières ;
- Il a été observé que, parmi les adhésifs étudiés, l'augmentation du taux de solides contenu dans l'adhésif contribue à réduire de manière importante les performances mécaniques des cornières de nouvelle génération et à augmenter leur masse ;
- Trois modes de défaillance ont été observés en compression, mais aucun d'eux n'est associé à un effet apparent sur les propriétés mécaniques en compression des deux générations de cornières ;
- Dépendamment de la combinaison de papier et d'adhésif, les cornières de nouvelle génération peuvent offrir des performances mécaniques en compression et en flexion au moins aussi bonnes que celles des cornières de génération actuelle pour des dimensions comparables.

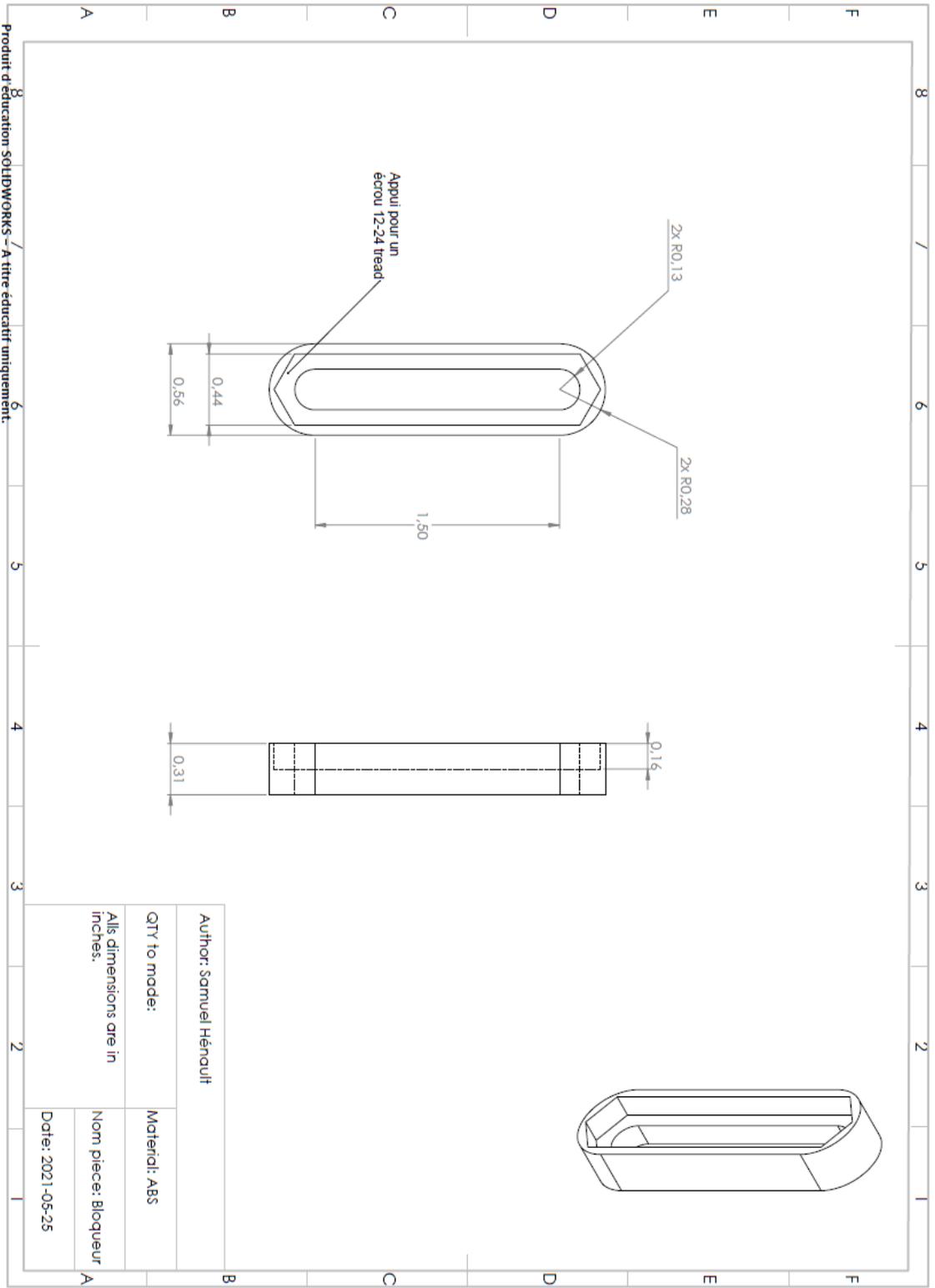
Ce projet a permis de répondre de manière satisfaisante aux objectifs de recherche, mais plusieurs questions demeurent. D'abord, les effets du dosage d'adhésif, de la tension du papier ainsi que de la vitesse de production sur les propriétés mécaniques des deux générations de cornières sont inconnus. Ensuite, les cornières de nouvelle génération et les actuelles ont été respectivement fabriquées par un procédé manuel et un procédé automatisé, deux procédés très différents. Il est donc difficile de déterminer la contribution respective de la méthode de pliage et des paramètres de production sur les propriétés mécaniques des cornières. Des essais supplémentaires devraient donc être réalisés sur des cornières de chaque génération fabriquée exclusivement par un procédé automatisé. Ces essais pourraient permettre de mieux comprendre l'apport de la méthode de pliage et des paramètres de production sur les propriétés mécaniques des cornières. Par le fait même, ces essais pourraient aider à déterminer les paramètres de production optimaux.

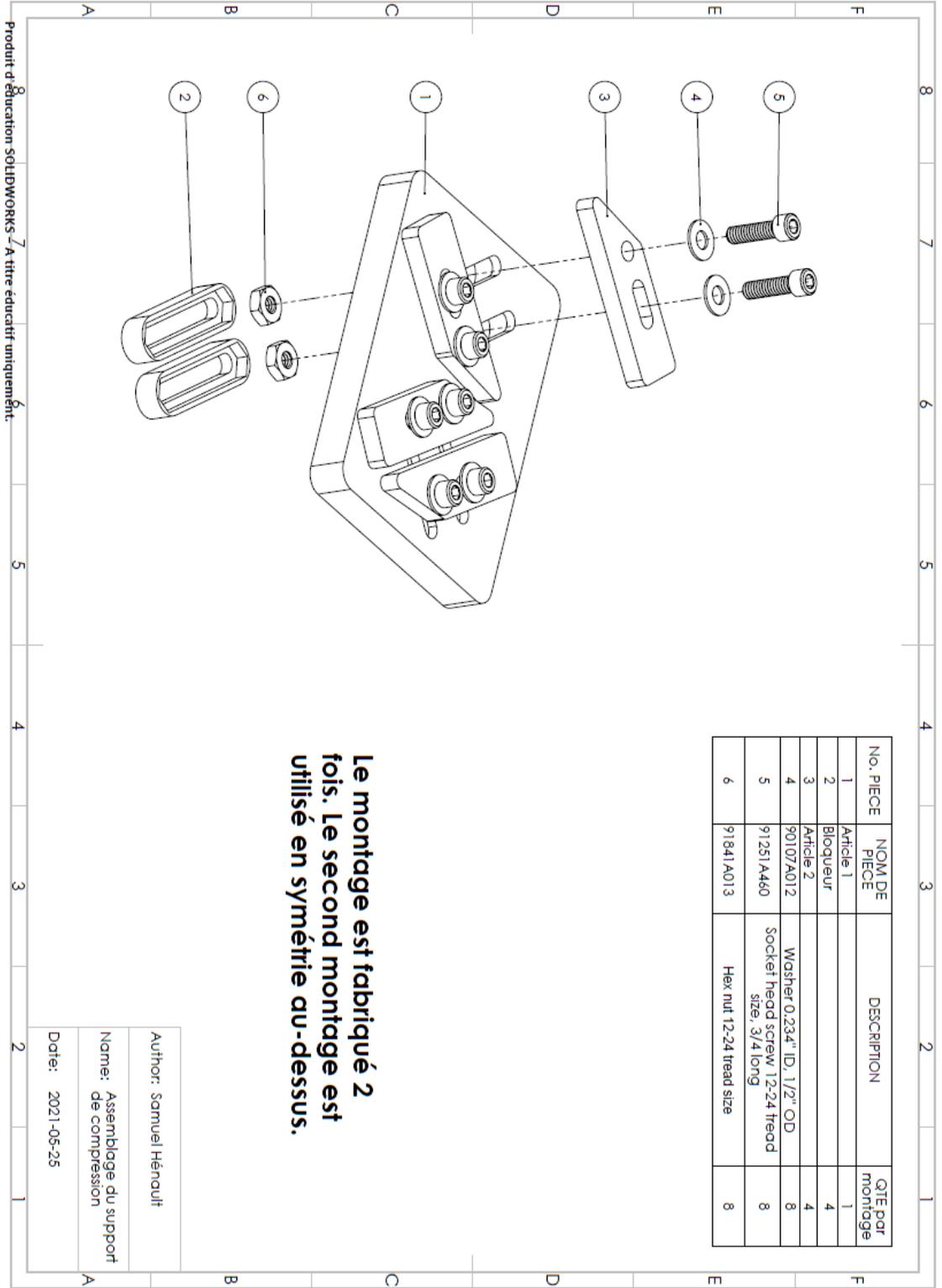
# ANNEXE I MISES EN PLAN





Produit d'éducation SOLIDWORKS - A titre éducatif uniquement.

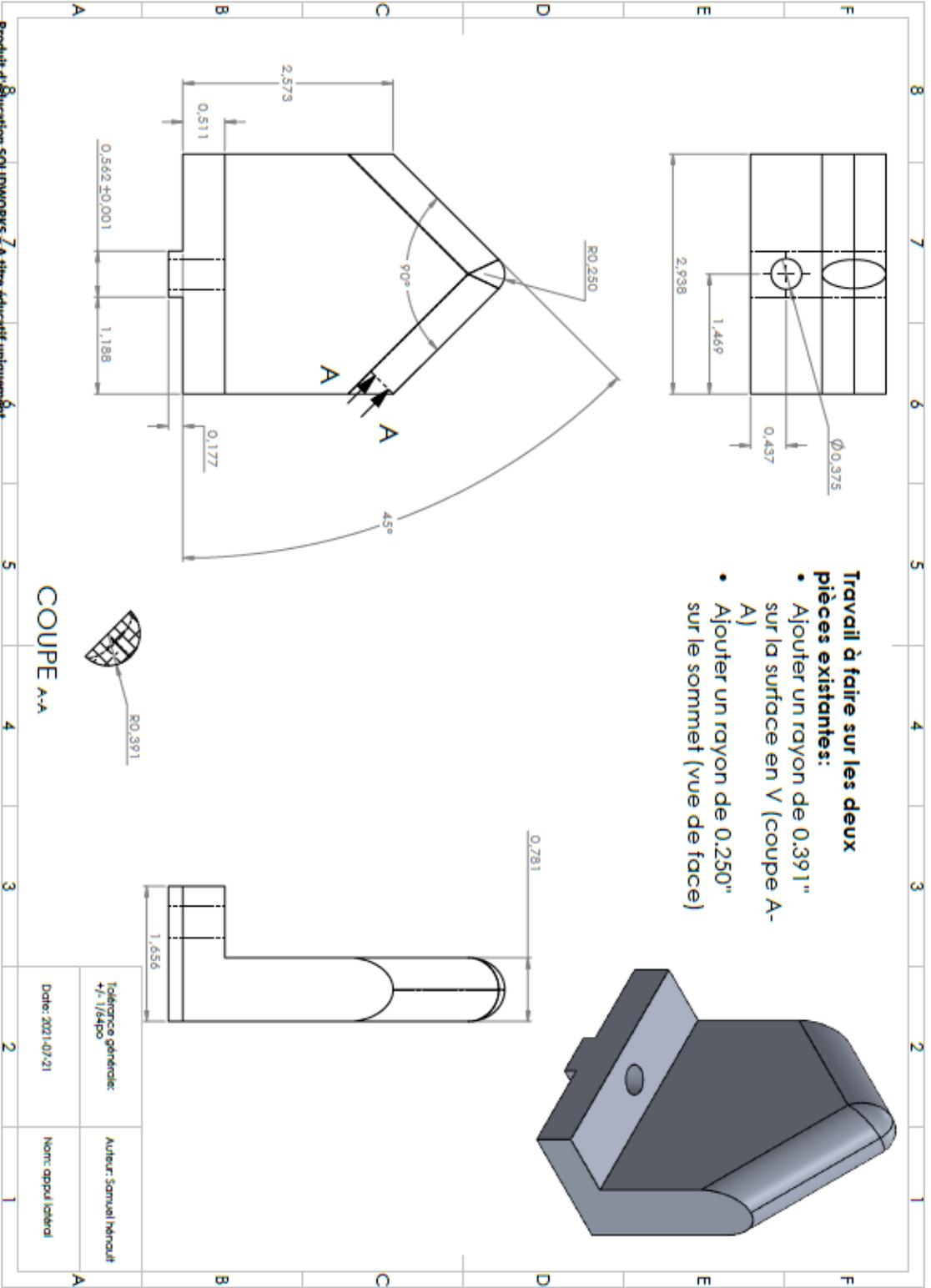


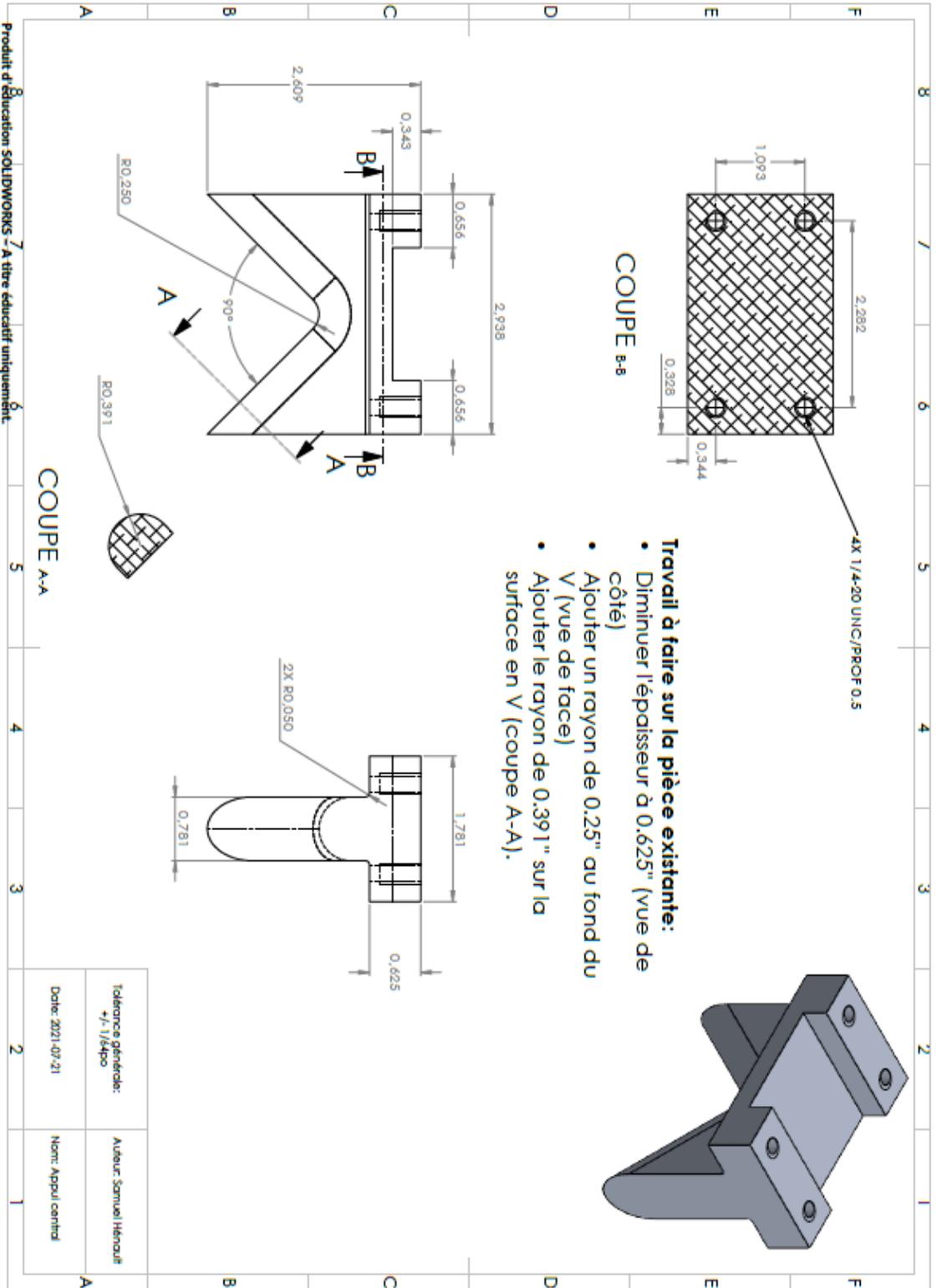


No. PIECE	NOM DE PIECE	DESCRIPTION	QTE par montage
1	Article 1		1
2	Bloqueur		4
3	Article 2		4
4	90107A012	Washer 0.234" ID, 1/2" OD	8
5	912S1A460	Socket head screw 12-24 thread size, 3/4 long	8
6	91841A013	Hex nut 12-24 thread size	8

**Le montage est fabriqué 2 fois. Le second montage est utilisé en symétrie au-dessus.**

Author: samuel Hénault  
 Name: Assemblage du support de compression  
 Date: 2021-05-25





## ANNEXE II AUTRES RÉSULTATS

Cette section présente les taux massiques d'humidité moyens ainsi que les forces maximales moyennes mesurées pour les échantillons évalués en compression et en flexion trois-points à un conditionnement sec et humide. Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

Tableau I.1 Taux massique d'humidité des échantillons évalués en compression et en flexion trois-points.

Étiquette	Essai de compression		Essai de flexion trois-points	
	TMH sec (%)	TMH humide (%)	TMH sec (%)	TMH humide (%)
REF	5,90 (0,26)	9,83 (0,21)	5,82 (0,08)	9,86 (0,19)
BDR	5,97 (0,23)	9,80 (0,10)	6,40 (0,10)	9,70 (0,10)
LDR	5,57 (0,12)	9,77 (0,31)	5,97 (0,06)	9,60 (0,10)
MDR	5,90 (0,46)	9,87 (0,06)	5,83 (0,32)	9,93 (0,25)
BD1	6,10 (0,30)	9,93 (0,15)	6,23 (0,25)	9,83 (0,23)
LD1	5,93 (0,29)	9,77 (0,06)	5,90 (0,40)	9,70 (0,10)
BD2	5,80 (0,10)	9,77 (0,15)	5,93 (0,35)	9,83 (0,06)
LD2	5,70 (0,44)	9,67 (0,06)	6,23 (0,21)	9,60 (0,10)
BHE	5,80 (0,26)	10,17 (0,06)	6,03 (0,35)	10,23 (0,15)
LHE	5,73 (0,15)	10,27 (0,12)	6,03 (0,06)	10,17 (0,23)

Tableau I.2 Taux massique d'humidité pour l'évaluation de la masse sèche et humide des échantillons.

Étiquette	Essai de compression		Essai de flexion trois-points	
	TMH sec (%)	TMH humide (%)	TMH sec (%)	TMH humide (%)
REF	6,33 (0,09)	10,03 (0,20)	6,31 (0,81)	10,01 (0,26)
BDR	6,25 (0,19)	9,95 (0,08)	6,32 (0,04)	9,98 (0,08)
LDR	6,27 (0,14)	10,28 (0,24)	6,25 (0,08)	10,30 (0,13)
MDR	6,28 (0,22)	10,32 (0,08)	6,40 (0,00)	10,30 (0,10)
BD1	6,13 (0,23)	9,57 (0,08)	6,17 (0,15)	9,57 (0,10)
LD1	6,16 (0,19)	9,74 (0,09)	6,10 (0,08)	9,85 (0,17)
BD2	6,05 (0,19)	9,70 (0,30)	5,93 (0,05)	10,32 (0,17)
LD2	6,25 (0,23)	9,75 (0,05)	6,33 (0,20)	9,77 (0,10)
BHE	6,08 (0,18)	9,78 (0,10)	6,17 (0,23)	9,88 (0,08)
LHE	6,15 (0,14)	9,82 (0,10)	6,25 (0,18)	10,10 (0,14)

Tableau I.3 Forces maximales pour les essais de compression et de flexion trois-points des échantillons secs et humides.

Étiquette	Essai de compression		Essai de flexion trois-points	
	$F_{max,c}$ sèche (N)	$F_{max,c}$ humide (N)	$F_{max,f}$ sèche (N)	$F_{max,f}$ humide (N)
REF	2192,46 (263,16)	1479,93 (101,36)	409,39 (29,93)	287,65 (22,87)
BDR	4492,97 (220,36)	2559,60 (58,20)	735,04 (13,28)	493,86 (5,48)
LDR	3494,07 (617,91)	2711,50 (133,48)	624,23 (10,05)	448,50 (19,57)
MDR	4024,27 (134,78)	2497,03 (173,78)	641,75 (13,67)	443,23 (2,05)
BD1	2091,40 (133,09)	1401,80 (16,48)	392,68 (22,85)	280,40 (8,55)
LD1	1974,33 (135,40)	1330,50 (23,46)	306,03 (4,20)	218,02 (2,65)
BD2	2550,30 (100,75)	1503,77 (45,64)	454,99 (39,27)	330,25 (0,53)
LD2	2105,10 (46,48)	1360,53 (49,67)	376,12 (7,16)	237,48 (1,08)
BHE	4002,50 (61,87)	1518,77 (38,71)	649,60 (31,00)	337,74 (8,03)
LHE	3393,53 (83,25)	1355,67 (93,44)	533,43 (2,68)	264,10 (12,44)

## ANNEXE III PROGRAMME MATLAB

Le programme Matlab a été créé dans le but de calculer le travail élastique et inélastique transmis par la machine d'essai lors d'un chargement en compression ou en flexion à partir d'une courbe force-déplacement. L'utilisation de ce programme requiert trois intrants :

- ratio : Paramètre utilisé pour ignorer le début des courbes force-déplacement qui correspond à la reprise des jeux du montage. Ce paramètre a été fixé à 0,10 (10 %) et 0,25 (25 %) pour les essais de compression et de flexion respectivement ;
- dep : Paramètre utilisé pour délimiter le déplacement total considéré dans le calcul. Ce paramètre a été fixé à 8 mm et 15 mm pour les essais de compression et de flexion respectivement ;
- donnees : Données de la courbe force-déplacement au format .txt. Le fichier doit être divisé en trois colonnes. Les données de la première colonne ne sont pas utilisées dans ce programme. La deuxième colonne doit comporter les données relatives à la force mesurée. La troisième colonne doit comporter les données relatives aux déplacements mesurés. Les valeurs de force et de déplacement doivent être fournies en valeur absolue.

Le programme Matlab est le suivant :

```
%ratio de départ (%) et déplacement total (mm)
ratio=0.25;
dep=15;

%copie des données de force et de déplacement
donnees= Nom_fichier;
deplacement = donnees(:,3);
force = donnees(:,2);

%Détermination de l'index du premier 'Fmax' et de 'ratio*Fmax'
A=size(force);
for j=10:10:A
    mean1=mean(force(j:j+9));
    mean2=mean(force(j+10:j+19));
    mean3=mean(force(j+20:j+29));
    mean4=mean(force(j+30:j+39));
    if mean1>mean2 && mean1>mean3 && mean1>mean4
        max_force=max(force(j:j+9))
        index_max_force=find(force(:)==max_force,1);
        depart=ratio*max_force;
        index_depart=find(force(:)>=depart,1);
        break
    end
end
```

```

    end
end

%Détermination du point où le déplacement atteint 'dep' mm à partir de
%'depart'
fin=deplacement(index_depart,1)+dep;
index_fin=find(deplacement(:,1)>=fin,1);

%Calcul du travail élastique
travail_totale_elastique=0;
travail_elastique=0;
for i=index_depart:index_max_force-1
    travail_elastique=force(i)*abs(deplacement(1+i)-deplacement(i));
    travail_totale_elastique = travail_totale_elastique + travail_elastique ;
end

%Calcul du travail inélastique
travail_totale_inelastique=0;
travail_inelastique=0;
for i=index_max_force:index_fin-1
    travail_inelastique=force(i)*abs(deplacement(1+i)-deplacement(i));
    travail_totale_inelastique = travail_totale_inelastique +
travail_inelastique ;
end

%Affichage graph
plot(deplacement(:,1),force(:,1),'Color','k')
xlabel('Déplacement de la traverse (mm)')
ylabel('Force (N)')
hold on;
for i=index_depart:index_max_force
    rectangle('Position',[deplacement(i,1) 0 deplacement(i+1)-deplacement(i)
force(i,1)], 'EdgeColor','g')
end
for i=index_max_force:index_fin
    rectangle('Position',[deplacement(i,1) 0 deplacement(i+1)-deplacement(i)
force(i,1)], 'EdgeColor','r')
end
annotation('textbox', [0.65, 0.7, 0.1, 0.1], 'String', "Wélas = " +
round(travail_totale_elastique) + " mJ")
annotation('textbox', [0.65, 0.6, 0.1, 0.1], 'String', "Winé = " +
round(travail_totale_inelastique) + " mJ")
plot(deplacement(index_max_force,1),force(index_max_force,1),'o')
plot(deplacement(index_depart,1),force(index_depart,1),'o')
hold off

```

## ANNEXE IV MOMENT D'INERTIE

Les calculs utilisés pour déterminer le second moment d'inertie d'une section de cornière sont basés sur le manuel de résistance des matériaux de Bazergui et coll. [74].

La Figure I.1 présente une vue de section d'une cornière.

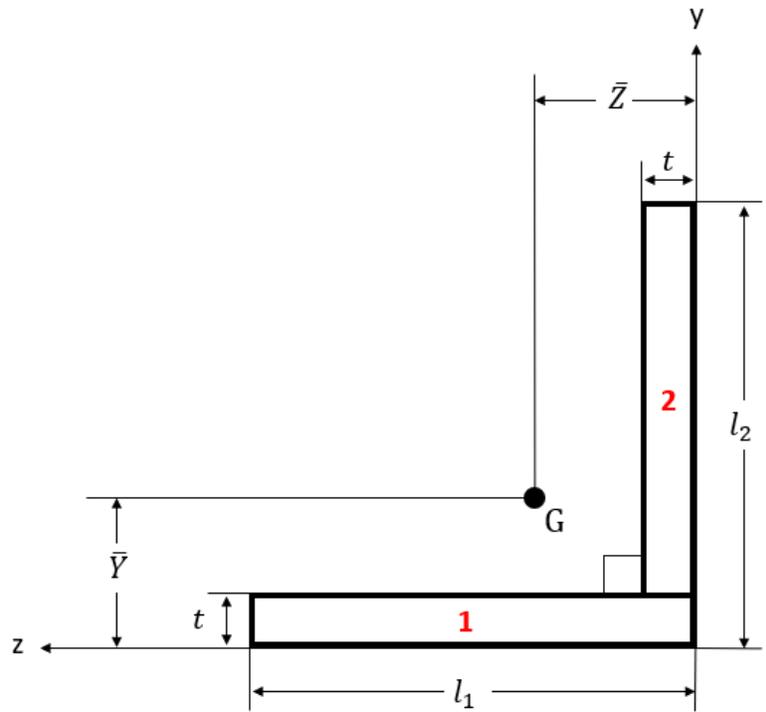


Figure III.1 Section d'une cornière.

Dans les calculs, l'angle entre les deux ailes est considéré à  $90^\circ$  et les rayons sont négligés. L'épaisseur  $t$  est considérée constante. Les longueurs  $l_1$  et  $l_2$  sont considérées égales. Le centroïde est identifié par  $G(\bar{Y}, \bar{Z})$ . La section est séparée en deux rectangles numérotés respectivement 1 et 2.

La longueur moyenne  $L$  des deux ailes est calculée selon la formule I.1.

$$L = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad \text{I.1}$$

L'épaisseur  $t$  est calculée selon la formule I.2. Il s'agit d'une moyenne des 18 mesures d'épaisseurs prises sur une éprouvette avant un essai mécanique.

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{18} t_i}{18} \quad \text{I.2}$$

Tableau III.1 Propriétés de section.

Rectangle	Aire	Coordonnées du centroïde		Moment d'inertie	
	$A_i$	$z_i$	$y_i$	$I_{z,i}$	$I_{y,i}$
1	$Lt$	$\frac{L}{2}$	$\frac{t}{2}$	$\frac{Lt^3}{12}$	$\frac{L^3t}{12}$
2	$Lt - t^2$	$\frac{t}{2}$	$\frac{L+t}{2}$	$\frac{t(L-t)^3}{12}$	$\frac{t^3(L-t)}{12}$

Le centroïde  $G(\bar{Z}, \bar{Y})$  de la section est calculé par les formules I.3 et I.4.

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^2 (A_i \cdot y_i)}{\sum_{i=1}^2 A_i} = \frac{Lt \cdot \frac{t}{2} + (Lt - t^2) \cdot \left(\frac{L+t}{2}\right)}{Lt + Lt - t^2} = \frac{L^2 + Lt - t^2}{4L - 2t} \quad \text{I.3}$$

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^2 (A_i \cdot z_i)}{\sum_{i=1}^2 A_i} = \frac{Lt \cdot \frac{L}{2} + (Lt - t^2) \cdot \frac{t}{2}}{Lt + Lt - t^2} = \frac{L^2 + Lt - t^2}{4L - 2t} \quad \text{I.4}$$

En raison de la géométrie, nous avons :

$$\bar{Y} = \bar{Z} \quad \text{I.5}$$

Les moments d'inertie de la section ( $I_z$  et  $I_y$ ) et le moment produit ( $I_{yz}$ ) sont calculés par les formules I.6, I.7 et I.8 respectivement.

$$I_y = \sum_{i=1}^2 (I_{y,i} + A_i \cdot (\bar{Y} - z_i)^2) = \frac{L^3t}{12} + Lt \cdot \left(\bar{Y} - \frac{L}{2}\right)^2 + \frac{t^3(L-t)}{12} + (Lt - t^2) \cdot \left(\bar{Y} - \frac{t}{2}\right)^2 \quad \text{I.6}$$

$$I_z = \sum_{i=1}^2 (I_{z,i} + A_i \cdot (\bar{Z} - y_i)^2) = \frac{Lt^3}{12} + Lt \cdot \left(\bar{Z} - \frac{t}{2}\right)^2 + \frac{t(L-t)^3}{12} + (Lt - t^2) \cdot \left(\bar{Z} - \frac{L+t}{2}\right)^2 \quad \text{I.7}$$

$$I_{yz} = \sum_{i=1}^2 (A_i \cdot (\bar{Z} - y_i) \cdot (\bar{Y} - z_i)) \quad \text{I.8}$$

En raison de la géométrie, nous avons :

$$I_y = I_z \quad \text{I.9}$$

Les moments d'inertie par rapport à un système d'axes  $z'$  et  $y'$  faisant un angle de  $\theta$  avec le système d'axe de référence sont calculés avec les formules I.10 et I.11. Ces équations peuvent être simplifiées avec l'introduction de l'équation I.9.

$$I_{y'} = \frac{I_y + I_z}{2} + \frac{I_y - I_z}{2} \cos 2\theta - I_{yz} \sin 2\theta = I_z - I_{yz} \sin 2\theta \quad \text{I.10}$$

$$I_{z'} = \frac{I_y + I_z}{2} - \frac{I_y - I_z}{2} \cos 2\theta + I_{yz} \sin 2\theta = I_z + I_{yz} \sin 2\theta \quad \text{I.11}$$

Les moments principaux de la section,  $I_1$  et  $I_2$ , par rapport aux axes principaux, sont calculés avec les formules I.12 et I.13 respectivement.

$$I_1 = \frac{I_y + I_z}{2} + \sqrt{\left(\frac{I_y - I_z}{2}\right)^2 + I_{yz}^2} = I_z + I_{yz} \quad \text{I.12}$$

$$I_2 = \frac{I_y + I_z}{2} - \sqrt{\left(\frac{I_y - I_z}{2}\right)^2 + I_{yz}^2} = I_z - I_{yz} \quad \text{I.13}$$

Puisque la section est symétrique, on pose pour hypothèse que l'angle  $\theta$  est de  $45^\circ$ . Avec les formules I.10 et I.11, cela donne :

$$I_{y'} = I_z - I_{yz} \sin(2 \cdot 45) = I_z - I_{yz} = I_2 \quad \text{I.14}$$

$$I_{z'} = I_z + I_{yz} \sin(2 \cdot 45) = I_z + I_{yz} = I_1 \quad \text{I.15}$$

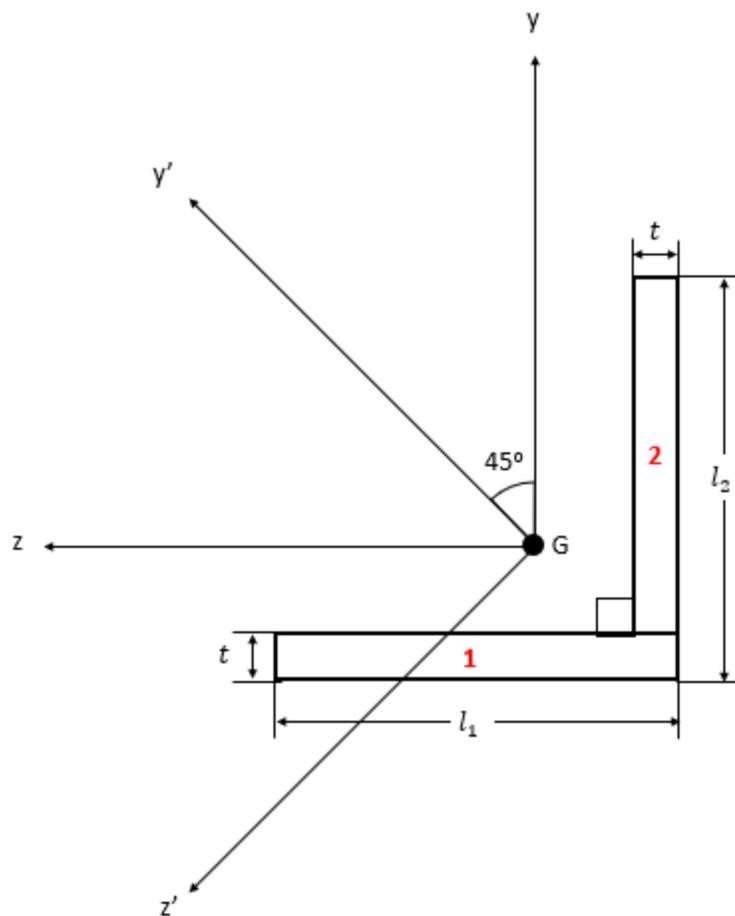


Figure III.2 Système d'axes de référence  $YZ$  et système d'axes principaux  $Y'Z'$ .

## LISTE DE RÉFÉRENCES

- [1] FAO, *Yearbook of Forest Products 2019*. 2021, FAO: Rome. p. 436.
- [2] FAO, *Yearbook of Forest Products 2013*. 2015, FAO: Rome. p. 358.
- [3] FAO, *Yearbook of Forest Products 2003*. 2005, FAO: Rome. p. 334.
- [4] RISI, *Ongoing cost pressure, short supply drive new \$50 hike on newsprint prices in May; y-o-y demand falls*. PPI Pulp & Paper Week, 2022.
- [5] RISI, *Paper, packaging and fiber market news and prices for North American*. PPI Pulp & Paper Week, 2022. **44**(15).
- [6] Angell, B.S. et P.R. Paslay, *Prediction of short-time static compression strength of corrugated containers*. Tappi, 1959. **42**(6): p. 192-199.
- [7] Maltenfort, G.G., *Performance and Evaluation of Shipping Containers*. 1989, Jelmar Publishing Co. p. 475.
- [8] Abzac. *Cornières carton*. 2022. Consulté le 1 janvier 2022, tiré de: <https://www.abzac.com/fr/page/5/cornieres-carton>.
- [9] D'Anglade, P.-M., *Paperboard corner, and method of manufacturing the same*. 2014, Abzac Canada Inc.: États-Unis. p. 24.
- [10] ISO, *4046-4 Paper, board, pulps and related terms - Vocabulary - Part 4: Paper and board grades and converted products*. 2016, International Organization for Standardization: Genève, Suisse.
- [11] Courchene, C.E., G.F. Peter, et J. Litvay, *Cellulose microfibril angle as a determinant of paper strength and hygroexpansivity in pinus taeda l*. Wood and Fiber Science, 2006. **38**(1): p. 112-120.
- [12] Barnett, J.R. et V.A. Bonham, *Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres*. Biological Reviews, 2004. **79**(2): p. 461-472.
- [13] Lindner, M., *Factors affecting the hygroexpansion of paper*. Journal of Materials Science : Full Set - Includes 'Journal of Materials Science Letters', 2018. **53**(1): p. 1-26.
- [14] Twede, D. et S.E.M. Selke, *Cartons, crates and corrugated board : handbook of paper and wood packaging technology*. 2005, DEStech Publications: Lancaster, Penns. p.
- [15] Bergander, A. et L. Salmén, *Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers*. Journal of Materials Science, 2002. **37**(1): p. 151-156.

- [16] Belgacem, N. et A. Pizzi, *Lignocellulosic fibers and wood handbook : Renewable materials for today's environment*. 2016, Scrivener Publishing and John Wiley & Sons: Canada. p.
- [17] Shmulsky, R. et P.D. Jones, *Forest products and wood science : an introduction*. 2019, John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ.
- [18] Walker, J.C.F., *Primary wood processing : principles and practice*. 2006, Springer: Dordrecht.
- [19] Bajpai, P., *Environmentally-friendly production of pulp and paper*. 2010, Wiley: Hoboken, N.J.
- [20] Gharekhani, S., et colls., *Basic effects of pulp refining on fiber properties—A review*. Carbohydrate Polymers, 2015. **115**: p. 785-803.
- [21] Hubbe, M.A. et R.A. Gill, *Fillers for Papermaking: A Review of their Properties, Usage Practices, and their Mechanistic Role*. BioResources, 2016. **11**(1).
- [22] Holik, H., *Handbook of Paper and Board*. 2013, Wiley: Weinheim.
- [23] Whistler, R.L. et J.N. BeMiller, *Starch chemistry and technology*. 3rd ed. Food science and technology, International Series. 2009, Academic Press: Londre. p.
- [24] Mentzer, M.J., *CHAPTER XVIII - STARCH IN THE PAPER INDUSTRY*, in *Starch: Chemistry and Technology (Second Edition)*, R.L. Whistler, J.N. Bemiller, et E.F. Paschall, Editors. 1984, Academic Press: San Diego. p. 543-574.
- [25] Glenn, G., et colls., *Per- and polyfluoroalkyl substances and their alternatives in paper food packaging*. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2021. **20**(3): p. 2596-2625.
- [26] Ali, I., *Study of the mechanical behavior of recycled fibers. Applications to papers and paperboards*. 2013, Université de Grenoble: HAL. p. 241.
- [27] Orlando, J.R., A.V. Richard, et A.H. Martin *WHAT HAPPENS TO CELLULOSIC FIBERS DURING PAPERMAKING AND RECYCLING? A REVIEW*. BioResources. **2**, 739-788.
- [28] Fernandes Diniz, J.M.B., M.H. Gil, et J.A.A.M. Castro, *Hornification—its origin and interpretation in wood pulps*. Wood Science and Technology, 2004. **37**(6): p. 489-494.
- [29] Howard, R.C. et W. Bichard, *The Basic Effects of Recycling on Pulp Properties*. Journal of pulp and paper science, 1992. **18**(4).
- [30] Cui, Y., *The effects of wood species and pulp type on paper recycling*. 1993, National Library of Canada = Bibliothèque nationale du Canada: Ottawa.
- [31] TAPPI, *Paper grade classifications, Technical Information Paper TIP 0404-36*. 2013.

- [32] Nycz, J. *Knowing Where Your Paper Comes From: Sustainability is Critical*. 2019. Consulté le 18 septembre 2022, tiré de: <https://www.woodlandpaper.com/2019/01/where-paper-sustain/#:~:text=Type%20of%20Trees%20Used%20to,spruces%2C%20hemlocks%2C%20and%20larch.>
- [33] Tomberlin, K.E., R. Venditti, et Y. Yao, *Life cycle carbon footprint analysis of pulp and paper grades in the United States using production-line-based data and integration*. *BioResources*, 2020. **15**(2): p. 3899-3914.
- [34] Olli, K., P. Petri, et S. Mikko, *Advanced water treatment, recycling lower paper mill water consumption*, in *Industrial WaterWorld*. 2012, PennWell. p. 24-26.
- [35] Haile, A., et colls., *Pulp and paper mill wastes: utilizations and prospects for high value-added biomaterials*. *Bioresources and Bioprocessing*, 2021. **8**(1).
- [36] EPA. *Paper and Paperboard: Material - Specific Data*. 2022. Consulté le 9 août 2022, tiré de: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/paper-and-paperboard-material-specific-data#PaperTableandGraph>.
- [37] Bajpai, P., *Recycling and deinking of recovered paper*. 2014, Elsevier: Amsterdam.
- [38] CEPI, *Monitoring report 2019*. 2019. p. 8.
- [39] AF&PA. *Does Paper Actually Get Recycled ? The Industry Answers*. 2021. Consulté le 8 novembre 2022, tiré de: <https://www.afandpa.org/priorities/recycling/does-paper-actually-get-recycled>.
- [40] Andrady, A.L., V.R. Parthasarathy, et Y. Song, *Biodegradation of paperboard: Loss in strength and weight of paperboard packaging materials under aerobic soil-exposure conditions*. *Tappi journal*, 1992. **75**(4): p. 203-215.
- [41] Alvarez, J.V.L., et colls., *Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions*. *Waste management (New York, N.Y.)*, 2009. **29**(5): p. 1514-9.
- [42] *Chapter 1 - Introduction and Adhesion Theories*, in *Adhesives Technology Handbook (Second Edition)*, S. Ebnesajjad, Editor. 2009, William Andrew Publishing: Norwich, NY. p. 1-19.
- [43] Toenniessen, M., *Packaging Materials: 10. Adhesives for food packaging applications*, in *ILSI Europe Report Series*. 2018: Belgique, Bruxelles. p. 37.
- [44] Gadhave, R.V.I. et C.R. Gadhave, *Adhesives for the Paper Packaging Industry: An overview*. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 2022. **12**(2): p. 55-79.
- [45] Ashley, R.J., M.A. Cochran, et K.W. Allen, *Adhesives in packaging*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1995. **15**(2): p. 101-108.

- [46] Emblem, A., *13 - Plastics properties for packaging materials*, in *Packaging Technology*, A. Emblem et H. Emblem, Editors. 2012, Woodhead Publishing. p. 287-309.
- [47] Korin, C., N. Hallbäck, et R. Junghans, *Failure Modes in Adhesively Bonded Carton Boards*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008. **22**(16): p. 2079-2104.
- [48] Korin, C., et colls., *Influence of Surface Treatments on the Mechanical Strength of Hotmelt Adhesive Joints Made of Cartonboards*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012. **26**(20-21): p. 2339-2356.
- [49] Popil, R.E., et colls. *Adhesive level effect on corrugated board strength – experiment and FE modeling*. 2007.
- [50] Tobias, N., K. Arno, et E. Daniel *Influence of Moisture, Temperature and Bleaching on the Mechanical Properties of Coated Fiber-Based Substrates*. 2022. **12**, 1287 DOI: 10.3390/coatings12091287.
- [51] Sampson, W.W. et J. Yamamoto, *The drying shrinkage of cellulosic fibres and isotropic paper sheets*. *Journal of Materials Science*, 2011. **46**(2): p. 541-547.
- [52] British, P. et C. Board Industry Federation. *Fundamental Research, Fibre-water interactions in paper-making*. 1978, British Paper and Board Industry Federation.: Londre. p. 477-487.
- [53] Setterholm, V.C. et W.A. Chilson, *Drying Restraint, Its effect on the tensile properties of 15 different pulps*. *Tappi*, 1965. **48**(11): p. 634-640.
- [54] Neagu, R.C., E.K. Gamstedt, et M. Lindström, *Influence of wood-fibre hygroexpansion on the dimensional instability of fibre mats and composites*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005. **36**(6): p. 772-788.
- [55] Niskanen, K., S.J. Kuskowski, et C. Bronkhorst, *Dynamic hygroexpansion of paperboards*. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 1997. **12**: p. 103-110.
- [56] Mayeli, N., *Factors affecting the free shrinkage of handsheets: apparent density, fines content, water retention value and grammage*. *Tappi journal*, 2018. **17**(6): p. 317-325.
- [57] Harrington, K.J., *An effect of moisture content on successive changes in the load-elongation curve for paper*. *Journal of Applied Polymer Science*, 1966. **10**(3): p. 437-441.
- [58] Rhim, J.-W. *Effect of Moisture Content on Tensile Properties of Paper-based Food Packaging Materials*. *Food science and biotechnology*, 2010. **19**, 243-247.
- [59] Allaoui, S., Z. Aboura, et M.L. Benzeggagh, *Effects of the environmental conditions on the mechanical behaviour of the corrugated cardboard*. *Composites Science and Technology*, 2009. **69**(1): p. 104-110.

- [60] Navaranjan, N., et colls., *Humidity effect on compressive deformation and failure of recycled and virgin layered corrugated paperboard structures*. Composites Part B, 2013. **45**(1): p. 965-971.
- [61] Strömberg, F., *Humidity's effect on strength and stiffness of containerboard materials : A study in how the relative humidity in the ambient air affects the tensile and compression properties in linerboard and fluting mediums*, in *Department of Engineering and Chemical Science*. 2016, Université de Karlstad: Suède. p. 73.
- [62] Cousins, W.J., *Elastic modulus of lignin as related to moisture content*. Wood Science and Technology : Journal of the International Academy of Wood Science, 1976. **10**(1): p. 9-17.
- [63] Cousins, W.J., *Young's modulus of hemicellulose as related to moisture content*. Wood Science and Technology : Journal of the International Academy of Wood Science, 1978. **12**(3): p. 161-167.
- [64] Marklund, E. et J. Varna, *Modeling the hygroexpansion of aligned wood fiber composites*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(7): p. 1108-1114.
- [65] ISO, *187 Paper, board and pulps - Standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples*. 2022.
- [66] TAPPI, *T402 Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheet and related products*. 2013, Technical Association of the Pulp and Paper Industry.
- [67] ISO, *3037 Corrugated fibreboard — Determination of edgewise crush resistance (non-waxed edge method)*. 2022, International Organization for Standardization: Genève, Suisse. p. 9.
- [68] ASTM, *D6484 Standard Test Method for Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*. 2020: West Conshohocken, Pa, États-Unis. p. 16.
- [69] ISO, *13821 Corrugated fibreboard — Determination of edgewise crush resistance — Waxed edge method*. 2020, International Organization for Standardization: Genève, Suisse.
- [70] ISO, *5628 Paper and board — Determination of bending stiffness — General principles for two-point, three-point and four-point methods*. 2019, International Organization for Standardization: Genève, Suisse.
- [71] EN, *NF EN 13393 Emballage - Spécification relatives aux cornières*. 2001, CEN: Bruxelles, Belgique.
- [72] ASTM, *D7264 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. 2015, ASTM International: West Conshohocken, Pa, États-Unis.

- [73] Fadiji, T., et colls., *Investigating the Mechanical Properties of Paperboard Packaging Material for Handling Fresh Produce Under Different Environmental Conditions: Experimental Analysis and Finite Element Modelling*. Journal of applied packaging research, 2017. **9**(2): p. 20-34.
- [74] Bazergui, A., et colls., *Résistance des matériaux*. 3e ed. 2012, Presses internationales Polytechnique: Canada. p. 715.