



HAL
open science

Comportement en compression et cisaillement d'un contre-plaqué de bouleau, essais aux grandes vitesses de déformation et températures cryogéniques

Lydie Caetano

► **To cite this version:**

Lydie Caetano. Comportement en compression et cisaillement d'un contre-plaqué de bouleau, essais aux grandes vitesses de déformation et températures cryogéniques. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Bretagne Sud, 2017. Français. NNT : 2017LORIS475 . tel-01955810

HAL Id: tel-01955810

<https://theses.hal.science/tel-01955810>

Submitted on 14 Dec 2018

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

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



THÈSE / UNIVERSITÉ BRETAGNE SUD
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de
DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ de BRETAGNE SUD

Mention : Sciences pour l'Ingénieur
École Doctorale: SICMA

Présentée par

Lydie Caetano

Préparée à l'unité mixte de recherche
IRD L CNRS UMR3744
Institut de Recherche Dupuy de Lôme

Comportement en compression et cisaillement d'un contre-plaqué de bouleau, essais aux grandes vitesses de déformation et températures cryogéniques

Thèse soutenue vendredi 22 décembre 2017
devant le jury composé de :

Éric RAGNEAU

Professeur des Universités, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes / *Examineur et président du jury*

Michel CORET

Professeur des Universités, Ecole Centrale de Nantes
Laboratoire Génie Civil et Mécanique (GeM) / *Rapporteur*

Marc OUDJENE

Maître de Conférences, HDR, Université de Lorraine,
Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB) / *Rapporteur*

Sandra GUERARD

Maître de Conférences, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers / *Examineur*

Bertrand GALPIN,

Maître de Conférences / Co-directeur de thèse

Vincent GROLLEAU

Professeur des Universités / Directeur de thèse

Remerciements...

Je remercie d'abord Vincent, Bertrand et l'ED SICMA de m'avoir fait confiance pendant tout ce doctorat. Grâce à ce projet, j'ai découvert le monde de la recherche, des matériaux et plus particulièrement du bois mais aussi de la dynamique et de la cryogénie. J'ai beaucoup appris. Merci Vincent et Bertrand d'avoir su vous rendre disponibles, à tous les moments de cette thèse. Travailler avec Vincent, c'est travailler avec un passionné de la recherche expérimentale, curieux, rigoureux et plein de savoir. Ca a vraiment été agréable de travailler dans ce cadre. L'expérimentation et la communication des travaux que l'on a pu faire, ont été deux parties de ce milieu qui m'ont captivée. Me donner la possibilité d'enseigner est une autre expérience qui m'a enrichie. Merci encore.

Merci aussi à toutes ces personnes qui n'ont jamais rien compris de ce que je faisais mais qui ont été là, ponctuellement ou pas, malgré nous ou pas, pour me soutenir, ou simplement compatir dans les moments difficiles ! Merci JC surtout ! Les petits moments que j'ai pu passer avec vous ont été des bouffées d'oxygène, surtout pendant cette année 2017. Et quelle année...

Merci à ceux qui ont été là plus souvent, qui ont toujours été là même. Jusqu'à la fin, comme un accouchement, à me tenir fictivement la main. Lulette, Alice, Rémond, Edmond, Nico, Erwan, vos petits mots, vos petites attentions... Je vous ai vraiment senti auprès de moi, me tenir la main et m'encourager à continuer, même quand Morphée me faisait du gringue, même quand je n'y croyais pas vraiment. Merci aussi à tous les autres, la liste serait trop longue, mais je vous savais présents ! Vous y avez cru, incroyablement ! Comment ne pas vous remercier ici ?

Merci à mon voisin de bureau, Erwan. Ah la la... Quel plaisir de découvrir un collègue de promo grâce à cette aventure ! Partager ça avec toi a été un très grand plaisir ! Plaisir partagé aussi avec toute la troupe « EG2M » (et même les autres thermiciens et informaticiens !). Les labos de l'UBS comptent dans leurs antres de belles personnes, de passage ou permanentes. Je suis heureuse d'avoir croisé vos chemins, même un peu, et je vous remercie aussi d'avoir été aussi chouettes pendant mon passage dans ce labo.

Et enfin, je ne peux pas parler des gens qui n'ont jamais rien compris mais qui m'ont toujours soutenu corps et âme sans parler de mes parents. Merci à vous pour votre appui, depuis toujours, bien avant cette thèse. Sans vous, je n'aurais pas pu vivre tout ça. Merci de m'avoir autant donné, sans jamais compter.

Merci aussi à toi Nico... Cette aventure tu l'auras vécue avec moi, dans les bons moments mais aussi (et surtout) dans les mauvais. Merci d'avoir toujours tenté de faire au mieux pour moi.

Ce manuscrit est le fruit d'un travail chargé, j'espère qu'il trouvera son utilité dans la communauté du bois, communauté que j'ai été ravie de rencontrer pendant ce doctorat.

Sommaire général du mémoire de thèse

INTRODUCTION DU PROBLEME ET CONTEXTE D'ETUDE

CHAPITRE I - LE CONTREPLAQUE, SON ORIGINE, SA FABRICATION ET SES PARTICULARITES

1	GENERALITES SUR LE BOIS	9
1.1	LE BOIS, UN MATERIAU MULTI-EHELLE	9
1.2	LE BOIS, UN MATERIAU AU COMPORTEMENT SENSIBLE A DIFFERENTS PARAMETRES	13
2	LE CONTREPLAQUE DE BOULEAU – PRESENTATION ET COMPORTEMENT	15
2.1	DESCRIPTION DU MATERIAU ETUDIE – LE CONTREPLAQUE DE BOULEAU	15
2.2	COMPORTEMENT MECANIQUE DU CONTREPLAQUE	16
3	BILAN DE L'ETAT DE L'ART	19
4	REFERENCES	21

CHAPITRE II – DIMENSIONNEMENT DES OUTILS EXPERIMENTAUX ET PRESENTATION DES PROTOCOLES

1	MISE EN CONDITIONS CLIMATIQUES	27
1.1	ECHANTILLONS SECS (2%)	27
1.2	HUMIDITE DE REFERENCE (8%)	29
1.3	HUMIDITE INTERMEDIAIRE (15%)	29
1.4	ESTIMATION DU TEMPS DE CONDITIONNEMENT	29
1.5	STABILITE DE L'HUMIDITE PENDANT LES ESSAIS	29

2	ESSAIS DE COMPRESSION A VITESSE DE DEFORMATION QUASI-STATIQUE	30
2.1	MACHINE UTILISEE ET PROTOCOLE DE MISE EN PLACE	30
2.2	ESSAIS EN CONDITIONS DE TEMPERATURES CRYOGENIQUES	30
2.3	TRAITEMENT DES RESULTATS – PRISE EN COMPTE DE LA RAIDEUR MACHINE	32
3	ESSAIS DE COMPRESSION A HAUTE VITESSE DE DEFORMATION	33
3.1	DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DES BARRES D’HOPKINSON	33
3.2	TRAITEMENT DES RESULTATS BRUTS	35
3.3	DIMENSIONNEMENT DU BANC DE BARRES D’HOPKINSON	36
3.4	UTILISATION D’UN PULSE SHAPER	37
3.5	ADAPTATION DES BARRES D’HOPKINSON AUX ESSAIS A TEMPERATURE CRYOGENIQUE	37
3.6	VALIDATION DES ESSAIS AUX BARRES D’HOPKINSON	38
4	ESSAIS DE CISAILLEMENT, DEVELOPPEMENT D’UN MONTAGE DE CISAILLEMENT	41
4.1	ESSAIS NORMALISES : MONTAGE IOSIPESCU	41
4.2	DEVELOPPEMENT D’UN ESSAI DE CISAILLEMENT AUX BARRES D’HOPKINSON	43
5	BILAN SUR LES OUTILS EXPERIMENTAUX	45
6	REFERENCES	46

CHAPITRE III - LE CONTREPLAQUE, SON ORIGINE, SA FABRICATION ET SES PARTICULARITES

1	CONFINEMENT ET EFFET DE COLLE	51
1.1	DISPOSITIF ET MISE EN PLACE	51
1.2	RESULTATS OBTENUS	52
2	JUSTIFICATION DE LA FORME DES ECHANTILLONS	55
2.1	EFFET DE LA METHODE D’USINAGE, DE LA FORME ET DE LA SECTION	55
2.2	VOLUME ELEMENTAIRE REPRESENTATIF (VER) POUR DES ECHANTILLONS CIRCULAIRES	56
3	LUBRIFICATION DES ECHANTILLONS	58
4	VERIFICATION DU TAUX D’HUMIDITE DANS LES ECHANTILLONS	59
4.1	DEFINITION DU TAUX D’HUMIDITE	59
4.2	MESURE DE L’HUMIDITE PAR ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE	60
4.3	MESURE DE L’HUMIDITE PAR CHAUFFAGE	61
5	EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS LES ECHANTILLONS	61
5.1	EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN COMPRESSION QUASI-STATIQUE	62
5.2	TEMPS D’ESSAI DISPONIBLE EN CRYOGENIE EN COMPRESSION AVEC LES BARRES D’HOPKINSON	65
5.3	ESSAIS DE COMPRESSION A 0,004/S POUR DES ECHANTILLONS IMBIBES ET TREMPES D’AZOTE LIQUIDE	67
6	EVALUATION DU MODULE ELASTIQUE, COMPARAISON A LA NORME EN789	68
7	ESSAI DE CISAILLEMENT TRANSVERSE DU CONTREPLAQUE AVEC LE MONTAGE IOSIPESCU	70
7.1	PRESENTATION DES ECHANTILLONS ET EFFET DE LA DIMENSION DE LA FENETRE DE CALCUL	70
7.2	ESTIMATION DE LA DEFORMATION EN CISAILLEMENT	72

8	VALIDATION DU MONTAGE DE CISAILLEMENT DOUBLE ENTAILLE	73
9	BILAN SUR LES PROTOCOLES ET LES VERIFICATIONS NECESSAIRES	75
10	REFERENCES	76

CHAPITRE IV - COMPRESSION ET CISAILLEMENT, PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS

1	CAS DE LA COMPRESSION LONGITUDINALE. ETUDE DU COMPORTEMENT ELASTIQUE DU CONTREPLAQUE	80
2	COMPRESSION HORS PLAN DU CONTREPLAQUE DE BOULEAU A 8% D'HUMIDITE	81
2.1	DESCRIPTION DES PARAMETRES ETUDIES	81
2.2	PRESENTATION DES ESSAIS	83
2.3	INFLUENCE DES DIFFERENTES CONDITIONS D'ESSAI	84
2.4	STRESS STRAIN CURVE MODEL	86
2.5	SUMMARY OF THE IDENTIFIED BEHAVIOUR	93
2.6	CONCLUSIONS	95
3	COMPRESSION HORS PLAN DU CONTREPLAQUE, EFFET DE L'HUMIDITE DANS LE CONTREPLAQUE, AUX VALEURS LIMITEES DE TEMPERATURE ET VITESSE DE DEFORMATION	96
3.1	PRESENTATION DES RESULTATS	96
3.2	EVALUATION DU COMPORTEMENT EN FONCTION DE L'HUMIDITE DANS LE CONTREPLAQUE	98
3.3	CONCLUSIONS	102
4	MODELISATION ELASTO-PLASTIQUE AVEC DENSIFICATION SUR UN ESSAI DE COMPRESSION	102
4.1	MODELE A TEMPERATURE AMBIANTE	103
4.2	MODELE A TEMPERATURE CRYOGENIQUE	105
5	CISAILLEMENT	106
6	CONCLUSION	108
7	REFERENCES	109

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Introduction du problème et contexte d'étude

Selon la norme afnor NF EN 313-2, un contreplaqué ou plus précisément un panneau contreplaqué est un panneau à base de bois obtenu par collage de couches adjacentes à fils croisés habituellement à angles droits. Le contreplaqué est composé de plusieurs couches de placages, appelées plis, en nombre impair. L'épaisseur d'un panneau varie entre 1 mm et 50 mm. Bien que l'utilisation du bois stratifié en lames minces collés ensemble soit connue depuis l'Égypte antique, son application industrielle ne commence réellement qu'à partir de l'entre-deux-guerres, au siècle dernier, grâce au développement de colles de plus en plus performantes. Aujourd'hui ils sont utilisés, dans de nombreux domaines dont on peut citer :

- Le nautisme : excellente résistance à l'eau en qualité marine, les panneaux de contreplaqués sont aujourd'hui très largement utilisés dans l'aménagement intérieur des bateaux de plaisance, après l'avoir été pour leurs coques ;
- La construction : utilisation dans la réalisation de murs, de toitures, de planchers, de coffrages, de revêtements extérieurs. Une gamme revêtue de résine, généralement d'un brun très foncé, est utilisée pour réaliser les coffrages pour les coulées de béton ;
- Le transport : réalisation de planchers (wagons, tramways, bus, véhicules utilitaires), mais aussi à la décoration et l'ameublement intérieur (caravanes, camping-cars) ;
- L'emballage : fabrication de caisses, en remplacement du bois massif, car plus étanche, d'un cout réduit ;
- La menuiserie : habillages muraux, réalisation de meubles en contreplaqué, pouvant être plaqués de bois nobles ;
- L'aménagement intérieur : pour ses qualités acoustiques, isolation thermique et esthétiques.

En 10 ans, la consommation de gaz naturel dans le monde a augmenté de près de 25% [BP(2017)]. Autour du Moyen Orient, l'augmentation de la production de gaz est de 23%. Le mode de transport privilégié est la voie maritime, au moyen d'engins de plusieurs centaines de mètres. Cet accroissement entrainent une hausse des commandes de méthaniers pour le transport de gaz à travers le monde [BP(2017)]. Le groupe Gaz Technique et Transport (GTT), fabricant de bateaux, propose deux technologies de transport, composées de contreplaqué de bouleau de qualité marine, le NO96 et le Mark III, regroupant ainsi trois domaines d'utilisation du contreplaqué :

le nautisme, l'emballage et le transport. Leurs navires permettent le transport de Gaz Naturel Liquide (GNL, ou LNG en anglais), liquéfié par abaissement de la température jusqu'à cryogénie (à -163°C). Le liquide est transporté dans de grandes cuves dont de $35 \times 35 \times 35 \text{m}^3$ de volume, généralement trois à cinq cuves par bateau. Les capacités de transport maximales peuvent aller jusqu'à $260\,000 \text{m}^3$. Ce volume correspondant à la consommation annuelle de gaz naturel d'une ville d'environ 180 000 habitants en France.

Ces cuves non réfrigérées, fonctionnent selon le principe d'une bouteille isotherme. Dans la technologie NO96, l'isolation de ces cuves est réalisée par l'utilisation de perlite en poudre stockée dans deux couches de caissons d'épaisseur 300mm (isolation primaire et secondaire) en contreplaqué de bouleau (cf. Figure 1). L'étanchéité primaire est réalisée par une tôle d'invar, de 0,7mm d'épaisseur. Une seconde tôle d'invar identique à la première est placée entre les deux couches de caissons. Elle assure la fonction d'étanchéité secondaire. La couche de caissons secondaire est posée sur la coque intérieure sur des câbles de mastic.

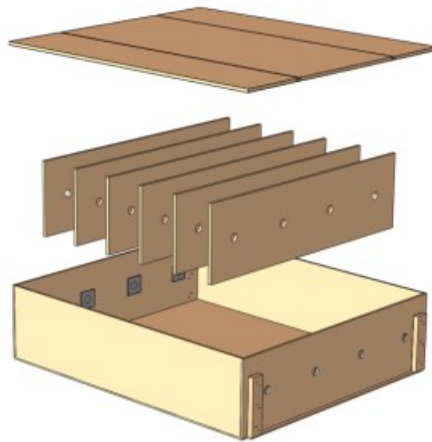


Figure 1 – Détail de la structure en contreplaqué de la technologie NO96. La perlite remplit les vides ainsi créés et isole les cuves.

Dans la technologie Mark III, la tôle d'étanchéité primaire est en inox 304L de 1.2mm d'épaisseur mise en forme afin de créer des raidisseurs appelés ondes. Cette tôle est fixée à un isolant de conception sandwich, réalisé à l'aide d'une couche de contreplaqué de bouleau de 12mm d'épaisseur (qui fait office de support de la paroi d'inox), collée à un bloc de mousse polyuréthane fibrée de 290mm, intégrant la couche d'étanchéité secondaire en aluminium/fibre de verre. Ce complexe isolant est ensuite collé à un autre contreplaqué de bouleau de 9mm, fixé à la structure du bateau par des plots de mastic. Le système isolant est ainsi présenté globalement Figure 2 et en détail Figure 3.

Mark III

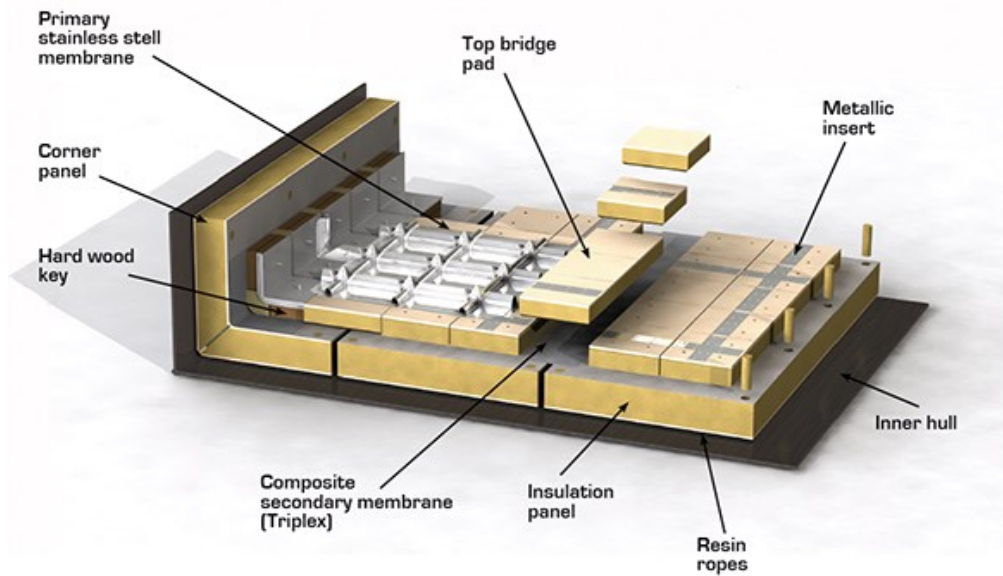


Figure 2 - Décomposition d'un complexe isolant de technologie Mark III

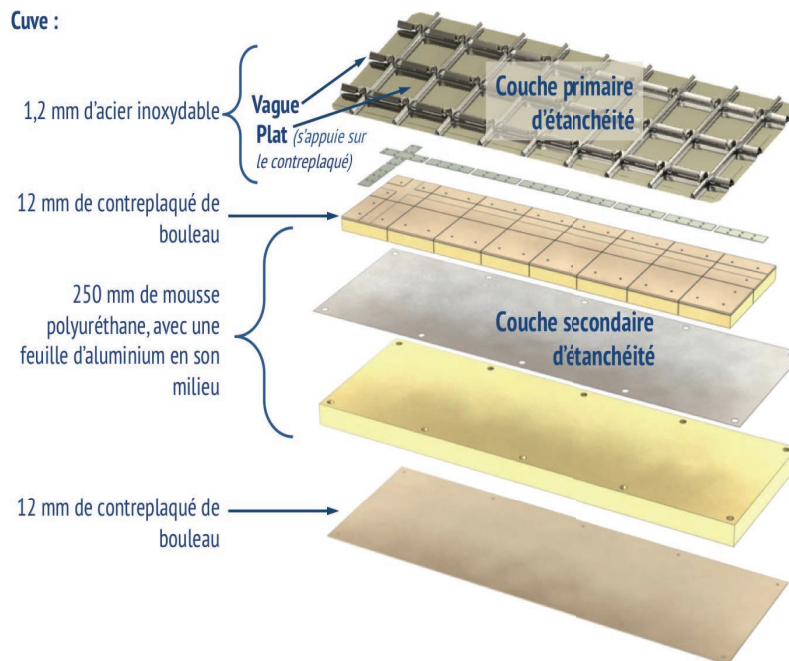
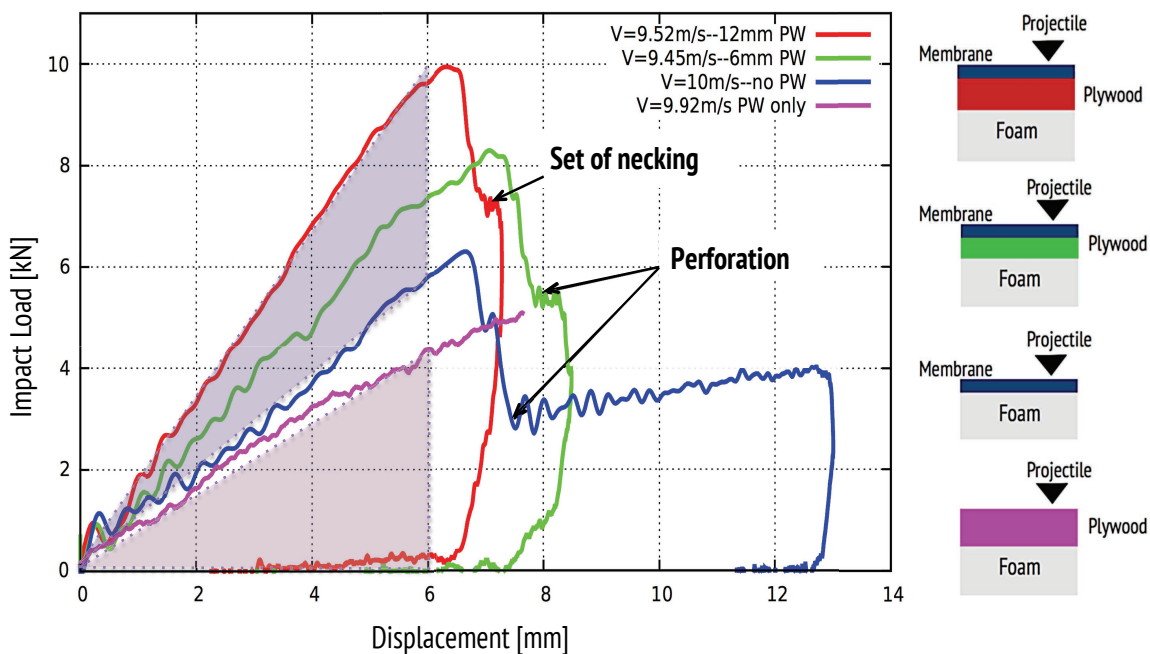


Figure 3 - Décomposition d'une cuve et vue éclatée des différentes couches qui composent son épaisseur

En fonction du taux de remplissage de la cuve et de l'état de la mer, des vagues de méthane liquide à la température de -163°C peuvent se créer à l'intérieur des cuves. Ce phénomène est appelé sloshing et a des effets à différentes échelles : influence sur le comportement global du bateau, des surpressions locales mises en évidence par Gavory [GAV(2009)], Graczyk [GRA(2008)], Pistani [PIS(2012)], et Graczyk [GRA(2007)] entre le méthane et la cuve pouvant conduire par exemple à une sollicitation de fatigue sur les dispositifs isolants ([KIM(2010)]), à la déformation des ondes ([KIM(2011)]). Il existe des études importantes qui donnent des

indications de remplissage des cuves pour éviter tout risque de mouvement incontrôlé ([LLO(2009)], [DVN(2006-CN30)], [GAV(2009)], [PAI(2010)]). Ces efforts sont suffisamment importants pour venir déformer jusqu'au contreplaqué présent sous cette couche primaire, notamment sur des modèles tels que le NO96, présenté par Arswendy ([ARS(2011)] et [ARS(2014)]). Cette déformation des ondes peut conduire à l'indentation de son support en contreplaqué, au poinçonnement local du sandwich d'isolation entre le contreplaqué et le mastic ([KIM(2010)], [CHU(2008)]) dans le cas de la technologie Mark III ou au poinçonnement des parois des caissons en contreplaqué par les raidisseurs disposés à l'intérieur de celles-ci dans le cas de la technologie NO96 ([ARS(2011)], [ARS(2014)] et [ALM(2011)]). Le risque d'obtention d'un point froid sur la coque des navires équipés de la technologie MARK III, par la perte d'étanchéité de la paroi primaire d'étanchéité en inox 304L, a également été évalué. Il a été montré lors de cette étude que le contreplaqué de 12 mm d'épaisseur situé sous celle-ci, ne peut être négligé dans le comportement à l'impact du complexe isolant. Comme on peut le voir sur la Figure 4, l'évolution de l'effort de contact lors d'un impact sur ce complexe {membrane-contreplaqué-mousse} en fonction du déplacement de l'impacteur (énergie initiale de 125J), 40% de l'énergie est absorbée par le contreplaqué par son comportement hors plan.



Or, dans la littérature, on constate qu'il n'existe pas d'étude sur le comportement hors plan du contreplaqué de bouleau au-delà du domaine élastique, à température ambiante. Le premier objectif de cette thèse est donc de déterminer expérimentalement le comportement hors plan, en compression et cisaillement de ce contreplaqué. Les paramètres de l'étude seront la vitesse de déformation, la température de l'ambient au cryogénique ainsi que le taux d'humidité dans le contreplaqué. Le second objectif est d'étudier les interactions entre ces différents paramètres afin de proposer une modélisation pour ce matériau.

Dans le premier chapitre, on va d'abord discuter du choix des paramètres retenus en se basant sur une étude bibliographique du comportement bois clair constituant chacun des plis du contreplaqué. Ensuite, on discutera plus spécifiquement des différentes études relatives au contreplaqué de bouleau. Dans le deuxième chapitre, les dispositifs expérimentaux nécessaires à la mise en conditions climatiques, ainsi que ceux utilisés dans l'obtention des paramètres caractéristiques sont présentés pour la compression et le cisaillement. Les conditions d'essais particulières demandent de faire de nombreuses vérifications au niveau expérimental, comme dans les méthodes de mise en conditions climatiques (humidité et température notamment). Le troisième chapitre traite de ces différentes vérifications et évaluations. Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats obtenus à la suite des différentes campagnes d'essais, en compression comme en cisaillement. Un travail approfondi a pu être fait en compression, proposant un modèle global du comportement du contreplaqué hors plan, et suivant les trois variables d'essai qui sont l'humidité, la température et la vitesse de déformation.

Références

- [ALM(2011)] – A. ARSWENDY, O. LIASJOE, T. MOAN, *Static response of an LNG containment system of GTT N096 type*, International Journal of Offshore and Polar Engineering, September 2011, Vol. 21, n°3, pp. 198–208
- [ARS(2011)] – A. ARSWENDY, T. MOAN, *Failure analysis of a liquid natural gas (LNG) containment system – Bending failure of plywood component*, Wood Material Science and Engineering, November 2011, No. 7, pp. 30–40
- [ARS(2014)] – A. ARSWENDY, T. MOAN, *Strength and stiffness assessment of an LNG containment system – Crushing and buckling failure analysis of plywood components*, Engineering Failure Analysis, December 2014, No. 48, pp. 247–258
- [BP(2017)] – BP Statistical Review of World Energy June 2017 [archive], BP, juin 2017.
- [CHU(2008)] – M. S. CHUN, M. H. KIM, W. S. KIM, S. H. KIM, J. M. LEE, *Experimental investigation on the impact behavior of membrane-type LNG carrier insulation system*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, September 2008, No. 22, pp. 901–907
- [DNV-CN30(2006)] – *Sloshing analysis of lng membrane tanks*, Classification notes No. 30.9, DNV, Det Norske Veritas, Veritasveien 1, NO-1322 Høvik, Norway, 2006.
- [GAV(2009)] – T. GAVORY, P.E. DE SEZE, *Sloshing in membrane LNG carriers and its consequences from a designer's perspective*, Paper No. 2009-FD-11, GTT, 2009
- [GRA(2007)] – M. GRACZYK, T. MOAN, MK. WU, *Extreme sloshing and whipping-induced pressures and structural response in membrane LNG tanks*, Ships and Offshore Structures, November 2007, Vol. 2, n°3, pp. 201–216
- [GRA(2008)] – M. GRACZYK, T. MOAN, *A probabilistic assessment of design sloshing pressure time histories in LNG tanks*, Ocean Engineering, 2008, Vol. 35, n°8, pp. 834–855
- [KIM(2010)] – M. H. KIM, S. M. LEE, J. M. LEE, B. J. NOH, W. S. KIM, *Fatigue strength assessment of MARK-III type LNG cargo containment system*, Ocean Engineering, May 2010, No. 37, pp. 1243–1252
- [KIM(2011)] – B.C. KIM, S.H. YOON, D.G. LEE, *Pressure resistance of the corrugated stainless steel membranes of LNG carriers*, Ocean Engineering, Byung ChulKim, SoonHoYoon, DaiGilLee, March 2011, Vol. 38, n°4, pp. 592–608
- [LLO(2009)] – Lloyd's Register Marine, Business Stream, *Sloshing Assessment Guidance Document for Membrane Tank LNG Operations*, « Additional Design Procedures », Ship Right, Design and construction, version 2.0, mai 2009
- [PAI(2010)] – J. K. PAIK, J. M. SOHN, Y. S. SHIN ET Y. S. SUH, *Nonlinear Structural analysis of membrane-type LNG carrier cargo containment system under cargo static pressure loads at the cryogenic condition with a temperature of -163°C*, Ships and Offshore Structures, Vol. 6, No. 4, 2011, pp. 311–322, November 2010
- [PIS(2012)] – F. PISTANI, K. THIAGARAJAN, *Experimental measurements and data analysis of the impact pressures in a sloshing experiment*, Ocean Engineering, 2012, Vol. 52, pp. 60–74

CHAPITRE I

Le contreplaqué, son origine, sa fabrication et ses particularités

Le contreplaqué est un matériau à base de bois. L'étude du bois clair le composant est alors intrinsèque à l'étude du panneau dont il est la base. La première partie de ce chapitre présente donc d'abord le bois clair de manière générale, puis les différentes sensibilités dont il fait l'objet et qui seront au cœur de nos travaux.

Le contreplaqué étudié dans cette thèse est un matériau industriel, produit à base de bouleau finlandais dont la croissance est maîtrisée. Sa production est ici décrite et ses caractéristiques techniques données. Le contreplaqué, de par sa construction, a des caractéristiques de comportement que n'a pas le bois clair. Elles sont présentées à la fin de ce chapitre.

SOMMAIRE DU CHAPITRE

1	GENERALITES SUR LE BOIS	9
1.1	LE BOIS, UN MATERIAU MULTI-ECHELLE	9
1.1.1	A L'ECHELLE MACROSCOPIQUE	9
1.1.2	A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE	11
1.1.3	A L'ECHELLE D'UNE CELLULE – ULTRASTRUCTURE	12
1.2	LE BOIS, UN MATERIAU AU COMPORTEMENT SENSIBLE A DIFFERENTS PARAMETRES	13
1.2.1	TAUX D'HUMIDITE DANS LE BOIS ET LES PRODUITS DERIVES DU BOIS	13
1.2.2	TEMPERATURE DE SOLLICITATION	14
1.2.3	VITESSE DE DEFORMATION	14
2	LE CONTREPLAQUE DE BOULEAU – PRESENTATION ET COMPORTEMENT	15
2.1	DESCRIPTION DU MATERIAU ETUDIE – LE CONTREPLAQUE DE BOULEAU	15
2.1.1	LA CREATION DU CONTREPLAQUE	15
2.1.2	FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT ETUDIE	16
2.2	COMPORTEMENT MECANIQUE DU CONTREPLAQUE	16
2.2.1	DESCRIPTION DU COMPORTEMENT ATTENDU EN COMPRESSION HORS PLAN	17
2.2.2	DESCRIPTION DU COMPORTEMENT ATTENDU EN CISAILLEMENT	18
3	BILAN DE L'ETAT DE L'ART	19
4	REFERENCES	21

1 Généralités sur le bois

Le bois est un matériau hétérogène. Cette hétérogénéité peut être abordée à différentes échelles, depuis la paroi cellulaire, jusqu'au tronc. Elle est due à la croissance particulière de l'arbre, aux saisons, mais aussi à la structure des cellules. Chaque échelle est ici classiquement décrite. Le bois comme les matériaux à base de bois sont sensibles à différents paramètres connus tels que l'humidité, la température et la vitesse de déformation. Leur comportement diffère en fonction de ces paramètres et cette variation est présentée en seconde partie.

Cette partie est largement inspirée des travaux de Navi et Heger [NAV(2005)] et Adalian [ADA(1998)] bien que de nombreux autres travaux puissent faire référence.

1.1 Le bois, un matériau multi-échelle

1.1.1 A l'échelle macroscopique

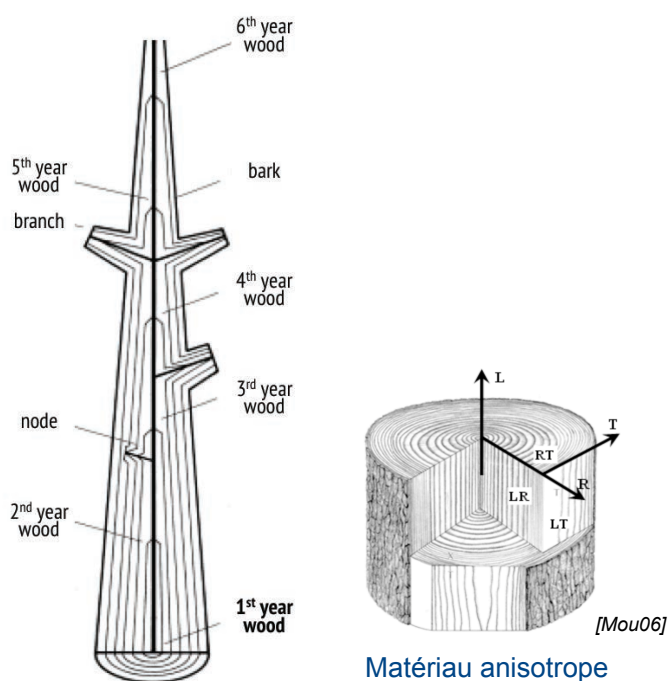


Figure 1 – Croissance d'un tronc d'arbre, issu de [NAV(2005)] et repère associé ([MOU(2006)])

Le bois est défini par son essence. Deux types existent : les résineux et les feuillus. Quelle que soit l'essence, le bois grandit de manière concentrique (Figure 1) et son tronc peut être divisé en quatre parties (Figure 2) :

- Le duramen, qui est composé de bois mort dont la moëlle. C'est le centre du tronc de l'arbre et il supporte la majorité des sollicitations mécaniques extérieures (son propre poids, le vent, la neige...). Ce bois est le plus dense et le plus résistant du tronc [NAV(2005)], avec les propriétés mécaniques les plus importantes des quatre parties ;
- L'aubier qui est la partie du tronc dont les cellules sont toujours vivantes. La sève montante transite à travers ce bois. Ses propriétés mécaniques sont plus faibles que celles du duramen [NAV(2005)] ;
- Le cambium est la partie du bois qui permet sa croissance. Les cellules du bois s'y développent, avant de devenir l'aubier ;

- L'écorce est faite de liber (ou phloème), la partie intérieure de l'écorce qui dirige la sève descendante, et le suber (ou phellème), la partie externe. Sur certaines espèces d'arbres, le suber est épais et la couche en contact avec l'air, et qui s'écaille (le rhytidome) est celle qui protège réellement le tronc des attaques extérieures (lésions, insectes, champignons, soleil...). Le suber est aussi appelé le liège du tronc.

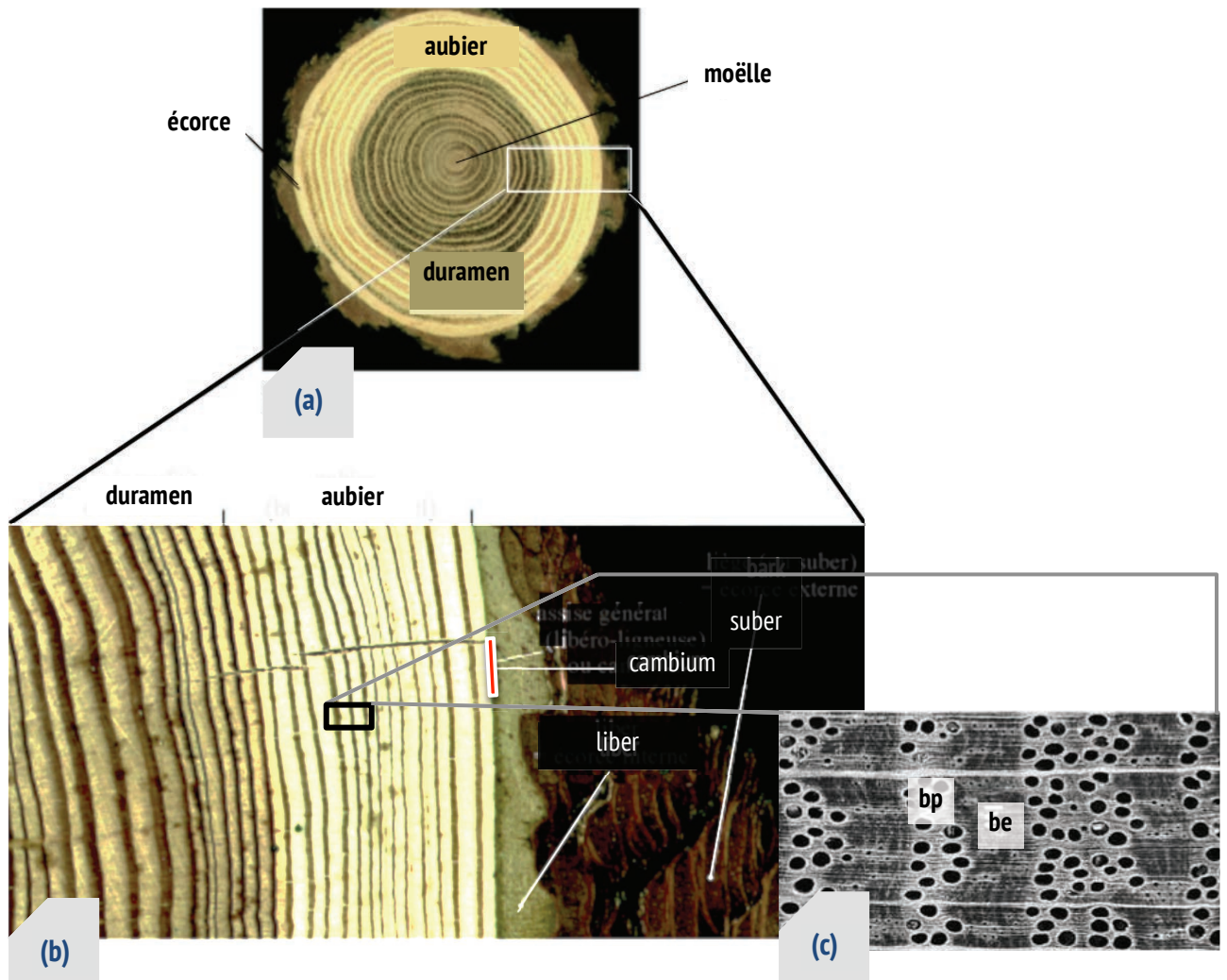


Figure 2 - Composition globale d'un tronc de bois (a). Zoom sur une coupe transversale de tronc (b) – (a) et (b) inspirées de [NAV(2005)].

Trois cernes de bois en micrographie (c). "bp" signifie « bois de printemps » et "be" signifie « bois d'été », issu de [USDA(2010)]

Quand le tronc est coupé dans le plan orthogonal à son axe, des cercles apparaissent, comme on peut le voir sur la Figure 2-a et plus en détail sur la Figure 2-b. Ces cercles sont les cernes du bois. La Figure 2-c est un agrandissement de ces cernes. Leur présence s'explique par une différence de croissance du bois, en fonction des saisons : les températures varient, le transport de la sève ralentit. Dans les climats tempérés, pendant le printemps, les arbres grandissent plus vite qu'en été et ont besoin de beaucoup d'apport énergétique. Le transport de sève est important, la dimension des cellules de transport, situées dans l'aubier, augmentent donc à ce moment-là. Cela entraîne une diminution de la densité dans cette partie du bois, et le bois paraît plus clair. Ce bois est appelé bois de printemps, en opposition au bois d'été, plus dense donc, de par le fait que vers la fin de l'été, la croissance du bois ralentit pour préparer la baisse conséquente de températures de l'hiver. Les cellules de transport rétrécissent, augmentant la densité du bois. Cela se traduit visuellement par

une couleur du bois plus foncée. Pendant l'automne et l'hiver, le bois ne grandit globalement pas. Ces deux types de bois n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques et ont été l'objet de différentes études de comportement ([POL(1966)], [KEL(1968)], [MOH(1997)]).

Pendant sa croissance et au-delà des saisons, un arbre peut se développer de différentes manières, notamment en créant du bois de réaction ou du bois de tension. Ces deux bois sont des bois qui sont créés pour compenser des efforts qui entraîneraient une rupture dans le tronc. Par exemple, un arbre qui pousse sur un flanc de montagne, pour se redresser va devoir compenser les efforts dus à la gravité en fonction de la taille de son tronc. D'un côté du tronc le bois sera dit, de réaction, de l'autre, ce sera du bois de tension. Au sein même du duramen des différences de bois existent. De la même manière, ces bois ont différentes propriétés et peuvent être vus comme des bois défectueux, empêchant ainsi leur utilisation de manière industrielle [JOU(1996)], [FOU(1993)].

Dans l'industrie, il est nécessaire d'avoir un bois régulier pour avoir des propriétés mécaniques génériques. Il faut donc contrôler sa croissance pour éviter la création de bois de compensation (de réaction ou de tension). Dans notre cas, le bois utilisé est un bois issu de forêts finlandaises dont les exploitations sont industrielles. Sa croissance est donc maîtrisée.

1.1.2 A l'échelle microscopique

Comme le rappelle Navi et Heger [NAV(2005)] et comme il est classiquement acquis, les espèces de bois feuillus et les espèces de bois résineux ont des microstructures différentes. Puisque la suite des travaux se concentre sur le bouleau et les dérivés de bouleau, seul les bois feuillus sont présentés. La plupart des feuillus sont composés de vaisseaux, de fibres et de parenchymes radiaux et longitudinaux (cf. Figure 3).

Les vaisseaux conduisent la sève à travers tout le tronc, dans le cambium. Ils peuvent correspondre à 6 à 55% du volume de l'arbre. Les fibres sont la structure de l'arbre et correspondent aux trachéides dans les résineux [CAM(1949)]. Elles sont dans l'axe du tronc et servent de support, ayant un rôle mécanique dans la constitution du tronc. Elles peuvent représenter 25-75% du volume de l'arbre. Pour finir, les parenchymes stockent les nutriments nécessaires à la croissance de l'arbre. Les deux premiers croient dans l'axe du tronc quand les parenchymes grandissent dans le sens tangent. Une micrographie 3D d'un feuillu est présentée Figure 3 et montre toutes ces parties. La taille et la proportion de chaque élément dépendent de chaque espèce de bois. Ces proportions définissent les différentes propriétés mécaniques globales de chaque espèce de bois [REM(2004)].

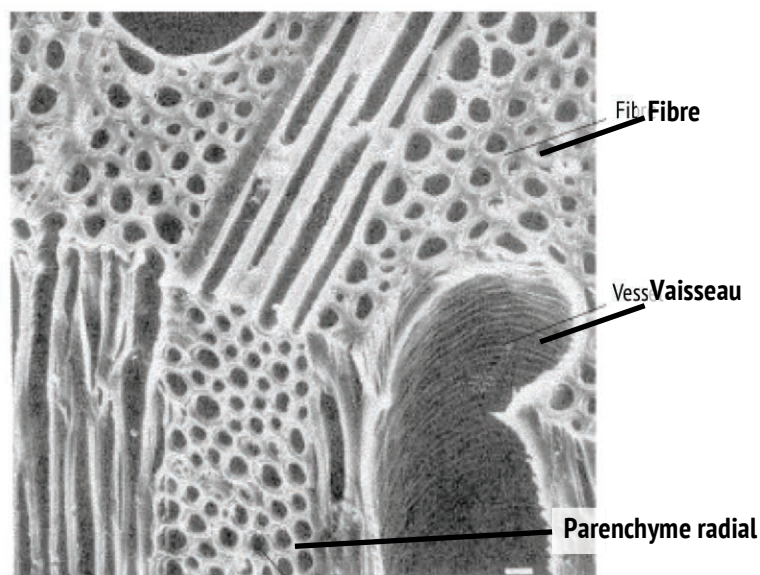


Figure 3 – Micrographie 3D de bois feuillu montrant les différents types de fibres [NAV(2005)]

1.1.3 A l'échelle d'une cellule – Ultrastructure

Tous ces composants (vaisseaux, fibres, parenchymes) sont entourés de murs cellulaires, qui sont une superposition de murs primaires et secondaires. Chaque cellule est liée aux autres grâce à la couche intercellulaire, composée de lignine plus ou moins concentrée [NAV(2005)]. En ce sens, le bois peut être rapporté à un matériau composite, la lignine étant la matrice du matériau et les cellules les renforts. Parce que la couche primaire est fine (0,1 μm quand la couche intercellulaire est de 0,5 à 1,5 μm) et aussi parce qu'elle est majoritairement composée de lignine et peu de cellulose, il est difficile de la différencier de la couche intercellulaire, majoritairement faite de lignine. La couche secondaire est différente, faite en trois parties. S_1 et S_3 sont d'épaisseur similaire quand S_2 est la couche la plus épaisse (cf. Figure 4). Cette dernière épaisseur varie en fonction de la croissance de l'arbre (plus fine dans le bois d'été que le bois de printemps).

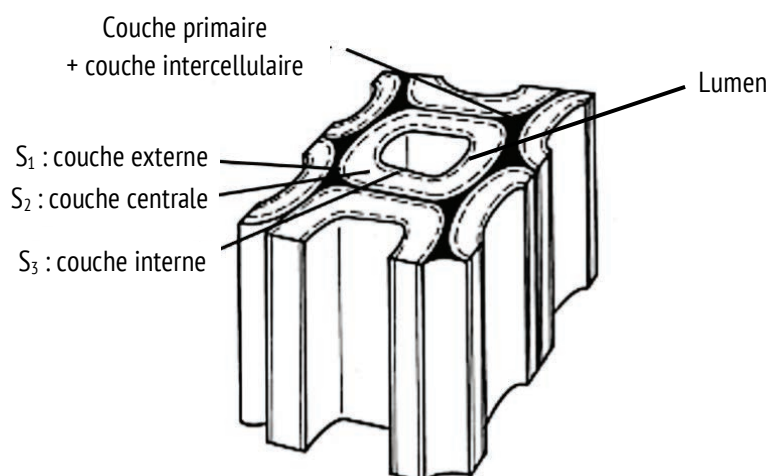


Figure 4 – Schéma de paroi cellulaire entourée par six autres cellules, inspiré de [NAV(2005)]

Au niveau chimique, le bois est fait de cellulose (45-50%), présente majoritairement dans les fibres ; d'hémicellulose et de lignine (20-25% et 20-30% respectivement), présentes dans la matrice (couche

intercellulaire) et d'extractibles (0-10%) jouant le rôle d'éléments protecteurs [NAV(2005)]. La distribution de ces composants dépend de là où l'on se place dans les parois cellulaires (cf. Figure 5).

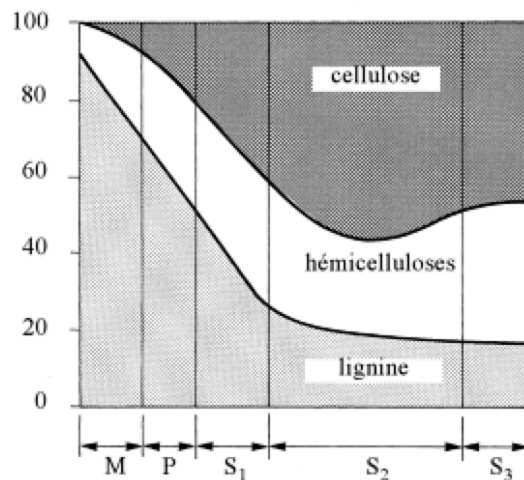


Figure 5 - Distribution, en %, des constituants chimiques des parois cellulaires, issu de [PAN(1970)]

Ces composants font du bois un matériau sensible à différents paramètres, notamment l'humidité, la température ou encore la vitesse de déformation. Ces sensibilités s'expriment différemment suivant l'espèce de bois étudiée, dû aux différences de proportions de chaque composant, au niveau cellulaire ou microscopique mais aussi à la croissance du bois au niveau macroscopique.

1.2 Le bois, un matériau au comportement sensible à différents paramètres

Le bois et les produits à base de bois sont sensibles à l'humidité qui les entoure, la température, et la vitesse de déformation à laquelle ils sont sollicités. Mais le type d'espèce ou le type de bois (bois vert, séché, ...) importent aussi dans l'influence de leur comportement. Cette étude étant focalisée sur le comportement du contreplaqué de bouleau lors d'un impact à température cryogénique, nous nous limitons à la recherche sur le bois séché, l'effet de l'humidité, de la température (négative) et de la vitesse de déformation.

1.2.1 Taux d'humidité dans le bois et les produits dérivés du bois

L'humidité est le premier paramètre généralement étudié influençant le bois. Modifier l'humidité permet la mise en forme du bois depuis des milliers d'années (barques, bateaux mais aussi mobilier), comme elle peut aussi le détériorer [NAV(2005)]. Le bois est composé de cellulose et d'hémicellulose, qui contiennent des groupes hydroxyles, très hydrophiles. Les molécules d'eau viennent se greffer à ces molécules et changent les propriétés du bois, mais aussi sa masse. Cette absorption est définie par le taux d'humidité dans le bois et peut être mesurée de plusieurs manières. L'eau dans le bois peut être stockée de différentes façons : en tant qu'eau liée chimiquement aux groupes hydroxyles quand le bois est encore relativement sec, et au delà de la saturation, quand la limite d'absorption de l'eau par le bois est dépassée, sous forme d'eau libre.

Cette eau liée change les propriétés du bois. A température positive, plus le bois (ou ses dérivés) est humide, plus sa réponse en contrainte à une sollicitation mécanique est faible, quelle que soit le type de sollicitation. De nombreux auteurs ont travaillé sur ce paramètre, couplé ou non, tels que Gerhards [GER(1982)], Koponen [KOP(1999)], Reid [REI(1997)], Siim [SII(2012)], Widehammar [WID(2004)] et Zhao [ZHA(2015)].

Dans les bois, l'eau est considérée comme liée jusqu'à environ 28-30%, quelle que soit l'espèce [NAV(2005)]. À ce pourcentage, on parle de point de saturation des fibres (PSF). Les groupes hydroxyles sont tous liés à une molécule d'eau. D'après Panshin [PAN(1970)], le PSF représente l'humidité dans le bois à partir de laquelle les parois cellulaires sont complètement saturées en eau mais aucune trace d'eau n'est encore présente dans les lumens. Cette condition est associée au volume maximal possible du bois et à des changements majeurs de ses propriétés physiques. Au delà de cette humidité l'eau présente remplit les lumens des cellules et est appelée « eau libre », sans lien chimique avec les composants du bois (cf. Figure 6).

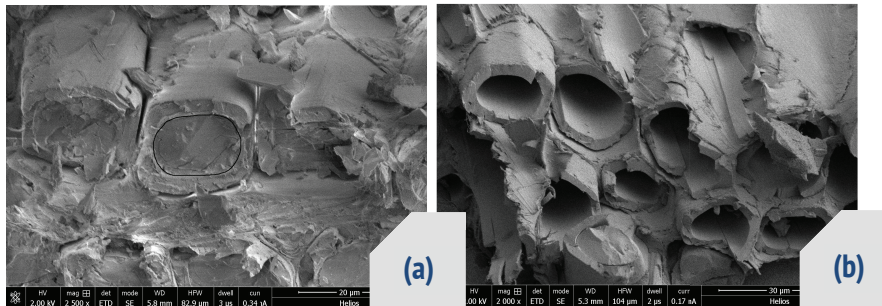


Figure 6 – Cellules de bois au delà du PSF, avec de l'eau libre (a) et des cellules au PSF, les lumens encore vides (b), d'après [ZHA(2015)]

1.2.2 Température de sollicitation

Des études ont été faites à température ambiante et à haute température, très utilisées notamment dans le cadre de la mise en forme du bois. Notre cadre d'étude sollicite le bois à température cryogénique. Des travaux à basse température sont disponibles dans la littérature, comme ceux de Boller [BOL(1953)], Widehammar [WID(2004)], Gerhards [GER(1982)] ou encore Zhao [ZHA(2015)]. Ces travaux sont intéressants pour comprendre l'effet des basses températures dans les matériaux à base de bois mais ils ne peuvent suffire de base pour nos travaux car à chaque fois un paramètre au moins diffère : l'espèce de bois, sa densité, la vitesse de sollicitation, l'humidité, la température en elle-même, la sollicitation... Ils restent cependant des travaux nécessaires à la compréhension du comportement du contreplaqué et des produits dérivés du bois à cette température. Tous arrivent aux mêmes conclusions que l'abaissement de la température entraîne une augmentation de la contrainte, quelle que soit la sollicitation. Le bois peut aussi devenir plus fragile, suivant la température, le produit (bois clair ou dérivé du bois), et l'espèce.

Des travaux sur le contreplaqué étudié ici ont été faits en compression hors plan et à température cryogénique [DNV(2003)], [DNV(2006-1)], [DNV(2006-2)]. Malheureusement, la température des échantillons est non contrôlée dans ces travaux, ce qui nous empêche de les utiliser tels quels sans vérifier la véracité des valeurs des paramètres obtenus.

1.2.3 Vitesse de déformation

Ce paramètre aussi influence le comportement du bois et des dérivés de bois, et de nombreux travaux ont déjà illustré ce phénomène. Notamment Bragov [BRA(1997)], Widehammar [WID(2004)], Gerhards [GER(1982)], Reid [REI(1997)], Thomas [THO(2004)]. Tous constatent que la vitesse de déformation joue un rôle prépondérant dans l'augmentation de la contrainte en compression ou à l'impact. Mais encore une fois, tous ces travaux répondent partiellement à nos attentes, traitant souvent de la vitesse de déformation à

l'ambiante, concernent d'autres espèces ou traitent de bois clair et non de produit dérivé du bois comme le contreplaqué. Le plus souvent ils décrivent les propriétés selon la direction des fibres.

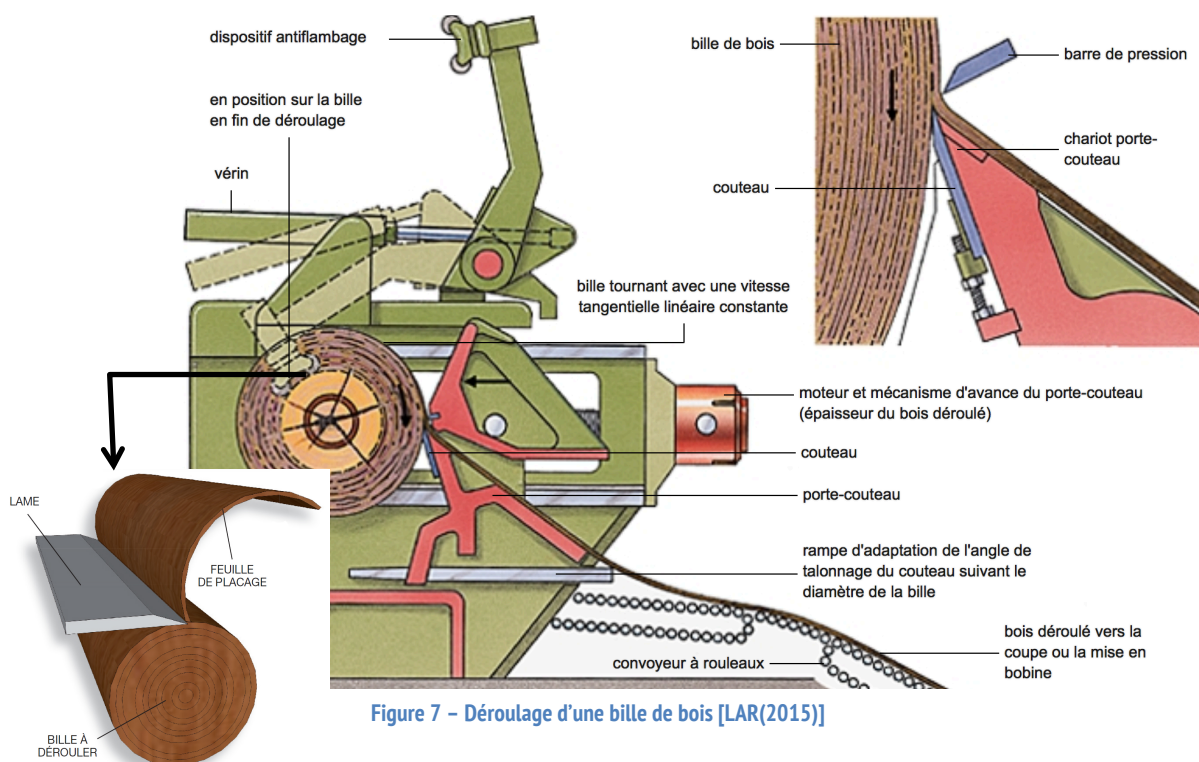
Beaucoup d'études fondamentales ne sont pas citées ici, car cette bibliographie a été limitée aux travaux proches des nôtres, sur lesquels nous avons pu nous baser pour entamer l'étude du contreplaqué de bouleau, à différentes humidités, différentes températures et différentes vitesses de déformation.

2 Le contreplaqué de bouleau – Présentation et comportement

2.1 Description du matériau étudié – le contreplaqué de bouleau

2.1.1 La création du contreplaqué

Le contreplaqué est un dérivé du bois brut. Il est fabriqué à partir de bois déroulé (Figure 7). Les plaques obtenues sont collées les unes aux autres, généralement croisées à 0°-90° (notre cas) et collées entre elles avec différentes colles (Figure 8). Les colles utilisées peuvent conférer des propriétés intéressantes aux composés de bois comme par exemple une meilleure résistance à l'eau grâce à la colle phénolique dans notre contreplaqué.



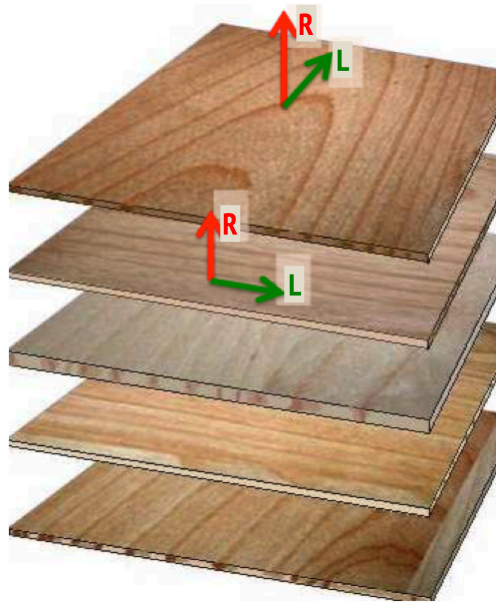


Figure 8 – Assemblage du contreplaqué [PRA(2012)]. L'axe radial, noté R (perpendiculaire au rayon du tronc de l'arbre) et longitudinal, noté L (dans le sens des fibres) sont représentés sur les deux premières feuilles.

Sur la Figure 8, on constate que malgré le croisement des feuilles de bois clair, la direction radiale est la même dans le contreplaqué que dans le tronc d'arbre initial. La direction hors plan est donc dénommée direction radiale. Les directions transversale et longitudinale du tronc initial ne sont quant à elles pas conservées dans le contreplaqué, elles sont alternées de pli en pli en raison du croisement des feuilles de bois. Il est donc attendu que le comportement du contreplaqué soit relativement orthotrope. Par commodité, la direction des fibres des plis extérieurs est choisie pour définir la direction longitudinale du contreplaqué. La direction transverse du contreplaqué complète la base ainsi définie.

2.1.2 Fiche technique du produit étudié

Le produit étudié est un contreplaqué de bouleau finlandais. Il est composé de 9 plis, et fait 12 mm d'épaisseur. Les feuilles de bois sont collées à la colle phénolique (grade III), ce qui lui donne les caractéristiques d'un contreplaqué « marine » (les feuilles de bois ne se décollent pas avec l'eau). Ce matériau a une densité de 680 kg/m^3 à 65% humidité relative dans l'air, ce qui correspond à une humidité dans le contreplaqué de 12% à température ambiante. A titre d'exemple, à 8% d'humidité dans le contreplaqué (humidité de référence dans nos travaux), la densité est de 670 kg/m^3 à température ambiante. Le module élastique de ce contreplaqué de bouleau dans le sens transverse est défini à 820 MPa à 20°C et 1800 MPa à -163°C d'après [DNV(2006-1)].

2.2 Comportement mécanique du contreplaqué

Le contreplaqué est notamment étudié à -160°C à une haute vitesse de déformation en compression hors plan et dans ces conditions, aucune bibliographie n'est disponible. Cependant, on sait que dans son plan radial, le bois clair a un comportement du même type que celui de matériaux cellulaires. Celui du contreplaqué sera donc du même type. Le rapport [DNV-CN30(2006)] donne les modules élastiques du contreplaqué en compression hors plan, à 20°C et -163°C en quasi-statique. On sait aussi que le bois est un matériau anisotrope [GUI(1987)], de par la manière dont il grandit (section 1.1). Il est ainsi nécessaire de

préciser le référentiel dans lequel les échantillons sont sollicités à chaque campagne d'essai. De nombreux travaux font référence dans l'étude du comportement de ces matériaux, notamment Gibson et Ashby [GIB(1997)] et Pavi et Heger [NAV(2005)]. On peut définir trois directions dans le bois clair telles que sur la Figure 1. Le Wood Handbook [USDA(2010)] et Gerrard [GER(1987)] ont identifié les modules élastiques rassemblés Tableau 1, pour une sollicitation du bois de bouleau selon chaque direction. Renaud [REN(1996)] ou Guitard [GUI(1987)] trouvent des résultats assez similaires pour du bois clair de bouleau. Par contre, des essais de compression hors plan [DNV-CN30(2006)] réalisés en régime quasi statique normalisé et pour une humidité de 12% conduisent à un module ER de 820 MPa, soit une valeur significativement plus élevée que celle proposée pour le bois clair dans la direction radiale.

(en MPa)	[USDA(2010)]	[GER(1987)]
E_L	13900	16300
E_R	1084	1110
E_T	695	620
$\dot{\epsilon}$	Quasi-statique	Quasi-statique
T°	ambiante	ambiante
MC	12%	9%

Tableau 1 – Valeurs usuelles trouvées de modules élastiques de bouleau suivant les différentes directions et conditions d'essai

Le contreplaqué peut-être considéré comme orthotrope de part la manière dont il est créé (cf. Figure 8, section 2.1.1) grâce au croisement des feuilles de bois à 0°-90° dans son montage. Il est même isotrope transverse et cet aspect simplifie la modélisation du comportement.

Son comportement peut être modélisé dans sa partie élastique par un comportement linéaire comme le propose classiquement des auteurs comme Guitard [GUI(1987)], Adalian [ADA(2001)], ou bien [ADA(2002)] qui propose un enrichissement de la loi en dynamique avec un modèle hyper-élastique. Holmberga [HOL(1998)] quant à lui propose un modèle de type mousse, qui permet de simuler aussi le comportement du bois en grandes déformations.

Des normes sont proposées pour les essais sur le bois, quelle que soit la sollicitation, sur du bois clair comme des produits à base de bois ([EN789], [ASTMD5379], [EN310], ou toutes les normes NF-B51, listées notamment par Calegari [CAL(2013)]). Des comparaisons ont pu avoir été faites et disponibles dans la littérature, telle que Fun [FUN(2013)] mais ces normes ne permettent d'obtenir que des modules élastiques, à basse vitesses de déformation (quelques dizaines de microns/s de vitesse de traverse) et jamais à température cryogénique.

2.2.1 Description du comportement attendu en compression hors plan

La Figure 9 montre les mécanismes en jeu lors d'une compression hors plan d'un matériau cellulaire comme le bois et les produits à base de bois. La courbe de compression est divisée en quatre parties, numérotées de 1 à 4. La partie (1), est la partie élastique. Il est admis que le contreplaqué est considéré comme un matériau élastique jusqu'à une certaine contrainte limite élastique (à moins de 5% pour le contreplaqué de bouleau).

Ainsi, dans cette zone, on peut définir un module élastique qui décrit l'évolution de la contrainte. Le comportement devient ensuite irréversible (partie (2)), on parlera de comportement plastique. L'écroutissement observé dans cette partie peut être décrit par un module d'écroutissement. Les parois cellulaires sont sollicitées en compression dans leur plan, les parois les plus faibles flambent en premier, le flambement se propage dans le matériau. Au-delà d'une certaine déformation, une majorité des parois cellulaires ont déjà flambé, et les parois cellulaires sont en contact les unes contre les autres, la compression des parois cellulaires selon leur épaisseur devient prépondérante, certaines parois cellulaires rompent (3) et la phase dite de densification débute alors (4).

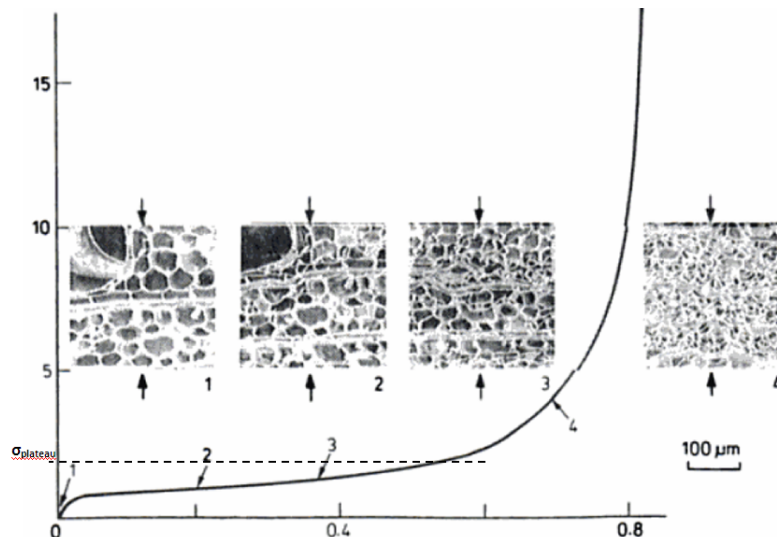


Figure 9 – Comportement d'un matériau cellulaire en compression hors plan [GIB(1997)]

La plupart des travaux existants traite de la façon d'obtenir le module élastique d'un bois ou d'un produit dérivé. Parfois la contrainte limite élastique est aussi donnée mais les travaux sont faits aux petites déformations. Nos travaux tenteront de trouver des paramètres qui permettent de décrire le comportement du contreplaqué en compression hors plan à de grandes déformations, jusqu'à densification.

2.2.2 Description du comportement attendu en cisaillement

Pour le cisaillement, Nicolae Iosipescu propose un dispositif qu'il présente en 1967 [IOS(1967)]. Il est d'abord utilisé pour obtenir les propriétés en cisaillement des métaux. Walrath et Adam [WAL(1983)] ont montré qu'il était également possible d'utiliser le dispositif Iosipescu pour les matériaux composites. La norme ASTM D5379 [ASTMD5379] décrit le mode opératoire à suivre pour ces matériaux, et fait figure de norme pour l'utilisation de ce système pour déterminer les paramètres en cisaillement. De nombreux auteurs ont utilisé ce dispositif pour les composites entre autre Barnes [BAR(1986)] ou Ho [HO(1993)]; et notamment les matériaux à base de bois avec Janowiak [JAN(1990)], Yoshihara [YOS(1999)] ou encore Xavier [XAV(2004)].

D'autres méthodes sont aussi utilisées, comme le test SPT (plaque carrée soumise en flexion), décrite dans la norme ISO 15310 et utilisée par Yoshihara [YOS(2009)]. Il la compare à la norme ASTM-D3044. Yoshihara [YOS(2012)] propose aussi une version modifiée de la version ISO 15310, qu'il compare aux différentes normes. Hassel [HAS(2009)] présente une autre méthode d'essai, basée sur la norme ASTM standard D 4442 (méthode B). La méthode permet de déterminer le module de cisaillement du bois clair ainsi testé.

Les mesures de déformation sont toujours délicates à prendre et se font par l'utilisation de rosettes quand la géométrie le permet, ou de manière optique, sans quoi, il est difficile d'extraire un module de cisaillement. Le bois et ses dérivés étant des matériaux élastiques fragiles en cisaillement (cf. comportement sur le graphique Figure 10 et Ivanov [IVA(2009)]), peu de paramètres permettent de décrire ce comportement. Les efforts en jeu sont très faibles. A chaque fois, ces essais permettent de déterminer le paramètre de résistance au cisaillement ou le module. Ils restent peu adaptés pour des matériaux fins, le plus adapté étant le montage losipescu.

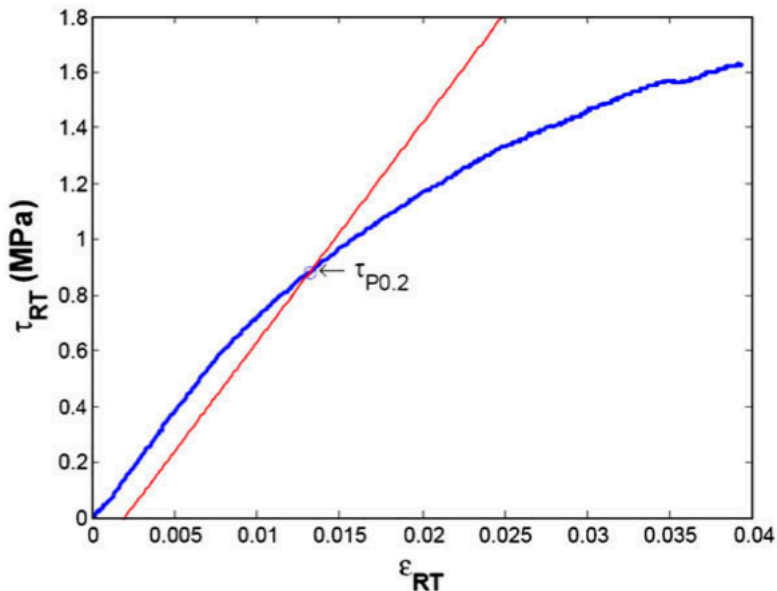


Figure 10 – Déformation nominale en cisaillement pour un épicea norvégien. Extrait de [HAS(2009)]. La résistance en cisaillement est définie par l'intersection entre la courbe de réponse en cisaillement dans sa partie considérée élastique et la parallèle à la pente initiale à 0,2% de déformation.

3 Bilan de l'état de l'art

Le contreplaqué de bouleau de type marine (colle phénolique) étudié dans cette thèse est un élément de structure utilisé en conditions extrêmes dans le milieu maritime. Il est utilisé en tant qu'emballage et que protection dans le transport de GNL. Il existe peu d'études sur le comportement de ce matériau, qu'elles concernent conjointement ou séparément l'effet de la température cryogénique, des différentes humidités et différentes vitesses de déformation, en compression hors plan comme en cisaillement hors plan. Or, sa fonction dans les complexes isolants de type Mark III ou NO96 de la compagnie GTT en font un matériau très sollicité en compression ou en poinçonnement hors plan. Quelques travaux sur ce contreplaqué existent, en particulier Arswendy [ARS(2011)], Arswendy [ARS(2014)], Siim [SII(2012)] et Paik [PAI(2010)] mais aucun d'entre eux ne fait état communément du comportement en compression ou en cisaillement hors plan à -163°C , et à haute vitesse de déformation. Quatre rapports DNV ([DNV(2003)], [DNV(2006-1)], [DNV(2006-2)] et [DNV-CN30(2006)]) présentent des résultats sur ce matériau, mais des biais expérimentaux existent, notamment concernant le contrôle de la température en cryogénie durant l'essai. D'autres travaux existent concernant le bois clair, dont nous nous inspirons pour vérifier nos résultats, mais

d'après nos recherches, la littérature fait preuve de fortes lacunes concernant les paramètres matériaux du contreplaqué dans notre contexte d'utilisation.

Ces manques autour de l'effet de la température cryogénique ou de la vitesse de déformation en compression hors plan ont motivés les travaux présentés dans ce manuscrit.

4 Références

- [ADA(1998)] – C. ADALIAN, *Comportement du bois en compression dynamique multiaxiale - Application à la simulation de crashes de conteneurs*, PhDThesis, Mechanics, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, 1998
- [ADA(2001)] – C. ADALIAN, P. MORLIER, *A model for the behaviour of wood under dynamic multiaxial compression*, Composites Science and Technology, Mai 2000, No. 61, pp. 403-408
- [ADA(2002)] – C. ADALIAN, P. MORLIER, “WOOD MODEL” for the dynamic behaviour of wood in multiaxial compression, Holz als Roh und Werkstoff, 2002, No. 60, pp. 433–439
- [ADE(2001)] – ADEME, Critt Bois, Fibois, CTBA, *Mesure des caractéristiques des combustibles bois*, Juillet 2001
- [ARS(2011)] - A. ARSWENDY, T. MOAN, *Failure analysis of a liquid natural gas (LNG) containment system – Bending failure of plywood component*, Wood Material Science and Engineering, November 2011, No. 7, pp. 30-40
- [ARS(2014)] – A. ARSWENDY, T. MOAN, *Strength and stiffness assessment of an LNG containment system – Crushing and buckling failure analysis of plywood components*, Engineering Failure Analysis, December 2014, No. 48, pp. 247–258
- [ASTMD5379]- ASTM D 5379/D 5379M - *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*, 2005
- [BAR(1986)] - J.A. BARNES, M. KUMOSA et D. HULL, *Theoretical and experimental evaluation of the Iosipescu shear test*, Composites Science and Technology, vol. 28, Issue 4, 1987, pp.251-268
- [BOL(1953)] - K. H. BOLLER, *Strength of wood at low temperatures*, Low temperature test methods and standards for containers, Committee on packing, packaging and preservation, 1953, pp. 64-76.
- [BRA(1997)] - A. BRAGOV, A. K. LOMUNOV, *Dynamic Properties of Some Wood Species*, Journal of Physics IV, Aug. 1997, pp. 487-492.
- [CAL(2013)] – L. CALEGARI, C. C. A. CALEGARI, P. J. G. LOPES, D. A. GATTO, D. M. STANGERLIN, *Normalization for determining physical and mechanical properties in woods*, Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.), Pelotas, Novembre 2013, Vol.4, No. 02, pp. 122-138
- [CAM(1949)] – J. CAMPREDON. *Le bois*. Presses Universitaires de France, 1949
- [DNV(2003)] - *Lng membrane materials - plywood - test results*, Technical Report No. 2003-3421, DNV, Det Norske Veritas, 2003.
- [DNV(2006-1)] - *Testing of plywood at lng temperatures – Phase 1*, Technical Report NO. 2006-3519, DNV, Det Norske Veritas, Veritasveien 1, NO-1322 Høvik, Norway, 2006.
- [DNV(2006-2)] - *Testing of plywood at lng temperatures – Phase 2*, Technical Report NO. 2006-3580, DNV, Det Norske Veritas, Veritasveien 1, NO-1322 Høvik, Norway, 2006.
- [DNV-CN30(2006)] - *Sloshing analysis of lng membrane tanks*, Classification Notes No. 30.9, DNV, Det Norske Veritas, 2006.
- [EN310] – *EN 310 : Determination of modulus of elasticity in bending and of bending Strength*, 1993

- [EN789] – EN 789: 2004 timber structures-test methods-determination of mechanical properties of wood based panels, 2004.
- [FOU(1993)] – M. FOURNIER, B. CHANSON, B. THIBAUT, D. GUITARD, *Mesures des déformations résiduelles de croissance à la surface des arbres, en relation avec leur morphologie. Observations sur différentes espèces*, Annals of Forest Science, n°51, pp. 249-266, Février 1993
- [FUN(2013)] – T. S. FUN et M. Z. JUMAAT, *Comparison of European standard EN 310 and EN 789 in determining the bending strength and modulus of elasticity of red seraya (Shorea spp.) plywood panel: experimental and finite element analysis*, European Journal of Wood Products, Mai 2013, No. 71, pp. 483–490
- [GER(1982)] – C. C. GERHARDS, *Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects*, Wood and Fiber, 1982, Vol. 14, n° 1, pp. 4-36.
- [GER(1987)] – C. GERRARD, *The equivalent orthotropic elastic properties of plywood*, Wood Science and Technology, 1987, No. 21, pp. 335-348.
- [GIB(1997)] – L. J. GIBSON, M. F. ASHBY. *Cellular solids - Structure and properties*. New York: Cambridge University Press, 1997.
- [GUI(1987)] – D. GUITARD, F. EL AMRI, *Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux*, Ann. Sci. For., 1987, Vol. 44, No. 3, pp. 335-358
- [HAS(2009)] – B.I. Hassel, P. Berard, C.S. Modén, L.A. Berglund, *The single cube apparatus for shear testing – Full-field strain data and finite element analysis of wood in transverse shear*, Composites Science and Technology, November 2008, No. 69, pp. 877–882
- [HO(1993)] – H. HO, J. MORTON, G. L. FARLEY, *Non-linear numerical analysis of the losipescu specimen for composite materials*, Final technical report, NASA-CR-195934, Composites Science and Technology, vol. 50, 1994, pp. 355-365
- [HOL(1998)] – S. HOLMBERGA, K. PERSSONA, H. PETERSSON, *Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials*, Computers and Structures, October 1998, Vol. 72, pp. 459-480
- [IOS(1967)] – N. Iosipescu, *New accurate procedure for single shear testing of metals*. J MATER, 1967, vol. 2, no 3, p. 537-566.
- [IVA(2009)] – I. V. IVANOV and T. SADOWSKI, *Numerical modelling and investigation of plywood progressive failure in CT tests*, Computational Materials Science, 2009, Vol. 45, pp. 729-734
- [JAN(1990)] – J.J. JANOWIAK, R.F. PELLERIN, *Iosipescu shear test apparatus applied to wood composites*, Wood and Fiber Science, vol. 23, n°3, 1991, pp. 410-418
- [JOU(1996)] – B. JOUREZ, *Le bois de tension. 1. Définition et distribution dans l'arbre*, Biotechnol. Agron. Soc. Environ., Vol. 1, n° 2, pp. 100-112, Novembre 1996
- [KEL(1968)] – R. KELLER, *Des caractéristiques nouvelles pour l'étude des propriétés mécaniques des bois : les composantes de la densité*, Annals of Forest Science, Vol. 25, n°4, pp. 237-249, 1968
- [KOP(1999)] – S. KOPONEN, I. SAAVALAINEN, *Comportement mécanique du contreplaqué. Les matériaux composites à base de bois. Revue des composites et des matériaux avancés*, 1999, pp. 107-119.
- [LAR(2015)] – Larousse 2015
- [LEG(1994)] – C. Le Govic, M. KHEBIBECHE, « Methodological developments in the testing of wood based panels. Part I: Tensile and compression tests », Materials and Structures, 1994, No. 27, pp. 229-236

- [MOH(1997)] – U.-B. MOHLIN, *Fibre development during mechanical pulp refining*, Journal of pulp and paper science A. Vol. 23, n° 1, pp. J28-J33, 1997
- [MOU(2006)] – M. MOUTEE, *Modélisation du comportement mécanique du bois en séchage*, PhDThesis, Département des sciences du bois et de la forêt, Faculté de Foresterie et géomatique de l'Université de Laval, Québec, 2006, 173.
- [NAV(2005)] – P. NAVI, F. HEGER. *Comportement thermo-hydomécanique du bois: applications technologiques et dans les structures*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [OSE(1984)] – J. M. OSEPCHUK, *A History of Microwave Heating Applications*, IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, Vol MTT-32, No. 9, Septembre 1984
- [PAI(2010)] – J. K. PAIK, J. M. SOHN, Y. S. SHIN ET Y. S. SUH, *Nonlinear Structural analysis of membrane-type LNG carrier cargo containment system under cargo static pressure loads at the cryogenic condition with a temperature of -163°C*, Ships and Offshore Structures, November 2010, Vol. 6, No. 4, 2011, pp. 311–322
- [PAN(1970)] – A. J. PANSHIN, C. DE ZEEUW. *Textbook of wood technology*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1970.
- [POL(1966)] – H. POLGE, *Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants : applications dans les domaines Technologique et Physiologique*, Annals of Forest Science, Vol. 23, n°1, pp. 1-206
- [PRA(2012)] – R. PRAT. *Le bois - Le contreplaqué*, www.snv.jussieu.fr/bmedia/bois/contreplaque.htm, Février 2012, (accès le Octobre 2014)
- [REI(1997)] – S. R.REID, C PENG, *Dynamic uniaxial crushing of wood*, International Journal of Impact and Engineering 1997, Vol. 19, n° 5-6, pp. 531-570.
- [REM(2004)] – S. REMY, M. BODSON, J.-P. TROUSSART, L. WELCOMME, P. CALMANT, J. VAN CLEVE, D. ROUSSELET, E. DEPIEREUX. *Atlas d'histologie et d'anatomie des plantes vasculaires*. 2004.
- [REN(1996)] – M. RENAUD, M. RUEFF, A. C. ROCABOY, *Mechanical behaviour of saturated wood under compression - Part 1. Behaviour of wood at high rates of strain*, Wood Science and Technology, 1996, No. 30, pp. 153-164
- [SII(2012)] – K. SIIM, R. KASK, H. LILLE, E. TÄKKER, *Study of physical and mechanical properties of birch plywood depending on moisture content*, 8th International DAAAM Baltic Conference. Tallinn, Estonie: Industrial Engineering, 2012.
- [THO(2004)] – W. H. THOMAS, *Planar shear moduli of rigidity of an oriented strand board from bending and shear tests* (article), Materials and Structures, No.37, pp. 480-484, 2004
- [TRI(2012)] – M.-C. TROUY-TRIBOULOT, P. TRIBOULOT. «Sciences et ingénierie du bois.» *Matériau bois - Structure et caractéristiques*. Techniques de l'ingénieur, 10 Nov. 2012.
- [USDA(2010)] – United States Department of Agriculture, Forest Service. *Wood Handbook Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. Wisconsin: Forest Products Laboratory, 2010.
- [WAL(1983)] – D. E. WALRATH et D. F. ADAMS, *The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite Materials*, Experimental Mechanics, Mars 1983, pp. 105-110

- [WID(2004)] - S. WIDEHAMMAR, *Stress-Strain Relationships for Spruce Wood: Influence of Strain Rate, Moisture Content and Loading Direction*, Society for Experimental Mechanics, Février 2004, Vol. 44, n° 1, pp. 44-48.
- [XAV(2004)] - J.C. XAVIER, N. M. GARRIDO, M. OLIVEIRA, J.L. MORAIS, P. P. CAMANHO, F. PIERRON, *A comparison between losipescu and off-axis shear test methods for characterization of Pinus Pinaster Ait*, Composites, Part A, applied science and manufacturing, vol. 35, 2004, pp. 827-840.
- [YOS(1999)] - H. YOSHIHARA, H. OHSAKI, Y. KUBOJIMA, M. OHTA, *Applicability of the losipescu shear test on the measurement of the shear properties of wood*, Journal of Wood Science, vol. 45, Issue 1, February 1999, pp. 24-29
- [YOS(2009)] - H. YOSHIHARA, *Edgewise shear modulus of plywood measured by square-plate twist and beam flexure methods*, Construction and Building Materials, Juillet 2009, No. 23, pp. 3537-3545
- [YOS(2012)] - H. YOSHIHARA, *Shear Modulus and Shear Strength Evaluation of Solid Wood by a Modified ISO 15310 Square-Plate Twist Method*, DRVNA INDUSTRIJA, Février 2012, Vol. 63, No. 1, pp. 51-55
- [ZHA(2015)] - L. ZHAO, J. JIANG, J. LU, T. ZHAN. «Flexural Property of Wood in Low Temperature Environment.» *Cold Regions Science and Technology* 116 (Aug. 2015): 65-69.

CHAPITRE II

Dimensionnement des outils expérimentaux et présentation des protocoles

Ce chapitre présente les différents dispositifs expérimentaux développés ou existants pour mettre en place nos essais de compression de cisaillement hors plan du contreplaqué de bouleau. Plusieurs conditions d'essais comme le taux d'humidité dans le contreplaqué, sa température, ou la vitesse de déformation à laquelle il est sollicité, influencent son comportement. Ces paramètres sont identifiés et présentés dans le chapitre précédent mais des essais et une quantification de leurs effets combinés sur le contreplaqué de bouleau n'a jamais été faite. En compression, ces essais sont menés pour des humidités dans les échantillons allant de 2% à 15%, des tentatives de mises à 28% ayant aussi été menées. La température varie de 25°C à -170°C à travers 5 paliers de température. La plage de vitesses de déformations va de $4.10^{-4}/s$ à 700/s. En cisaillement, seuls des échantillons à 8% d'humidité sont testés, pour deux vitesses de déformation de $1,2.10^{-3}/s$ à 970/s, et à température ambiante.

Les échantillons de contreplaqué de bouleau sont stabilisés à différentes humidités en suivant divers protocoles présentés dans la première partie de ce chapitre. Des dispositifs d'isolation en compression ont été conçus pour permettre les essais à froid et à différentes vitesses de déformation, adaptés à chaque type de machine. Toute la mise en place en compression quasi-statique est décrite dans la deuxième partie de ce chapitre, la compression dynamique utilisant une machine différente est décrite dans la troisième partie. Le cisaillement exige le développement d'un montage spécifique, compatible avec une machine hydraulique pour les essais à vitesse de déformation quasi-statique et avec un dispositif SHPB pour des essais en dynamique. Ce nouvel outil est présenté en quatrième partie.

SOMMAIRE DU CHAPITRE

1	MISE EN CONDITIONS CLIMATIQUES	27
1.1	ECHANTILLONS SECS (2%)	27
1.2	HUMIDITE DE REFERENCE (8%)	29
1.3	HUMIDITE INTERMEDIAIRE (15%)	29
1.4	ESTIMATION DU TEMPS DE CONDITIONNEMENT	29
1.5	STABILITE DE L'HUMIDITE PENDANT LES ESSAIS	29
2	ESSAIS DE COMPRESSION A VITESSE DE DEFORMATION QUASI-STATIQUE	30
2.1	MACHINE UTILISEE ET PROTOCOLE DE MISE EN PLACE	30
2.2	ESSAIS EN CONDITIONS DE TEMPERATURES CRYOGENIQUES	30
2.3	TRAITEMENT DES RESULTATS – PRISE EN COMPTE DE LA RAIDEUR MACHINE	32
3	ESSAIS DE COMPRESSION A HAUTE VITESSE DE DEFORMATION	33
3.1	DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DES BARRES D'HOPKINSON	33
3.2	TRAITEMENT DES RESULTATS BRUTS	35
3.3	DIMENSIONNEMENT DU BANC DE BARRES D'HOPKINSON	36
3.4	UTILISATION D'UN PULSE SHAPER	37
3.5	ADAPTATION DES BARRES D'HOPKINSON AUX ESSAIS A TEMPERATURE CRYOGENIQUE	37
3.6	VALIDATION DES ESSAIS AUX BARRES D'HOPKINSON	38
4	ESSAIS DE CISAILLEMENT, DEVELOPPEMENT D'UN MONTAGE DE CISAILLEMENT	41
4.1	ESSAIS NORMALISES : MONTAGE IOSIPESCU	41
4.1.1	LA GEOMETRIE DE L'ECHANTILLON	41
4.1.2	INSTALLATION DE L'ECHANTILLON DANS LE MONTAGE IOSIPESCU	42
4.2	DEVELOPPEMENT D'UN ESSAI DE CISAILLEMENT AUX BARRES D'HOPKINSON	43
4.2.1	PRESENTATION DU MONTAGE DE CISAILLEMENT ADAPTE AUX BARRES D'HOPKINSON	44
4.2.2	GEOMETRIE DES ECHANTILLONS DANS LE MONTAGE DE CISAILLEMENT IRDL	44
4.2.3	INSTALLATION DE L'ECHANTILLON DANS LE MONTAGE DE CISAILLEMENT IRDL	45
5	BILAN SUR LES OUTILS EXPERIMENTAUX	45
6	REFERENCES	46

1 Mise en conditions climatiques

Pour pouvoir mettre nos échantillons en conditions, plusieurs méthodes ont été utilisées. L'objectif de départ étant d'obtenir des échantillons à 0%, 8% et 15% d'humidité dans le contreplaqué. Plusieurs autres humidités ont pu être obtenues et sont venues étoffer les travaux concernant les effets de l'eau liée dans le bois et dans les panneaux à base de bois. Pour rappel, un échantillon est considéré à l'équilibre lorsque les conditions climatiques restent stables, ainsi la variation de sa masse doit être inférieure à 0,1% en 24h (norme [EN789]). L'humidité est ensuite vérifiée suivant les méthodes décrites précédemment au Chapitre I.

1.1 Echantillons secs (2%)

L'humidité visée dans les échantillons était d'abord de 0%. Or, toutes les méthodes de séchage, efficaces pour du bois clair, décrite par exemple par Panshin [PAN(1970)] et Trouy-Triboulot [TRI(2012)] proposent des températures de séchage autour de 100°C. Il se trouve que les feuilles composant le contreplaqué sont assemblées avec de la colle phénolique, qui se dégrade autour de 80°C. Nous n'avons donc jamais pu atteindre un taux d'humidité dans le contreplaqué de 0%.

Le protocole suivant a permis d'obtenir des taux d'humidité de 4% et 2%. Nos échantillons ont d'abord été séchés grâce à un premier passage en enceinte de séchage SECASI (cf. Figure 1). Cette chambre est contrôlée en température et en humidité suivant l'abaque Figure 2. Si les conditions prédéfinies ne sont pas incluses dans la zone de contrôle (en bleue sur l'abaque), la machine ne contrôle plus le taux d'humidité dans la chambre. D'après l'abaque, une humidité plus faible aurait pu être envisagée mais en pratique, la limite de contrôle de la machine est atteinte.



Figure 1 – Chambre climatique SECASI contenant un lot d'échantillons de contreplaqué de bouleau circulaires

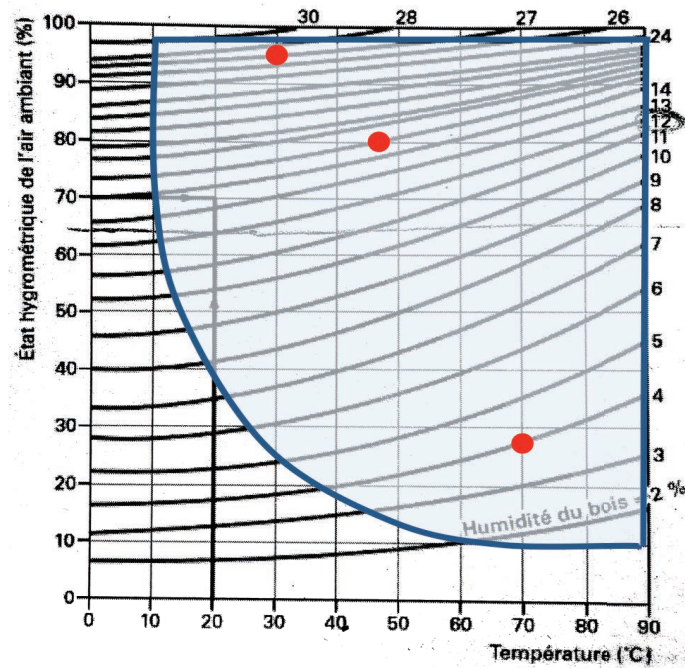


Figure 2 – Abaque SECASI (en bleu) et isothermes de sorption du bois (d’après [PLA(2009)]). Les points rouges sont les points d’humidité visée dans le contreplaqué

Une partie des échantillons ainsi obtenus à 4% a été conservée, sous vide, dans une cloche contenant du gel de silice (Figure 3-a). A une température de 25°C, le gel de silice régule l’humidité de l’air et stabilise le taux d’humidité dans le contreplaqué à 4% ([JAN(2008)]).

En stockant une autre partie de ces échantillons dans une seconde cloche mise sous vide et chauffée (Figure 3-b), le taux d’humidité dans le contreplaqué a pu être abaissé à 2%. Le chauffage est fait par une plaque sur laquelle quatre résistances chauffantes assurent une température de 50°C. Le vide relatif est maintenu en continu, à une pression minimum dans la cloche de -0,2 bar. Malgré un stockage en cloche de 130 jours et une stabilité de masse des échantillons comme le suggère la norme NF EN789, les échantillons n’ont pas atteint une humidité inférieure à 2%.

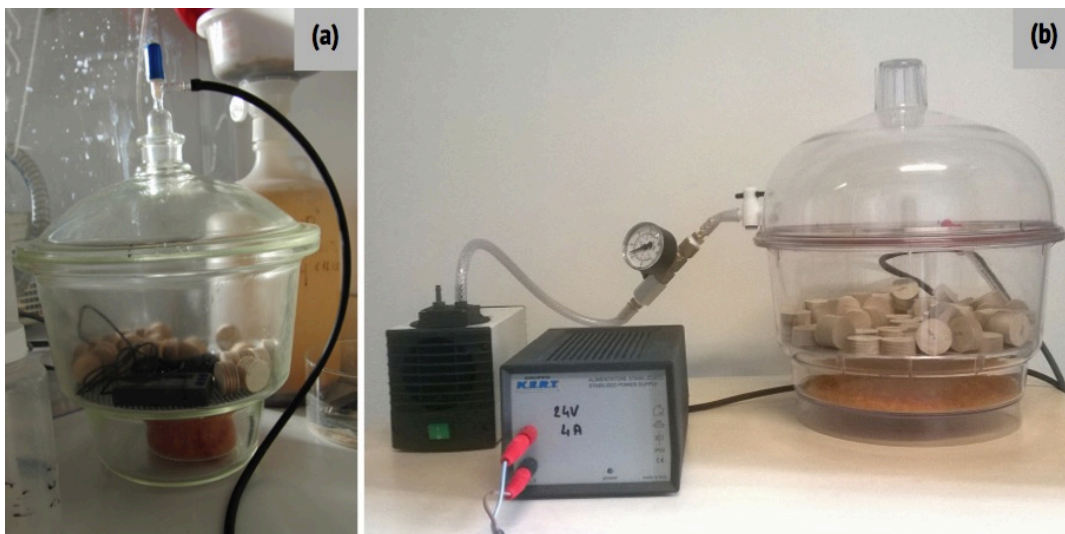


Figure 3 – A gauche (a), cloche à vide avec système de pompe à eau (effet venturi) et contrôle de l’hygrothermie et à droite (b), cloche à vide avec pompe mécanique, et plateau chauffant régulé.

1.2 Humidité de référence (8%)

Nous prenons pour humidité de référence un taux de 8% dans le contreplaqué, valeur de référence dans son utilisation en transport de méthane liquide. Les échantillons sont stockés dans une pièce climatisée, régulièrement contrôlée, à une température de 23°C et une humidité relative dans l'air de 47%. Ces conditions conduiraient d'après graphe Figure 2 à une humidité légèrement supérieure à 8%.

Certains de ces échantillons ont été utilisés en analyse thermogravimétrique (ATG) pour vérifier le taux d'humidité. Sur cinq échantillons, une humidité moyenne dans le contreplaqué de 7,5% +/- 0,5% est observée, ce qui valide les conditions de stockage.

Tous les échantillons sont vérifiés en humidité après essais (cf. Chapitre I).

1.3 Humidité intermédiaire (15%)

L'humidité que nous définirons comme intermédiaire correspond à 15% d'humidité dans le contreplaqué. Elle est obtenue grâce à la chambre SECASI Figure 1, en suivant l'abaque Figure 2. Cela correspond à quatre jours de mise en condition à 80% d'humidité relative et 47°C. Les échantillons sont ensuite stockés dans une cloche, à pression ambiante, grâce au sel chlorure de sodium (NaCl) ([JAN(2008)]).

1.4 Estimation du temps de conditionnement

Le Tableau 1 regroupe l'ensemble des informations pour l'obtention des différents taux d'humidité dans des échantillons de contreplaqué de bouleau, circulaires de 28mm de diamètre et de 12 mm d'épaisseur. Ce choix de géométrie sera justifié Chapitre III.

1.5 Stabilité de l'humidité pendant les essais

Pour vérifier la stabilité de l'humidité dans les échantillons, ceux-ci sont pesés juste avant et juste après l'essai. Il se trouve que pour tous les échantillons testés, aucune perte ou gain de matière n'est constaté. La variation de masse la plus importante a été relevée pour les échantillons dont l'humidité est de 15%, avec une variation qui reste très faible, en moyenne de 0,45% avec une valeur maximale de 0,55% sur une répétabilité de 7 essais.

Les essais de référence à 8% voient leur masse varier en moyenne de 0,08%, avec un maximum à 0,13% sur un total de 15 essais. On peut donc conclure que la masse reste constante au cours de l'essai, et donc que le taux d'humidité au cours de l'essai aussi.

Humidité dans le contreplaqué [%]	Outils d'acclimatation	Température [°C] / Humidité relative [%]	Temps requis (mise en ambiance ou stockage)
2%	Cloche à vide et pompe à eau + Gel de silice	50°C / 10% RH	130 jours
4%	Enceinte climatique SECASI	70°C / 28% RH	5 jours
4%	Cloche à vide et pompe à eau + Gel de silice	23°C / 17% RH	30 jours
8%	Salle climatisée	23°C / 47% RH	2 jours
15%	Enceinte climatique SECASI	45°C / 80% RH	4 jours
15%	Cloche à vide et pompe à eau + sels de chlorure de sodium	23°C / 75% RH	Seulement pour stockage après passage dans l'enceinte SECASI
PSF	Enceinte climatique SECASI	30°C / 96% RH *	3 jours
PSF	Cloche à vide et pompe à eau + sels de sulfate de potassium	23°C / 97% RH	Seulement pour stockage après passage dans l'enceinte SECASI

* Les conditions pour obtenir le point de saturation des fibres ne sont pas bien choisies pour la chambre SECASI à disposition. De la condensation est sur les parois et humidifie les échantillons. L'humidité obtenue dans le contreplaqué après vérification était de 33% +/- 3%.

Tableau 1 – Mises en conditions des échantillons de contreplaqué de bouleau, circulaires de 28 mm de diamètre et 12 mm d'épaisseur

2 Essais de compression à vitesse de déformation quasi-statique

2.1 Machine utilisée et protocole de mise en place

Les essais sont menés sur une machine hydraulique de traction-compression de marque INSTRON 8803. Elle est équipée de deux différentes cellules de mesures de 50kN ou 500kN. Nous l'utilisons en compression avec des plateaux en acier inoxydable. L'un des deux plateaux est rotulé, l'autre est fixe et perpendiculaire à l'axe de sollicitation aux défauts machine près. Pour ajuster le parallélisme, les deux plateaux sont mis en contact, le plateau rotulé n'étant pas serré. La rotule oriente le plateau du haut et l'ajustement est ensuite gardé par serrage. Une attention particulière est accordée au centrage de l'échantillon sur les plateaux, avec une tolérance de 3mm, afin d'assurer une sollicitation axiale des cellules de force.

2.2 Essais en conditions de températures cryogéniques

L'étude bibliographique montre qu'une majorité d'essais mécaniques du bois en cryogénie sont réalisés à température ambiante après un trempage de l'échantillon dans l'azote liquide [DNV(2003)], [DNV(2006-1)], [KOL(1940)]. Afin de limiter toute évolution parasite de la température d'une part et toute absorption d'azote liquide par le contre-plaqué d'autre part, nous avons utilisé une enceinte climatique régulée (Figure 4). Elle est réalisée dans un complexe isolant {contreplaqué/mousse de

polyuréthane/contreplaqué} d'épaisseur 100mm. L'épaisseur de la chambre impose donc d'utiliser des allonges supplémentaires. Elles permettent aussi d'isoler thermiquement la cellule de force et le vérin de la machine, dont le joint est sensible aux températures cryogéniques. Elles sont faites d'acier, dont le rapport diamètre/longueur évite tout problème de flambement.

Les températures cryogéniques sont obtenues en injectant de l'azote liquide via une buse installée dans un coin de l'enceinte climatique (Figure 4). Une boucle de régulation contrôle la vanne qui alimente la buse. Un ventilateur est utilisé pour homogénéiser la température dans la chambre et une attention spéciale est prise pour éviter un quelconque contact des échantillons avec l'azote liquide injecté [KIM(2015)], notamment en utilisant un couvercle en aluminium très fin pour abriter les échantillons. Des essais de compression avec des échantillons immergés dans l'azote liquide, ainsi que d'autres essais avec des échantillons simplement trempés dans l'azote ont tout de même été réalisés pour évaluer l'effet de cette absorption sur le contre-plaqué. Ils sont présentés dans le Chapitre III.

La température est contrôlée grâce à différents thermocouples type T, (nickel/cuivre) utilisés pour faire des mesures sur une gamme de températures de -250°C à 400°C. L'un est serti sur le plateau de compression, quand un autre est installé dans la chambre comme le présente la Figure 4. Un troisième thermocouple de 0,5 mm de diamètre est inséré dans l'échantillon, dans un alésage de 10 mm de long et 0,63 mm de diamètre, percé à mi-épaisseur de l'échantillon. La surface correspondant à ce trou, vue de la face en compression, est de 1,5% de la surface totale qui subit le chargement et aucun effet de ce trou n'a pu être constaté sur le comportement des échantillons circulaires de 28mm de diamètre.

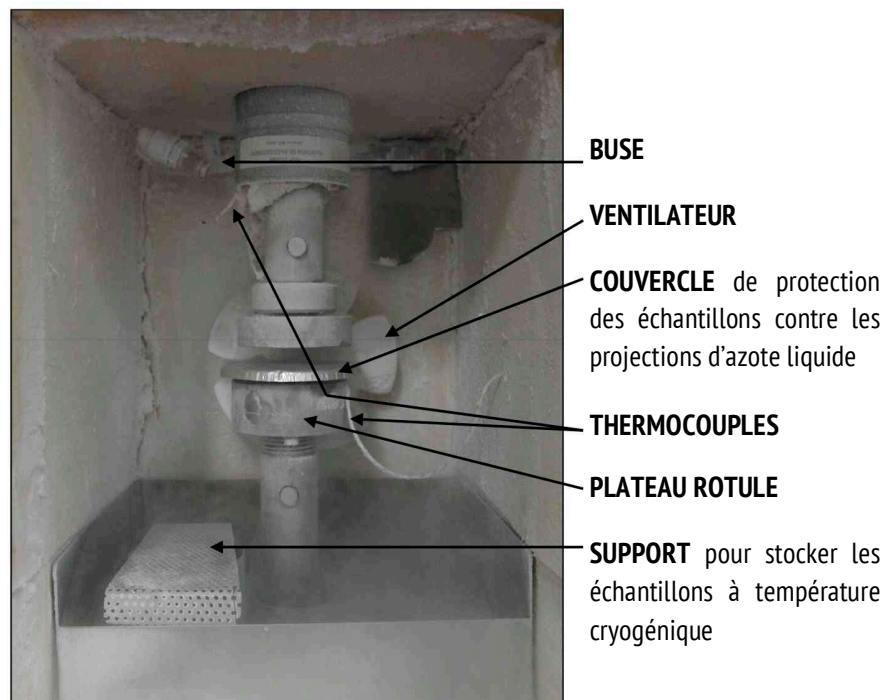


Figure 4 – Enceinte climatique adaptée à la machine hydraulique

Pendant tous nos tests en cryogénie, l'amplitude de variation observée est inférieure à +/- 10°C pour des mesures de température faite avec les thermocouples de type T.

2.3 Traitement des résultats – Prise en compte de la raideur machine

Nos échantillons sont d'une épaisseur de 12 mm, d'une part, et les conditions d'essais cryogéniques d'autre part, nous empêche de faire des mesures de déformation directement sur le matériau par jauges de déformation ou extensométrie mécanique comme optique. Sur la machine hydraulique, le déplacement de la traverse est donc utilisé comme mesure. Or, du fait que la machine n'ait pas une raideur infinie, les différents déplacements mesurés incluent les déplacements liés à la déformation du bâti de la machine et/ou ses jeux fonctionnels. On n'a donc pas accès au déplacement strict de l'échantillon sous la sollicitation imposée. Il convient de déterminer la contribution en déplacement liée à la machine en fonction de l'effort mesuré par la cellule. La méthode consiste en la réalisation d'un essai sans échantillon, où les plateaux de compression sont en contact. On mesure alors le déplacement de la machine, en fonction de l'augmentation de la charge. Il est commun de considérer que cette évolution est linéaire au-delà d'une valeur d'effort correspondant à la mise en place des amarrages.

Malheureusement, dans le cas de la compression du bois, et avec les dimensions d'échantillons choisies, les efforts de compression obtenus pendant la déformation élastique sont faibles, de l'ordre de quelques kN, et ne permettent pas de considérer un comportement linéaire de la raideur machine. Ce phénomène est illustré Figure 5 avec les évolutions de l'effort en fonction du déplacement de traverse pour une compression classique d'un contreplaqué (échantillon de 28mm de diamètre, 12mm d'épaisseur à 23°C, 0.004/s et 8% d'humidité) et un essai de raideur machine pour lequel la charge est multipliée par 0,1 pour permettre une comparaison. La totalité du comportement dit élastique de l'éprouvette s'effectue pour des charges faibles et inférieures à 6 kN, pour lesquelles la raideur machine a un comportement fortement non linéaire.

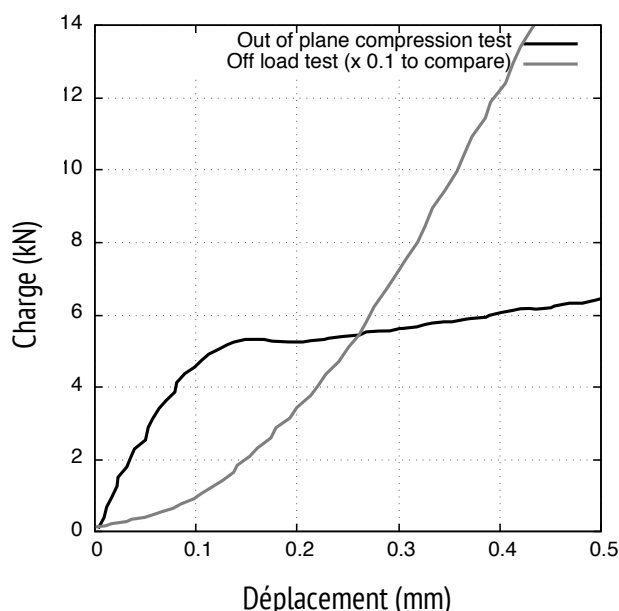


Figure 5 – Raideur machine (courbe grise) et essai de compression de référence (courbe noire), à température ambiante, 8% d'humidité dans le contreplaqué et à $4.10^{-3}/s$

La modélisation de cette courbe de raideur en fonction de la charge se fait en deux parties. La première partie de la courbe de raideur est modélisée par une fonction cubique. La seconde partie est considérée

linéaire. Une valeur d'effort de 12,5 kN, commune à tous les essais du plan d'expérience est choisie pour la transition cubique-linéaire (cf. graphique Figure 6).

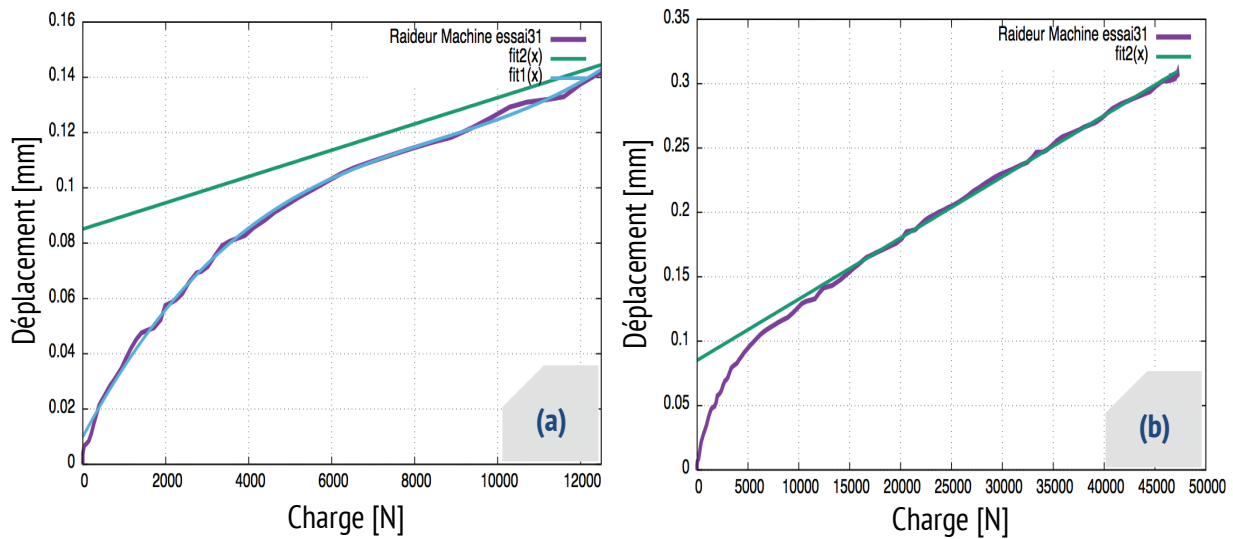


Figure 6 – Déplacement sur un essai "à vide" (en violet) en fonction de la charge imposée. Dans la zone [0kN ; 12,5kN], graphique (a), la courbe de tendance (en bleu) est cubique et nommée fit1(x). La deuxième partie de la courbe est modélisée par une droite, nommée fit2(x) (en vert), présentée sur l'essai complet sur le graphique (b).

La raideur machine est identifiée pour chaque campagne d'essais et chaque condition expérimentale.

Le déplacement mesuré $\Delta L_{mesuré}$ est corrigé de la mesure de déplacement du à la raideur machine $\Delta L_{machine}$ pour obtenir le déplacement corrigé ΔL au niveau de l'échantillon selon :

$$\Delta L = \Delta L_{mesuré} - \Delta L_{machine}$$

Ce qui permet de calculer la déformation nominale de l'échantillon :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

avec L_0 la hauteur initiale.

Le graphique Figure 6 nous permet de valider cette manière de traiter la raideur machine. Ce graphique présente le déplacement en fonction de la charge. Les modèles conduisent à une erreur maximale de quelques centièmes de millimètres lorsque l'effort est proche de 12,5 kN, soit une erreur en déformation de quelques 10^{-3} .

3 Essais de compression à haute vitesse de déformation

3.1 Description du fonctionnement des barres d'Hopkinson

Les vitesses de déformation de $10^2/s$ à $10^4/s$ sont obtenues par l'utilisation de barres d'Hopkinson, aussi appelées barres de Kolsky, initiées par les travaux de John et Bertram Hopkinson [JHOP(1872-1)], [JHOP(1872-2)], [BHOP(1905)] et [BHOP(1914)], éprouvé par Kollmann [KOL(1949)]. On les appelle aussi SHPB (Split Hopkinson Pressure Bars). Elles sont composées d'un projectile, d'une barre d'entrée, dont les données sont indexées $.i$, et d'une barre de sortie dont les données sont indexées $.o$ comme illustré sur la Figure 7. Les déformations dans les barres sont mesurées par deux ponts de jauges de déformation G_i et G_o .

L'échantillon est placé entre les deux barres, le projectile est lancé à une vitesse initiale v_{s0} à l'aide d'un canon pneumatique. Les barres et le projectile sont alignés, composés d'un matériau élastique isotrope. Dans leur configuration classique, toutes les barres sont constituées du même matériau, au même diamètre.

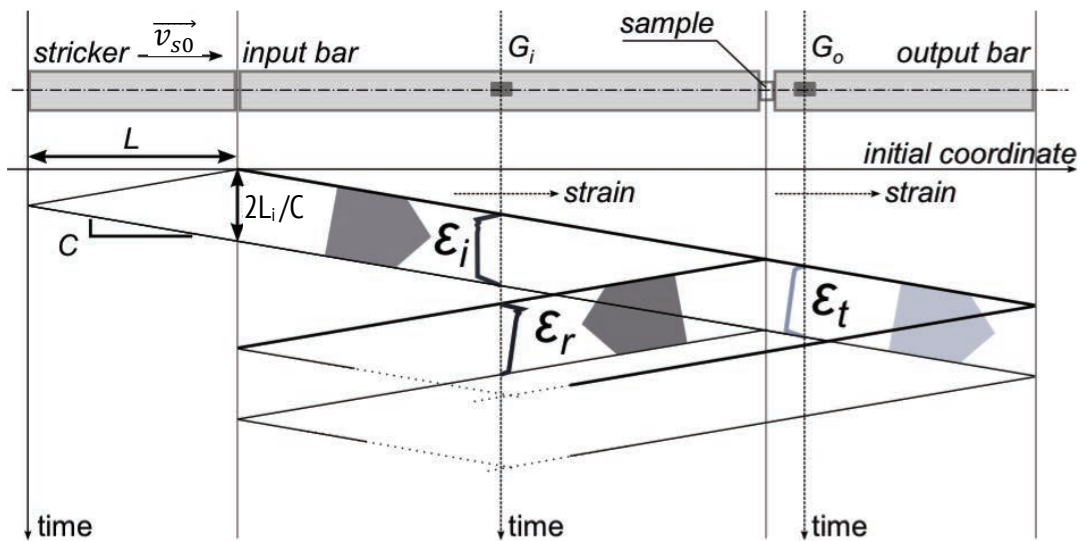


Figure 7 – Signaux dans le SHPB en fonction du temps

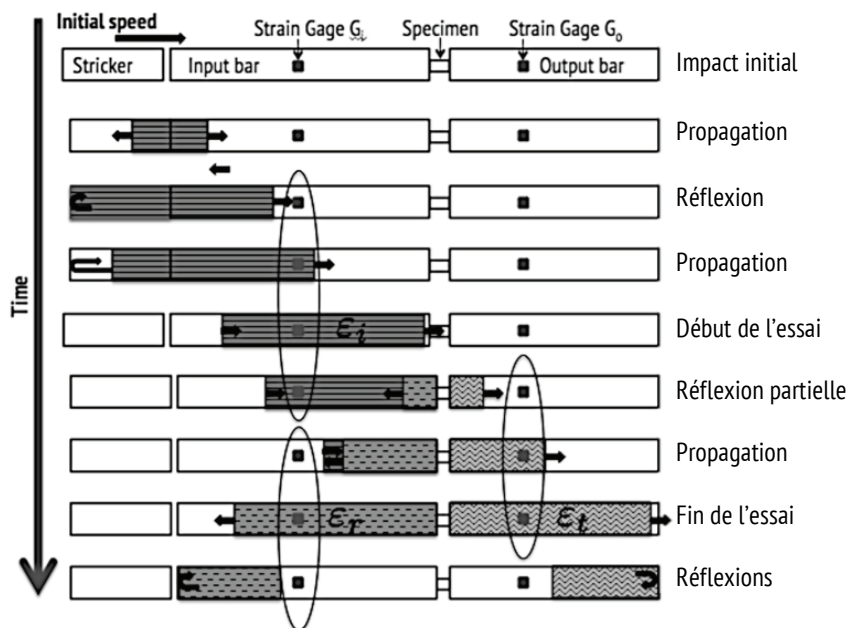


Figure 8 – Description de la propagation d'onde dans les barres d'Hopkinson

Pendant que le projectile est lancé, les autres barres sont au repos. L'impact du projectile sur la barre d'entrée génère une onde de compression élastique d'une durée théorique qui correspond au temps que met l'onde à faire l'aller-retour dans le projectile (cf. Figure 7). Sa durée est donc de $2 \cdot L_i / C$, avec L_i , la longueur de l'impacteur, et C la célérité des ondes dans les barres et son amplitude, gardée constante, est de $-v_{s0} / 2 \cdot C$. L'onde se propage à travers la barre d'entrée (cf. Figure 8). Cette onde incidente (déformation créée notée ϵ_i) est mesurée sur la jauge G_i installée au milieu de la barre d'entrée.

Quand l'onde arrive à l'interface barre/échantillon (étape « début de l'essai » dans la Figure 8), elle se divise en deux ondes, à cause de la différence d'impédance des deux matériaux à l'interface. Ainsi, une part de cette onde est réfléchiée dans la barre d'entrée (déformation créée notée ε_r) et mesurée par la même jauge de déformation G_i sur la barre d'entrée. L'autre part de ε_i traverse l'échantillon, lui faisant ainsi subir la compression dynamique. A l'interface échantillon/barre de sortie, une nouvelle onde est créée, appelée onde transmise et dont la déformation créée est notée ε_t (étape « réflexion partielle » dans la Figure 8). L'équilibre du chargement est atteint [CHE(2011)], [GRA(2000)], [SHA(2008)] lorsque $F_i = F_o$ (les chargements sur l'échantillon, respectivement aux interfaces barre d'entrée/échantillon et échantillon/barre de sortie) et donc $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$ puisque les barres sont faites du même matériau et ont la même géométrie. La mesure de l'onde transmise est faite sur la jauge de sortie G_o (propagation dans la Figure 8). Le test est terminé quand l'onde transmise traverse entièrement l'échantillon (étape « fin de l'essai » dans la Figure 8).

D'autres réflexions d'ondes apparaissent après le premier passage, dans les barres comme dans l'échantillon, mais l'acquisition est arrêtée après le premier passage des ondes (étape « réflexions » dans la Figure 8).

3.2 Traitement des résultats bruts

Il faut noter que les trois déformations ne sont pas mesurées à l'interface barres/échantillon mais au niveau des jauges et qu'il faut donc les transposer (notamment à cause de la dispersion des ondes) pour calculer les valeurs de chargement subies par l'échantillon et la vitesse de déplacement relatif V entre la barre de sortie et la barre d'entrée. Pour cela, la procédure décrite par Mohr [MOH(2010)] est suivie. Les calculs de force et de vitesse d'impact sont décrits ci-dessous, pour des barres et un projectile de même matériau, et de même géométrie.

Notons E_b le module d'Young des barres, S_b la surface de la section transversale des barres. F_i et F_o sont les chargements subis par l'échantillon à l'interface barre d'entrée/échantillon et échantillon/barre de sortie respectivement. V_i et V_o sont les vitesses des ondes dans la barre d'entrée et de sortie respectivement. Ainsi, on a les équations (3-1) à (3-4).

$$F_i = -E_b \cdot (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \cdot S_b \quad (3-1)$$

$$F_o = -E_b \cdot (\varepsilon_t) \cdot S_b \quad (3-2)$$

$$V_i = -C \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_r) \quad (3-3)$$

$$V_o = -C \cdot (\varepsilon_t) \quad (3-4)$$

La force F_i et la vitesse V_i sont respectivement obtenues par la somme et la différence des ondes provoquant les déformations incidente ε_i et réfléchiée ε_r , comme (3-1) et (3-3) le décrivent. L'incertitude sur l'évaluation de F_i et V_i dépend donc de la valeur relative entre ε_i et ε_r et le meilleur compromis est obtenu pour un ratio de $\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_i} = \frac{-1}{2}$ [GRO(2009)].

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_i - V_o}{L_{CP0}} = \frac{-C}{L_{CP0}} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (3-5)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(x) \cdot dx \quad (3-6)$$

Pour un échantillon cylindrique de longueur initiale L_{CP0} , la vitesse de déformation nominale en compression $\dot{\varepsilon}$, donnée positive par simplification, est décrite par l'équation (3-5) et la déformation nominale ε calculée par (3-6).

Les contraintes nominales σ dans l'échantillon peuvent être calculées grâce à sa surface S_{CP0} et la connaissance de la force d'entrée comme de la force de sortie (équation (3-7)).

$$\sigma(t) = \frac{F_i}{S_{CP0}} = \frac{-E_b \cdot S_b \cdot (\varepsilon_i + \varepsilon_r)}{S_{CP0}} \text{ ou } \sigma(t) = \frac{F_o}{S_{CP0}} = \frac{-E_b \cdot S_b \cdot (\varepsilon_t)}{S_{CP0}} \quad (3-7)$$

F_o et V_o quant à eux, sont proportionnels à l'onde transmise ε_t .

3.3 Dimensionnement du banc de barres d'Hopkinson

Notre volonté pour ces essais dynamiques est de pouvoir tester le contreplaqué de bouleau en compression à une vitesse de déformation avoisinant 1000/s. La vitesse de déformation initiale de l'échantillon aux barres de Hopkinson admet pour borne supérieure $\frac{V_{SO}}{L_o}$ [CHE(2011)].

Deux paramètres contraignent donc notre dimensionnement des barres : nous avons à disposition du contreplaqué de 12 mm d'épaisseur. Les échantillons auront donc une épaisseur multiple de 12 mm. L'autre particularité, limitative pour nos essais, est que nos jauges de déformations ne peuvent pas supporter un choc initial correspondant à une vitesse du projectile supérieure à environ 20 m/s, du fait de leur mode de fixation sur les barres par collage. Cette limitation technique nous pousse à tester des échantillons de 12 mm seulement.

Puisque l'on veut atteindre le plateau de compression, une déformation finale minimale de 25% est visée à température ambiante, ce qui correspondrait à un temps d'essai de 250 μ s. La longueur du projectile devra donc être de 600 mm environ.

Par contre, l'équation (3-1) révèle que la taille de l'échantillon par rapport aux barres (par le rapport $\frac{S_{CP0}}{S_b}$) est à considérer. Ce rapport est défini tel que :

$$\frac{S_{CP0}}{S_b} = \min \left[1; \frac{E_b \cdot L_{CP0} \cdot \dot{\varepsilon}}{2 \cdot C \cdot \sigma} \right]$$

(d'après (3-5) et (3-7), et la vérification théorique de l'équilibre des signaux)

Le cas d'un essai cryogénique est un essai limitatif car la hausse de contrainte due à la température peut atteindre la limite élastique des barres, ce qui n'est pas souhaité. Pour une contrainte estimée de 50 MPa lors d'un essai dynamique à température cryogénique, [DNV(2003)], [DNV(2006-1)], [BRA(1997)], les valeurs de ratio des surfaces en fonction des différentes barres d'Hopkinson disponibles sont données dans le Tableau 2 ci-dessous.

Matériau	Mod. Young [GPa]	Ratio surf. [-]
Acier	200	2,5
Aluminium	70	0,84

Hiermaier [HIE(2008)] et Chen [CHE(2011)] recommandent d'utiliser des barres élancées pour éviter l'effet de dispersion d'ondes. De plus, le bois et les panneaux à base de bois étant des matériaux non homogènes, il est recommandé de tester des échantillons les plus larges possibles [ROW(2005)], [EN789]. Alors le meilleur compromis possible est d'utiliser des barres en aluminium, vérifiant un ratio de surface proche de 1 pour une contrainte limite de 50 MPa comme précisée plus haut. De plus, il sera possible d'atteindre le plateau de compression pour une vitesse de déformation d'environ 1000/s, sans risquer de décoller les jauges, tout en gardant une incertitude de mesure faible, d'après Grolleau [GRO(2009)].

3.4 Utilisation d'un pulse shaper

Pour tous nos essais, un "pulse shaper" est utilisé afin de filtrer mécaniquement les hautes fréquences des signaux [DAV(1963)], et limiter la dispersion des ondes, en intercalant un matériau entre le projectile et la barre d'entrée. De nombreuses études ont été faites sur leur utilisation, notamment par Duffy [DUF(1971)] ou plus récemment par Jiang [JIA(2015)] ou Chen [CHE(2014)]. D'autres travaux ont élaboré des méthodes utilisant la déformation de l'impacteur, comme Baranowski [BAR(2013)] a pu en faire l'étude.

Notre pulse shaper est un fil d'étain de 0,23 mm de diamètre, installé entre l'impacteur et la barre incidente comme le présente la Figure 9 issue de [NAG(2012)]. Il est installé sur le diamètre complet de la barre incidente.

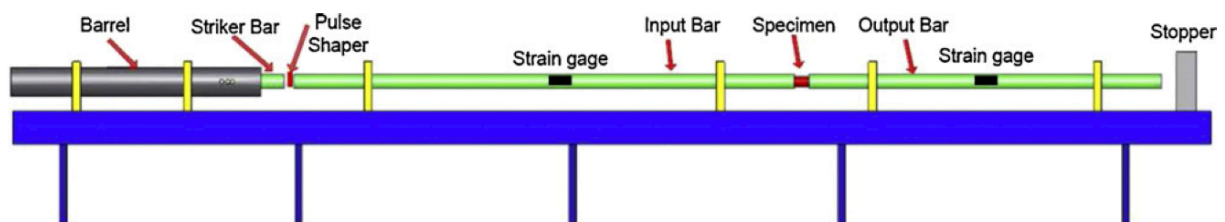


Figure 9 - Système SHPB complet et installation du pulse shaper

3.5 Adaptation des barres d'Hopkinson aux essais à température cryogénique

Pour les essais cryogéniques, refroidir tout le banc d'Hopkinson est évidemment illusoire. Les barres sont donc maintenues à température ambiante. Pour éviter un échauffement de l'échantillon au contact des barres, l'échantillon est refroidi avec deux allonges, de 40 mm de longueur chacune, usinées dans le même matériau que les barres et au même diamètre. Les conséquences sur les calculs de transport d'onde sont donc limitées car seul le changement de longueur des barres lors du calcul est à prendre en compte. Elles sont installées comme sur la Figure 10, de chaque côté de l'échantillon.

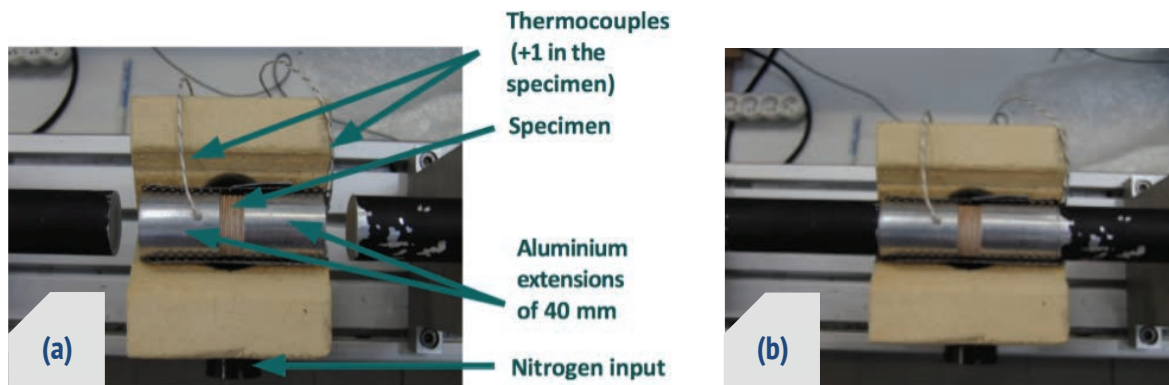


Figure 10 - Présentation de l'enceinte cryogénique adaptée aux SHPB
Ouverte avec les barres non en contact à gauche (a), barres en contact et échantillon mis en place à droite (b)

Le tout est placé dans une enceinte isolante en polyuréthane, taillée en V pour accueillir l'échantillon et les allonges. Un couvercle, lui-même en polyuréthane, complète le dispositif pour former une enceinte fermée. La coaxialité des barres, des allonges et de l'échantillon est vérifiée et conservée par le support. L'enceinte est alimentée en azote gazeux pour refroidir les allonges et l'échantillon avant et pendant l'essai. Lors du refroidissement, il est maintenu fermé sur les côtés, avec deux plaques de contreplaqué, pour rendre le processus plus rapide et isoler réellement les barres d'Hopkinson du refroidissement. Cette installation est visible par la Figure 11. Les températures sont suivies en plusieurs endroits : dans l'échantillon (trou de 0,63 mm, au milieu de l'échantillon, percé à 10 mm de profondeur), dans l'allonge (sertissage), et dans l'air.



Figure 11 – Enceinte climatique pour dispositif SHPB, fermée au moyen de deux plaques de contreplaqué, en refroidissement

Lorsque toutes les températures sont stabilisées, l'essai est lancé. Il faut alors ouvrir l'enceinte, et venir mettre les barres d'Hopkinson en contact avec ce système {allonges + échantillon} puis finalement, le projectile est lancé. La température varie de +/-5°C pendant l'essai.

3.6 Validation des essais aux barres d'Hopkinson

Dans le but de valider le design des barres défini en sections 3.1 et 3.3, nous présentons les résultats d'un essai en compression dynamique à température ambiante effectué sur un échantillon de contreplaqué de bouleau de 12 mm d'épaisseur, à 8% d'humidité. Le projectile est lancé à une vitesse de 11 m/s. Le

graphique Figure 12 présente les trois ondes obtenues et l'on constate que le rapport $\frac{\epsilon_r}{\epsilon_i}$ est de $\frac{-0,00065}{0,0011} = -0,59$, proche de l'objectif $-1/2$.

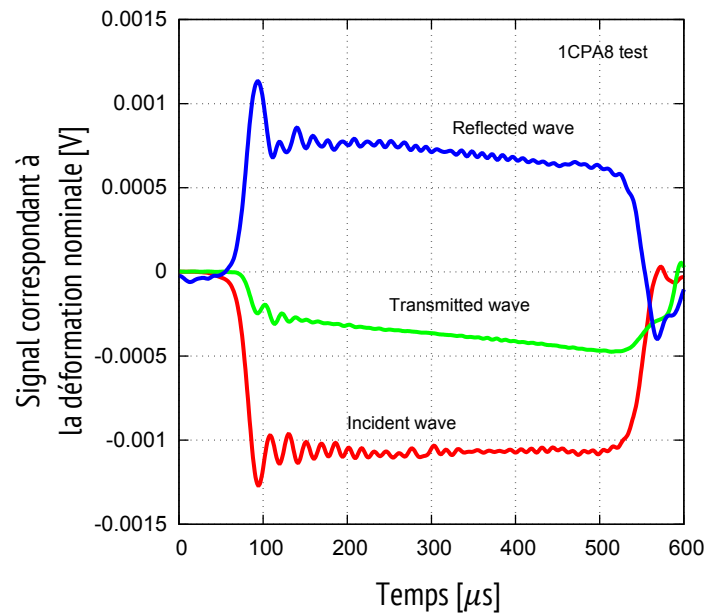


Figure 12 – Résultats d'une compression de contreplaqué aux SHPB. L'échantillon est à 8% d'humidité, à température ambiante

Les efforts sont mesurés sur les deux barres du système, en entrée et en sortie. L'échantillon n'est pas en équilibre dès le début de l'essai. Une fois que l'écart mesuré entre entrée et sortie est inférieur à 3%, l'équilibre est considéré atteint et permet de déterminer l'intervalle de temps pendant lequel l'essai aux barres peut être considéré comme valide, tel que « SHPB measurement time interval » sur la Figure 13.

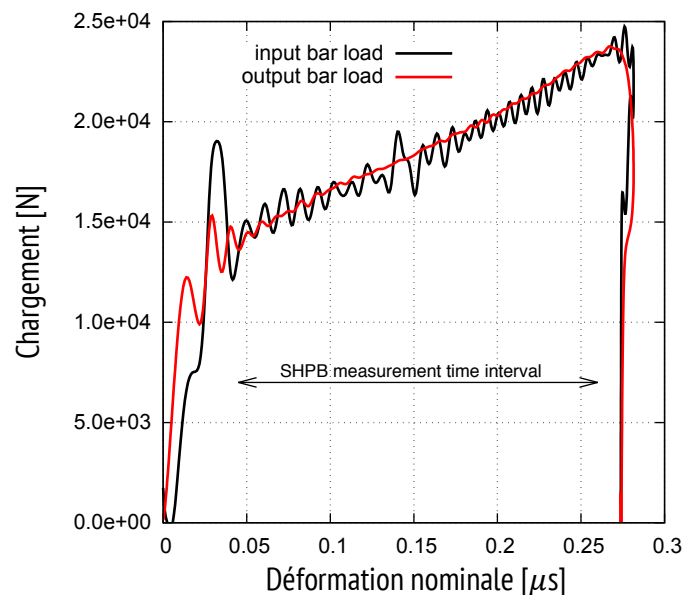


Figure 13 – Comparaison des mesures de jauges en barre de sortie et barre d'entrée

L'insertion des allonges, qui plus est à une température différente de celle des barres, peut affecter l'équilibre de l'essai et la transmission des ondes dans tout le système. Il est donc nécessaire de faire un essai à vide, appelé aussi « barre-barre » pour estimer l'effet de ce rajout dans le système. L'essai est donc un essai classique, sans échantillon, et fait à différentes températures. Bien sûr, puisqu'il n'y a pas d'échantillon, il n'y

a pas de différence d'impédance des matériaux qui puisse créer une onde réfléchie, cette dernière est donc théoriquement nulle. Le graphique Figure 14 présente les résultats obtenus pour un essai à vide sans allonge à température ambiante (courbe noire) ; avec les allonges à température ambiante (courbe rouge) et avec les allonges à température cryogénique (courbe bleue). Par souci de lisibilité, les courbes sont décalées mais les signaux réfléchis sont bien nuls, quelle que soit la condition d'essai, avec ou sans les allonges. La seule précaution à prendre est de considérer le changement de longueur des barres en rajoutant les allonges, dans le calcul du transport des signaux depuis la jauge jusqu'aux interfaces barre/échantillon.

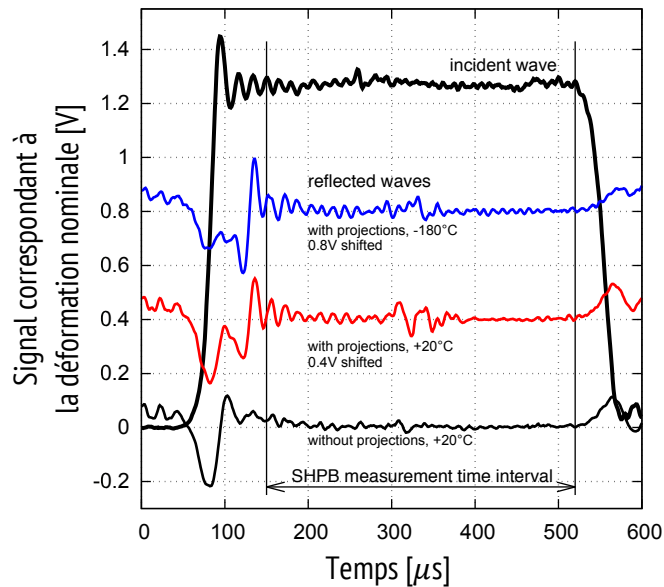


Figure 14 – Résultats d'un essai à vide SHPB

Il est également possible de déterminer la vitesse de déformation (équation (3-5)), la déformation nominale (équation (3-6)) et la contrainte (équation (3-7)), présentées Figure 15. La vitesse de déformation est quasiment constante sur tout l'intervalle de test et d'environ 700/s. La déformation est quasiment linéaire en fonction du temps, avec une valeur de fin d'essai autour de 27% à température ambiante. Le signal de contrainte permet une exploitation des résultats pour en déduire les paramètres du contreplaqué en compression à haute vitesse de déformation.

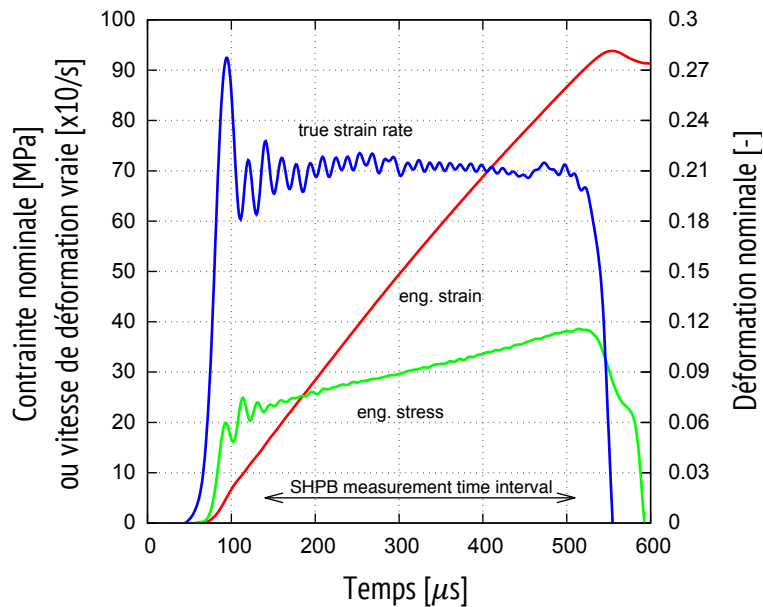


Figure 15 – Sollicitation aux barres d'Hopkinson. En bleu, la vitesse de sollicitation à 700/s, en rouge l'évolution de la déformation et en vert la réponse du contreplaqué à 8% d'humidité et à température ambiante en compression hors plan à cette vitesse de sollicitation

4 Essais de cisaillement, développement d'un montage de cisaillement

Des essais de cisaillement normalisés existent pour des vitesses de déformation lentes ([ASTMD5379(2010)]). Par contre, l'étude bibliographique ne nous a pas permis d'identifier un montage susceptible de réaliser des essais aux grandes vitesses de déformation de l'ordre de 10/s à 1000/s.

Dans cette étude, nous limitons nos essais aux conditions quasi-statiques et dynamiques à température ambiante pour une humidité de l'échantillon de 8%. Cependant, des essais quasi-statiques à température cryogénique pourraient être réalisés en utilisant l'enceinte climatique et la procédure décrite section 2.2.

Afin de valider le montage de cisaillement développé, des essais quasi-statiques normalisés sont réalisés suivant la norme ASTM D5379. Cette norme se base sur le dispositif développé par Nicolae Iosipescu [IOS(1967)]. Les échantillons sont entaillés pour concentrer la sollicitation dans la zone de cisaillement. Toutes les déformations sont calculées à partir des champs de déplacements mesurés de manière optique. Pour chaque essai, les résultats sont présentés en déformation nominale de cisaillement ε_{xy} calculées à partir des valeurs propres du tenseur de Tenseur de Cauchy Green droit. Le montage développé est conçu de manière à être utilisable avec des barres d'Hopkinson. La validation de ces essais suivant l'ASTM D 5379 permet de suggérer que les résultats obtenus en dynamique sont fiables.

4.1 Essais normalisés : montage Iosipescu

4.1.1 La géométrie de l'échantillon

La norme ASTM D 5379 décrivant le cisaillement de matériaux composites suggère une géométrie d'échantillon telle que présentée sur la Figure 16. Cet essai n'est généralement pas utilisé pour les cisaillements hors plan. Notre principale limite dans ce cas est la hauteur d_1 de l'échantillon de l'ordre de 20 mm pour leur montage dans le montage standard. Puisque les essais sont réalisés dans l'épaisseur, qui est

fixée à 12 mm pour tous nos échantillons, 20 mm n'est pas une dimension accessible même par empilement et nous choisissons donc de tester directement des échantillons de 12 mm d'épaisseur.

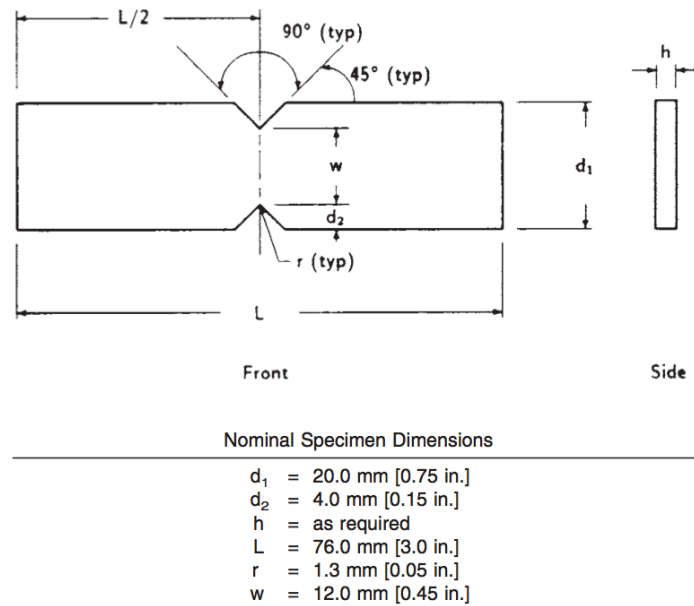


Figure 16 - Géométrie d'échantillon décrite dans la norme ASTM D 5379

Les échantillons adaptés à ce système sont présentés Figure 17. Ils sont rectangulaires, avec $d_1 = 12$ mm de hauteur. Une attention particulière est portée sur l'usinage des entailles, en utilisant une fraise à rainurer en V à 90° , et en assurant la symétrie de l'usinage sur les deux faces par montage d'usinage. Deux plis sont retirés de chaque côté de l'éprouvette. La hauteur utile de cisaillement résultante de cet usinage est $w = 7,5$ mm. Les entailles sont réalisées parallèlement à la direction des fibres des faces extérieures. La zone cisailée est donc constituée de 3 plis sollicités en cisaillement en roulant et deux plis sollicités en cisaillement de fibre. La hauteur utile de cisaillement assure un rapport d_1/w identique à celui de la norme. La largeur h est de 20 mm et la longueur L est de 76 mm.

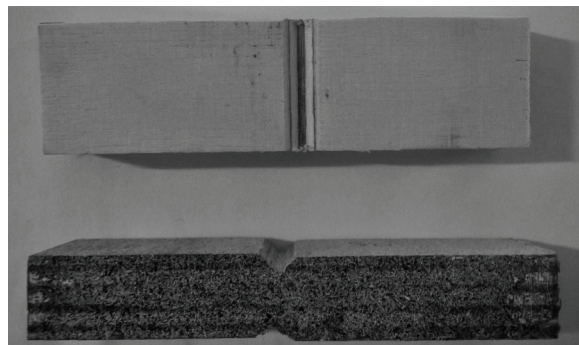


Figure 17 - Echantillon à tester dans un dispositif de type losipescu

4.1.2 Installation de l'échantillon dans le montage losipescu

La norme décrit l'installation de l'échantillon tel que sur la Figure 18. L'installation dans le dispositif losipescu se fait au moyen de deux cales rectifiées pour compenser la faible épaisseur du contreplaqué et assurer le serrage dans un montage standard. La Figure 19 présente un échantillon une fois installé, avec et sans les cales.

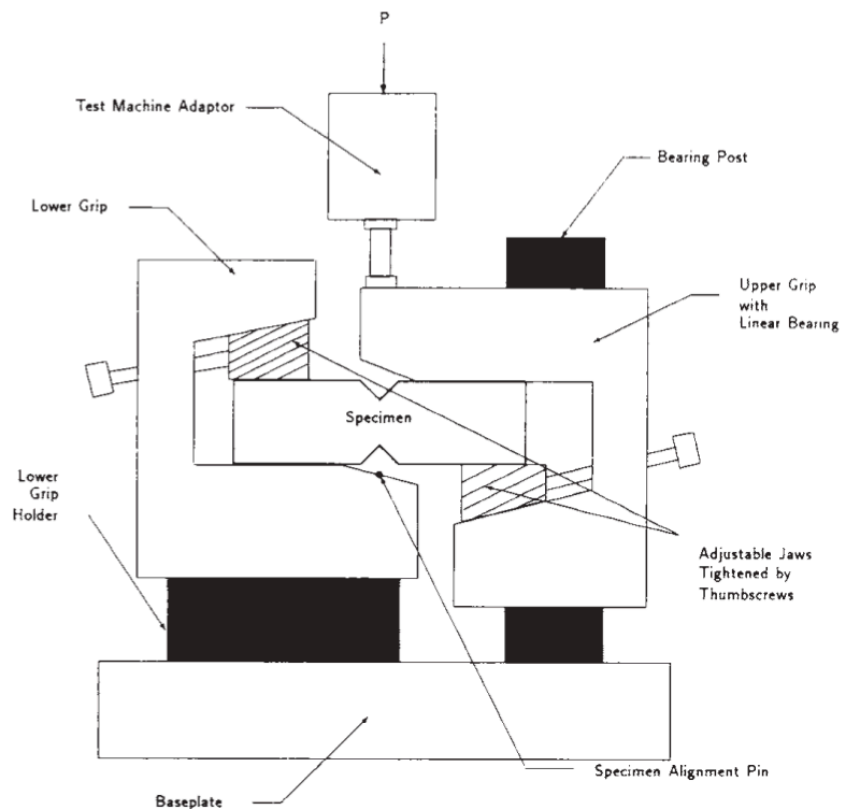


Figure 18 - Installation d'échantillon de cisaillement, classiquement dans la norme ASTM D 5379

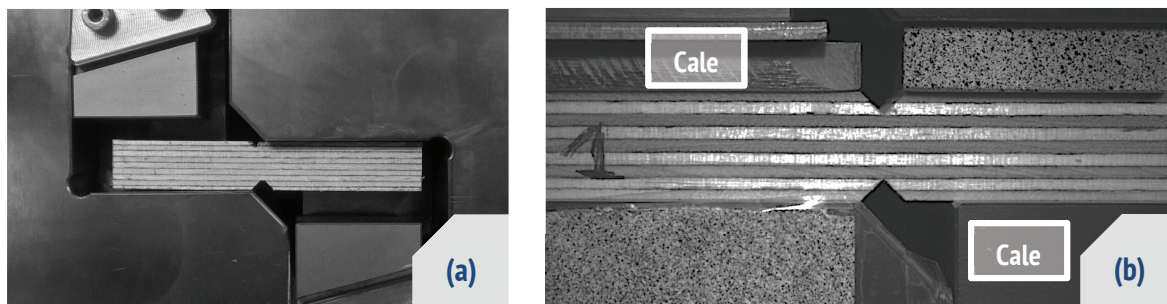


Figure 19 – Echantillon installé dans un dispositif losipescu. Sans cale rectifiée (a) et avec les cales rectifiées (b)

Les cales permettent de maintenir l'échantillon au plus proche de son entaille sur trois des quatre bords d'entaille. Il est à noter que le système losipescu n'assure pas systématiquement cette condition aux limites, comme la Figure 18 le montre.

La norme préconise l'utilisation de jauges de déformation et fournit la méthode pour calculer le cisaillement dans la zone située entre les entailles. Compte tenu de la structure multi-plis du contreplaqué, et la faible hauteur disponible, le cisaillement est évalué au moyen de la mesure optique et de la corrélation d'image.

4.2 Développement d'un essai de cisaillement aux barres d'Hopkinson

Le dispositif losipescu utilise des amarrages massifs. La propagation d'ondes à travers un tel montage se heurterait à de multiples changements brutaux d'impédance mécanique et conduirait à des réflexions parasites. Ce montage n'est donc pas compatible avec des dispositifs d'essais en dynamique comme les barres d'Hopkinson. Pour ces conditions expérimentales, nous devons développer un nouveau montage

utilisable en quasi-statique comme en dynamique et permettant la mesure des déformations par mesure optique.

4.2.1 Présentation du montage de cisaillement adapté aux barres d'Hopkinson

Le montage développé est présenté sur la Figure 20, il est composé d'un poinçon, d'une contre-plaque (limitant la flexion du dessous de l'échantillon pendant l'essai), et d'une matrice en deux parties, entre lesquelles le spécimen est bridé. La contrainte essentielle dans le dimensionnement de ce montage est d'éviter toute réflexion d'onde, ce qui imposerait théoriquement de concevoir toutes les pièces avec la même impédance mécanique ; et si le matériau est le même que celui des barres d'Hopkinson utilisées, toutes les pièces doivent avoir une même section transversale. La partie haute et la partie basse de la matrice ont des extrémités cylindriques de même diamètre et réalisées dans le même matériau que les barres d'Hopkinson utilisées. Les sections des matrices en contact avec l'échantillon sont de même surface que les barres. Les réflexions d'ondes sont ainsi limitées au maximum.

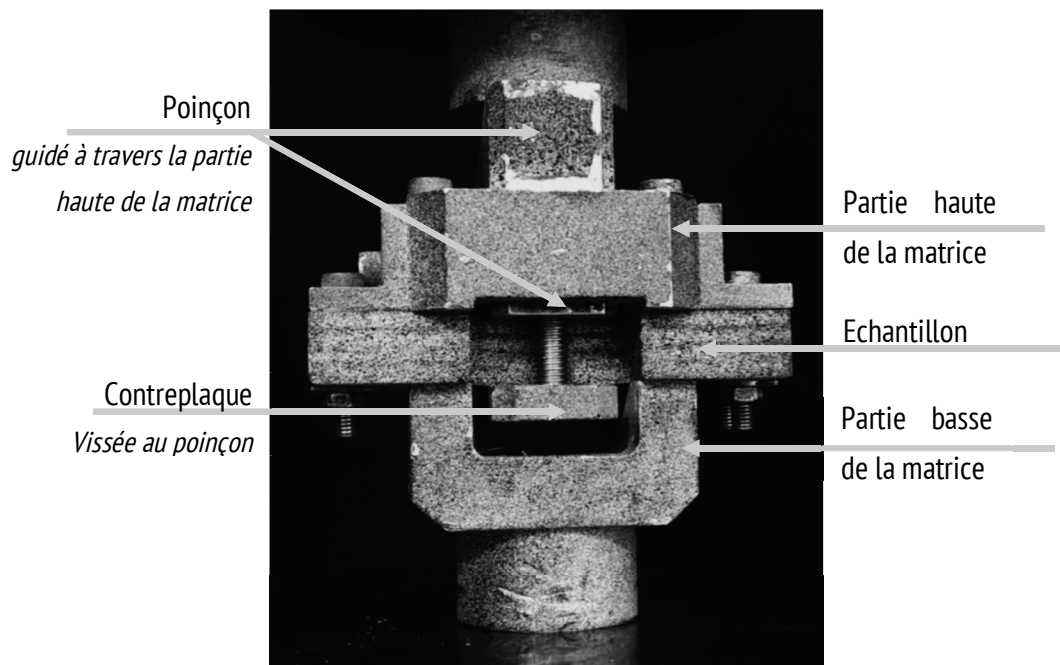


Figure 20 - Poinçon et contreplaqué. Echantillon installé

L'échantillon est impacté avec le poinçon du côté de la barre entrante. Les mesures de déformation sont acquises de manière optique. Le rapport $\frac{\epsilon_r}{\epsilon_l}$ étant trop faible, l'effort est mesuré sur la barre sortante.

4.2.2 Géométrie des échantillons dans le montage de cisaillement IRDL

Dans le but d'optimiser l'encastrement latéral, et d'éviter toute compression parasite sur ces surfaces, nous avons choisi une géométrie de spécimen en forme d'altère. Des entailles identiques à celles des éprouvettes losipescu sont usinées sur les échantillons (cf. Figure 21), avec les mêmes précautions d'usinage quant à la symétrie de l'échantillon.

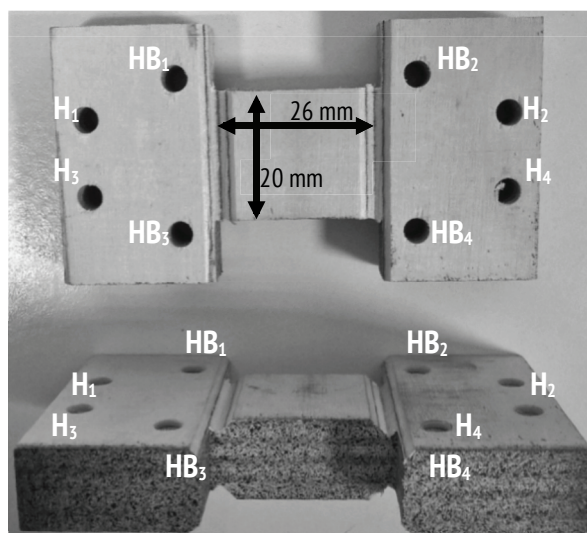


Figure 21 – Echantillon de cisaillement percé avec double entaille

4.2.3 Installation de l'échantillon dans le montage de cisaillement IRDL

Le spécimen est d'abord serré entre le poinçon et la contre-plaque, au moyen de deux vis en acier inoxydable. Le serrage de l'échantillon est limité à 6 N.m, serrage effectué à la clé dynamométrique. Cela correspond à une pré-charge en compression de 4 kN (13 MPa à environ 4% de déformation nominale) de la zone centrale de l'échantillon avant le début de l'essai, inférieure à la contrainte de début de plateau.

Pour les positionner et les maintenir durant l'essai, les échantillons sont percés de huit trous débouchants (Figure 21). Quatre d'entre eux solidarissent l'échantillon avec les matrices haute et basse (trous HB_{1,2,3,4}, Figure 21), les quatre autres assurent une immobilisation avec la partie haute de la matrice (H_{1,2,3,4}, Figure 21) et limitent toute flexion de l'échantillon dans son encastrement avec les matrices.

5 Bilan sur les outils expérimentaux

Basé sur le besoin de connaître le comportement du contreplaqué à l'impact à température cryogénique et à différentes humidités, différents outils expérimentaux ont été utilisés. Certains sont d'usage classique, d'autres ont dû être développés spécifiquement. Dans le but de limiter tout effet de taille et de forme dans nos comparaisons, nous avons utilisé une même géométrie d'échantillon pour l'ensemble des conditions expérimentales de compression. Grâce aux travaux déjà réalisés dans ce domaine, les mises en ambiance climatique ont été conçues et adaptées.

Les essais de compression en quasi-statique utilisent une machine hydraulique classique, et un dispositif de maintien à température cryogénique des échantillons a été conçu. Les essais de compression en dynamique sont hors-norme mais l'utilisation des barres d'Hopkinson est bien connue. L'extension de leur utilisation en régime cryogénique conduit à la définition et la validation d'un nouveau protocole d'essai. Un montage original a été développé pour les essais de cisaillement, qui permet la réalisation d'essais de cisaillement hors plan en régime dynamique.

Nos essais sont parfois nécessairement faits en dehors des normes existantes et les protocoles développés réclament donc une validation, objet du chapitre III.

6 Références

- [ASTMD5379(2010)] - ASTM D 5379/D 5379M - *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*, 2005
- [BAR(2013)] - P. BARANOWSKI, J. MALACHOWSKI, R. GIELETA, K. DAMAZIAK, L. MAZURKIEWICZ, and D. KOLODZIEJCZYK, *Numerical study for determination of pulse shaping design variables in SHPB apparatus*, Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences, Vol. 61, No. 2, 2013, pp. 459-466
- [BHOP(1905)] - B. HOPKINSON, *The effect of momentary stress in metals*, Proc. Royal Society of London 1, 498–507 (1905).
- [BHOP(1914)] - B. HOPKINSON, *A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets*, Philosophical Trans. Royal Society of London 213, 437– 456 (1914).
- [BRA(1997)] - A. BRAGOV and A. K. LOMUNOV *Dynamic properties of some wood species*, J. Phys. IV France 07, 1997, pp. 487-492.
- [CHE(2011)] - W. CHEN and B. SONG, *Split hopkinson (kolsky) bar. design, testing and applications*, Mechanical Engineering Series, Springer US, 2011
- [CHE(2014)] - G. CHEN, Q. P. ZHANG & X. C. HUANG, *A method of incident pulse shaping for SHPB*, Structures Under Shock and Impact, n° XIII, vol. 141, 2014, pp. 181-189
- [DAV(1963)] - EDH. DAVIES, SC. HUNTER, *The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar*. J Mech Phys Solids 1963;11: 155e79
- [DNV(2003)] - *Lng membrane materials - plywood - test results*, Technical Report No. 2003-3421, DNV, Det Norske Veritas, 2003.
- [DNV(2006-1)] - *Testing of plywood at lng temperatures – Phase 1*, Technical Report NO. 2006-3519, DNV, Det Norske Veritas, Veritasveien 1, NO-1322 Høvik, Norway, 2006.
- [DUF(1971)] - J. Duffy, J. D. Campbell and R. H. Hawley, *On the Use of a Torsional Split Hopkinson Bar to Study Rate Effects in 1100-0 Aluminum*, J. Appl. Mech 38(1), March 1971, pp. 83-91
- [EN789] - *En 789: 2004 timber structures-test methods-determination of mechanical properties of wood based panels*, 2004.
- [GRA(2000)] - George T GRAY, *Classic split-hopkinson pressure bar testing*, Materials Park, OH: ASM International, 2000. 462–476.
- [GRO(2009)] - Vincent GROLLEAU, *Quelques phénomènes rencontrés sous sollicitation mécanique rapide, illustration par le copeau, l'arbalète, le schéma de Tchamwa-Wielgosz et le bulge-test*, Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches de L'Université de Bretagne Sud, décembre 2009
- [HIE(2008)] - Stefan HIERMAIER, *Structures under crash and impact*, Springer US, 2008.
- [JAN(2008)] - Yves JANNOT, *Isothermes de sorption : modèles et détermination*, cours, Juillet 2008
- [JHOP(1872-1)] - J. HOPKINSON, *On the rupture of iron wire by a blow*, Proc. Literary and Philosophical Society of Manchester 1, 40–45 (1872)
- [JHOP(1872-2)] - J. HOPKINSON, *Further experiments on the rupture of iron wire*, Proc. Literary and Philosophical Society of Manchester 1, 119–121 (1872).

- [JIA(2015)] - T.Z. JIANG, P. XUE, H.S.U. BUTT, *Pulse shaper design for dynamic testing of viscoelastic materials using polymeric SHPB*, International Journal of Impact Engineering n°79, 2015, pp. 45-52
- [KIM(2015)] - J-H. KIM, D-H. PARK, C-S. LEE, K-J. PARK, J-M. LEE, *Effects of cryogenic thermal cycle and immersion on the mechanical characteristics of phenol-resin bonded plywood*, Cryogenics (2015)
- [KOL(1940)] - F. KOLLMAN, *The mechanical properties of wood of different moisture content within -200°C to +200°C temperature range*, VDI-Forschungsheft 403, XI Bd., 1940, pp. 1-18
- [KOL(1949)] - H. KOLSKY, *An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading*, Proc. Physical Society 62, 676–700 (1949).
- [MOH(2010)] - Dirk MOHR, Gérard GARY, and Bengt LUNDBERG, *Evaluation of stress–strain curve estimates in dynamic experiments*, International Journal of Impact Engineering 37, 2010, no. 2, 161 –169.
- [NAG(2012)] - R. NAGHDABADIA, M.J. ASHRAFIA, J. ARGHAVANI, *Experimental and numerical investigation of pulse-shaped split Hopkinson pressure bar test*, Materials Science and Engineering A, n° 539, 2012, pp.285–293
- [NAV(2005)] - P. NAVI, F. HEGER. *Comportement thermo-hydromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [PAN(1970)] - A. J. PANSHIN, C. DE ZEEUW. *Textbook of wood technology*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1970.
- [PLA(2009)] - F. PLASSAT, *Travail mécanique du wood - mise en oeuvre du bois*, Techniques de l'ingénieur, bm 7404 :34, 2009.
- [ROW(2005)] - R. M. ROWELL (ed.), *Handbook of wood chemistry and wood composites*, Taylor&Francis, 2005.
- [SHA(2008)] - W. SHARPE (ed.), *Handbook of experimental solid mechanics*, Springer, 2008.
- [TRI(2012)] - Marie-Christine TROUY-TRIBOULOT, Pascal TRIBOULOT. *Sciences et ingénierie du bois Matériau bois - Structure et caractéristiques*. Techniques de l'ingénieur, 10 Nov. 2012.

CHAPITRE III

Validation des conditions expérimentales

L'utilisation des barres d'Hopkinson pour le régime dynamique et la réalisation d'une partie des essais à température cryogénique ou encore le développement des essais de cisaillement rapide, sont autant d'éléments qui ont entraîné des choix de géométries d'éprouvette particuliers. Il a donc été nécessaire de faire de nombreuses vérifications, géométriques, thermiques ou propre à chaque protocole d'essai pour assurer le contrôle des essais et obtenir des résultats répétables et fiables. Ces validations sont présentées dans ce chapitre.

SOMMAIRE DU CHAPITRE

1	CONFINEMENT ET EFFET DE COLLE	51
1.1	DISPOSITIF ET MISE EN PLACE	51
1.1.1	DISPOSITIF DE CONFINEMENT	51
1.1.2	MISE EN PLACE DE L'ÉCHANTILLON ET PROCEDURE	52
1.2	RESULTATS OBTENUS	52
1.2.1	EFFET DE HAUTEUR SUR LE BOIS CLAIR	52
1.2.2	EFFET COMPARE DU CONFINEMENT SUR LE BOIS CLAIR ET SUR LE CONTREPLAQUE	53
1.2.3	EFFET DE CONFINEMENT – CONCLUSION SUR LE ROLE DE LA COLLE DANS LE CONTREPLAQUE	54
2	JUSTIFICATION DE LA FORME DES ECHANTILLONS	55
2.1	EFFET DE LA METHODE D'USINAGE, DE FORME ET DE SECTION	55
2.2	VOLUME ELEMENTAIRE REPRESENTATIF (VER) POUR DES ECHANTILLONS CIRCULAIRES	56
3	LUBRIFICATION DES ECHANTILLONS	58
4	VERIFICATION DU TAUX D'HUMIDITE DANS LES ECHANTILLONS	59
4.1	DEFINITION DU TAUX D'HUMIDITE	59
4.2	MESURE DE L'HUMIDITE PAR ANALYSE THERMOGRAVIMETRIQUE	59
4.3	MESURE DE L'HUMIDITE PAR CHAUFFAGE	60
5	EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS LES ECHANTILLONS	61
5.1	EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN COMPRESSION QUASI-STATIQUE	61
5.1.1	ESSAI A TEMPERATURE CRYOGENIQUE LORS D'UN ESSAI A $4.10^{-3}/s$ ET 8% D'HUMIDITE DANS LE BOIS	61
5.1.2	EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS L'ÉCHANTILLON, POUR UN ESSAI A TEMPERATURE AMBIANTE, A $4.10^{-3}/s$ ET 8% D'HUMIDITE DANS LE BOIS	63
5.1.3	EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS L'ÉCHANTILLON, POUR DIFFERENTES VITESSES DE DEFORMATION A $-170^{\circ}C$ ET 8% D'HUMIDITE DANS LE BOIS	63
5.1.4	DIFFERENTES HUMIDITES DANS LE CONTREPLAQUE	64
5.2	TEMPS D'ESSAI DISPONIBLE EN CRYOGENIE EN COMPRESSION AVEC LES BARRES D'HOPKINSON	65
5.3	ESSAIS DE COMPRESSION A 0,004/s POUR DES ECHANTILLONS IMBIBES ET TREMPES D'AZOTE LIQUIDE	66
5.3.1	PREPARATION DES ECHANTILLONS	66
5.3.2	RESULTATS	67
6	EVALUATION DU MODULE ELASTIQUE DE COMPRESSION HORS PLAN	68
7	ESSAI DE CISAILLEMENT TRANSVERSE DU CONTREPLAQUE AVEC LE MONTAGE IOSIPESCU	70
7.1	PRESENTATION DES ECHANTILLONS ET EFFET DE LA DIMENSION DE LA FENETRE DE CALCUL	70
7.2	ESTIMATION DE LA DEFORMATION EN CISAILLEMENT	71
8	VALIDATION DU MONTAGE DE CISAILLEMENT DOUBLE ENTAILLE	73

9	BILAN SUR LES PROTOCOLES ET LES VERIFICATIONS NECESSAIRES	75
10	REFERENCES	76

1 Confinement et effet de colle

En vue d'étudier le contreplaqué, il est nécessaire de savoir si ce matériau, un composite de bois clair, a un comportement totalement décrit par le bois, ou bien aussi influencé par la colle qui le compose. Une méthode d'essai est donc développée pour comparer le comportement du contreplaqué et du bois clair en compression avec et sans confinement. Des essais de compression sur des échantillons fabriqués avec différents nombres de joints de colle sont aussi effectués pour évaluer l'effet des joints de colle sur le comportement. Les résultats sont présentés dans cette partie.

1.1 Dispositif et mise en place

Le bois clair a ses fibres orientées toutes dans le même sens, alors que le contreplaqué est fait de feuilles de bois croisées, orientées alternativement à 0° et 90°. La compression du bois clair selon une direction perpendiculaire à ses fibres (direction R) conduit à une déformation dans le plan du contreplaqué (direction T) notamment par roulage des fibres, et une déformation négligeable dans le sens des fibres (L) [NAV(2005)]. Ce phénomène est très limité dans le cas du contreplaqué et une déformation transversale négligeable est constatée. Ce phénomène est attribué à un effet de confinement. Pour pouvoir comparer les deux matériaux, la méthode est de les confiner de la même manière, puis de venir les tester en compression. Les essais présentés sont réalisés à température ambiante, 8% dans le bois et vitesse quasi statique de 0,004/s. Le bois est issu de plaquettes de bouleau de 300*50*20mm³, de la même provenance que celui qui compose le contreplaqué.

1.1.1 Dispositif de confinement

Le bois est fait de fibres ordonnées dans la même direction. Cela lui donne la propriété d'avoir des déformations quasiment nulles dans le plan tangentiel-longitudinal ou radial-longitudinal [USDA(2010)]. Pour une compression dans le plan tangentiel-longitudinal, il est donc nécessaire de confiner l'échantillon selon la direction transversale. Dans ce but, un dispositif de confinement est conçu et présenté Figure 1. Il est constitué de trois parties, un U qui accueille des échantillons rectangulaires, de 30*30 mm², un mors latéral qui vient se plaquer contre l'échantillon pour assurer le confinement et un piston de compression. L'échantillon est serré grâce à 4 vis à pas fin dont le serrage est contrôlé par une clé dynamométrique.

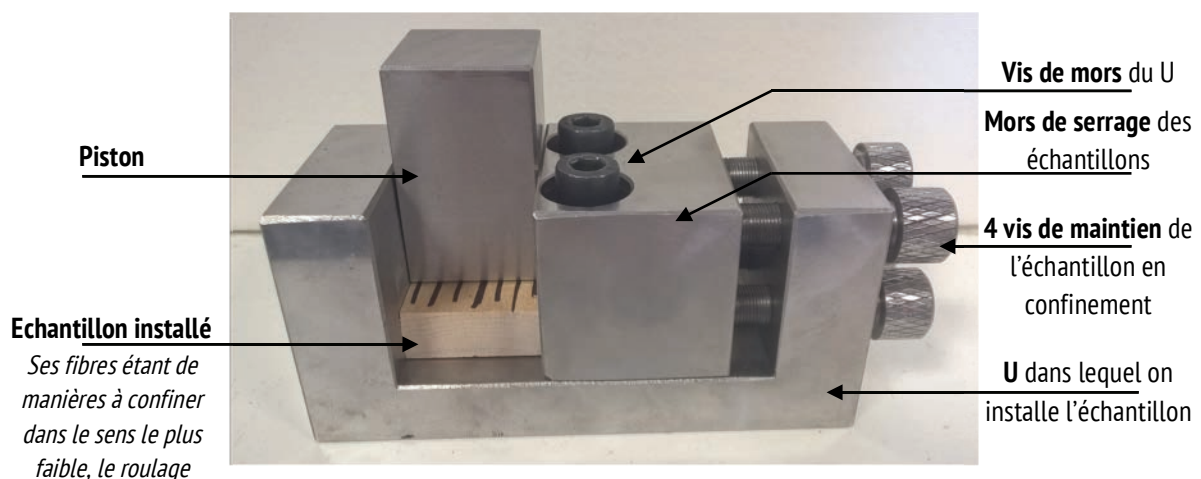


Figure 1 – Dispositif de confinement avec un échantillon de bois clair installé, non centré pour faire apparaître le sens des fibres

1.1.2 Mise en place de l'échantillon et procédure

Le serrage imposé aux échantillons est très faible, le serrage n'est effectué que pour mettre en contact le mors de serrage avec l'échantillon qui reste libre mais difficilement déplaçable une fois installé. Le couple de serrage correspondant est de 0,04 Nm par vis. Une fois le serrage effectué, le mors de serrage est bloqué dans sa position par les deux vis de blocage et le piston de compression doit encore être libre dans son déplacement vertical. Une attention particulière a été portée sur l'usinage du piston. Il est rectifié et sa surface utile est de 30 x 30,5 mm², afin d'assurer un jeu fonctionnel compris entre 0 et 0,5mm, entre le mors et piston. Toutes les faces en contact avec l'échantillon sont rectifiées. Sur la Figure 1, un échantillon de bois clair est installé en position décalée suivant les fibres, le sens des fibres est révélé au feutre noir pour illustrer son installation.

1.2 Résultats obtenus

1.2.1 Effet de hauteur sur le bois clair

Différentes tailles d'échantillons sont testées : du contreplaqué de 12 mm d'épaisseur, du bois clair de 12 mm, 15 mm, 20 mm, 30 mm et 40 mm d'épaisseur. Les échantillons de bois clair de 12 mm, 15 mm et 20 mm sont issus de plaquettes de bouleau de 300x50x20mm³ de la même provenance que celui qui compose le contreplaqué. Les échantillons de 30 mm et 40 mm de hauteur sont composés de deux échantillons de bois clair collés entre eux ; respectivement de 15 mm et 20 mm d'épaisseur. L'orientation des fibres est respectée lors du collage pour avoir toutes les fibres dans le même sens. Les plaques sont collées à la colle vinyle. Le graphique Figure 2 expose le comportement du bois clair confiné, en compression, à différentes hauteurs d'échantillons. La courbe présentée est la courbe la plus représentative de la répétabilité (entre 4 et 6 essais pour chaque hauteur testée). Les barres d'erreurs ajoutées à 10%, 20% et 30% de déformation nominale sont bornées par la valeur maximum et minimum de chaque répétabilité à cette déformation. Le même comportement en compression hors plan confinée est obtenu. Aucun effet significatif de la présence d'un joint de colle n'est décelable.

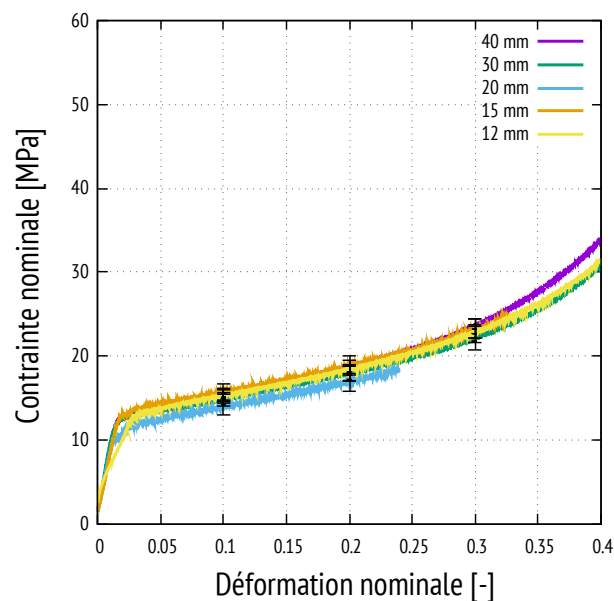


Figure 2 – Compression sur des échantillons de bois clair, confinés et de différentes hauteurs

1.2.2 Effet comparé du confinement sur le bois clair et sur le contreplaqué

Le graphique Figure 3 présente la réponse du bois clair, lorsqu'il est confiné selon le protocole décrit en section 1.1.2 ou lorsqu'il est libre. Les barres d'erreur sont toujours bornées par la valeur maximum et minimum de la répétabilité. On constate que les répétabilités d'essai sont convenables pour un matériau naturel, avec un écart maximum de 3 MPa entre deux essais de compression hors plan de bois confiné à 30% de déformation. De même pour du bois libre, pour lequel le phénomène de roulage des fibres est plus important, avec un écart maximum de 5 MPa à 30% de déformation nominale. Le confinement a un effet certain sur l'augmentation de la contrainte dans le bois clair. Confiné, le matériau devient plus raide et accumule plus d'énergie, de l'ordre de 15% de plus à 30% de déformation nominale.

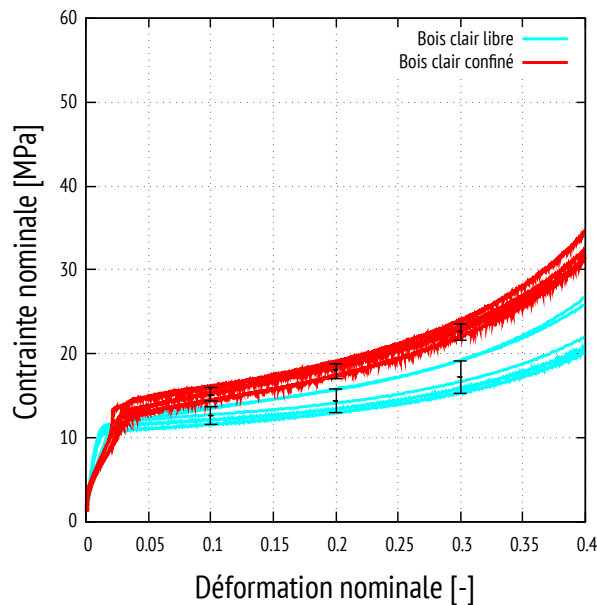


Figure 3 – Comparaison de comportement en compression hors plan, entre un groupe d'échantillon de bois clair confiné (en rouge) ou libre. (en bleu)

Le contreplaqué quant à lui ne révèle pas de différence de comportement quand il est simplement confiné suivant la même procédure. Comme le montre la Figure 4, que le contreplaqué soit confiné ou non, les réponses des échantillons sont confondues. Cela signifie qu'il est déjà auto-confiné simplement par le croisement des feuilles de bois. Cela ne dépend pas de leur collage mais bien des propriétés du matériau, la déformation étant déjà nulle selon les directions transversales durant l'essai de compression hors plan pour le bois clair. La déformation en compression peut être considérée uniaxiale, ce qui permet de confondre la contrainte vraie et la contrainte de l'ingénieur. La déformation de l'ingénieur correspond alors à la variation relative de volume et sera privilégiée en référence aux travaux antérieurs proposés par Gibson et Ashby [GIB(1997)].

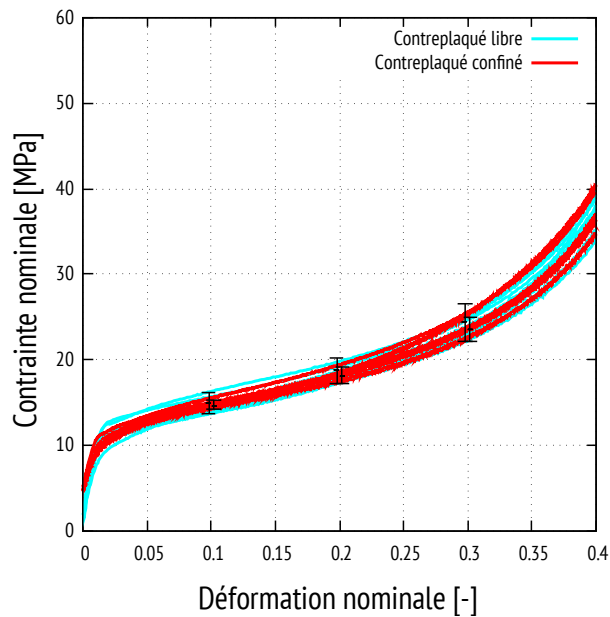


Figure 4 – Essais de compression hors plan d'échantillons de contreplaqué, confiné (en rouge) ou libre (en bleu)

1.2.3 Effet de confinement – conclusion sur le rôle de la colle dans le contreplaqué

Le contreplaqué confiné a le même comportement que le contreplaqué libre. Mais lorsqu'on compare le comportement du contreplaqué libre et du bois clair confiné, on constate qu'ils répondent avec le même niveau de contrainte à une sollicitation de compression hors plan (Figure 5).

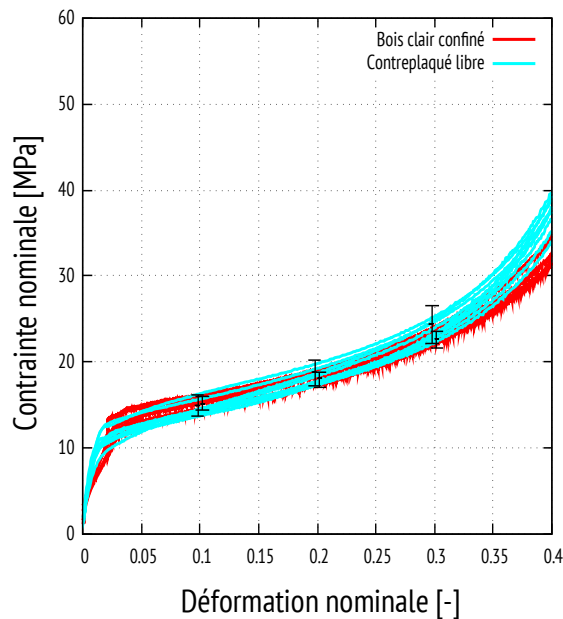


Figure 5 – Comparaison de comportement entre le contreplaqué libre et le bois clair confiné. Essais de compression hors plan

Ce dernier constat permet de conclure sur différents points :

- Le contreplaqué ne subit pas de déformation transversale pendant les essais. Présenter son comportement en contrainte nominale est un choix justifié, la section n'évoluant pas ;
- La colle n'a pas d'effet particulier sur la réponse en compression hors-plan du contreplaqué, et ne semble que participer au confinement obtenu par le croisement des feuilles de bois.

La contrainte présentée dans les graphiques qui suivront est donc la contrainte nominale :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Où S_0 est la surface initiale comprimée pendant l'essai.

2 Justification de la forme des échantillons

Les essais mécaniques en compression, même hors plan, de panneaux à base de bois, sont décrits dans différentes normes, notamment [EN789] et [EN310]. Il s'agit d'essais réalisés à vitesse de déformation quasi-statique, dont la dimension de la section carrée est 45x45 pour une hauteur de l'ordre de 60mm. Ces dimensions sont incompatibles avec les limitations inhérentes aux barres de Hopkinson comme montré au Chapitre II. Pour éviter tout effet de la dimension des échantillons entre les essais quasi-statiques et dynamiques, tous nos essais sont réalisés avec une même géométrie circulaire (diamètre 28mm et épaisseur 12mm) qu'il convient donc de valider par rapport aux normes citées en terme de volume élémentaire représentatif et de forme.

2.1 Effet de la méthode d'usinage, de forme et de section

La plupart des auteurs utilisent des échantillons rectangulaires pour tester le bois en compression comme le préconise la norme EN789 qui suggère d'utiliser des échantillons de 45 x 45 mm² de section. Nos échantillons sont donc hors norme et nous devons vérifier l'existence ou non d'un effet de forme sur le contreplaqué. Nos échantillons ont été usinés en utilisant le sciage (scie à ruban) ou le contournage sur fraiseuse à commande numérique. Tous sont comparés à la série d'essais de compression des échantillons circulaires de diamètre 28 mm usinés par contournage, dans les conditions de référence : température ambiante, 8% d'humidité dans le contreplaqué, en compression hors plan à 4.10⁻³/s.

Différents points ont été testés :

- cas 1. taille, comparaison de carrés de 20 mm, 25 mm et 50 mm de côté ;
- cas 2. usinage, comparaison de la méthode d'usinage entre carrés de 25 mm de côté ;
- cas 3. orientation, comparaison de l'orientation des fibres entre carrés de 25 mm de côté ;
- cas 4. forme, comparaison de comportement de rectangle de 50*12 mm² avec une orientation des fibres selon la grande ou la petite dimension ;
- cas 5. norme, comparaison à des échantillons de la norme EN 789 (60 mm de haut et 45*45 mm² de surface).

Les échantillons carrés de 25 mm de côté, les rectangles de 50*12 mm² et les échantillons circulaires de 28 mm de diamètre, ont une surface considérée comme identique (respectivement 625 mm², 600 mm² et environ 615 mm²).

Le graphique de la Figure 6-a présente les résultats des différents essais, tous cas confondus, et le graphique de la Figure 6-b présente seulement les essais dont les échantillons ont la même surface. Les deux graphes présentent les réponses des échantillons en contrainte nominale, en fonction de la déformation nominale. Les barres d'écart représentent la valeur moyenne pour les déformations à 10%, 20% et 30%. Les bornes de

ces barres d'écart correspondent au maximum et au minimum obtenus dans la répétabilité présentée pour chaque type d'échantillon. Le nombre de répétabilités est au minimum de 5 essais, au maximum de 10.

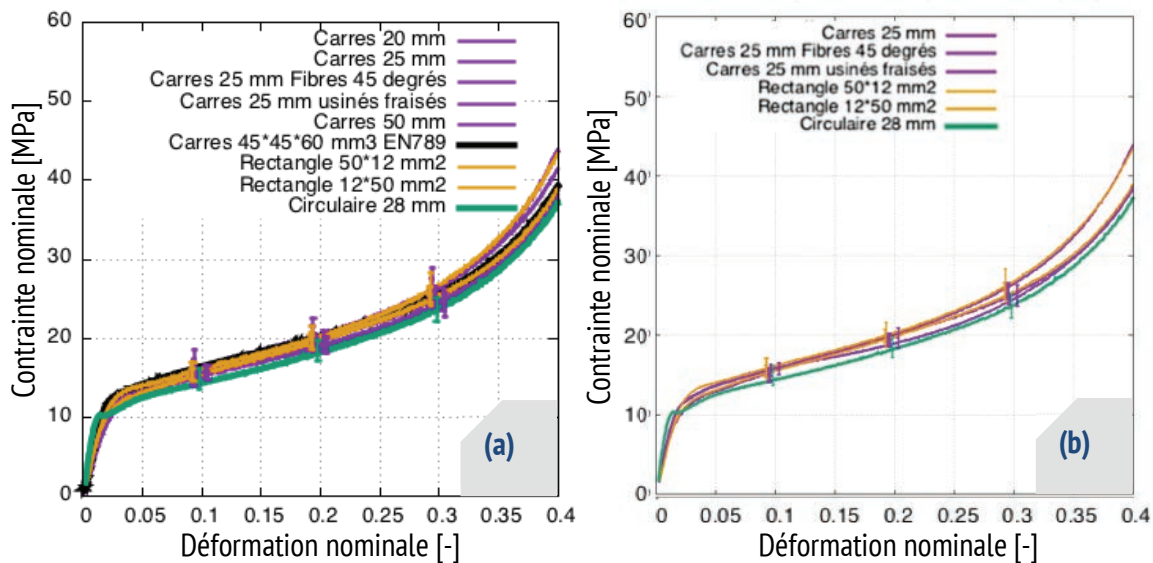


Figure 6 – Effet de forme sur la compression hors plan du bouleau. Toute surface confondue (a) et avec une surface égale mais une forme différente (b)

Cette campagne nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- il n'y a pas d'effet de taille dans les échantillons carrés, ni même d'effet de hauteur. Les essais sur les échantillons tirés de la norme (de 60 mm de hauteur) donnent les mêmes niveaux de contrainte et de déformation que les autres ;
- Il n'y a pas d'effet d'usinage. Que les échantillons soient fraisés ou usinés à la scie à ruban, les résultats sont les mêmes (cas 2);
- Que les fibres soient perpendiculaires aux côtés des échantillons ou orientées à 45°, les réponses en compression sont les mêmes (cas 3);
- Pour des échantillons rectangulaires (cas 4), l'orientation des fibres n'a pas d'incidence non plus ;
- Lorsque l'on compare les essais pour des échantillons carrés, rectangulaires ou ronds, les réponses restent les mêmes. On le vérifie pour les échantillons ayant la même surface (cas 4, Figure 6-a) mais aussi avec les autres échantillons, plus grands, ou plus hauts.

2.2 Volume élémentaire représentatif (VER) pour des échantillons circulaires

Des échantillons circulaires, de 15 à 50 mm de diamètre et de hauteur de 12 ou 36 mm (3 échantillons de 12 mm collés en respectant les croisements 0°-90°), sont comprimés en direction hors plan suivant le même protocole (vitesse quasi-statique, humidité 8%). Tous les échantillons ont tous été prélevés dans le même panneau. Il se trouve que ce panneau était différent des autres panneaux utilisés lors de ces travaux de thèse, car issu d'un lot différent, et ne sera consacré qu'à cette seule étude comparative.

Le graphique Figure 7 présente les résultats obtenus et permet de conclure sur des absences d'effet de la valeur du diamètre sur l'intervalle [15 ; 50mm] ou de la hauteur de l'échantillon entre 12 et 36 mm de hauteur, la dimension minimale du VER est inférieure à un diamètre 15mm et une hauteur de 12mm.

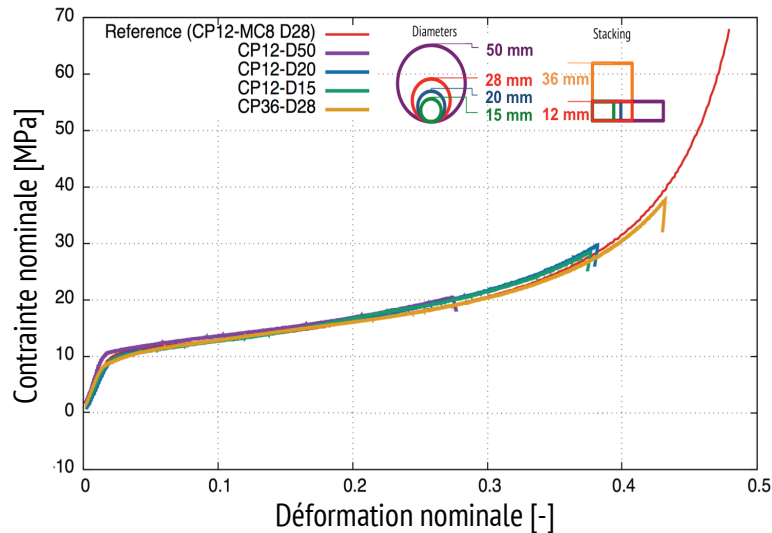


Figure 7 – Courbes de réponse en compression pour des échantillons de différents diamètres et hauteurs

Nous utiliserons donc des échantillons de diamètre 28 mm, un peu plus petit que le diamètre des barres, mais très proche, pour ne pas diminuer le ratio de surface et garder un bon ratio de signaux incident, réfléchi et transmis, comme décrit au Chapitre II.

Un travail équivalent a été mené en dynamique sur des échantillons de 15 mm, 20 mm et 28 mm de diamètre. Le graphique Figure 8 présente les trois répétibilités et la superposition est évidente. Le constat reste le même qu'en quasi-statique : pour une compression hors plan, à température ambiante, 8% d'humidité dans le bois, mais à 700/s, il n'y a pas d'effet de diamètre de l'échantillon dans la gamme [15 ; 28 mm].

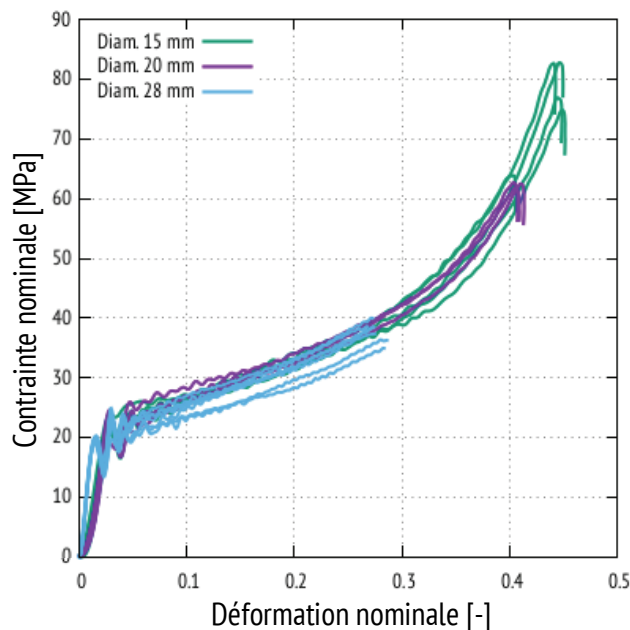


Figure 8 – Compression hors plan de contreplaqué de bouleau à 700/s pour différents diamètres d'échantillons.

Cette étude nous permet de conclure que notre échantillon de 28 mm de diamètre est valide, en quasi-statique comme en dynamique ; les résultats obtenus en quasi-statique sont comparables à des essais avec

des formats d'échantillon plus classiques notamment ceux de la norme EN789 ou les résultats précédemment trouvés dans [DNV(2003)] et [DNV(2006-1)]. Les échantillons en dynamique ont tous le même comportement pour un diamètre compris entre 15 mm et 28 mm.

3 Lubrification des échantillons

Pour éviter l'effet tonneau dû à l'adhérence des faces d'appuis de l'échantillon sur les plateaux lors de la compression, il est classique d'utiliser des échantillons en forme d'haltère ([AND(2013)]) mais d'une part ces échantillons ne sont pas adaptés à une interprétation simple des essais aux barres de Hopkinson ; d'autre part nous n'avons pas trouvé de travaux utilisant ce genre de design en compression hors plan. Enfin, Xavier [XAV(2012)] avance que ce genre d'échantillon augmente la difficulté de détermination du coefficient de Poisson du matériau. D'autres, comme Le Govic ([LEG(1994)]) utilisent des feuilles de paraffine ou de Téflon. Il en installe 3 à 4 feuilles, avec de la graisse entre chaque feuille, sur chaque face de l'échantillon, entre l'échantillon et le plateau de compression. Cette technique permet de réduire la friction entre le plateau et l'échantillon et d'avoir une homogénéisation des champs mécaniques. L'objectif étant d'avoir un coefficient de friction constant et le plus faible possible, il constate tout de même qu'il est très difficile de déterminer le coefficient obtenu et de s'assurer qu'il ne varie pas.

Nous avons testé la méthode de Le Govic [LEG(1994)]. Son principal défaut est de rendre inutilisable la mesure de déplacement de traverse pour déterminer la déformation en raison d'un écrasement important et non répétable des films de lubrifiant. Une mesure optique se montre également délicate par l'expulsion des films de paraffine qui viennent masquer l'échantillon. Une autre méthode plus basique consiste à lubrifier la première couche des échantillons de graisse mais le contreplaqué absorbe le lubrifiant, ce qui peut modifier son comportement. Vu l'épaisseur et la porosité de nos échantillons, les lubrifications ne sont donc pas envisageables. Les résultats de Brabec sur le hêtre [BRA(2015)], dont la densité est proche de celle du bouleau, confortent également nos mesures optiques où l'on vérifie aussi qu'il n'y a pas d'effet tonneau sur nos échantillons lors de l'essai. La norme [EN789] n'impose pas de lubrification des échantillons pour les essais de compression, et la forme d'échantillon proposée n'est pas justifiée dans l'optique d'éviter les effets de bord. Nos essais seront réalisés sans lubrification.

Des constats intéressants sont tout de même à noter. Lors des essais de compression lubrifiée en quasi-statique et à température ambiante, le comportement mécanique n'est pas affecté jusqu'à une déformation de 30%, mais des ruptures brutales apparaissent, avec des plans de rupture orientés à 45°, dans les échantillons. Les photos de gauche et du centre de la Figure 9 comparent deux échantillons comprimés au même niveau d'effort, avec lubrification (échantillon posé au dessus) et sans lubrification (échantillon au dessous). La photo de droite montre les ruptures dans un autre échantillon comprimé avec lubrifiant.

Sans lubrifiant, aucune rupture n'apparaît lors de l'essai, stoppé lorsque 150kN de charge sont atteints, à environ 52% de déformation nominale. Avec lubrifiant, pour un déplacement imposé identique, l'essai atteint seulement une charge ultime de 70kN pour une déformation nominale de l'ordre de 47%. Nous pouvons donc

conclure que la lubrification joue un rôle sur le comportement ultime de rupture du contreplaqué, alors que la densification est prononcée, pour des déformations de l'ordre de 50%.

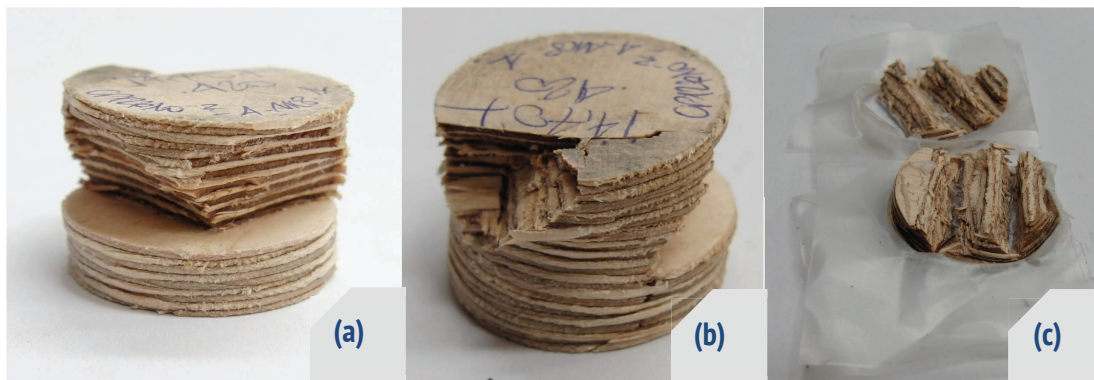


Figure 9 – Echantillons amenés à la rupture lors d'un essai de compression quasi-statique (à 4.10^{-3} /s). A gauche (a) deux échantillons, celui du dessous n'a pas été lubrifié selon la méthode de Le Govic quand celui du dessus oui. Au centre (b), les mêmes échantillons sous un autre angle de vue. Les ruptures à 45° sont très claires. A droite (c), un autre échantillon ayant subit des ruptures orientées à 45° sur toute la surface.

4 Vérification du taux d'humidité dans les échantillons

Trois méthodes de mesure sont utilisées. Deux méthodes par chauffage et une méthode par analyse thermogravimétrique. Les méthodes par chauffage sont utilisées pour toutes les mesures effectuées après nos essais. La mesure ATG a été utilisée à seule fin de validation des conditions de stockage et des autres mesures de l'humidité.

4.1 Définition du taux d'humidité

Le taux d'humidité est calculé en utilisant l'équation (4-1) [PAN(1970)] où :

- MC est l'humidité dans les échantillons exprimée en % (MC pour Moisture Content) ;
- m est la masse initiale de l'échantillon ;
- m_0 est la masse anhydre de l'échantillon.

$$MC (\%) = 100 * \frac{m - m_0}{m_0} \quad (4-1)$$

L'humidité est considérée stable quand :

- La masse de l'échantillon après 24h n'a pas varié de plus de 0,1% (norme NF EN789) ;
- La masse de l'échantillon évolue de moins de 0,5% en 4 heures (NF B51-004).

Notre validation est basée sur la norme EN789.

4.2 Mesure de l'humidité par analyse thermogravimétrique

L'humidité dans le contreplaqué, dans les conditions de référence à humidité de 8%, a été vérifiée grâce à une méthode d'analyse thermogravimétrique (ATG). Pour cela, des morceaux d'échantillons, conditionnés à 8% d'humidité dans le contreplaqué, sont extraits. La Figure 10 montre ces morceaux d'échantillons après analyse ATG.

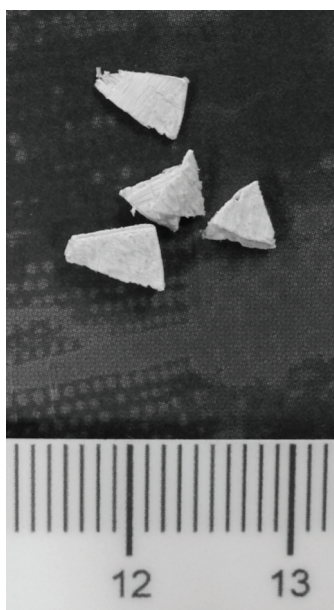


Figure 10 – Echantillons de contreplaqué après ATG

Le test a été fait trois fois et la moyenne des résultats donne une humidité dans le contreplaqué de 7.47%. Ce résultat correspond à nos attentes puisque les conditions de stockage de ces échantillons présument une humidité d'environ 8%. La Figure 11 présente une courbe type obtenue par ATG, dans le repère température-masse. La courbe bleue traduit la perte de masse. Une première perte franche, fléchée, permet d'atteindre la masse anhydre de l'échantillon obtenue à la température de 72°C. Une fois cette masse atteinte, le reste de la courbe correspond à la dégradation thermique de l'échantillon. A ce point fléché, l'échantillon est à 7,42% d'humidité et pèse 92,58% de son poids initial.

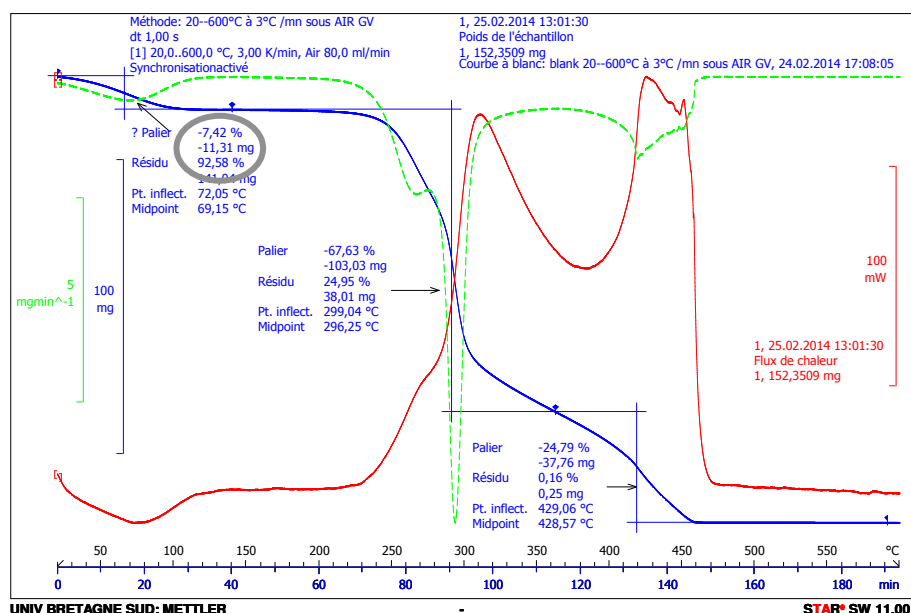


Figure 11 – Perte de masse d'un échantillon pendant une ATG

4.3 Mesure de l'humidité par chauffage

Ces méthodes destructives ne sont applicables qu'après essai mécanique. Pour obtenir la masse anhydre m_0 il est classique de suivre la procédure décrite par Panshin [PAN(1970)] et Trouy-Triboulot

[TRI(2012)] qui consiste à chauffer l'échantillon à 100°C jusqu'à ce que sa masse se stabilise. Il nous a fallu adapter cette méthode car le contreplaqué est fait de bois mais aussi de colle. Au delà de 80°C, la colle se détruit. Les échantillons sont donc chauffés à 80°C jusqu'à obtenir une masse stable. La méthode donne le même résultat que la mesure ATG, mais nécessite 2h pour sécher un échantillon de 28 mm de diamètre et 12 mm de hauteur.

Ainsi, parce que cette méthode est longue et délicate à mettre en œuvre, une autre méthode, communément acceptée est utilisée. Elle utilise un micro-onde pour sécher les échantillons. L'échantillon est séché par intermédiaires courts et à puissance modérée pour limiter la température maximale et réaliser des pesées intermédiaires. L'ADEME [ADE(2001)] ou encore Osepchuk [OSE(1984)] utilisent cette méthode. La masse de l'échantillon est pesée avec une balance de 0,001g de précision. Les deux méthodes s'avèrent donner les mêmes résultats.

5 Evolution de la température dans les échantillons

Lors de tout essai mécanique irréversible, une partie de l'énergie mécanique est transformée en énergie calorifique. Un échauffement peut donc être observé dans l'échantillon pendant l'essai. L'objectif de cette partie est de déterminer l'évolution de cette température lors des essais de compression, pour différentes vitesses de déformation, différentes températures, et différentes humidités dans le bois. Aucune bibliographie n'illustre ce phénomène de façon quantifiée, à température ambiante comme en température cryogénique.

5.1 Evolution de la température en compression quasi-statique

Les essais cryogéniques à vitesse de déformation faible sont faits avec une machine hydraulique, associé à une enceinte climatique, présentée Chapitre II. Les différents thermocouples de type T permettent de mesurer la température dans l'enceinte. Les échantillons testés sont tous des échantillons de 28 mm de diamètre et 12 mm d'épaisseur. Un thermocouple de type T a été placé à l'intérieur de l'échantillon, grâce à un perçage de 10 mm de profondeur, 0,65 mm de diamètre, réalisé radialement au milieu de l'épaisseur de l'échantillon. Des mesures ont été faites dans l'enceinte pour des essais à {-163°C, -90°C et -55°C}, et pour des humidités de l'échantillon de {2%, 4%, 8%, 15% et 30%}, aux vitesses de déformation de $4.10^{-3}/s$ et $4.10^{-1}/s$.

5.1.1 Essai à température cryogénique lors d'un essai à $4.10^{-3}/s$ et 8% d'humidité dans le bois

Pendant les essais quasi-statiques cryogéniques de référence (-163°C, $4.10^{-3}/s$ et MC8), la température de l'échantillon évolue, comme le montre le graphique Figure 12. La température du plateau, en bleu sur le graphique, fluctue tout au long des essais. Cela est dû au fait que le thermocouple de régulation est installé du côté de la buse d'alimentation et les diminutions de température sont liées à l'injection d'azote liquide dans l'enceinte via la régulation. La température est considérée comme stable quand la valeur moyenne de la température des plateaux est à la température visée. Le chargement (en kN) est présenté en rouge et son échelle d'évolution est à gauche, l'échelle de température (en °C) est à droite.

A -163°C une élévation de température de l'échantillon est constatée, allant jusqu'à -155°C à la fin de l'essai et de -157°C à 30% de déformation nominale, quand la densification débute. L'échauffement observé est une transformation de l'énergie mécanique pendant l'essai. Son évolution est globalement linéaire sur tous les essais effectués, quelles que soient la température et l'humidité dans le contreplaqué. Sur l'essai Figure 12, de 40s à 100s, l'échantillon s'échauffe de 10°C quand après 100s, il s'échauffe de 4 °C.

Lorsque l'essai est terminé, et l'échantillon libre de toute charge, la température redescend. Ce retour à une température de départ rapide est dû au fait que les plateaux restent à -170°C pendant l'essai, sans variation de température. Ainsi, à la fin du chargement, ils favorisent un refroidissement rapide des échantillons.

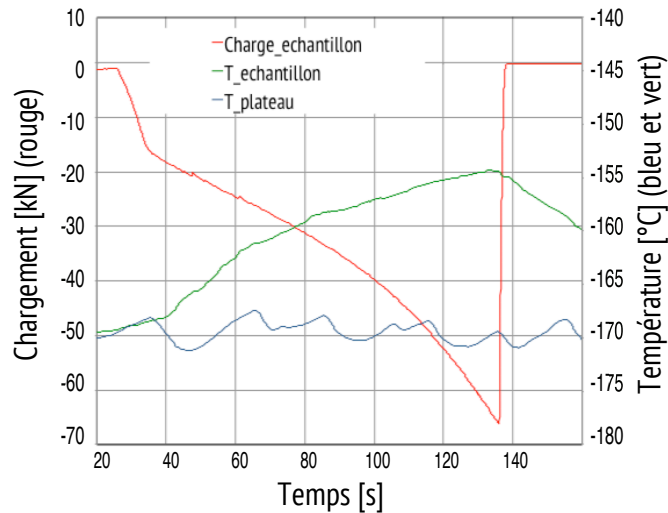


Figure 12 – Evolution de la température dans un échantillon et dans les plateaux de compression, pour un chargement quasi-statique à -163°C et une humidité dans le bois de 8%

Quel que soit l'essai, l'effet de la température est visible dès le départ de l'essai : plus la température est basse, plus l'échauffement est important. Il augmente aussi avec l'évolution de la déformation. En augmentant le chargement en compression, on atteint l'état de densification du contreplaqué. Plus il y a de compaction, plus l'échauffement est important. Les essais ne sont donc pas faits à température constante. A -163°C, pour 30% de déformation nominale, l'échauffement est d'environ 17°C, environ 10°C à -90°C de 3°C à -55°C, résultats reportés dans le Tableau 1. Les moyennes sont en gras, suivies par les contraintes correspondantes et les écarts-types.

Température d'essai (°C)	-163°C	-90°C	-55°C
Augmentation moyenne (°C)	+17,2°C	+10,0°C	+3,0°C
[Contrainte correspondante]	[75 MPa]	[58 MPa]	[50 MPa]
Ecart-type	2,5°C	1,2°C	1,0°C

Tableau 1 – Echauffement moyen des températures d'essai à -163°C, 90°C ou -55°C pour une humidité dans le bois de 8%, à 30% de déformation nominale

Le réchauffement est donc d'autant plus important que la température est basse. Cela peut s'expliquer par le fait que la contrainte, et donc le travail mécanique pour une déformation donnée, augmentent avec la diminution de la température lors d'une compression hors plan.

5.1.2 Evolution de la température dans l'échantillon, pour un essai à température ambiante, à $4.10^{-3}/s$ et 8% d'humidité dans le bois

Une série d'essais instrumentés a été menée à température ambiante. Le graphique Figure 13 présente les résultats obtenus. Jusqu'à 70kN, soit jusqu'à environ 52% de déformation nominale (sur un total de 55% sur l'essai complet, pour l'essai Figure 13) une augmentation d'environ un tiers de la température totale seulement est constatée (1°C sur un total de 5°C d'échauffement). Cela signifie que la majorité du réchauffement se fait à la fin de l'essai, pendant la densification du contreplaqué. Contrairement aux essais en cryogénie, ce réchauffement suit la courbe de chargement, en ayant une allure exponentielle.

A température ambiante, ce phénomène n'a pas d'incidence forte sur l'essai, même si les mécanismes sont les mêmes qu'en cryogénie : une faible augmentation de la température pendant le début de l'essai jusqu'à entamer la phase de densification. Alors la température augmente sévèrement, en suivant l'augmentation de la contrainte. On constate que l'échauffement à température ambiante est sensiblement le même qu'à -55°C .

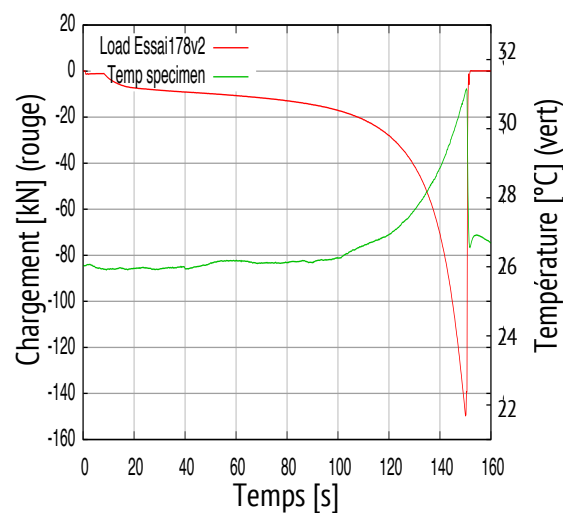


Figure 13 – Evolution de la température pendant la compression quasi-statique, à température ambiante

5.1.3 Evolution de la température dans l'échantillon, pour différentes vitesses de déformation à -170°C et 8% d'humidité dans le bois

A $4.10^{-1}/s$, l'échantillon se réchauffe et cet échauffement perdure malgré la fin de l'essai, contrairement aux essais à $4.10^{-3}/s$. Le graphique Figure 14 présente deux cas d'études différents, pour des échantillons identiques (taille, défauts absents, même masse volumique), testés sous les mêmes conditions climatiques (température et humidité dans le bois). Pour l'essai 52 (à droite), à 24% de déformation nominale (sur une déformation totale de 38%), pour une contrainte d'environ 60MPa, l'échantillon subit une augmentation de 15°C sur une augmentation totale de 45°C . L'autre échantillon (à gauche) prend 10°C sur les 30°C pris au total, pour une déformation nominale de 33,7% (correspondant à 108 MPa de contrainte) avec un essai qui termine à 34,4% de déformation nominale.

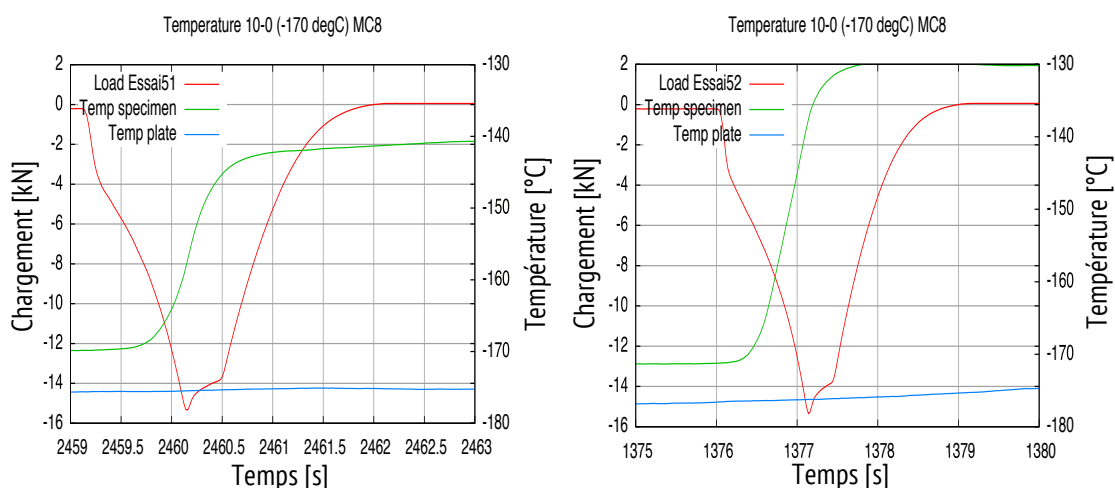


Figure 14 – Chauffage dans l'échantillon au cours d'une compression à $4.10^{-1}/s$, $-163^{\circ}C$ et une humidité dans le bois de 8%

La répétabilité de l'échauffement n'est pas éloquent en amplitude, et n'apparaît pas au même moment pour ces deux essais. Pourtant, la conclusion reste qu'à $4.10^{-1}/s$, les échantillons subissent une forte augmentation de température, mais qu'elle apparaît vers la fin de l'essai, comme pour les essais à température ambiante. Cela coïncide avec une augmentation de la contrainte à l'approche des mécanismes de densification dans le contreplaqué. La température restant constante sur une majeure partie du plateau de compression, partie qui nous intéresse pour la suite de ces travaux.

L'augmentation de température se fait plus linéairement pour les essais à $4.10^{-3}/s$ et 8% d'humidité. Jusqu'à 20% de déformation, dans la partie plateau de compression, l'échantillon prend $8^{\circ}C$ sur $15^{\circ}C$ au total. Malgré le fait que l'essai ne soit pas isotherme, l'augmentation n'est pas conséquente pour nous, relativement aux échauffements constatés à $4.10^{-1}/s$ sur la totalité de l'essai, par exemple.

A $700/s$, les appareils de mesure ne permettent pas de savoir si l'échantillon se réchauffe, ni pendant l'essai, ni après, l'essai étant trop rapide pour notre matériel. Nous n'avons pas réussi à trouver, ni dans les documentations techniques, ni dans la bibliographie, une information concernant le temps de réponse du thermocouple. On peut supposer que suivant l'évolution de température à $4.10^{-1}/s$, l'échantillon s'échauffe d'autant plus. Cela suit aussi les tendances d'augmentation de la contrainte avec la vitesse de déformation.

5.1.4 Différentes humidités dans le contreplaqué

Les essais à différentes humidités ne sont faits qu'à $-163^{\circ}C$. Le Tableau 2 résume les différentes augmentations moyennes par humidité, à 30% de déformation.

Humidité dans le contreplaqué (%)	2	4	8	15	PSF
Augmentation moyenne ($^{\circ}C$)	+15,3°C	+17°C	+17,2°C	+13,3°C	+8,3°C
<i>[Contrainte correspondante]</i>	<i>[65 MPa]</i>	<i>[70 MPa]</i>	<i>[75 MPa]</i>	<i>[83 MPa]</i>	<i>[95 MPa]</i>
<i>Ecart-type</i>	<i>+2,2°C</i>	<i>+0,8°C</i>	<i>2,5°C</i>	<i>+2,6°C</i>	<i>+0,9°C</i>

Tableau 2 – Chauffage moyen en fonction de l'humidité dans le bois, à $-163^{\circ}C$

Un premier constat est que lorsque le panneau de contreplaqué a son humidité inférieure à 15%, l'échauffement est sensiblement le même, compte tenu des écarts-types.

Une fois que l'humidité dans le bois est plus importante, l'échauffement existe encore mais il est plus faible : 25% plus faible entre 8 et 15% d'humidité, et 52% plus faible entre 8% et le point de saturation des fibres (PSF). C'est le seul paramètre qui ne suit pas la tendance pour laquelle l'augmentation de contrainte entraîne une augmentation de température. On suppose alors que l'eau, même si elle est seulement dans les cellules, donc dite eau « liée », modifie les propriétés thermiques du contre-plaqué.

5.2 Temps d'essai disponible en cryogénie en compression avec les barres d'Hopkinson

Des essais sont faits en dynamique avec des barres d'Hopkinson. En cryogénie, un système est développé pour permettre des essais à température contrôlée. Il a été présenté au Chapitre II. En dynamique à température cryogénique, les essais sont faits en deux temps : d'abord l'échantillon est installé dans le support isolant, entre les allonges, et le tout est mis à froid ensemble. Une fois la température désirée atteinte, les allonges, l'échantillon et les barres sont mis en contact. Pour cela, il faut ouvrir l'enceinte isolante, période pendant laquelle l'échantillon pourrait se réchauffer au contact des barres en aluminium, conductrices et à température ambiante, avant même que l'essai n'ait eu lieu. Il est donc nécessaire de quantifier ce réchauffement, et le temps disponible pour faire l'essai, avant que la température ne soit plus contrôlée, même si le refroidissement est maintenu dans l'enceinte tout au long de la procédure d'essai.

Pour faire cette vérification, les échantillons utilisés ne sont pas testés en compression. Ils sont simplement refroidis, et une fois à la température souhaitée obtenue, mis en contact avec les barres. On mesure alors l'évolution de température grâce aux trois thermocouples disposés dans l'échantillon. Le premier est près de la face de l'échantillon, à 1.6 mm de la face ; un deuxième à 5mm, proche du milieu de l'échantillon et un dernier à 3 mm du bord, entre les deux premiers. La Figure 15 illustre les trous ainsi percés à 9 mm de profondeur, et à 120° les uns des autres pour éviter toute interaction.

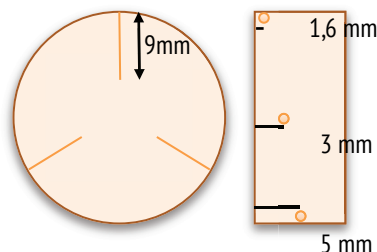


Figure 15 - Perçage dans l'échantillon

Le décompte du temps débute au moment où l'essai est censé démarrer en conditions réelles, quand l'enceinte, l'échantillon et les allonges sont à la température visée. Le temps indiqué à côté de chaque étape est le temps qui s'est écoulé depuis le lancement du test. La température à l'intérieur de la chambre climatique au début du test est de -172°C.

- Etape 1 : Retirer les plaques de contreplaqué pour ouvrir l'enceinte (5,65 secondes);
- Etape 2 : Mise en contact des barres d'Hopkinson et de l'ensemble {allonges + échantillon} (17,18 secondes);
- Etape 3: Fin du test (60 secondes, temps choisi arbitrairement pour constater l'évolution de la température).

A la fin de l'essai, les allonges sont à une température de -132°C . Le graphique Figure 16 donne l'évolution de la température à l'intérieur de l'échantillon, jusqu'à la 40ème seconde du test. Le changement de température le plus important et qui intervient le plus tôt se fait dans la couche la plus proche de la surface extérieure de l'échantillon. Cette température donne le temps limite disponible pour faire nos essais. Pour pouvoir faire un essai dynamique, à partir du moment où le système est à la température visée, comptant la mise en place de l'échantillon dans les barres, une dizaine de secondes sont nécessaires. Or le test fait ici nous permet de constater que même après 20 secondes de mise en place, la température dans l'échantillon n'a augmenté que d'un degré. Le temps de mise en place n'influence donc pas la température en début d'essai.

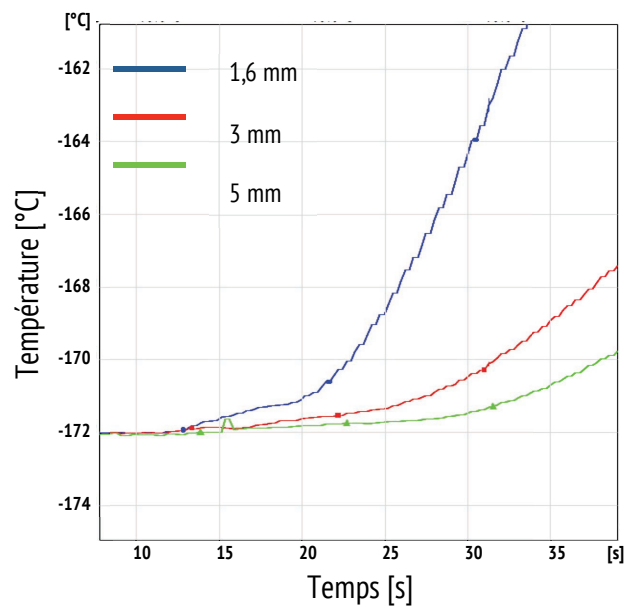


Figure 16 – Evolution de la température dans les trois couches du contreplaqué

5.3 Essais de compression à 0,004/s pour des échantillons imbibés et trempés d'azote liquide

Plusieurs travaux faits à température cryogéniques conditionnent les échantillons de bois ou de dérivé de bois en les trempant directement dans l'azote liquide avant de faire les essais, que ce soit en compression ([KOL(1940)], [DNV(2006-1)]) ou en cisaillement ([DNV(2006-2)]). La température n'est pas mesurée ni contrôlée pendant l'essai sur les campagnes précédemment citées. Afin de connaître l'influence de ce protocole expérimental sur le comportement du contreplaqué, nous avons donc développé des essais de compression simple avec des échantillons trempés dans l'azote au préalable, et des échantillons immergés dans l'azote pendant l'essai.

5.3.1 Préparation des échantillons

Les échantillons trempés sont préparés en les mettant dans un récipient isolant rempli d'azote liquide. Ils n'en sont sortis qu'une fois qu'ils coulent au fond du récipient et que plus aucune bulle ne s'échappe. Cette indication confirme que l'échantillon est à la température de l'azote liquide. Ils sont sortis un à un pour chaque essai, le thermocouple est ensuite installé dans le trou percé à cet effet (10 mm de profondeur, d'un diamètre de 0,65 mm) et l'échantillon est placé dans l'enceinte thermique. Pendant toute cette manutention,

qui dure environ 15 secondes, on observe déjà une échappée d'azote. L'enceinte est régulée à -110°C et l'échantillon prend environ 40°C pendant l'essai.

Les échantillons imbibés sont directement installés dans l'enceinte, déjà instrumentés. Pendant l'essai, ils sont disposés dans une barquette remplie d'azote liquide. Le test est réalisé dans ces conditions, en s'assurant entre chaque essai que la barquette soit toujours suffisamment remplie d'azote pour que l'échantillon soit complètement immergé. Pour se faire, l'enceinte climatique reste ouverte, régulée à -180°C , et l'appoint en azote liquide est fait si besoin au long de l'essai.

5.3.2 Résultats

Les graphiques Figure 17 présentent la réponse au chargement des échantillons de contreplaqué (courbes violettes) et l'évolution de leur température dans le même temps (courbes vertes). Le graphique Figure 17-a présente un échantillon imbibé et le graphique Figure 17-b, un échantillon simplement trempé dans l'azote liquide.

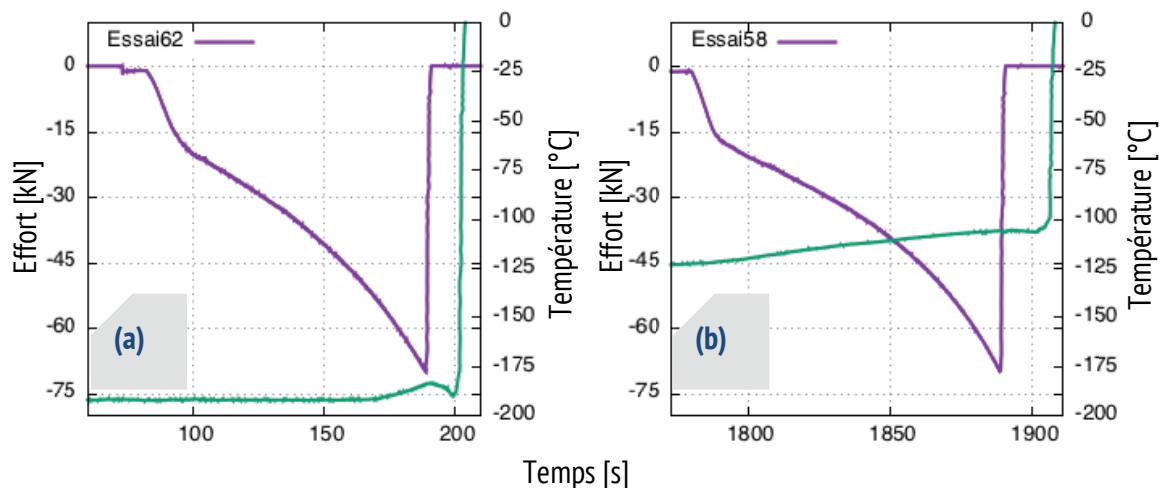


Figure 17 - Evolution de la température lors d'une compression hors plan à température cryogénique. Réponse d'un échantillon imbibé (a), et celle d'un échantillon trempé (b)

Pendant chaque essai d'échantillon imbibé, l'azote rentre en ébullition. Pour autant, avec l'appoint d'azote, la température reste constante à -190°C dans l'échantillon, comme le montre la Figure 17-a. C'est aussi la température de l'azote à l'état liquide. Pour un essai trempé, le cas est différent. L'échantillon subit un échauffement, dès la mise en place : il gagne 60°C en moyenne pendant l'installation. L'essai démarre donc à -120°C environ et l'échantillon s'échauffe encore de 15°C à 30% de déformation, comme le montre le graphique de gauche sur la Figure 17-b.

Nous pouvons donc conclure qu'au-delà de conserver un échantillon à température cryogénique, le fait de le laisser imbibé pendant l'essai empêche l'échauffement, d'où une température stable de -190°C pour les échantillons imbibés. Faire des essais cryogéniques avec des échantillons simplement trempés ne permet pas d'assurer une constance de la température durant l'essai. Nos essais sont assurés d'être à température constante et contrôlée (relativement aux variations constatées et présentées précédemment) grâce à l'utilisation des enceintes climatiques développées au laboratoire.

6 Evaluation du module élastique de compression hors plan

Pour déterminer le module élastique du contreplaqué en compression hors plan nous nous appuyons sur la norme EN789. L'éprouvette est de type parallélépipédique de section carrée de $45 \times 45 \text{ mm}^2$ (+/-5%) et de 60mm de hauteur, soit 5 échantillons de 12 mm collés en respectant le croisement des feuilles avec une colle vinyle. Cet essai est réalisé à une vitesse de traverse de $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ mm/s}$, soit une vitesse de déformation initiale de $4 \cdot 10^{-5} /s$. La norme EN789 (méthode 1) suggère de trouver subjectivement une droite décrivant la partie élastique de l'essai (droite 1 sur la Figure 18) et de translater celle-ci suivant l'axe des déplacements d'une valeur de $0,01 \cdot h_0$ où h_0 est la hauteur initiale de l'échantillon (droite 2 sur la Figure 18). Ce déplacement représente 1% de déformation nominale. Le croisement entre cette courbe 2 et la courbe d'essai donne la borne F_{max} . Elle permet de donner les bornes de calcul du module d'élasticité qui sont 10% de F_{max} et 40% de F_{max} entre lesquelles le module est calculé.

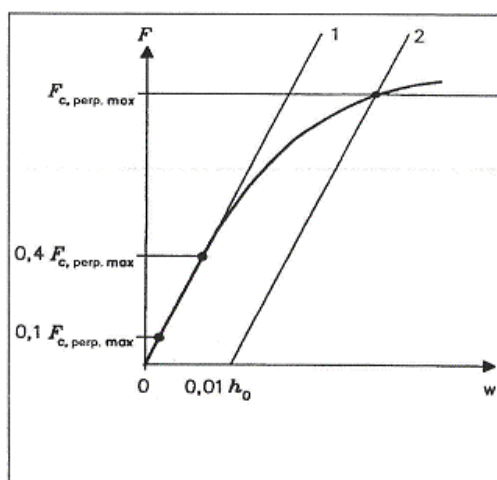


Figure 18 – Courbe de chargement utilisée dans la norme EN789 pour décrire le calcul du module élastique en compression perpendiculaire aux fibres

La base de la méthode normalisée EN789 (méthode 1) étant une détermination visuelle d'une partie linéaire, nous avons décidé de proposer une seconde méthode (méthode 2) où la détermination des bornes pour le calcul du module se fait visuellement en même temps que la recherche de la partie linéaire. Nous avons donc réalisé différents essais de compression. Deux dispositifs de mesures pour calculer les déformations ont été utilisés :

- Corrélation d'image avec dispositif Aramis pour le dépouillement. Deux longueurs de références ont été utilisées pour le dépouillement. Une première qui correspond à la hauteur totale entre les interfaces mors-échantillon et une seconde de 12mm, soit une épaisseur unique de contreplaqué placé au centre de l'éprouvette
- Déplacement de traverse corrigé de la raideur machine

Les résultats sont présentés dans le Tableau 3 suivant :

[En MPa]		Bornes EN789 (méthode 1)	Bornes visuelles (méthode 2)
Mesure directe	Module élastique : déplacement traverse + raideur machine	601,93 [35,78]	610,42 [32,25]
Mesure optique	Module Lo= 12 mm	732,73 [111,35]	675,82 [91,44]
	Module sur la totalité Lo=60mm	600,14 [41,21]	583,80 [40,10]

Tableau 3 – Modules élastiques du contreplaqué de bouleau en compression hors plan à 4.10^{-5} /s. Les valeurs entre crochets sont les valeurs d'écart-type

La première observation est relative à la première colonne de ce tableau. On constate que le calcul de la déformation d'une éprouvette calculée à l'aide du déplacement machine corrigé de la raideur machine est validé dans la partie élastique puisque on obtient le même module ($E=601.93\text{MPa}$, 0.3% d'écart) en se basant sur le déplacement vrai des plateaux ($E=600.14\text{MPa}$) mesuré par corrélation d'image. En ce qui concerne la méthode de dépouillement pour le calcul du module élastique, on constate un écart relatif de l'ordre de 2.8% de la méthode 2 par rapport à la méthode 1 dans les deux cas. On constate également que cette méthode conduit à des écarts types légèrement plus faibles. Compte tenu de cet écart, on choisit de calculer la valeur des modules élastiques en utilisant cette méthode 2.

La seconde observation est la différence de valeurs de module élastique constatée entre la mesure sur la totalité ou la partie centrale de l'éprouvette qui correspond ici à une plaque unique de contreplaqué. Cet écart est de 18% en prenant comme référence le module dans la partie centrale. Un constat équivalent a déjà été rapporté par Adalian [ADA(1998)] dans le cas d'essais dans le sens des fibres.

La troisième observation concerne la comparaison de la valeur de ces modules précédemment calculés [600MPa, 730MPa] obtenues pour une vitesse de déformation de 4.10^{-5} /s, une humidité de 8%, une température de 25°C, avec celles de la littérature pour un contreplaqué de bouleau de même provenance. On peut citer Paik [PAI(2010)] qui propose un module élastique de 820 MPa. Quant à Kim [KIM(2010)] il utilise un module élastique de 520 MPa. Aucune indication (géométrie, vitesse, humidité,...) n'est donnée concernant l'obtention de ces modules Le rapport [DNV(2003)] présente un module élastique de 660 MPa, en suivant la norme ISO 844, pour des échantillons de $41 \times 41 \times 12 \text{ mm}^3$.

En conclusion, il apparaît que les valeurs que nous avons mesurées [600MPa, 730MPa] se situent dans la partie centrale des valeurs de la littérature : 520MPa pour la valeur basse et 820MPa pour la valeur haute. On rappelle également que les modules élastique présentés dans ce rapport ont été calculés en définissant de manière subjective pour chaque essais une partie linéaire entre deux couples de valeurs [déformation, contrainte] non paramétrés relativement à une grandeur référence.

7 Essai de cisaillement transverse du contreplaqué avec le montage losipescu

Cette étude concerne le dépouillement d'essais de cisaillement de type losipescu [IOS(1967)], utilisés dans la norme [ASTMD5379(2010)]. Les déplacements dans la zone cisailée sont mesurés par corrélation d'images et calculés via le logiciel de traitement d'images Aramis. Chaque facette a pour taille 12x12 pixels, avec un pas de 6 pixels de facette en facette. Un pixel a une taille approximative de 0.04 mm de côté.

7.1 Présentation des échantillons et effet de la dimension de la fenêtre de calcul

Les échantillons Figure 19 ont déjà été présentés au Chapitre II, tout comme que leur mise en place. Les dimensions de cet échantillon sont rappelées sur la Figure 19 ci-dessous. La zone cisailée entre les deux pointes d'entailles est constituée de 3 plis sollicités en cisaillement roulant et de 2 plis sollicités en cisaillement transverse.

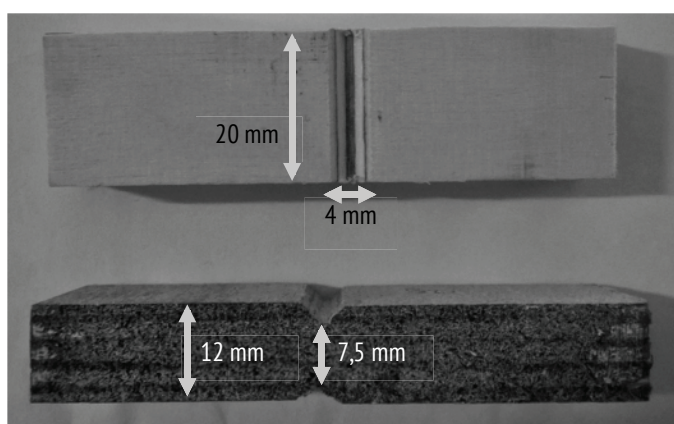


Figure 19 – Echantillon à tester dans un dispositif de type losipescu

La mesure des déplacements dans la zone cisailée est réalisée par corrélation d'images. Le calcul des déformations est réalisé par le dispositif ARAMIS. La validation de la zone d'observation est donc primordiale. On choisit d'étudier 3 zones rectangulaires. La plus grande (A) englobe toute la partie située sous les entailles (Figure 20-a). La zone (B) de taille intermédiaire est plus étroite 4,3 mm et sa hauteur est définie par les deux pointes d'entailles. Elle contient 3 plis soumis au cisaillement roulant et deux plis au cisaillement transverse (Figure 20-b). Enfin la zone (C) la plus étroite ne prend que deux plis sollicités en cisaillement roulant et deux plis sollicités en cisaillement transverse. Sa largeur est de 1,5mm (Figure 20-a).

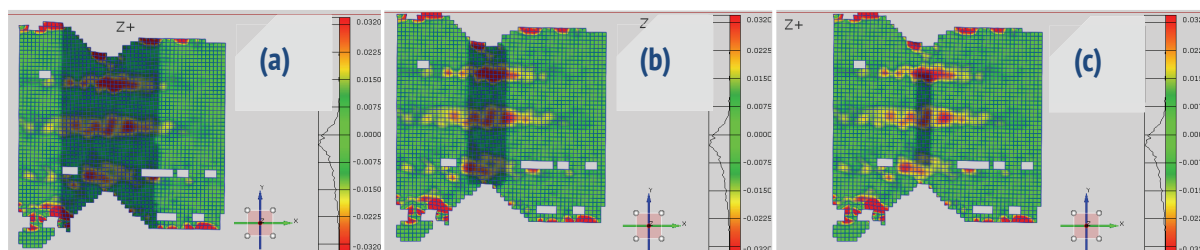


Figure 20 – DIC des essais de cisaillement. Les trois zones de mesures sont visibles en gris

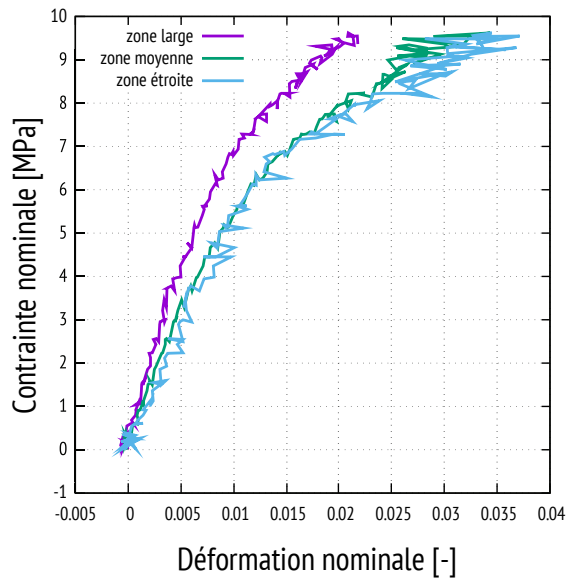


Figure 21 – Effet du choix de la zone de calcul de la déformation lors du dépouillement des essais de cisaillement

La Figure 21 présente l'évolution de la contrainte nominale de cisaillement en fonction de la déformation nominale $\varepsilon_{xy} = \frac{\varepsilon_{MAJOR} - \varepsilon_{MINOR}}{2}$ (cf. Chapitre II). Cela permet aussi d'être indépendant du repère initial des images de mesure.

On constate que les zones (B) et (C) fournissent des comportements identiques contrairement à la zone (A). Pourtant, le nombre de plis considéré pour le calcul est différent. Ces deux zones exposent le même nombre de plis au cisaillement transverse et diffèrent par le nombre de plis soumis au cisaillement en roulant, 3 sur la zone (B) et 2 sur la zone (C). Par ailleurs, les modules de cisaillement en roulant et transverse sont très différents, de l'ordre de 160MPa pour le cisaillement en roulant et de 1500MPa pour le cisaillement transverse ([DNV(2006-2)]). Cette différence peut expliquer la similitude des résultats sur les zones B et C. On choisit dans le reste de l'étude d'utiliser la zone (C) pour le calcul des déformations. Les résultats correspondent alors à un contreplaqué dont le nombre de plis en cisaillement roulant par rapport à ceux en cisaillement transverse est de 1 alors que le rapport réel est de 1.25.

7.2 Estimation de la déformation en cisaillement

Le cisaillement ε_{xy} est calculé à partir des deux déformations majeures et mineures ε_{MAJOR} et ε_{MINOR} . Dans le cas d'un cisaillement simple, ces deux valeurs devraient être simplement opposées. La graphique Figure 22 présente l'évolution de la contrainte nominale en fonction de la somme des déformations majeures et mineures (courbes vertes), et de cisaillement $\frac{\varepsilon_{MAJOR} - \varepsilon_{MINOR}}{2}$ (courbes rouges).

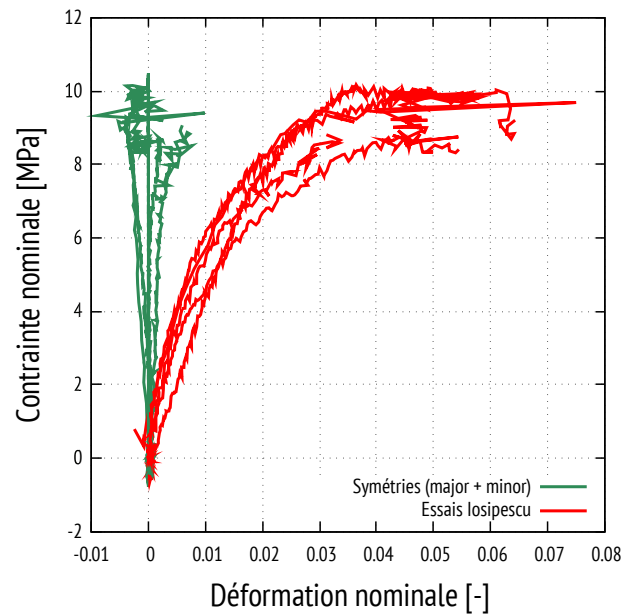


Figure 22 – Vérification de la symétrie de la matrice de déformation

On constate que la somme des deux déformations principales n'est pas exactement nulle. Les déformations principales sont opposées sur la quasi-totalité de l'essai. A partir de 2% de déformation de cisaillement, il n'y a plus assez d'information pour faire le calcul de vérification de la symétrie de chargement. Jusqu'à 6 MPa, on peut estimer que la section est sollicitée en cisaillement pur, l'écart entre les déformations étant de +/- 2%.

Quoiqu'il en soit, au delà d'une déformation en cisaillement de 4%, de nombreuses ruptures s'enchaînent, notamment entre les fibres sollicitées en cisaillement roulant pendant l'essai ([USDA2010]). La Figure 23 illustre ce phénomène, avec les premières fractures dans le matériau, dans les plis sollicités en cisaillement roulant. Les ruptures apparaissent bien en fin d'essai. Aucune rupture n'est constatée avant 3,5% de déformation nominale.

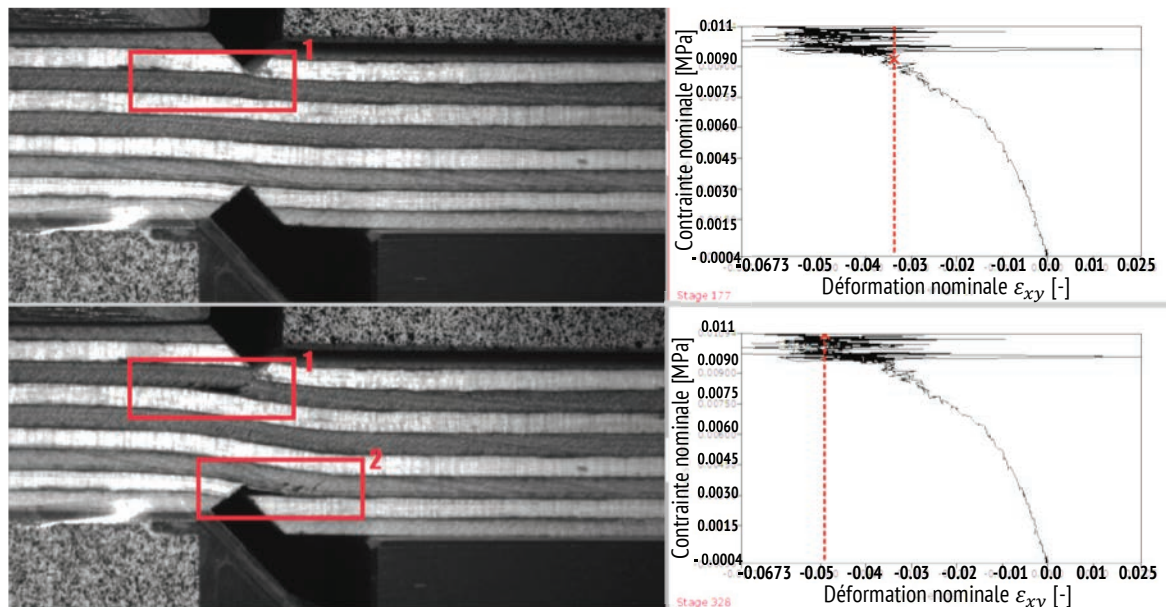


Figure 23 – Rupture fragile en cisaillement roulant, dispositif Iosipescu.

8 Validation du montage de cisaillement double entaille

Pour valider notre dispositif, la même démarche que celle mise en place pour l'étude du dispositif développé par Iosipescu a été suivie, en analysant notamment l'évolution des déformations mineure et majeure et la somme de celles-ci, qui doit être nulle dans le cas d'un cisaillement simple. Les déformations sont calculées sur une zone de mesure similaire à celle utilisée pour le dispositif de Iosipescu, dans une seule section cisailée, avec les mêmes paramètres de corrélation d'image. On rappelle que les entailles réalisées sur l'éprouvette Iosipescu et double entaille ont la même géométrie. Mais les échantillons dits « double entaille » présentés Figure 24, ont la particularité d'avoir deux zones cisailées symétriques. Une première vérification de la symétrie des déformations a conduit à estimer une variation de $\pm 5\%$ entre les deux zones cisailées.

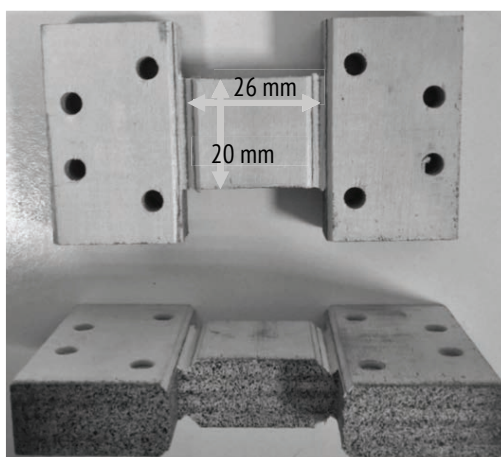


Figure 24 - Echantillons entailés, pour les essais de cisaillement au moyen du montage double entaille

Sur la Figure 25 ont été tracées les évolutions de la somme et la demi différence des déformations majeures et mineures appelée ε_{xy} dans le graphique afin de simplifier l'écriture.

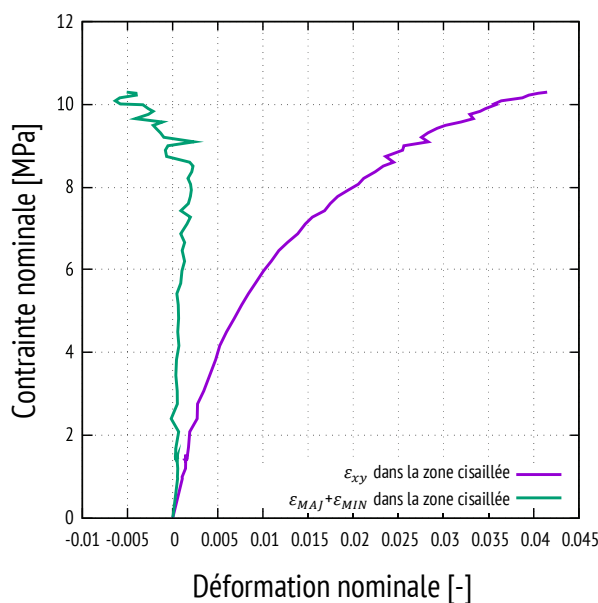


Figure 25 - Evolution du cisaillement et de la différence entre ε_{MAJOR} , ε_{MINOR}

On constate que jusqu'à 2% de déformation de cisaillement la différence entre ε_{MAJOR} et ε_{MINOR} est d'environ 2‰, et atteint 5‰ à 4% de déformation. Ces écarts sont identiques à ceux calculés lors de l'étude

du cisaillement avec le dispositif de Iosipescu. La seule différence concerne l'évolution de cet écart qui est monotone croissant pour Iosipescu traduisant une dérive du trajet de chargement constante dans la zone cisailée, contrairement à l'éprouvette double entaille. Après 2.5% de déformation de cisaillement le trajet de chargement semble plus radicalement modifié.

La courbe représentant la demi différence des déformations majeure et mineure, soit la déformation de cisaillement présentée Figure 25, est reportée Figure 26 ci-dessous. On peut également y voir un autre essai réalisé avec le dispositif double entaille et tous les essais réalisés avec dispositif de Iosipescu présentés dans le paragraphe précédent.

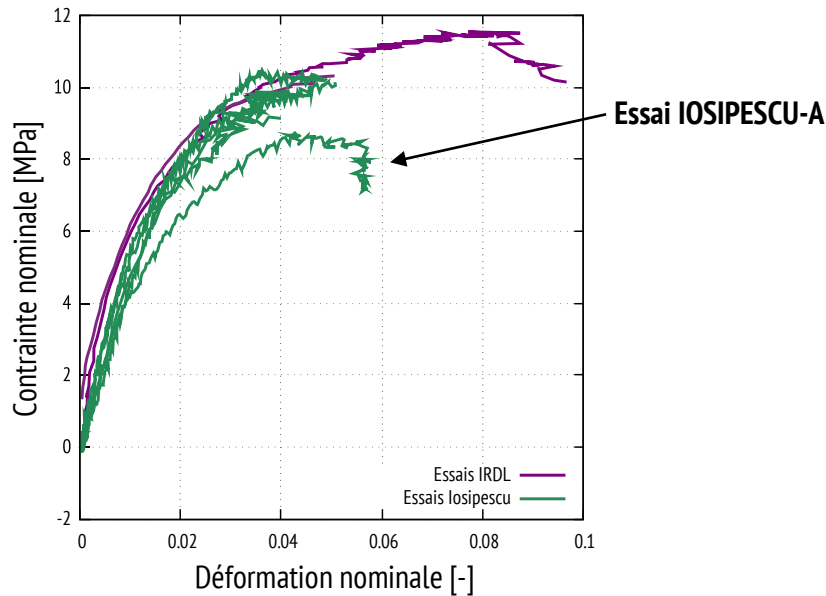


Figure 26 – Comparaison des essais de cisaillement obtenus par le dispositif Iosipescu ou le dispositif double entaille

On constate que les essais réalisés avec les dispositifs double entaille et Iosipescu donnent des évolutions similaires de la contrainte de cisaillement en fonction de la déformation de cisaillement et que les caractéristiques de répétabilité sont comparables. On peut exclure l'essai (IOSIPESCU-A) de cette étude de répétabilité. En effet comme on peut le voir Figure 23 les ruptures débutent dans les zones de pointe d'entailles. Il est alors possible que la pointe des entailles de cette éprouvette aient été usinées au delà de l'interface des plis, donc dans le plis soumis au cisaillement en roulant créant ainsi une amorce de rupture prématurée.

Les résultats précédents valident le dispositif double entaille pour établir le comportement en cisaillement d'un contreplaqué de 12mm entaillé dans des conditions quasi-statiques. L'étude bibliographique ne nous ayant pas permis de trouver un dispositif existant susceptible de valider le dispositif double entaille en cisaillement dynamique, on fait l'hypothèse que les résultats fournis par ce dispositif dans ce cadre d'étude seront significatifs.

9 Bilan sur les protocoles et les vérifications nécessaires

Tous nos essais ont pu être faits en conditions contrôlées. Les humidités sont connues et stabilisées sur toute la durée de l'essai. Nous avons pu faire varier les humidités de 2% à 30%. Les vitesses de déformations sont contrôlées via le déplacement de la traverse pour la machine hydraulique et mesurées via les jauges de déformation pour les SHPB. Nous avons fait varier les vitesses de déformations de $4 \cdot 10^{-4}/s$ à $700/s$. Les déformations et les contraintes seront présentées en valeurs nominales, notamment pour se référer aux modèles numériques qui peuvent être envisagés. La température est régulée et contrôlée tout au long de l'essai. Elle est constante à chaque essai, malgré le fait que les échantillons aient un comportement isotherme ou adiabatique dans certains cas. La compression comme le cisaillement sont faits en suivant les essais de norme pour vérifier les protocoles et valider les dispositifs conçus. Enfin, nos choix de géométrie d'échantillon sont justifiés, le confinement est étudié et confirmé, notamment de part le croisement des feuilles de contreplaqué et non par la colle qui le compose. Les vérifications préalables de qualité d'échantillon sont faites et une attention particulière est portée à maîtriser ces différents paramètres. Finalement, le plan d'expérience choisi en compression est présenté Figure 27. Il permet d'avoir une gamme suffisamment large d'essais pour comprendre le comportement du contreplaqué en compression de manière globale et suivant de nombreux paramètres. Cela permet d'envisager des modélisations relativement complètes sous cette sollicitation. En cisaillement, seule la vitesse de déformation sera étudiée, à température ambiante et 8% d'humidité dans le contreplaqué.

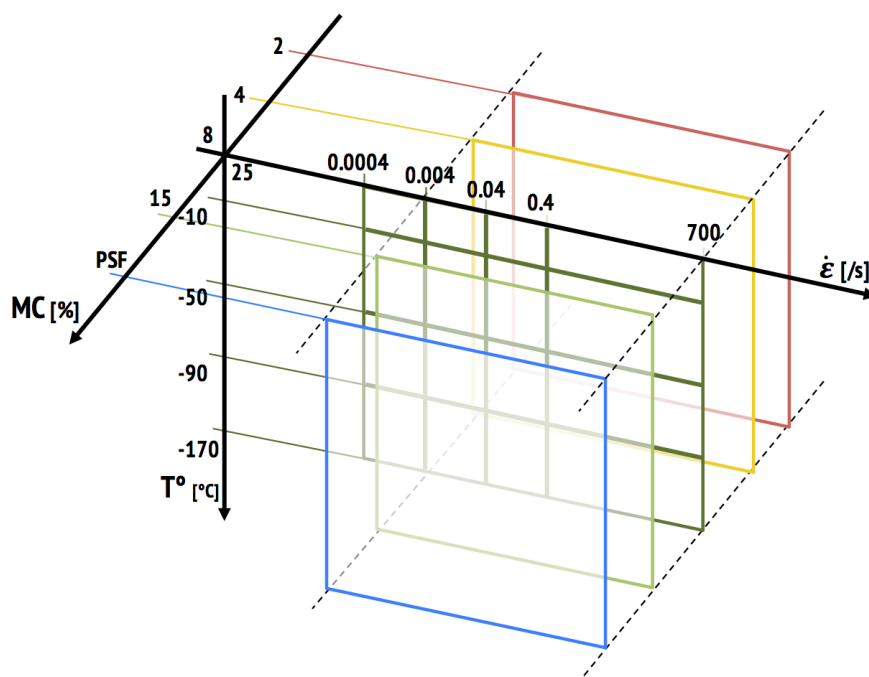


Figure 27 – Plan d'expérience à trois dimensions pour les essais de compression: Humidité (MC), Température (T°) et Vitesse de déformation ($\dot{\epsilon}$). A 8% d'humidité, toutes les températures et les vitesses de déformations sont testées. Aux autres humidités, les essais sont dans les coins de chaque plan : à -170°C et 25°C pour $700/S$ et $4 \cdot 10^{-3}/s$.

10 Références

- [ADA(1998)] – C. ADALIAN, *Comportement du bois en compression dynamique multiaxiale - Application à la simulation de crashes de conteneurs*, PhDThesis, Mechanics, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, 1998, 382.
- [ADE(2001)] – ADEME, Critt Bois, Fibois, CTBA, *Mesure des caractéristiques des combustibles bois*, Juillet 2001
- [AND(2013)] – A. ANDRE, R. KLIGER, R. OLSSON, *Compression failure mechanism in small-scale wood specimens reinforced with CFRP: an experimental study*, Constr. Build. Mater. 2013, Vol.41, pp.790–800
- [ASTMD5379]- ASTM D 5379/D 5379M - *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*, 2005
- [BRA(2015)] – M. BRABEC, J. TIPPNER, V. SEBERA, J. MILCH et P. RADEMACHER, *Standard and non-standard deformation behaviour of European beech and Norway spruce during compression*, Holzforschung, Janvier 2015, No. 69, pp. 1107–1116
- [DNV(2003)] - *Lng membrane materials - plywood - test results*, Technical Report 2003, No. 2003-3421, DNV, Det Norske Veritas
- [DNV(2006-1)] - *Testing of plywood at lng temperatures – Phase 1*, Technical Report NO. 2006-3519, DNV, Det Norske Veritas, Veritasveien 1, 2006, No-1322 Høvik, Norway
- [DNV(2006-2)] - *Testing of plywood at lng temperatures – Phase 2*, Technical Report NO. 2006-3580, DNV, Det Norske Veritas, Veritasveien 1, 2006, No-1322 Høvik, Norway
- [EN310] - NF EN 310, *Panneaux à base de bois - Détermination du module d'élasticité en flexion et de la résistance à la flexion*, Juin 1993
- [EN789] - *En 789: 2004 timber structures-test methods-determination of mechanical properties of wood based panels*, 2004.
- [GIB(1997)] – L. J. GIBSON, M. F. ASHBY. *Cellular solids - Structure and properties*. New York: Cambridge University Press, 1997
- [IOS(1967)] – N. Iosipescu, *New accurate procedure for single shear testing of metals*. J MATER, 1967, vol. 2, no 3, p. 537-566.
- [KIM(2010)] – M. H. KIM, S. M. LEE, J. M. LEE, B. J. NOH, W. S. KIM, *Fatigue strength assessment of MARK-III type LNG cargo containment system*, Ocean Engineering, May 2010, No. 37, pp. 1243–1252
- [KOL(1940)] – F. KOLLMANN, *The mechanical properties of wood of different moisture content within -200°C to +200°C temperature range*, VDI-Forschungsheft 403, XI Bd., 1940, pp. 1-18
- [LEG(1994)] – C. LE GOVIC, M. KHEBIBECHE, *Methodological developments in the testing of wood based panels. Part I: Tensile and compression tests*, Materials and Structures, 1994, No. 27, pp. 229-236
- [NAV(2005)] – P. NAVI, F. HEGER. *Comportement thermo-hydrromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [OSE(1984)] – J. M. OSEPCHUK, *A History of Microwave Heating Applications*, IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques, Vol MTT-32, No. 9, Septembre 1984

- [PAI(2010)] - J. K. PAIK, J. M. SOHN, Y. S. SHN et Y. S. SUH, *Nonlinear Structural analysis of membrane-type LNG carrier cargo containment system under cargo static pressure loads at the cryogenic condition with a temperature of -163°C*, Ships and Offshore Structures, November 2010, Vol. 6, No. 4, 2011, pp. 311–322
- [PAN(1970)] - A. J. PANSHIN, C. DE ZEEUW. *Textbook of wood technology*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1970.
- [TRI(2012)] - Marie-Christine TROUY-TRIBOULOT, Pascal TRIBOULOT. *Sciences et ingénierie du bois Matériau bois - Structure et caractéristiques*. Techniques de l'ingénieur, 10 Nov. 2012.
- [USDA(2010)] – R. J. ROSS, *Wood handbook: wood as an engineering material*, Technical Report FPL- GTR-190, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010
- [XAV(2012)] - J. XAVIER, A.M.P. DE JESUS, J.J.L. MORAIS, J.M.T. PINTO, *Stereovision measurements on evaluating the modulus of elasticity of wood by compression tests parallel to the grain*, Construction and Building Materials, Juillet 2011, Vol. 26, pp. 207–215

CHAPITRE IV

Compression et cisaillement, présentation des résultats obtenus

Ce chapitre présente les différents résultats obtenus à la suite des différentes campagnes d'essais menées. Au préalable, des essais classiques de compression dans le sens longitudinal des fibres ont été faits, suivant la norme EN789 et nous présentons les résultats obtenus. La principale partie de ce chapitre se concentre sur le comportement en compression hors plan du contreplaqué. Les résultats sont d'abord présentés pour des échantillons à 8% d'humidité. Les effets de la vitesse de déformation (essais à $[4 \cdot 10^{-4}/s ; 700/s]$) et de la température (essais à $[-170^{\circ}\text{C} ; 25^{\circ}\text{C}]$) lors des essais sont alors étudiés en détail et un modèle du comportement est alors proposé pour des déformations nominales à partir de 4% jusqu'à densification. L'effet de l'humidité sur les paramètres décrivant le comportement du contreplaqué en compression hors plan est ensuite évalué à 0.004/s et 700/s pour 25°C et -170°C. Pour tous ces effets, une modélisation globale du comportement du contreplaqué est proposée. Le cisaillement hors plan du contreplaqué à température ambiante et 8% d'humidité, pour deux vitesses de déformation extrêmes de 0.0012/s et 970/s est aussi présenté et ces résultats analysés à la fin de ce chapitre.

SOMMAIRE DU CHAPITRE

1	COMPRESSION DANS LE PLAN, ETUDE DU COMPORTEMENT ELASTIQUE DU CONTREPLAQUE	80
2	COMPRESSION HORS PLAN DU CONTREPLAQUE DE BOULEAU A 8% D'HUMIDITE	81
2.1	DESCRIPTION DES PARAMETRES ETUDIES	81
2.1.1	LE MODULE ELASTIQUE	82
2.1.2	LE MODULE D'ECROUISSAGE ET LA CONTRAINTE D'ORIGINE D'ECROUISSAGE	82
2.1.3	LA DEFORMATION DE DENSIFICATION	83
2.2	PRESENTATION DES ESSAIS	83
2.3	INFLUENCE DES DIFFERENTES CONDITIONS D'ESSAI	84
2.3.1	STRAIN RATE SENSITIVITY AT AMBIENT TEMPERATURE	84
2.3.2	EFFECT OF TEMPERATURE AT THE QUASI-STATIC STRAIN RATE	85
2.3.3	STRAIN RATE SENSITIVITY AT CRYOGENIC TEMPERATURE	85
2.4	STRESS STRAIN CURVE MODEL	86
2.4.1	EFFECT OF TEMPERATURE AND STRAIN RATE ON THE LINEAR HARDENING PARAMETERS	88
2.4.2	EFFECT OF TEMPERATURE AND STRAIN RATE ON THE DENSIFICATION PARAMETERS	91
2.5	SUMMARY OF THE IDENTIFIED BEHAVIOUR	93
2.6	CONCLUSIONS	95
3	COMPRESSION HORS PLAN DU CONTREPLAQUE, EFFET DE L'HUMIDITE DANS LE CONTREPLAQUE, AUX VALEURS LIMITEES DE TEMPERATURE ET VITESSE DE DEFORMATION	96
3.1	PRESENTATION DES RESULTATS	96
3.2	EVALUATION DU COMPORTEMENT EN FONCTION DE L'HUMIDITE DANS LE CONTREPLAQUE	98
3.3	CONCLUSIONS	102
4	MODELISATION ELASTO-PLASTIQUE AVEC DENSIFICATION SUR UN ESSAI DE COMPRESSION	102
4.1	MODELE A TEMPERATURE AMBIANTE	103
4.2	MODELE A TEMPERATURE CRYOGENIQUE	105
5	CISAILLEMENT HORS PLAN DU CONTREPLAQUE DE BOULEAU A 8% D'HUMIDITE	106
6	CONCLUSION	108
7	REFERENCES	109

1 Compression dans le plan, étude du comportement élastique du contreplaqué

Des essais de compression suivant la norme [EN789] ont permis de déterminer les modules élastiques et les contraintes limites élastiques dans le plan du contreplaqué dans le sens des fibres. Les échantillons proposés par la norme ont une hauteur de 200 mm et une section de 48x48 mm². Les échantillons sont créés par collage de plaques de 12 mm d'épaisseur, puis usinés en respectant le parallélisme des faces d'appui sur les plateaux de compression et la perpendicularité de ces faces avec le plan des fibres, cf. Figure 1.

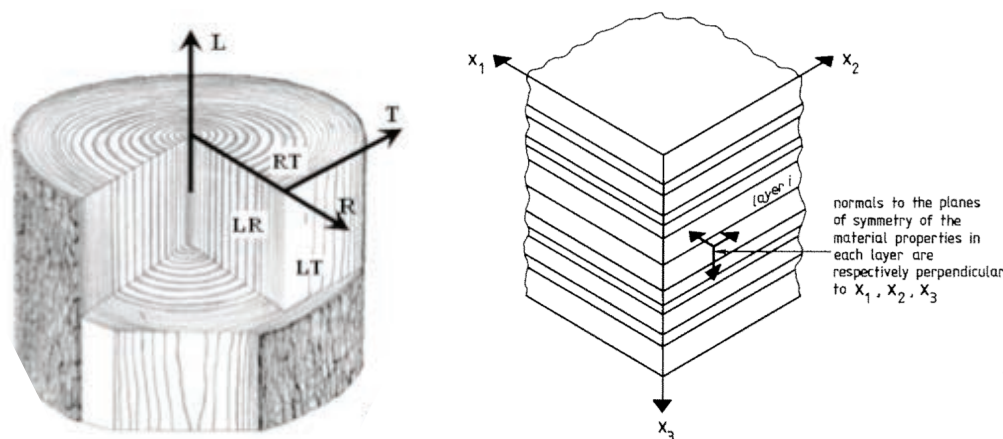


Figure 1 – Définition du repère propre au bois clair, issu de [MOU(2006)] et propre au contreplaqué, issu de [GER(1987)]

Les répétabilités des essais sont présentées Figure 2 et les valeurs de module et de contrainte élastiques mesurées sont répertoriées dans le Tableau 1. On constate que les modules obtenus à 20°C sont du même ordre que ceux issus du rapport [DNV-CN30(2006)] utilisées par Paik [PAI(2010)] ou du Handbook of Finnish plywood [UPM(2008)] utilisées par Arswendy [ARS(2011)].

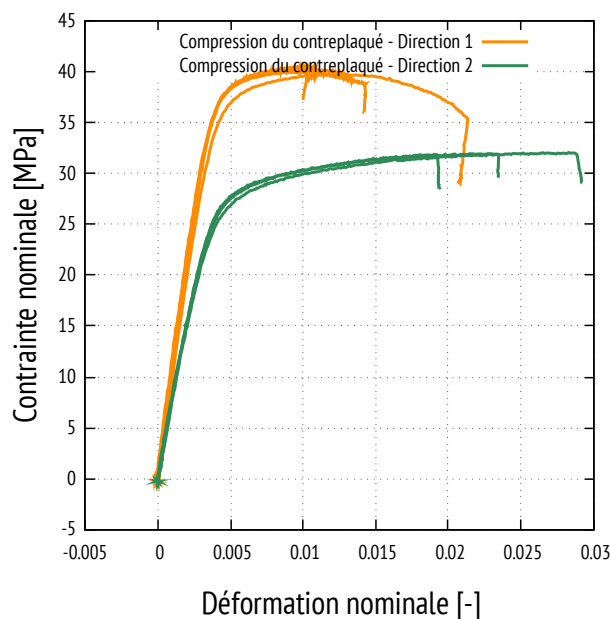


Figure 2 – Réponse en compression longitudinale (Direction 1, courbes oranges), et tangentielle (Direction 2, courbes vertes)

En MPa	Module Elastique (données [DNV-CN30(2006)]) (données [UPM(2008)])	Contrainte limite élastique (données [DNV-CN30(2006)]) (données [UPM(2008)])
Direction 1 (L du contreplaqué)	10 000 (9450) (9333) 7083	35 - (27.7) 25
Direction 2 (T du contreplaqué)	(8000) -	- (24.3)

Tableau 1 – Paramètres du contreplaqué en compression longitudinale (Direction 1) et tangentielle (Direction 2)

En utilisant une simple loi des mélanges comme celle utilisée aussi par Gerrard dans [GER(1987)], on peut estimer les modules du contreplaqué à partir des modules du bois clair. Pour le bouleau, le module est de 13900 MPa dans le sens longitudinal et 695 MPa dans le sens tangentiel d'après le Wood Handbook [USDA(2010)]. Soit des modules estimés de 8030 MPa dans la direction 1 (L) et 6560 MPa dans la direction 2(T) dans le Wood Handbook [USDA(2010)]. D'après les valeurs de Gerrard [GER(1987)], les modules seraient théoriquement de 9550 MPa dans la direction 1 et 7860 MPa dans la direction 2, soient des valeurs proches de celles mesurées expérimentalement.

2 Compression hors plan du contreplaqué de bouleau à 8% d'humidité

La direction hors plan du contreplaqué correspond à la direction radiale de chaque pli de bois clair qui le compose. Comme l'a notamment montré Adalian [ADA(1998)] la direction radiale du bois clair, du fait de sa structure dans cette direction, conduit à un comportement de type « matériaux cellulaires » (cf. Chapitre I). Ce comportement est notamment décrit par Gibson et Ashby [GIB(1997)] et Reid [REI(1997)] et se compose en trois parties : une première partie élastique, décrite par un module élastique dont les évolutions en fonction de différents paramètres ont été partiellement abordées en section 1. Une deuxième partie pendant laquelle les parois des fibres du bois transmettent la compression mais subissent du flambement ; certaines fibres rompent et la contrainte augmente. La courbe de réponse s'apparente à une courbe d'écrouissage. Enfin la troisième partie, dite de densification, la majorité des fibres ont flambé ou rompu ; phase pendant laquelle la contrainte augmente fortement.

Plusieurs paramètres peuvent être étudiés et tous sont influencés par les conditions d'essais du contreplaqué telles que la température, l'humidité dans les échantillons, ou la vitesse de déformation. Cette partie porte sur l'étude de ces effets sur le contreplaqué de bouleau, en compression hors plan.

2.1 Description des paramètres étudiés

Après avoir corrigé les déplacements « bruts » de la machine (cf. Chapitre III), nous extrayons les différents paramètres suivants :

- Le module d'élasticité du contreplaqué E;

- La contrainte d'origine plateau ou d'écroissage ;
- Le module du plateau ou module d'écroissage ;
- La déformation de densification ε_D .

Ces paramètres sont représentés sur les graphiques Figure 3. ε_D ne peut être représenté, étant un scalaire qui dépend de chaque essai, situé dans le virage créé par l'augmentation de contrainte lors de la densification. La section 2.1.3 traite de ce paramètre. La Figure 3 représente un essai de compression de référence (8% d'humidité à température ambiante à 0.004/s). Les essais représentés correspondront à la courbe de l'essai réel le plus représentatif. Les barres d'erreurs présentent les valeurs moyennes de chaque répétabilité à 10%, 20% et 30% (quand la déformation est suffisante) de déformation nominale. Les bornes de chaque barre sont les valeurs minimale et maximale obtenues dans une répétition donnée à ces déformations. Sur cette figure, les droites bordeaux correspondent à la modélisation choisie pour cet essai suivant les valeurs des paramètres obtenues, dans la partie élastique et la partie plateau. Les droites en pointillées correspondent au résultat de ces paramètres à +/- un écart-type. Ici, on constate sur la Figure 3-a que la courbe représentative est bien incluse dans l'espace défini par ces droites en pointillés, et ce jusqu'à 33% de déformation nominale.

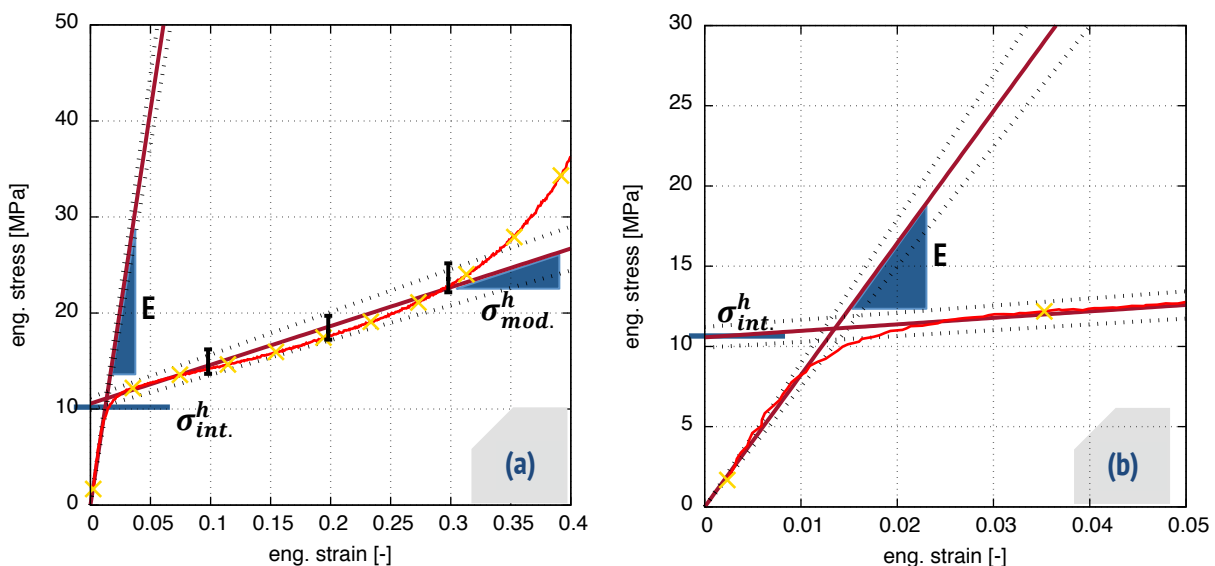


Figure 3 – Représentation des paramètres de description des courbes en compression hors plan. Exemple sur une courbe de compression à $4.10^{-3}/s$, à 8% d'humidité dans le contreplaqué, complète (graphique (a)) et zoomée sur la partie élastique (graphique (b)).

2.1.1 Le module élastique

Lors d'une compression hors plan, le comportement du contreplaqué est considéré linéaire dans le début de l'essai (jusqu'à quelques pourcents de déformation). La pente de cette partie peut donc être décrite par un paramètre unique, appelé module élastique. Il existe différentes façons de calculer cette pente, et elles ont été décrites dans le chapitre III, section 7. Dans la suite de ce chapitre, ce module est noté E.

2.1.2 Le module d'écroissage et la contrainte d'origine d'écroissage

Lors d'une compression hors plan, quand l'échantillon rentre dans son comportement irréversible, la courbe en réponse à cette sollicitation peut être modélisée de manière affine et décrite par seulement deux paramètres, le module d'écroissage σ_{mod}^h et la contrainte élastique d'origine du plateau de compression σ_{int}^h . Le calcul de ces deux paramètres se fait sur chacune des courbes de comportement obtenues, par la

détermination de courbes de tendances linéaires, déterminées entre deux bornes définies en déformation nominale. Pour définir la valeur de la borne minimum, certains auteurs utilisent une valeur de déformation fixe, tels que Jordan [JOR(2016)]. La déformation dans ses essais est de 7,5%, correspondant au début du plateau de compression pour les polymères testés. Cette valeur est trop importante pour nous ; à ce niveau de déformation nous sommes déjà dans la partie plateau de compression de la courbe de réponse. Nous définissons la contrainte limite élastique du contreplaqué de bouleau pour une déformation de 4%. La borne haute est pour nous une borne de 20% de déformation. Comme explicité section 2.3, ces bornes sont choisies pour obtenir un résultat stable, quelles que soient les conditions d'essais, et avoir un coefficient de corrélation fiable.

2.1.3 La déformation de densification

Basée sur de le calcul de l'énergie d'absorption du matériau, décrite dans Gibson et Ashby [GIB(1997)], ce paramètre est utilisé par Tan [TAN(2005)], Li [LI(2006)] ou Jing [JIN(2014)]. Il peut être vu comme la déformation à partir de laquelle le comportement du contreplaqué est dominé par la densification. Nous choisissons de limiter le calcul de σ_{int}^h et σ_{mod}^h à une borne de fin de 20% de déformation nominale. D'autres paramètres auraient pu être choisis pour définir cette borne, comme la déformation de densification. Dans notre cas, on ne peut le prendre comme borne maximale pour définir le plateau de compression car il correspond à une déformation pour laquelle la partie plateau n'est plus linéaire quelles que soient les conditions d'essais, même en quasi-statique à température ambiante. Ce paramètre reste un résultat que l'on confrontera suivant les conditions d'essais.

2.2 Présentation des essais

La Figure 4 présente une répétabilité d'essai à vitesse de déformation quasi-statique (à $4.10^{-3}/s$), à température ambiante, et à 8% d'humidité dans les échantillons. Ces essais sont présentés en contrainte nominale [MPa] - déformation nominale [-]. Des barres d'erreurs sont présentées à 10%, 20% et 30% de déformation, dans la mesure du possible. Il existe des cas d'essais pour lesquels la réponse ne va pas jusqu'à 30% de déformation, notamment en dynamique. Deux types de barres seront utilisées dans la présentation des résultats, en rouge, sur la gauche de la déformation étudiée, les barres d'erreurs à +/- un écart-type et à droite de la déformation étudiée, les barres bornées des valeurs maximum et minimum pour les déformations correspondantes. Les écart-types calculés sont des écart-types de Pearson non corrigés de l'effet de la taille de l'échantillon. La valeur présentée au milieu des deux types de barres est la valeur moyenne de la contrainte à la déformation correspondante. Sur chaque gamme d'essai, un essai représentatif sera présenté, et utilisé comme point de comparaison du comportement global du contreplaqué, suivant les conditions d'essai. Il se pourra donc que la valeur moyenne calculée de la contrainte à 10%, 20% ou 30% soit différente de la valeur de la courbe représentative.

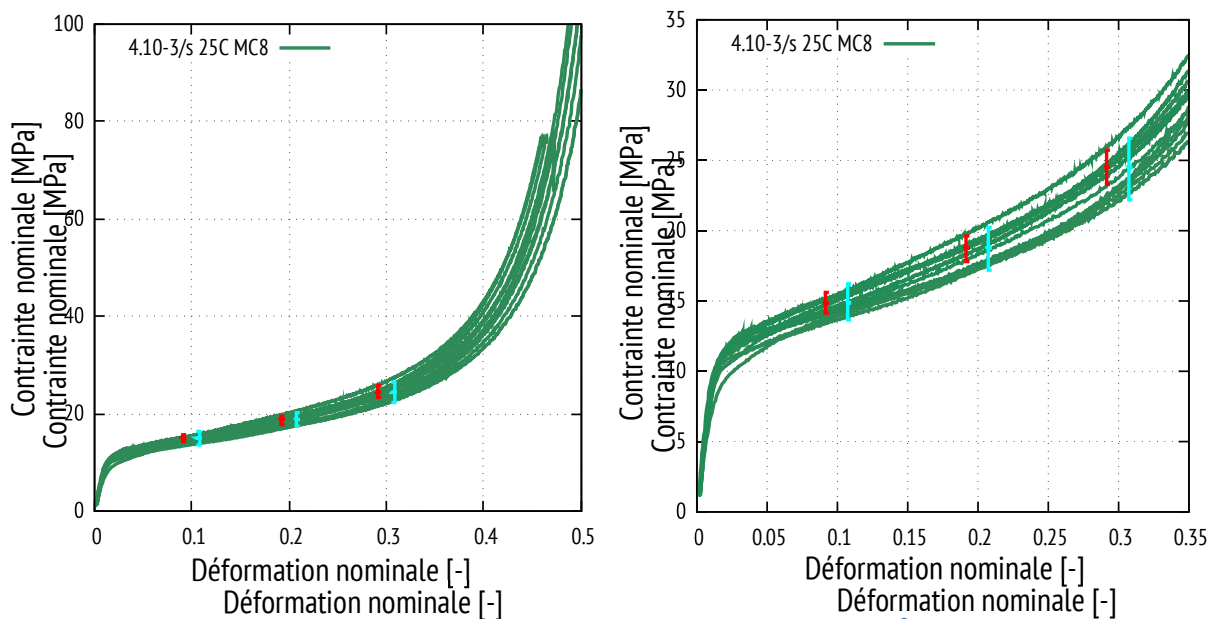


Figure 4 – Présentation d'une répétabilité d'essai sur la gamme d'essais dite de référence : à $4.10^{-3}/s$, $25^{\circ}C$ et 8% d'humidité dans le contreplaqué. En rouge (vers la gauche) les barres d'erreur à \pm un écart-type, et en bleu (vers la droite) les barres d'erreurs bornées des valeurs maximum et minimum pour les déformations correspondantes

Pour les essais de référence, la répétabilité est très bonne en comparaison à des répétabilités de bois clair [GER(1982)]. Le fait que le contreplaqué soit fait de feuilles de bois croisées à 0° et 90° en fait un matériau plus raide que le bois clair (cf. Chapitre III, section 1) et moins soumis aux aléas naturels que ce dernier ; d'où une répétabilité plus satisfaisante. Les écart-types ne sont pas toujours aussi faibles qu'en quasi-statique à température ambiante, et tendent même à augmenter, notamment quand la vitesse de déformation augmente et que la température diminue.

2.3 Influence des différentes conditions d'essai

Face au nombre important de conditions expérimentales étudiées et dans un souci de clarté, nous préférons présenter dans un premier temps les effets de la température et de la vitesse de déformation pour une humidité de 8% dans le contreplaqué. Une étude précise de la méthodologie d'analyse et de la modélisation est proposée sur ce cas de référence. Une version qualitative est d'abord présentée, donnant les résultats étudiés de manière statistique. Elle est suivie d'une étude quantitative, proposant un modèle décrivant le comportement du contreplaqué en compression hors plan suivant la température et la vitesse de déformation pour chaque paramètre du modèle. Les essais sont faits à des températures de $\{-170^{\circ}C ; -90^{\circ}C ; -50^{\circ}C ; -10^{\circ}C ; 23^{\circ}C\}$ et pour des vitesses de déformation de $\{0,0004/s ; 0,004/s ; 0,04/s ; 0,4/s ; 700/s\}$. La partie suivante est extraite de l'article intitulé « High strain rate out-of-plane compression of birch plywood from ambient to cryogenic temperatures », actuellement en révision en octobre 2017 au journal Strain (STRAIN-1294).

2.3.1 Strain rate sensitivity at ambient temperature

Figure 5 and Figure 6 show that at ambient temperature, the strain rate sensitivity of the out-of-plane compression stress of the birch plywood is huge. At a strain value of 3%, the interpolated stress value is 11.8MPa at 0.004/ s and as high as 20.8 MPa at 700/s, which corresponds to a stress increase by a factor of $20.8/11.8 \approx 1.76$ for a strain rate multiplied by $1.75 \cdot 10^3$. This stress ratio S_r is higher than the one we can

calculate from the study published by Widehammar [WID(2004)] in the case of the compression of an oven dried clear spruce wood in the radial direction, i.e. $S_r^{Widehammar} \approx 1.5$ for a strain rate multiplied by $1.25 \cdot 10^3$. However, our stress ratio is close to the ones obtained by Eisenacher [EIS(2013)] in the case of the laterally confined compression of a 12% moisture content clear spruce wood in the direction perpendicular to the fibres $S^{Eisenacher} \approx 1.7$ for a strain rate multiplied by $1.50 \cdot 10^3$. Eisenacher attributes this high stress ratio value to the lateral confinement he applied on the direction perpendicular to the fibres, leading to zero lateral strain in the radial or transverse directions, depending on the initial orientation. In our case, the out-of-plane compression of the plywood leads to a uniaxial straining of the specimen, with no lateral strain up to a compressive strain of 0.5. This lateral confinement is obtained by the fact that (i.) two adjacent glued veneers have perpendicular fibre directions and (ii.) the veneer thickness to lateral dimensions ratio is about 0.05, and (iii.) that the Young's modulus in the fibre direction is about 20 times the one in the lateral direction [USDA(2010)].

2.3.2 Effect of temperature at the quasi-static strain rate

Figure 5 shows that for the quasi-static strain rate, the effect of cryogenic temperature is as high as predicted by Boller [BOL(1953)]. At a strain value of 3%, the interpolated stress value is 11.8 MPa at ambient temperature and 26 MPa at -170°C , which corresponds to a stress increase by a factor $26/11.8 \approx 2.2$.

2.3.3 Strain rate sensitivity at cryogenic temperature

If one focuses on the results presented in Figure 5 at a cryogenic temperature of -170°C , it is clear that the stress strain curves obtained at the strain rate of 0.004/s and 700/s are not significantly different, and it can be concluded that the strain rate effect no longer exists at this cryogenic temperature. This result is confirmed by the cryogenic tests performed at $4.10^{-2}/\text{s}$ and $4.10^{-1}/\text{s}$.

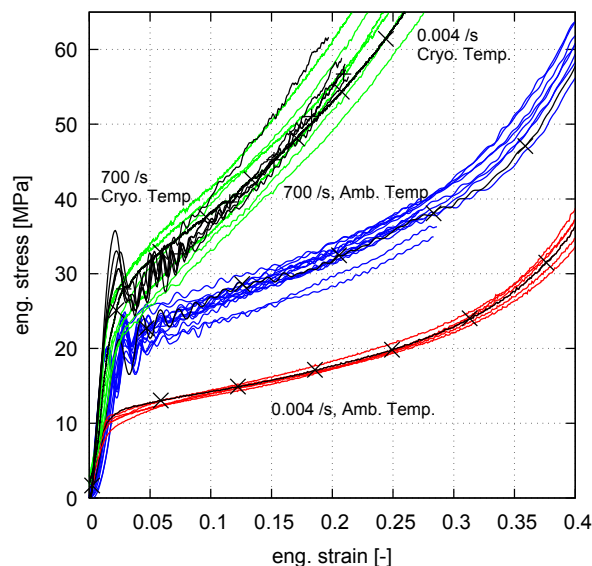


Figure 5 – True stress versus true strain response during out-of-plane compression of a 8% moisture content 12mm thick birch plywood specimen for the two different strain rates (0.004/s, 700/s) and the two temperatures ($+23^\circ\text{C}$, -170°C). The most representative curves are highlighted in black.

2.4 Stress strain curve model

In order to quantify the evolution of the behaviour as a function of temperature and strain rate, an interpolation of the stress-strain curves has been conducted. Due to the significant increase in stress at subfreezing temperatures, it has not been possible to lead all the experiments to the densification regime at the lowest temperatures or at highest strain rates. Thus, the interpolation has been conducted in two steps. (i.) A linear interpolation of the behaviour is performed for all the tests, and (ii.) an exponential interpolation of the densification regime is identified for each test performed up to densification, see Figure 7. The linear model reads:

$$\sigma = \sigma_{int}^h + \sigma_{mod}^h \cdot \varepsilon \quad (2-1)$$

with σ_{int}^h the stress hardening intercept and σ_{mod}^h the hardening modulus of the linear interpolation.

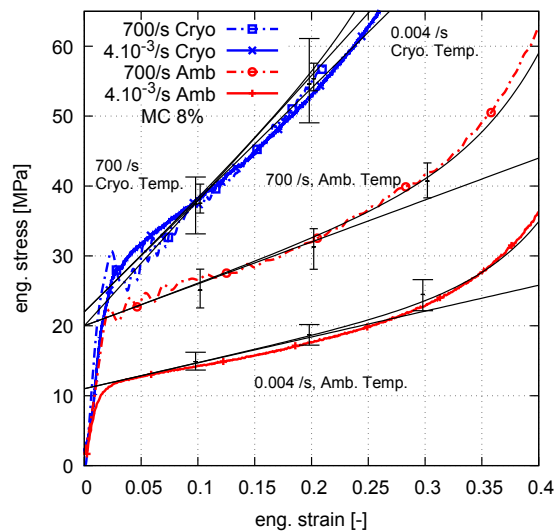


Figure 6 – True stress versus true strain response during out-of-plane compression of a 8% moisture content 12mm thick birch plywood specimen for the two different strain rates (0.004/s, 700/s) and the two temperatures (+23°C, -170°C). The most representative curves are plotted along with a linear interpolation of the plateau behaviour. The error bars represent the minimum and maximum stress of all of the data obtained on each condition.

In order to confine the linear interpolation to the pre-densification part of the hardening regime, a limited strain interval ([0.04 ; 0.2]) was considered for each test. The lower limit corresponds to the minimum value at which equilibrium was obtained during SHPB experiments. Different values of the upper limit have been tested from 10% up to 25%, and no significant evolution of the identified parameters was found up to a value of 22%. We used an upper limit value of 20% in strain excepted for one test at high strain rate (700/s) and cryogenic temperature (-170°C) condition for which the interpolation was performed using an upper limit of 19.5%, its final strain. The minimum value of the square of the sample correlation coefficient among all the tested conditions is 0.95. Four interpolated behaviours are shown Figure 6 along with each representative curve and error bars.

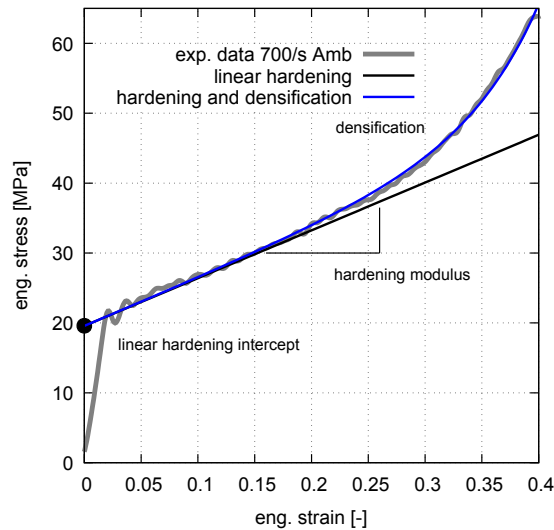


Figure 7 – True stress versus true strain experimental response and interpolation during out-of-plane compression of a 8% moisture content 12mm thick birch plywood specimen.

The tests performed at a strain rate of 0.004/s and all the tests performed at ambient temperature represent eight experimental conditions Tableau 2. For each of these tests, if the final strain is greater than 0.3; an exponential interpolation (2-2) of the densification regime has been performed between 4% and final strain at maximum stress; and the densification strain has been identified. The proposed exponential interpolation of the experimental stress versus engineering strain curve reads:

$$\sigma = \sigma_{int.}^h + (\sigma_{mod}^h - \sigma_{mod}^d \cdot n_{exp}^d) \cdot \varepsilon + \sigma_{mod}^d \cdot (e^{n_{exp}^d \cdot \varepsilon} - 1) \quad (2-2)$$

where σ_{mod}^d is the densification modulus and n_{exp}^d the densification exponent.

With this definition, σ_{mod}^h is the initial hardening modulus value at zero strain. From a practical point of view, among all our identifications, the $\frac{\sigma_{mod}^h}{\sigma_{mod}^d \cdot n_{exp}^d}$ ratio was found to be greater than 100, and the influence of the $\sigma_{mod}^d \cdot n_{exp}^d$ term could be neglected in equation (2-2). In the following, the hardening modulus refers to the σ_{mod}^h value. The densification strain ε_{dens} [AVA(2001)], [TAN(2005)] was initially defined for foams and recently used in the case of wood impact by Wouts et al. [WOU(2016)].

Strain rate (/s)	0.0004	0.004	0.04	0.4	700
Temp. (°C)	+23.	+23.	+23.	+23.	+23.
	-	-	-	-	-10.
	-	-55.	-	-	-50.
	-	-90.	-	-	-90.
	-170.	-170.	-170.	-170.	-170.

Tableau 2 – List of the tested experimental conditions for out-of-plane compression of 12mm thick and 8% moisture content birch plywood.

The densification strain is defined as the strain at which the maximum value of the energy absorbing efficiency $\eta(\varepsilon_\alpha)$ is reached, (2-3), where ε_0 is the starting point of the linear hardening behaviour ; we used a constant value $\varepsilon_0 = 0.04$. This value is the third coefficient that can be gathered from these eight experimental conditions.

$$\eta(\varepsilon_a) = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_a} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon_a)} \quad \text{and} \quad \left. \frac{d\eta(\varepsilon_a)}{d\varepsilon_a} \right|_{\varepsilon_a = \varepsilon_{dens}} = 0 \quad (2-3)$$

2.4.1 Effect of temperature and strain rate on the linear hardening parameters

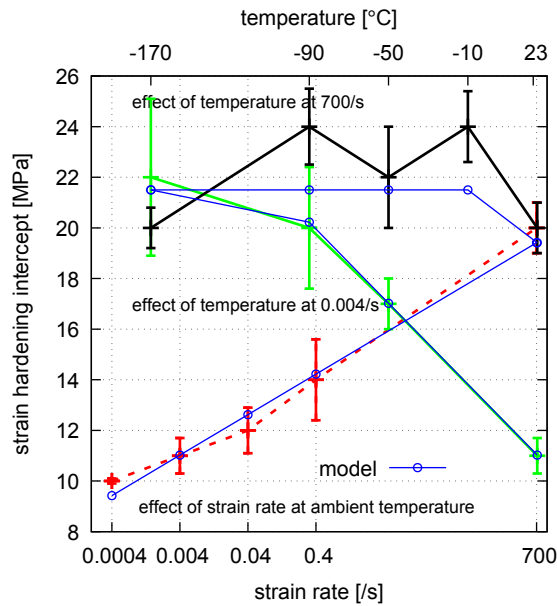


Figure 8 – Hardening intercept coefficient σ_{int}^h evolution as a function of temperature (solid lines) and strain rate (dashed), the model prediction is shown in blue. Errorbars correspond to one standard deviation.

Figure 8 and Figure 9 show the evolution with temperature and strain rate (strain rate are in logscale) of the two linear interpolation parameters σ_{int}^h and σ_{mod}^h . stress versus strain hardening regime. Figure 8 shows the evolution of the stress hardening intercept; the tick space represents a jump of 2MPa in stress. For the sake of simplicity, the vertical scale of the Figure 9 plot is formatted in order to be able to compare the respective influence of the coefficients on the evolution of the stress: tick space of vertical axis corresponds to a jump of 2MPa of the stress plateau for a 0.1 strain increase.

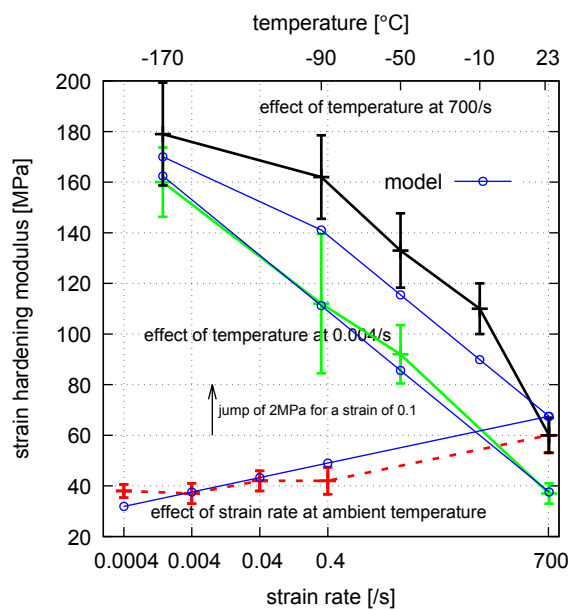


Figure 9 – Hardening modulus coefficient σ_{mod}^h evolution as a function of temperature (solid lines) and strain rate (dashed), the model prediction is shown in blue. Errorbars correspond to one standard deviation.

Let recall that at cryogenic temperature of -170°C , there is no significant evolution of the two parameters with strain rate.

At ambient temperature, dashed lines Figure 8 and Figure 9, the evolution of the hardening modulus is significant, but small compared to the evolution of the stress hardening intercept coefficient with strain rate.

At the quasi-static strain rate of $0.004/\text{s}$, green curves Figure 8 and Figure 9, the stress hardening intercept coefficient and the hardening modulus coefficient are very sensitive to the temperature decrease, with a same order of influence on the stress value for a 0.1 strain. But, the evolution of the stress hardening intercept coefficient seems negligible for a temperature below -90°C . On the contrary, there is no saturation value for the slope coefficient in the considered temperature range.

At the high strain rate of $700/\text{s}$, the evolution of the intercept coefficient seems negligible for a temperature below -10°C . Similarly, the evolution of the slope coefficient seems negligible for a temperature below -100°C . The hardening intercept and hardening modulus evolutions with temperature and logarithmic strain rate can be also represented using a 3D plot given in Figure 10 (left) and Figure 11 (left) respectively. In these 3D plots, the saturation at highest strain rates and lowest temperatures is revealed, as well as the bilinear evolution of each coefficient as a function of logarithmic strain rate $[\text{s}^{-1}]$ and temperature $[\text{K}]$. The evolution of each coefficient C can be modelled using the following bilinear equation:

$$C = \min[C_{SR}^C \cdot \log_{10}(\dot{\epsilon}) + C_T^C \cdot T + C_C^C, C_{max}^C] \quad (2-4)$$

where C_{SR}^C, C_T^C, C_C^C are three constants involved in the bilinear evolution, and C_{max}^C the saturated value of the considered coefficient, $\dot{\epsilon}$ the strain rate $[\text{s}^{-1}]$ and T the temperature $[\text{K}]$. The constants are identified using least square method and given Tableau 3 along with the number of experimental conditions N_{cond} involved in the identification. In the 3D plots, Figure 10 (left) and Figure 11, each isovalue corresponds to a specific value of the strain-rate-and-temperature-equivalent-value, or time and temperature equivalent value $TTE = C_{SR} \cdot \log_{10}(\dot{\epsilon}) + C_T \cdot T$. Thus, to superimpose the stress strain curve at a temperature T onto the curve at a reference temperature T_{ref} and strain rate $\dot{\epsilon}_{ref}$, the strain rate has to be scaled by a factor $a_{(T, T_{ref})}$ and reads $\log_{10}(a_{(T, T_{ref})}) = \frac{-C_T(T - T_{ref})}{C_{SR}}$ using the standard WLF formulation [WOL(2007)] and [ZHA(2007)].

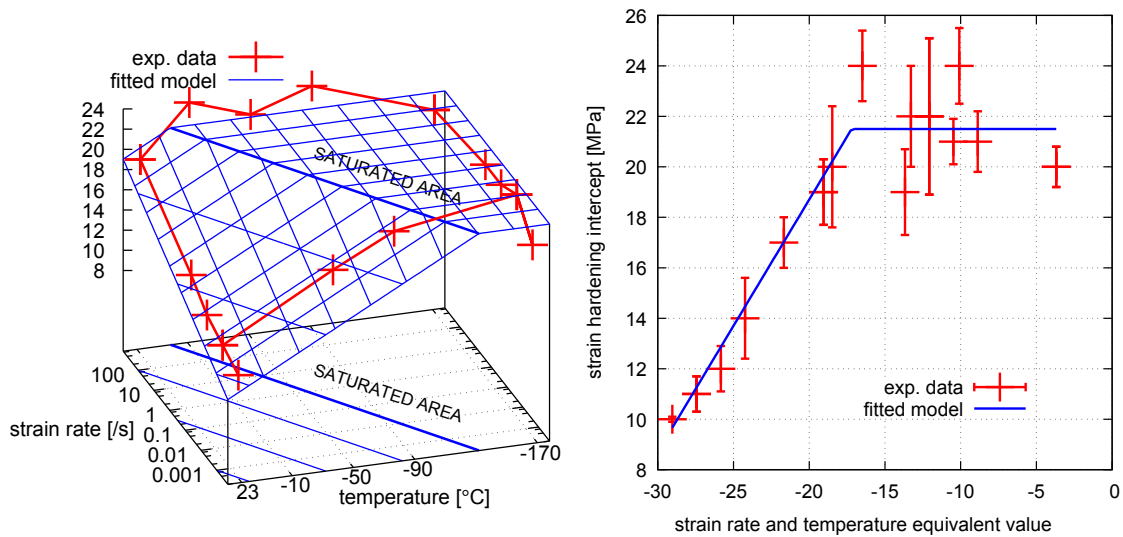


Figure 10 – Left, 3D view of the hardening intercept σ_{int}^h evolution as a function of temperature and strain rate. Iso-values lines at specific σ_{int}^h value of 9.5, 13.5, 17.5 and 21.5 MPa are plotted on base and surface. Right, evolution of the hardening intercept coefficient as a function of strain-rate-and-temperature- equivalent-value $TTE = C_{SR} \cdot \log_{10}(\dot{\epsilon}) + C_T \cdot T$. Errorbars correspond to one standard deviation of the coefficient.

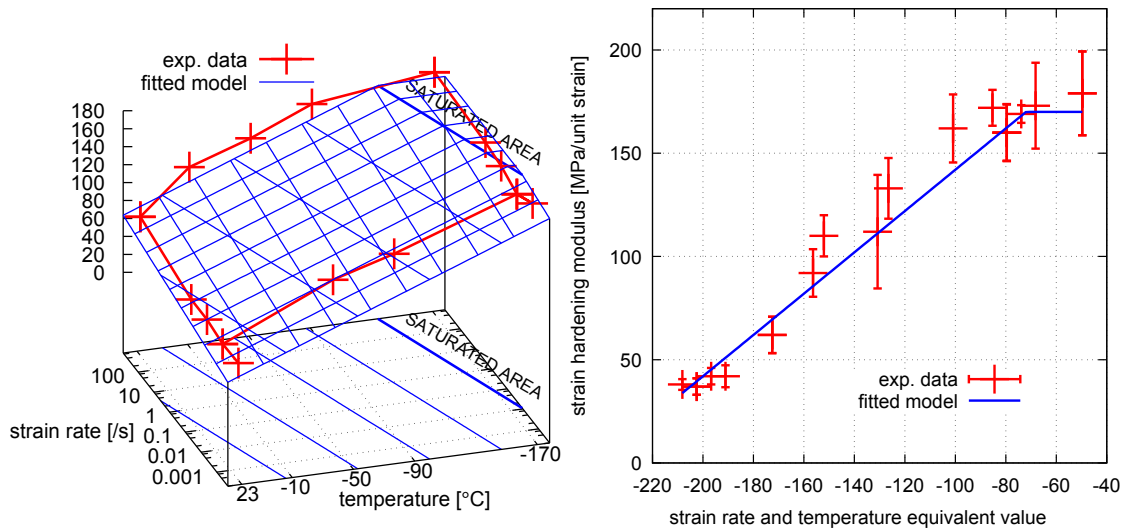


Figure 11 – Left, 3D view of hardening modulus coefficient σ_{mod}^h evolution as a function of temperature and strain rate. Iso-values lines at specific σ_{mod}^h value of 50., 80., 110., 140. and 170 MPa are plotted on base and surface. Right, evolution of the hardening modulus coefficient as a function of strain-rate-and- temperature-equivalent-value $TTE = C_{SR} \cdot \log_{10}(\dot{\epsilon}) + C_T \cdot T$. Errorbars correspond to one standard deviation of the coefficient.

Figure 10 (right) and Figure 11 (right), the evolution of the hardening intercept and hardening modulus as function of their respective strain-rate-and-temperature-equivalent TTE values are given. For each experimental condition defined by its temperature and strain rate, the mean values of the identified coefficient σ_{int}^h and σ_{mod}^h are plotted in red along with their corresponding one standard deviation errorbar calculated among a minimum of five repetitions. The identified bilinear model (results presented Tableau 3) is plotted in blue solid line and a good agreement between the bilinear interpolation and experimental data is obtained. In the case of the hardening intercept coefficient, the difference between model and experimental data is lower than one standard deviation in the bilinear regime. In the case of the hardening modulus, the agreement of the bilinear model is lower. The maximum error reaches a value between one and

two times the standard deviation for four experimental conditions, these are for the highest strain rate of 700/s and temperature of -10°C , -50°C and -90°C , and at the lowest strain rate of 0.0004/s and temperature of -170°C . The orientation of the steepest descent direction of the bilinear model is normal to isovalues, which orientation is given by the slope of the isovalues in the strain rate and temperature plane, and reads $-C_T^C / C_{SR}^C$. This ratio value is 0.050 in the case of the hardening intercept but 0.11 in the case of the hardening modulus coefficient. As far as the identified bilinear model can be considered valid, this difference seems to show that the hardening intercept, which can be considered as an elastic limit, and the hardening modulus cannot be modelled using a unique time and temperature equivalent function.

Coefficient	C_{SR}	C_T	C_c	C_{max}	N_{cond}
$\sigma_{int.}^h$ [MPa]	1.6	-0.080	38.7	21.5	15
$\sigma_{mod.}^h$ [MPa]	5.7	-0.64	242.	170.	15
$\sigma_{mod.}^d$ [MPa]	0.0035	-0.00032	0.11	-	8
$n_{exp.}^d$ [-]	-0.39	0.012	14.43	-	8

Tableau 3 – Identified constants of the bilinear models (2-4) for each behaviour coefficients (2-2)

2.4.2 Effect of temperature and strain rate on the densification parameters

Following the procedure used in the previous section, the experimental values of the densification modulus $\sigma_{mod.}^d$ are plotted Figure 12 as a function of strain rate and temperature ; Figure 13 as a function of strain-rate-and-temperature-equivalent value. For this coefficient, the bilinear interpolation leads to an error between one and two standard deviation for three of the eight experimental conditions Figure 12 and Figure 13, but the linear tendency is confirmed by the linear regression coefficient value $r^2 = 0.94$ of the densification modulus versus strain-rate-and-temperature-equivalent-value interpolation. In the case of densification modulus, the slope of the isovalues in the strain rate and temperature plane $-C_T^C / C_{SR}^C$ is 0.091, a value close to the one obtained for the hardening modulus. This suggests that these two parameters could be modelled using a unique time and temperature equivalent function.

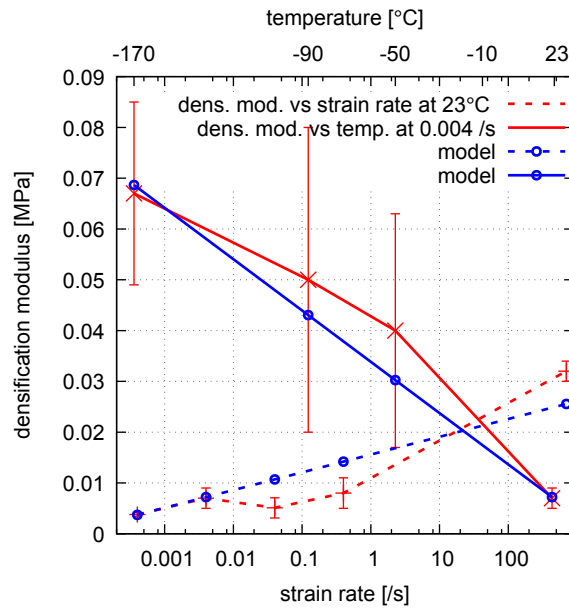


Figure 12 – Temperature (solid lines) and strain rate (dashed) evolution of the densification modulus σ_{mod}^d . Errorbars correspond to one standard deviation.

The evolution of the densification exponent coefficient value n_{exp}^d is plotted as a function of temperature and strain rate Figure 14; and as a function of strain-rate-and-temperature-equivalent value Figure 15. The bilinear interpolation leads to an error value lower than one standard deviation Figure 14 and Figure 15, but the linear tendency of the densification exponent versus strain-rate-and-temperature-equivalent-value is poor with a regression coefficient value of only $r^2 = 0.65$. The densification strain (2-3) has been identified for eight experimental conditions. The identification requires to choose a starting strain, commonly defined as the beginning of the so-called plateau behaviour of foams materials, and in the range [2%, 4%] in the case of plywood. But this point is not known at high strain rates, as equilibrium is only obtained for strains greater than 4% within the SHPB experiments performed. Moreover, using a starting point value of 2% or 6% leads to a difference in densification strain of only 0.005 for the four extreme conditions referenced Tableau 2. We thus chose a constant starting strain value $\varepsilon_0 = 0.04$.

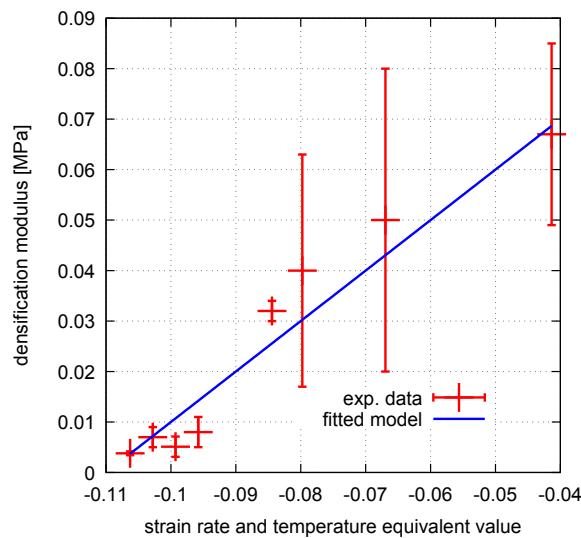


Figure 13 – Evolution of densification modulus σ_{mod}^d as a function of strain-rate-and-temperature-equivalent-value $TTE = C_{SR} \cdot \log_{10}(\dot{\varepsilon}) + C_T \cdot T$. Errorbars correspond to one standard deviation of the coefficient.

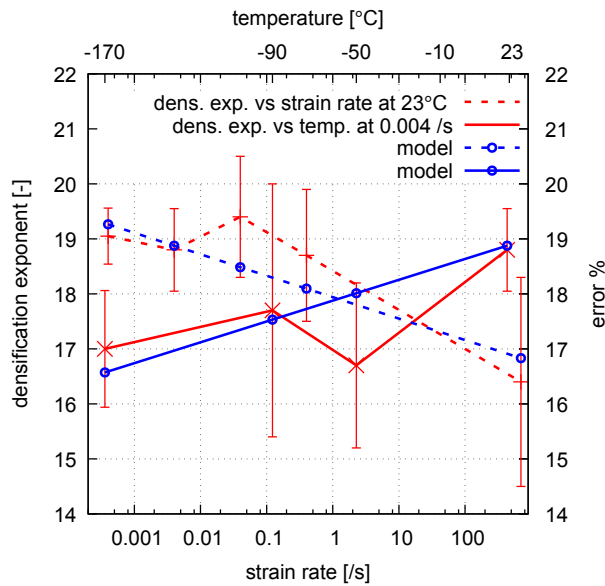


Figure 14 – Temperature (solid lines) and strain rate (dashed) evolution of the densification exponent n_{exp}^d . Errorbars correspond to one standard deviation.

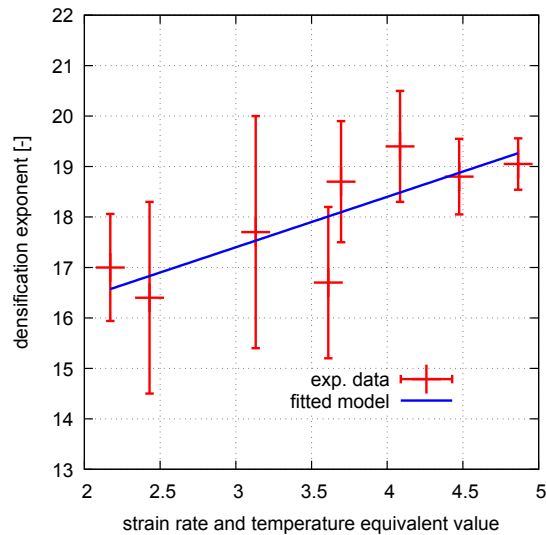


Figure 15 – Evolution of densification exponent n_{exp}^d as a function of strain- rate-and-temperature-equivalent-value $TTE = C_{SR} \cdot \log_{10}(\dot{\epsilon}) + C_T \cdot T$. Errorbars correspond to one standard deviation of the coefficient.

The evolution of the densification strain ϵ_{dens} if plotted as a function of temperature and strain rate Figure 16 Whatever the experimental conditions, the densification strain value remains in the range [0.365, 0.381]. The evolution of the densification strain with temperature seems negligible, and only significant for a jump in strain rate by 10^5 with jump in densification strain value about two times the standard deviation. The mean value of the densification strain over all the tested conditions is $\overline{\epsilon_{dens}} = 0.37[-]$.

2.5 Summary of the identified behaviour

The behaviour equation (2-2), and the coefficient equation (2-4) led us to identify 14 constants given Tableau 3. This behaviour can be used to estimate the stress versus strain curve and the densification strain at any temperature in the range $[-170^{\circ}\text{C} ; 25^{\circ}\text{C}]$ and strain rate in the range $[0.0004/\text{s} ; 700/\text{s}]$. Representative stress strain curves from the experiments (black solid lines) are shown together with the corresponding results of the interpolation (thin black lines) for six experimental conditions in Figure 17. The

ambient temperature tests are plotted in red for three different strain rates, and sub-zero tests are plotted in blue. The relative error in stress between interpolated behaviour and mean experimental values are lower than 7% for strains up to 30%. This relative error can be as high as 15% after densification for a strain of 40%. At a stress level of 100 MPa, the error in strain is lower than 7%.

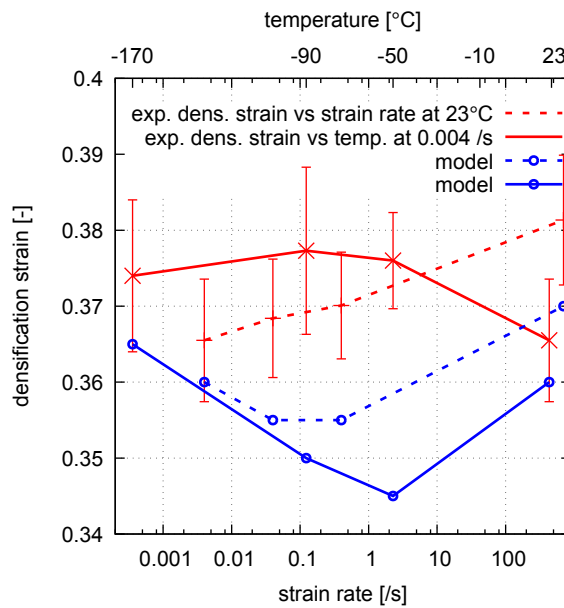


Figure 16 - Temperature (solid lines) and strain rate (dashed) evolution of the densification strain ϵ_d . Errorbars represent one standard deviation of the value at the considered testing condition.

The experimental densification strains are plotted in red circles, and the one calculated from the interpolated behaviour are plotted with black circles Figure 17 and blue solid lines Figure 16. The maximum relative error is 8%. From an application point-of-view, at ambient temperature, the behaviour is strain rate sensitive, the stress jumps by a factor of 2. at 4% strain to 2.2 at 30% strain for a strain rate jump by a factor of 10^5 . In this case the absorbed energy at 30% strain is twice the quasi static one.

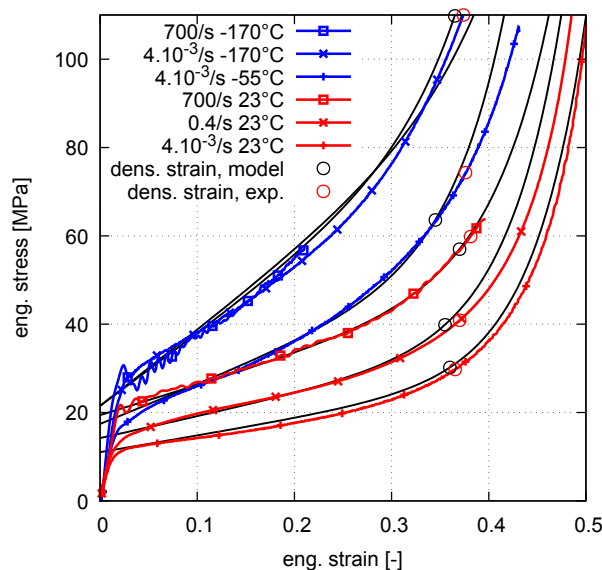


Figure 17 - Experimental and interpolated (thin black lines) stress strain curves at various strain rates and temperatures. Experimental densification strains are plotted with red circles, the calculated ones are plotted with black circles.

The behaviour is also highly temperature sensitive, and a drop of -80°C from ambient temperature leads to a stress increase by 1.6 to 2.1 for strains of 4% and 30% respectively. At -170°C , the stress increase is saturated, whatever the strain rate, with jumps of 2. and 3.3. At cryogenic temperature, the absorbed energy at 30% strain is about 2.6 time the one at ambient temperature and quasi-static strain rate.

2.6 Conclusions

The out-of-plane compression behaviour of 8% moisture content birch plywood under various experimental conditions has been studied. A large range of temperatures, from room temperature down to a cryogenic temperature of -170°C have been explored. Quasi-static tests have been performed using a universal machine. We developed and validated a Split Hopkinson Pressure Bar procedure for high strain rate experiments at ambient and cryogenic temperatures. In this latter case, the specimen is cooled down together with two 40 mm long extensions made of the same material as the bars. Practical consideration of the SHPB test led us to a 28mm diameter and 12mm thick specimen. These dimensions were validated from a comparison to the one obtained using the EN789 standard. The analysis of the compression tests focused on the hardening behaviour of the stress versus strain curve during linear hardening and the following densification regime. The behaviour was fitted using a linear and a an exponential function of the strain, thanks to four coefficients, namely the stress hardening intercept, the hardening modulus, the densification modulus and the densification exponent. The evolution with temperature and strain rate of each coefficient has been studied and modelled using a bilinear function of the logarithmic strain rate and the temperature. A total of 14 constants have been identified. The following conclusions may be drawn from the experimental results:

- The compression stress increases significantly with decreasing temperature and increasing strain rate, but at the cryogenic temperature of -170°C , the strain rate sensitivity is negligible;
- At room temperature (resp. at a quasi-static strain rate of 0.004/s), the strain rate (resp. temperature) dependency of the hardening intercept, the hardening modulus and the densification modulus of the stress strain curve are significant. A saturation of the hardening intercept coefficient is observed for temperatures below -90°C and -10°C for strain rates of 0.004/s and 700/s respectively. The same phenomenon is observed for the hardening modulus coefficient below -100°C at a strain rate of 700/s;
- The densification strain is found to be slightly strain rate sensitive, its value is 0.365 at a strain rate of 0.0004/s and 0.38 at a strain rate of 700/s. The evolution with temperature seems to be not significant. The mean value is found to be 0.37;

Using the proposed interpolated model, the compression stress of the plywood can be interpolated at any temperature in the range $[-170^{\circ}\text{C} ; 25^{\circ}\text{C}]$ and strain rate in the range $[0.0004/\text{s} ; 700/\text{s}]$. When compared to experimental data, the maximal error is about 7% up to a strain of 30%. The densification strain can be also predicted with a maximum error of 8%.

3 Compression hors plan du contreplaqué, effet de l'humidité dans le contreplaqué, aux valeurs limites de température et vitesse de déformation

3.1 Présentation des résultats

Pour connaître l'effet de l'humidité dans le contreplaqué, les échantillons ont été conditionnés comme présenté Chapitre II. La comparaison sera faite pour les humidités de 2%, 4%, 8% et 15% d'humidité dans les échantillons. Pour rappel, les échantillons à plus de 30% d'humidité présentant de la moisissure, ils ne seront pas pris en cas d'étude. Les campagnes d'essai sont faites suivant le plan d'expérience rappelée chapitre III. La Figure 18 présente les résultats obtenus pour des échantillons aux quatre humidités, testés à 0.004/s, 700/s et 25°C et -170°C. Chaque courbe est une courbe représentative d'un type d'essai et est d'une couleur spécifique à son humidité, quelle que soit le graphique observé sur la figure. Un premier constat est que l'humidité dans le contreplaqué influence son comportement quelles que soient les conditions de température ou de vitesse de déformation. Des barres d'erreur sont tracées à 10%, 20% et 30% lorsque ces niveaux de déformation sont atteints, révélant la valeur moyenne, qui peut différer de la valeur de la courbe représentative, et les valeurs maximum et minimum de chaque répétabilité.

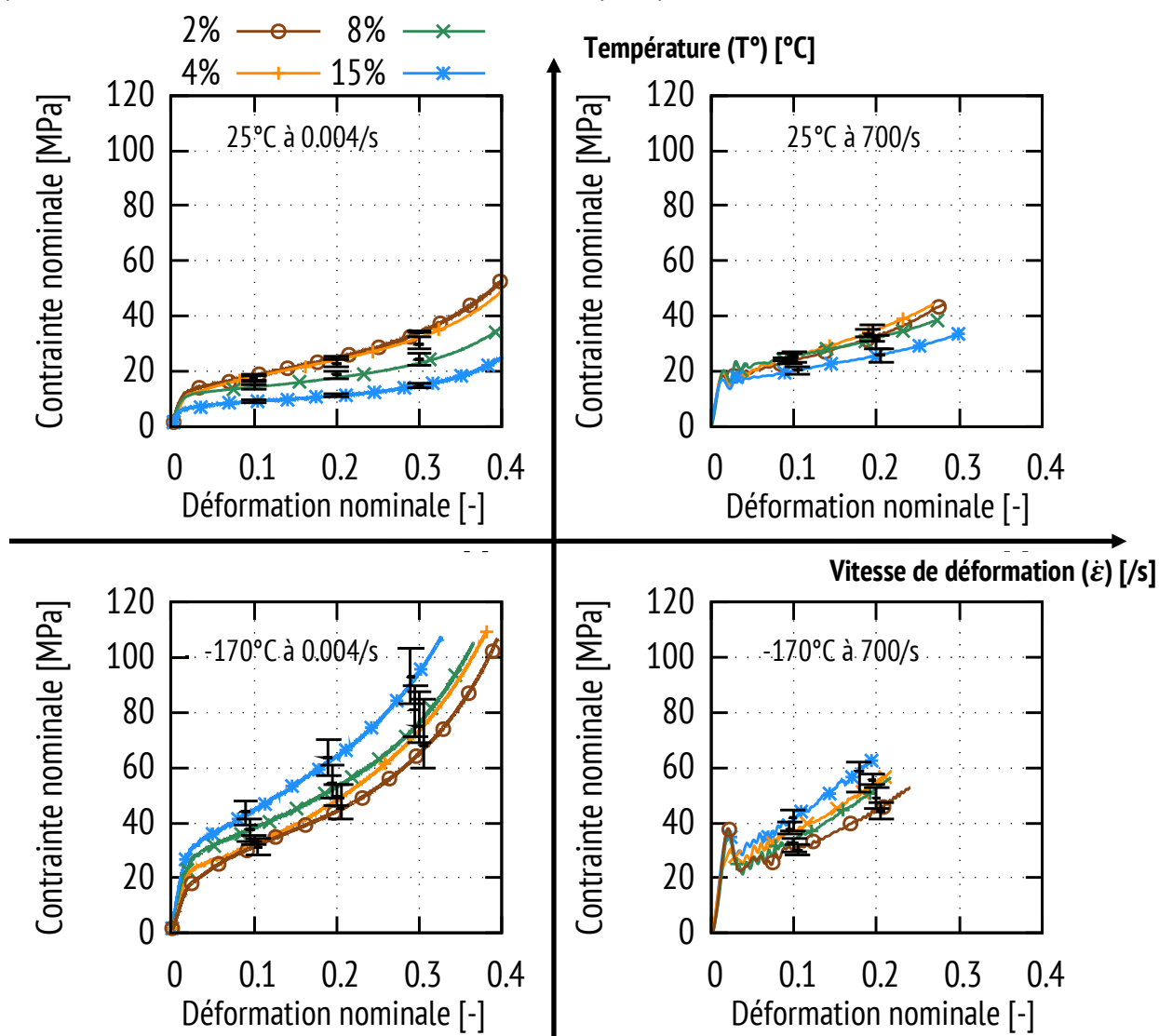


Figure 18 – Effet de l'humidité dans le contreplaqué en compression hors plan

À température ambiante et vitesse quasi-statique (en haut et à gauche Figure 18) l'effet adoucissant de l'humidité, au delà d'un taux de 4% est clairement visible et correspond bien aux données bibliographiques. À température cryogénique et vitesse quasi-statique (en bas et à gauche Figure 18), cet effet de l'humidité s'inverse et devient très nettement rigidifiant. Cet effet se conserve à grande vitesse de déformation (en bas et à droite Figure 18).

A température ambiante et vitesse rapide (en haut et à droite Figure 18), l'effet de l'humidité est très faible jusqu'à un taux de 8% d'humidité.

La position relative des courbes et la taille des barres d'erreur indiquent que l'effet de l'humidité dans le contreplaqué est significatif, mais n'a pas le même poids suivant les conditions climatiques d'essai.

A température ambiante (indexé Amb), et à $4.10^{-3}/s$ (indexé QS), jusqu'à 8% d'humidité, la contrainte à 3%, notée $\sigma_{3\%}$ est pratiquement constante et vaut 12 MPa. A 15% d'humidité, $\sigma_{3\%}$ chute à 7 MPa, de même à 700/s (indexé Dyn). Le rapport des contraintes $S_{r,var(cond)}$ (avec $var(cond)$ le paramètre variant en fonction d'une certaine condition d'essai fixe) pour ces deux vitesses, calculé $S_{r,\dot{\epsilon}(Amb)} = \frac{\sigma_{3\%,Dyn,Amb}}{\sigma_{3\%,QS,Amb}}$ quelque soit l'humidité dans le contreplaqué, est représenté Figure 19, courbe bleue. La courbe rouge présente le même rapport à une température de $-170^{\circ}C$ (indexée Cryo) tel que $S_{r,\dot{\epsilon}(Cryo)} = \frac{\sigma_{3\%,Dyn,Cryo}}{\sigma_{3\%,QS,Cryo}}$ et les courbes orange et violette présentent ces rapports pour une même vitesse de déformation, respectivement $S_{r,T^{\circ}(Dyn)} = \frac{\sigma_{3\%,Dyn,Cryo}}{\sigma_{3\%,Dyn,Amb}}$ et $S_{r,T^{\circ}(QS)} = \frac{\sigma_{3\%,QS,Cryo}}{\sigma_{3\%,QS,Amb}}$. Il est constaté que le rapport $S_{r,\dot{\epsilon}(T^{\circ})} = \frac{S_{r,\dot{\epsilon}(Cryo)}}{S_{r,\dot{\epsilon}(Amb)}} = \frac{S_{r,T^{\circ}(Dyn)}}{S_{r,T^{\circ}(Cryo)}}$ évolue de manière linéaire, comme le montre la courbe verte du graphique Figure 19. Cette évolution n'est plus vérifiée au delà de 3% de déformation nominale et un modèle linéaire ne suffit plus à décrire cette évolution.

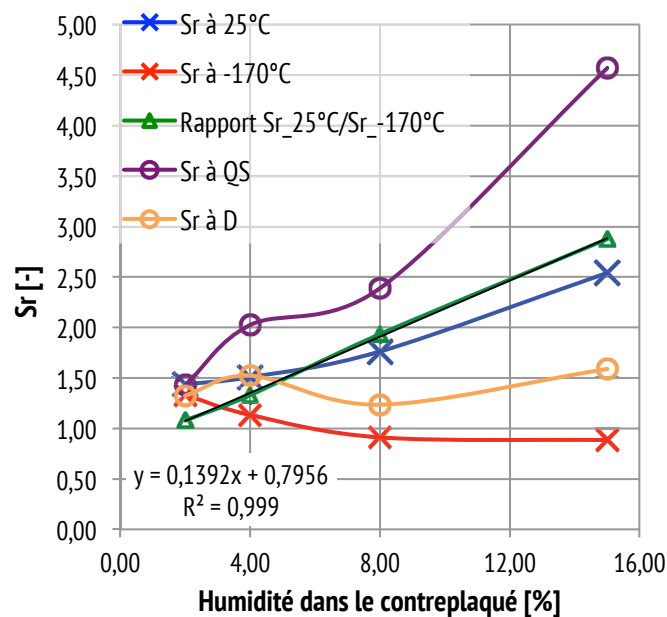


Figure 19 – Effet de l'humidité sur le rapport de contrainte pour un saut de vitesse de 5 décades

3.2 Evaluation du comportement en fonction de l'humidité dans le contreplaqué

Pour chaque répétabilité exposée Figure 18, les quatre paramètres évoqués section 2.1 sont évalués et présentés Tableau 4. Il est séparé en quatre sous-tableaux, correspondant aux quatre graphiques de la Figure 18. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes de chaque répétabilité, l'écart-type des valeurs est donné entre crochet. Les graphiques Figure 21 présentent ces valeurs, complétées des barres d'erreur à +/- un écart-type. La valeur de contrainte à 20% est aussi présentée comme point de comparaison sur les Figure 22 et Figure 23, en fonction de la vitesse de déformation ou de la température.

	↑ T° [°C]				→ ε̇ [1/s]			
	E [MPa]	σ_{int}^h [MPa]	σ_{mod}^h [MPa]	ϵ_D [%]	E [MPa]	σ_{int}^h [MPa]	σ_{mod}^h [MPa]	ϵ_D [%]
2%	759 [94]	11 [1,6]	66 [5,7]	38 [0,1]	/	15 [0,6]	89 [3,4]	/
4%	576 [56]	11 [1,3]	57 [8,9]	39 [0,1]	/	15 [1,1]	93 [4,1]	/
8%	822 [73]	11 [0,7]	37 [4,0]	37 [0,1]	/	19 [1,3]	62 [8,8]	38 [0,1]
15%	610 [163]	7 [0,3]	22 [1,8]	35 [0,1]	/	15 [0,3]	55 [8,7]	/
2%	844 [80]	17 [0,3]	140 [19,8]	37 [0,1]	/	18 [1,3]	123 [14,1]	/
4%	1065 [120]	18 [2,5]	134 [21,0]	38 [0,2]	/	18 [1,6]	149 [19,0]	/
8%	1252 [282]	22 [3,1]	160 [13,8]	37 [0,1]	/	20 [0,8]	179 [20,3]	/
15%	1821 [167]	26 [2,7]	187 [24,4]	/	/	23 [2,7]	198 [23,4]	/

Tableau 4 – Effet de l'humidité dans le contreplaqué sur le module élastique (E), la contrainte limite d'élasticité (σ_{int}^h), le module d'écroûissage (σ_{mod}^h) et la déformation de densification (ϵ_D) à des températures et des vitesses de déformations extrêmes

La contrainte limite élastique peut être assimilée à la valeur de la contrainte origine d'écroûissage. Son évolution en fonction de l'humidité ne correspond pas tout à fait aux résultats issus des travaux de Gerhards [GER(1982)] : dans ses travaux, pour une humidité passant de 15% à 8% dans le contreplaqué, la contrainte limite élastique en compression hors plan augmente de 30% à environ 25°C. Notre augmentation est de près de 60%.

La saturation que nous avons pu observer pour des humidités inférieures ou égales à 8% n'est pas signalée dans ses travaux. De plus, l'effet de la température n'a été évalué que pour des températures positives.

Nous pouvons compléter ses travaux grâce aux résultats proposés dans le Tableau 4, notamment à 8% d'humidité, à 25°C et 0.004/s. La Figure 20 reproduit le graphe proposé par Gerhards [GER(1982)] montrant l'évolution relative de la contrainte limite élastique en fonction de la température en C, en prenant en référence la contrainte limite élastique obtenue à 20°C. Des points complémentaires sont proposés sur la

courbe issue de ces travaux Figure 20, pour l'effet de la température négative à 8% d'humidité et pour une vitesse de déformation de 0.004/s.

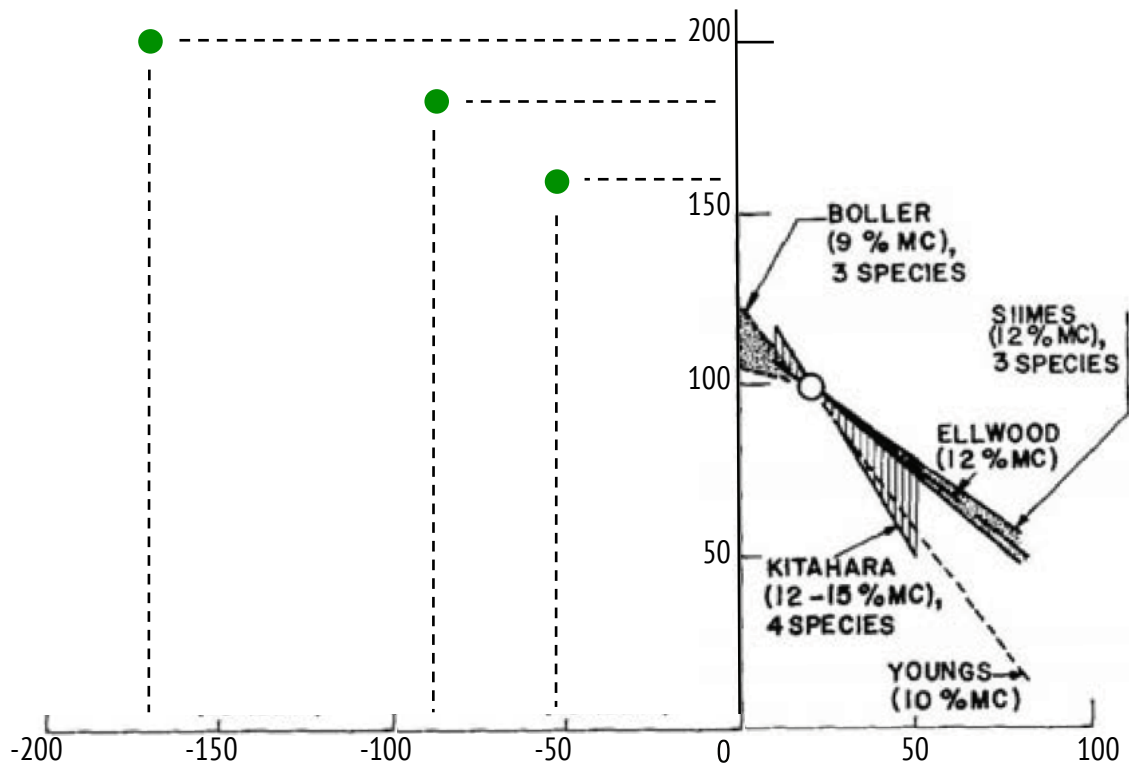


Figure 20 – Extension des résultats issus de [GER(1982)], d'après les résultats Figure 8

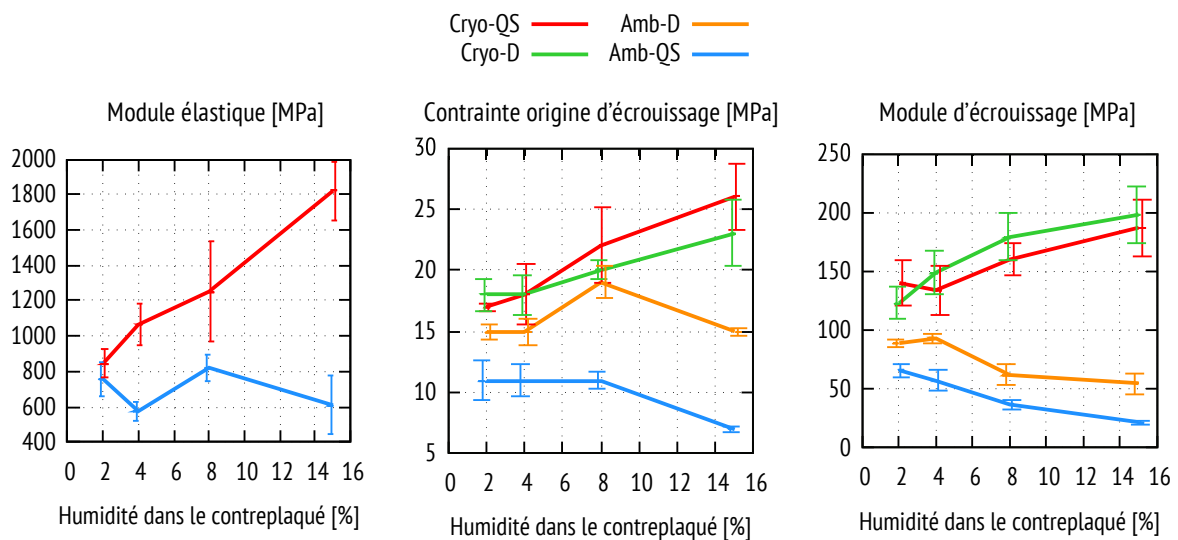


Figure 21 – Evolution du module élastique (E), de la contrainte origine d'écroutissage (σ_{int}^h) et du module d'écroutissage (σ_{mod}^h)

Les modules élastiques ne sont pas calculés pour les essais en dynamique, l'équilibre de l'échantillon n'étant atteint qu'autour de 3% de déformation, soit après la phase de comportement élastique du contreplaqué. Nous pouvons constater que pour les modules élastiques, à température ambiante, et à $4.10^{-3}/s$, une valeur constante peut être définie, quelle que soit l'humidité dans le contreplaqué, jusqu'à 15%. Les valeurs d'écart-type confirment cette tendance. Cette valeur est de 732 MPa si l'on considère la valeur moyenne pondérée du nombre d'essais. Elle correspond à des valeurs du même ordre que celles proposées dans le rapport [DNV-CN30(2006)] ou chez Paik [PAI(2010)]. On constate que la valeur de module élastique est

stable à température ambiante, mais à -170°C , elle croît linéairement en fonction de l'humidité, avec un rapport de 2,5 entre ce module moyen à température ambiante et celui à 15% d'humidité à -170°C .

L'humidité influence clairement les valeurs du module d'érouissage, à toute température d'essai et toute vitesse de déformation. Aucune saturation des valeurs n'est observée même si à -170°C l'évolution des modules plateaux est moins forte : le rapport de modules est de 1,17 à $4 \cdot 10^{-3}/\text{s}$ et 1,11 à 700/s entre 8% et 15% d'humidité en cryogénie contre 1,22 à $4 \cdot 10^{-3}/\text{s}$ et 1,13 à 700/s à température ambiante. On constate que la vitesse de déformation sature aussi les valeurs de module à l'ambiante. La contrainte origine d'érouissage n'est influencée qu'à température cryogénique ou pour des humidités importantes (cf. Tableau 4). Quand les échantillons sont testés à température ambiante, ils sont moins rigides qu'à température cryogénique : les contraintes doublent à 2% d'humidité et sont même multipliées par 6 à 15% d'humidité (cf. Figure 18 Figure 20 et Figure 22). La baisse de température semble donc avoir un effet important sur le comportement du contreplaqué en fonction de son humidité. Pourtant, avant 28% d'humidité dans le bois et les produits dérivés du bois comme le contreplaqué, l'eau présente est appelée « eau liée ». Les molécules d'eau sont liées aux groupes hydroxyle du bois. Il n'y a donc pas à proprement parlé d'eau dans le bois, mais sa viscosité est changée [NAV(2005)] et la température cryogénique influence la viscosité du bois. Pour autant, aucune rupture fragile n'a été constatée en cryogénie. Les valeurs de contrainte à 20% de déformation nominale sur le graphique Figure 22 confirment cet effet de la température.

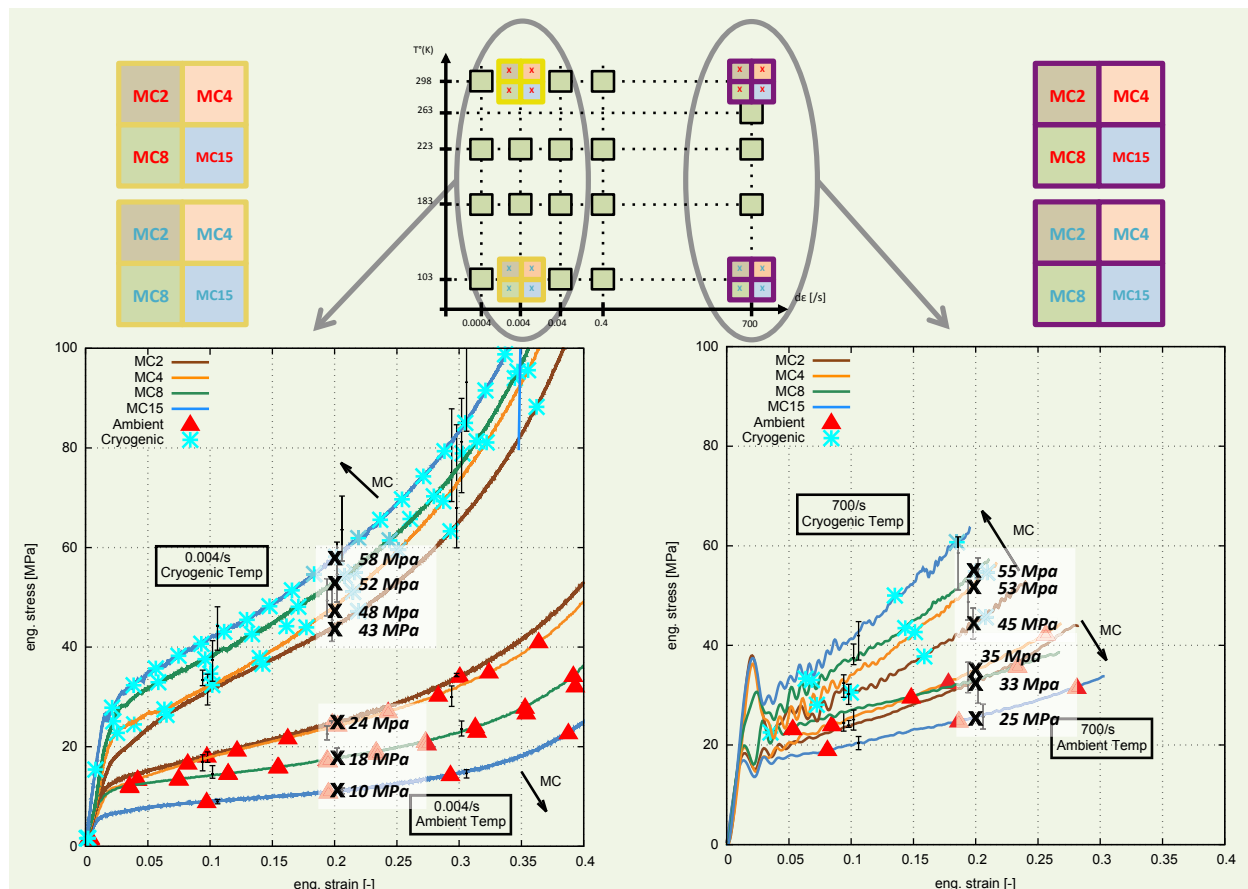


Figure 22 – Effet de la température en fonction de l'humidité dans le contreplaqué, pour deux vitesses de déformation extrêmes

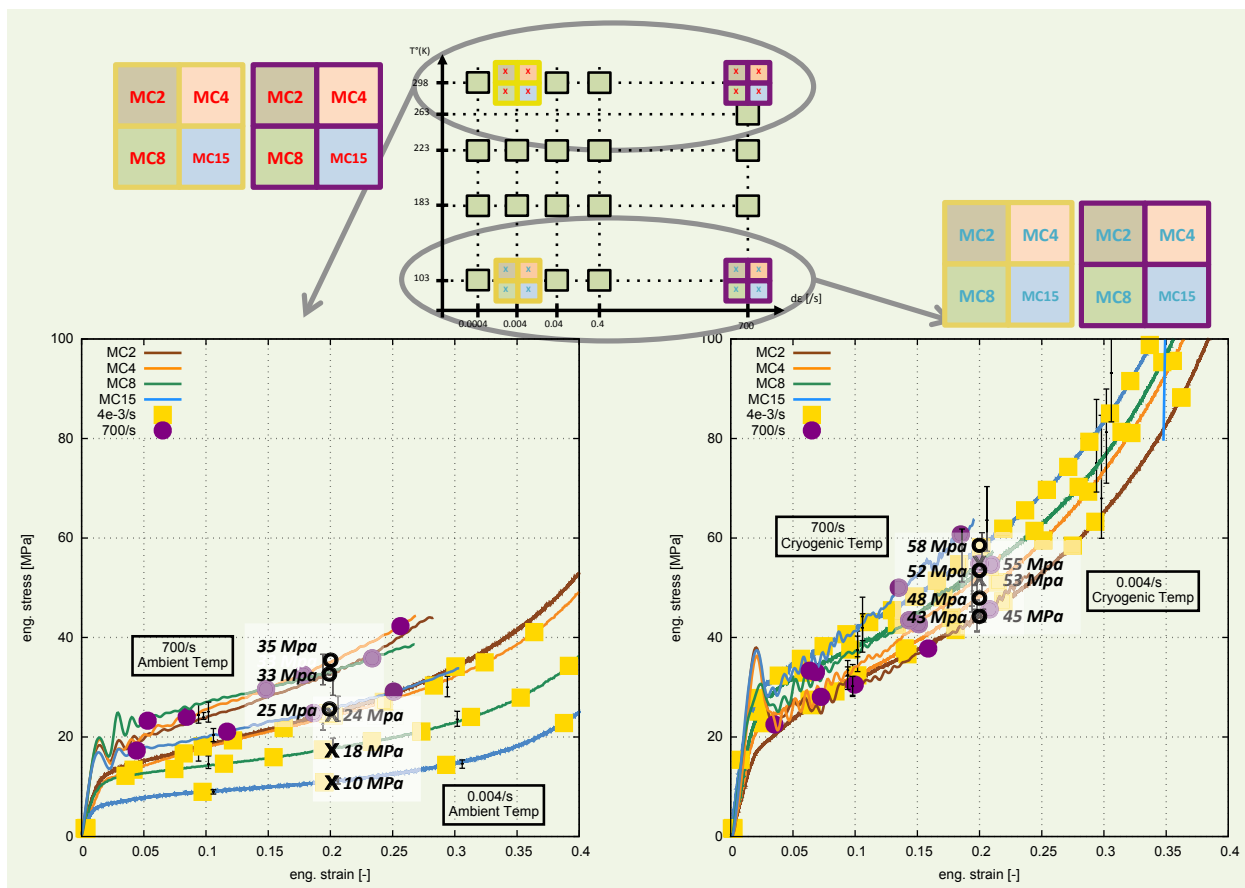


Figure 23 - Effet de la vitesse de déformation en fonction de l'humidité dans le contreplaqué, pour deux températures extrêmes

En cryogénie, on constate encore l'effet de saturation en vitesse de déformation observé à 8% d'humidité. A la température de -170°C , quelle que soit l'humidité dans l'échantillon jusqu'à 15% compris, la vitesse de déformation n'a plus d'incidence sur les paramètres tels que σ_{int}^h et σ_{mod}^h . Le rapport pour une même humidité, à -170°C , aux vitesses de déformation de $4 \cdot 10^{-3}/\text{s}$ et $700/\text{s}$ est compris entre 1,14 et 1,0.

Les valeurs du module d'érouissage, sont plus impactées par la température que par la vitesse de déformation. La vitesse de déformation augmente leur valeur, en conservant leur tendance décroissante en fonction de l'humidité lorsque les essais sont faits à température ambiante. Cependant, le rapport le plus important entre deux valeurs pour σ_{int}^h est de 2,14 à 15% d'humidité quand il est de 3,57 pour la même humidité en passant de 25°C à -170°C . Sachant qu'une équivalence temps-température existe, comme celle trouvée pour les échantillons à 8% d'humidité (section 2.3), cela signifie qu'un saut de 6 décades en vitesse de déformation n'est pas suffisant pour être équivalent à une baisse de température de 190°C . Malheureusement, nous n'avons pas assez de points dans notre plan d'expérience pour déterminer cette équivalence.

Quelles que soient les conditions d'essai ou l'humidité, la déformation de densification est comprise entre 35% et 39%. A température cryogénique et $700/\text{s}$, le calcul n'est pas toujours possible, l'essai ne dépassant pas 40% de déformation. Une valeur de déformation à 8% d'humidité et à l'ambiante est tout de même déterminée (cf. section 2.4.2 et Figure 16). Ni la température ni la vitesse de déformation ne semblent avoir d'effet sur la valeur de ϵ_D , alors qu'une baisse de l'humidité semble augmenter sa valeur. La déformation de

densification ε_D peut être considérée comme constante avec une valeur moyenne de 37%, moyenne pondérée par le nombre d'essais pour chaque répétabilité.

3.3 Conclusions

La vitesse de déformation seule entraîne une augmentation de la contrainte à tout niveau pour σ_{int}^h et σ_{mod}^h , lorsque l'on est à température ambiante (cf. Figure 21, et Figure 23). L'humidité n'a pas le même effet à 700/s et à $4.10^{-3}/s$. En dynamique, l'humidité paraît peu influente, avec des valeurs de contrainte origine d'érouissage très proches, mais les valeurs de module d'érouissage restent dépendantes de l'humidité. Ce module peut être près de deux fois plus faible à 15% d'humidité qu'à 2%.

A température cryogénique, il existe un effet de l'humidité, qui est le même, quelle que soit la vitesse de déformation comme l'indiquent les valeurs de contraintes à 20% présentées Figure 23 et les évolutions présentées sur les graphiques Figure 21. La contrainte origine d'érouissage comme le module d'érouissage présentent tous les deux des valeurs presque identiques aux deux vitesses considérées, par contre, ils dépendent toujours de l'humidité.

Nos essais confirment que l'humidité, même à de faibles taux, alors que l'eau y est sous sa forme liée, influence le comportement du contreplaqué. A 25°C et $4.10^{-3}/s$, le module élastique et la contrainte limite ne sont pas influencés, jusqu'à 8% d'humidité, contrairement aux modules d'érouissage. En dynamique, quelle que soit l'humidité jusqu'à 8% d'humidité, le comportement global est identique jusqu'à 20% de déformation nominale malgré une différence de valeur du module d'érouissage σ_{mod}^h . En cryogénie, il est nécessaire de connaître le taux d'humidité dans le contreplaqué pour considérer le matériau sans biais. En effet, même à de faibles humidités, le comportement est très dépendant du taux d'humidité.

4 Modélisation élasto-plastique avec densification sur un essai de compression

Un modèle complet décrivant la contrainte nominale en fonction de la déformation nominale est proposé, basé sur les travaux de Favier et al. [ORG(1998)] pour caractériser les parties élastique et érouissage. Il est complété par un modèle Mehl-Avrami pour la partie densification de la courbe de comportement. L'équation (4-1) présente ce modèle, somme de trois contributions, saturante, linéaire et puissance, où que f_{qs} est la contrainte nominale en compression hors plan du contreplaqué.

$$f_{qs(\varepsilon)} = \underbrace{\sigma_{int}^h \cdot \tanh\left(\frac{\sigma^{elas} * \varepsilon}{\sigma_{int}^h}\right)}_{\text{Modèle Favier}} + \underbrace{\sigma_{mod}^h \cdot \varepsilon + \left(\log\left(\frac{1}{\varepsilon_{sup} - \varepsilon}\right)\right)^K}_{\text{Modèle Mehl-Avrami}} \quad (4-1)$$

Où :

- σ_{int}^h est la contrainte maximale de la contribution saturante ;
- σ^{elas} est la pente à l'origine de la contribution saturante ;
- σ_{mod}^h est le module d'érouissage ;

Ainsi, le module élastique apparent E est tel que $E = \sigma^{elas} + \sigma_{mod}^h + \frac{K}{\varepsilon_{sup}} \left(\log\left(\frac{1}{\varepsilon_{sup}}\right)\right)^{K-1}$;

Où le troisième terme est négligeable face aux deux premiers. Avec nos paramètres, ce terme contribue à moins de 1% au module élastique.

- ε_{sup} est la déformation maximale atteignable. Elle correspondrait à une contrainte qui augmenterait vers l'infini jusqu'à rupture car le matériau est densifié à 100%;
- K est une constante identifiée pour chaque type d'essai.

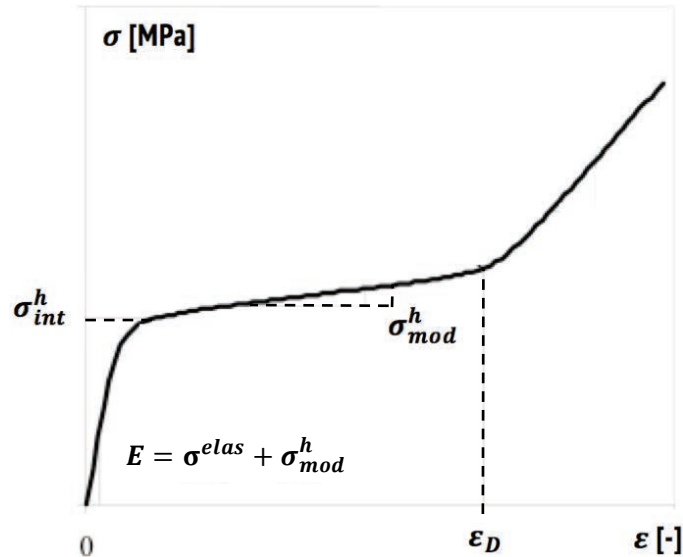


Figure 24 - Définition des paramètres du modèle complet, inspiré de [ORG(1998)]

4.1 Modèle à température ambiante

Ce modèle est utilisé avec les configurations suivantes : ε_{sup} est fixé à $1.65 \cdot \varepsilon_D$, avec une valeur fixe de la déformation de densification ε_D de 37%. ε_{sup} vaut alors environ 0.6. Cette valeur est ajustée manuellement, de manière à avoir une courbe exponentielle qui suit la réponse lors de la phase de densification du contreplaqué, quelle que soit l'humidité, pour une valeur de K égale à 5.

Dans ces conditions, le modèle est identifiable pour différentes vitesses de déformation telles que {0.0004/s, 0.004/s, 0.04/s et 0.4/s} à température ambiante, et 8% d'humidité dans le contreplaqué. Il s'accorde aussi avec la réponse en contrainte du contreplaqué en compression hors plan pour des taux d'humidités {2%, 4%, 8% et 15%}. La Figure 25 et la Figure 26 illustrent ces résultats. Le modèle n'est pas testé pour des essais à 700/s puisque l'on ne peut pas calculer le module élastique E ni la déformation de densification ε_D .

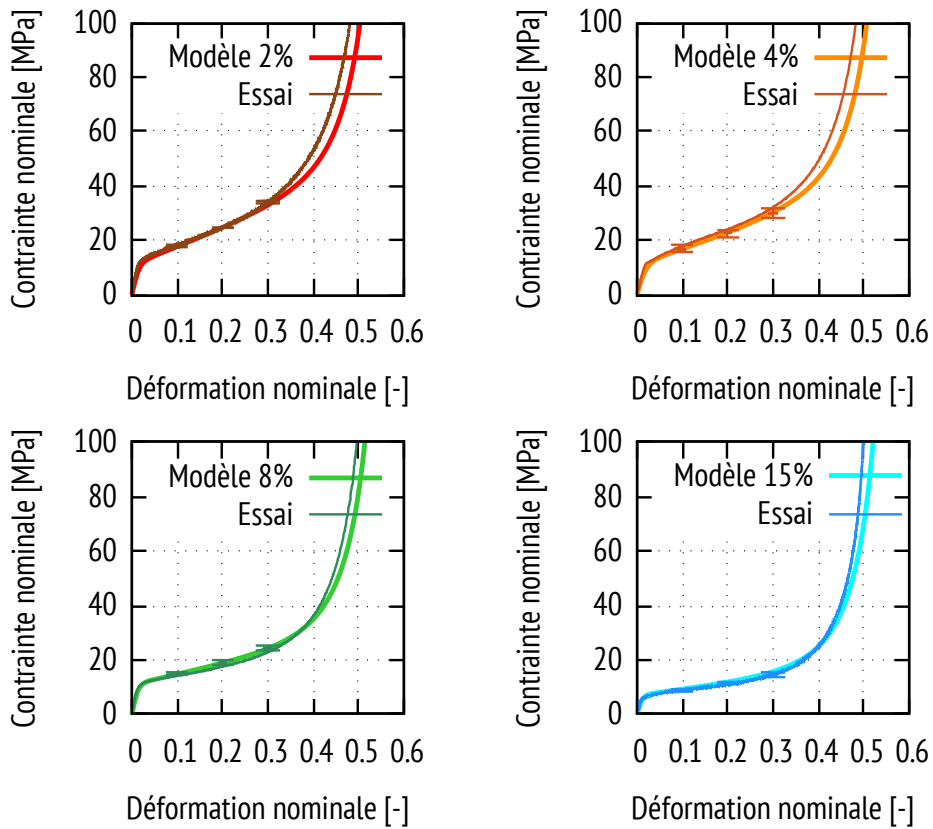


Figure 25 – Comparaison entre le modèle proposé équation (4-1) et les résultats expérimentaux pour différentes humidités à température ambiante et 0.004/s

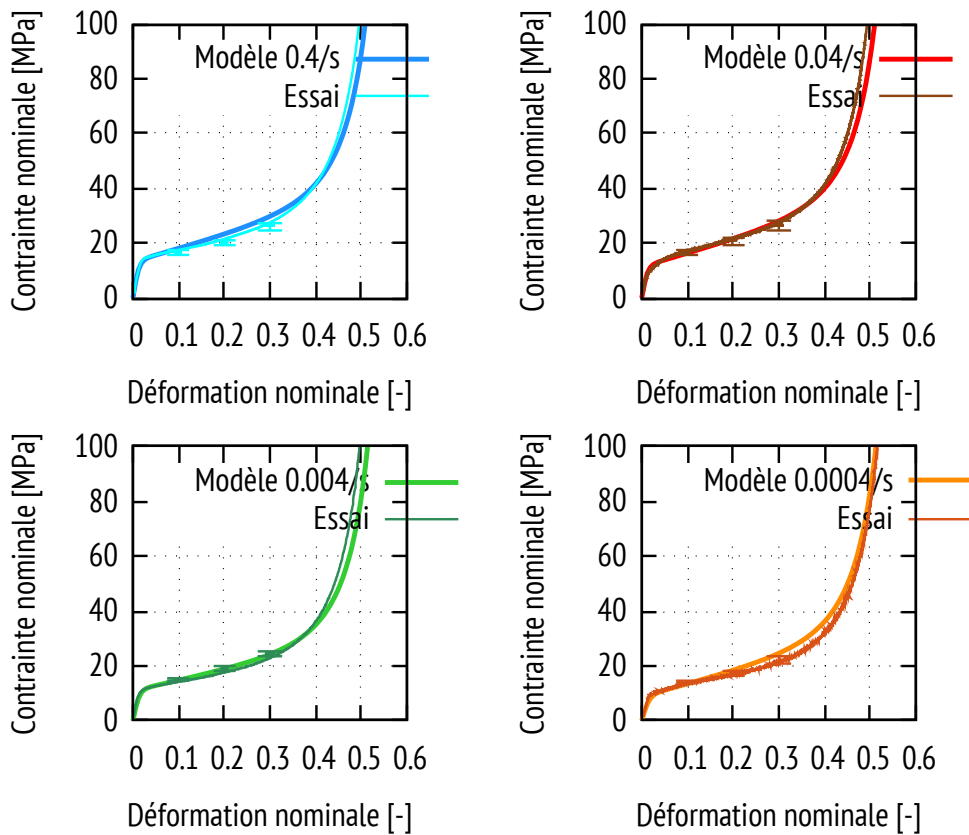


Figure 26 – Comparaison entre le modèle proposé équation (4-1) et les résultats expérimentaux pour différentes vitesses de déformation à température ambiante et 8% d'humidité dans le contreplaqué

4.2 Modèle à température cryogénique

A -170°C , ce modèle est utilisé avec ε_{sup} ajusté à $1.35 \cdot \varepsilon_D$, et la même valeur de déformation de densification ε_D fixé à 37%. ε_{sup} vaut alors environ 0.5, ce qui semble être une valeur de déformation nominale limite pour le contreplaqué en compression hors plan à cette température. K est toujours fixé à une valeur de 5. Dans ces conditions, le modèle est valable pour différentes vitesses de déformation telles que {0.0004/s, 0.004/s, 0.04/s et 0.4/s} à température cryogénique, et 8% d'humidité dans le contreplaqué. Il s'accorde aussi avec la réponse en contrainte du contreplaqué en compression hors plan pour des humidités {2%, 4%, 8% et 15%} dans le matériau. La Figure 27 et la Figure 28 illustrent ces résultats. Le modèle n'est pas testé pour des essais à 700/s puisque l'on ne peut pas calculer E et ε_D .

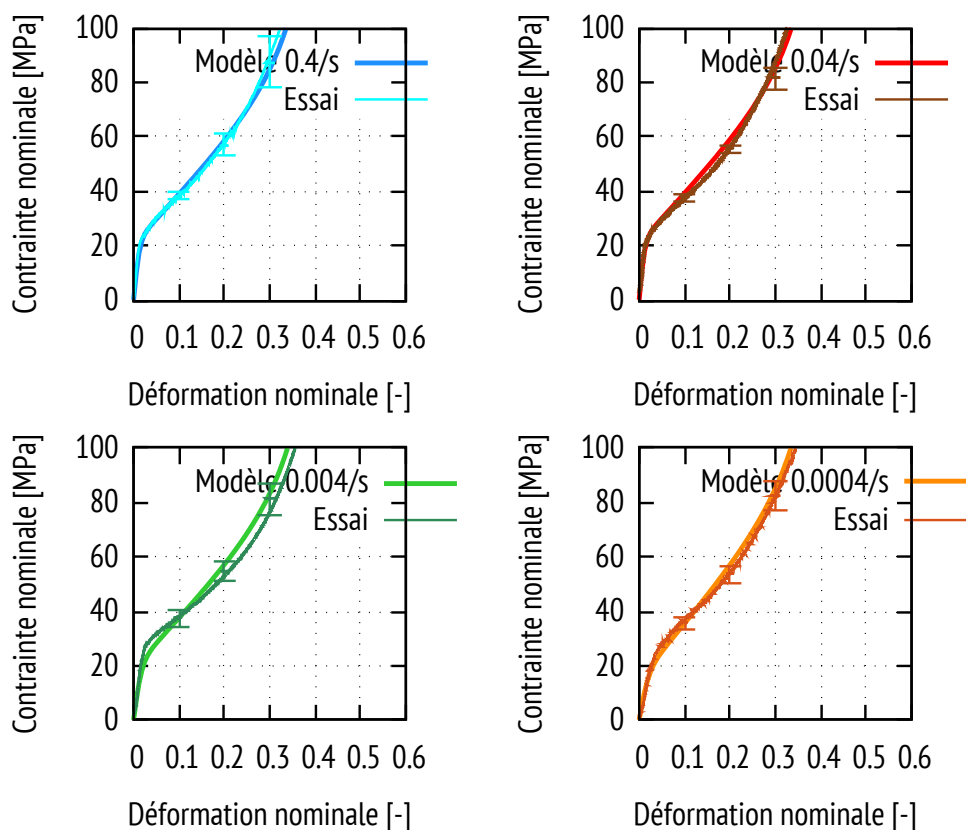


Figure 27 – Comparaison entre le modèle proposé équation (4-1) et les résultats expérimentaux pour différentes vitesses de déformation pour une température de -170°C et 8% d'humidité dans le contreplaqué

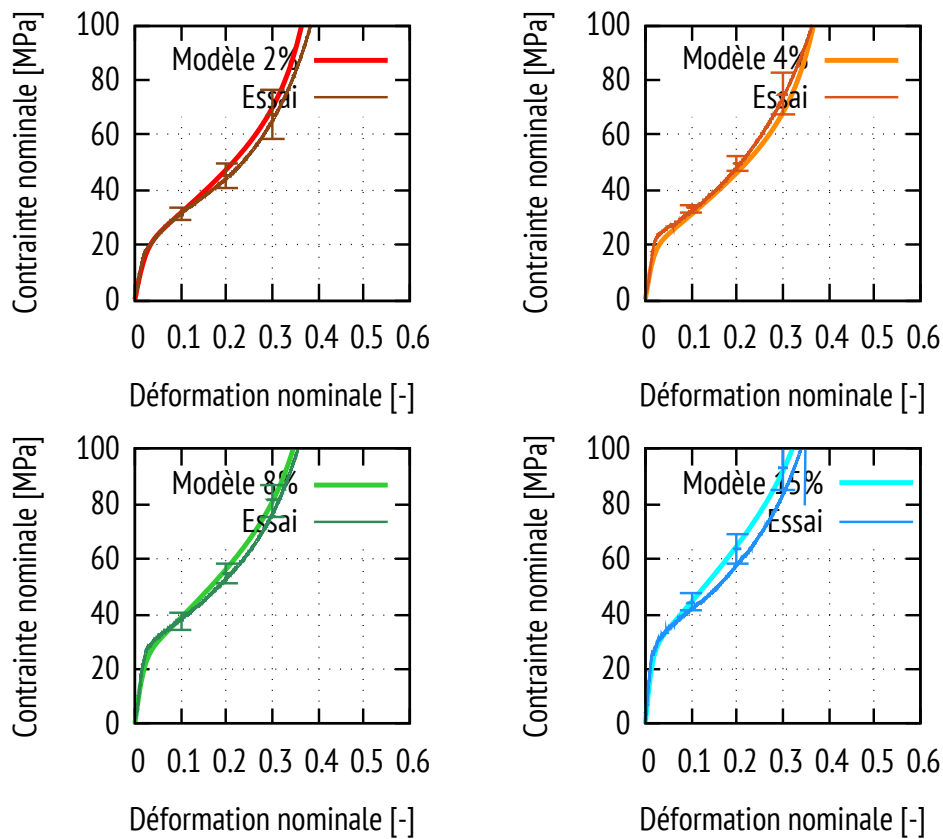


Figure 28 – Comparaison entre le modèle proposé équation (4-1) et les résultats expérimentaux pour différentes humidités à la température de -170°C et $0.004/\text{s}$

Le modèle décrit de manière globale l'évolution de la contrainte en fonction des différents coefficients trouvés précédemment avec des paramètres physiques et un couple de valeurs : $K=5$ quelles que soient les conditions d'essai et $\varepsilon_{sup}=1,65*\varepsilon_D$ à 25°C et $\varepsilon_{sup}=1,35*\varepsilon_D$ à -170°C . Les facteurs qui définissent ε_{sup} ne sont pas choisis au hasard puisqu'ils correspondent à des valeurs de déformations choisies en fonction d'une déformation nominale maximale atteignable par le matériau, constatée après essai. Aucune information n'a été trouvée concernant ce modèle ou ces données dans la littérature.

5 Cisaillement hors plan du contreplaqué de bouleau à 8% d'humidité

Les essais de cisaillement ont été faits suivant un plan d'expérience plus réduit. La campagne d'essais traite du cisaillement d'échantillons à 8% d'humidité, à $1,2.10^{-3}/\text{s}$ et $970/\text{s}$, à température ambiante. La fin des essais en cisaillement est provoquée l'apparition de ruptures dans les échantillons pour une valeur relativement faible de déformation de l'ordre de 4%, contrairement aux essais en compression hors plan. A $0.0012/\text{s}$, le module élastique de cisaillement, noté G , et la contrainte limite (définie à 3% de déformation nominale), notée τ_{lim} , peuvent être définis. G est classiquement défini comme le rapport entre l'évolution de la contrainte de cisaillement et le glissement $2 * \varepsilon_{xy}$. A $970/\text{s}$, seule la contrainte limite peut être déterminée, les ondes n'étant pas en équilibre dans les barres d'Hopkinson avant 2 à 3% de déformation. Le module élastique est calculé en suivant la méthode décrite pour le module élastique en compression hors plan. La contrainte limite correspond à la contrainte maximale obtenue sur l'essai avant ruptures. Pour les essais dynamiques comme pour les essais quasi-statiques, cela correspond à la déformation nominale à 3%. A

ce stade de la déformation, les valeurs obtenues sont fiables (équilibre atteint en dynamique) et les ruptures apparaissent juste après (cf. Chapitre III).

La Figure 29 présente les répétabilités des résultats obtenus et le Tableau 5 les résultats obtenus en valeur moyenne et leur écart-type.

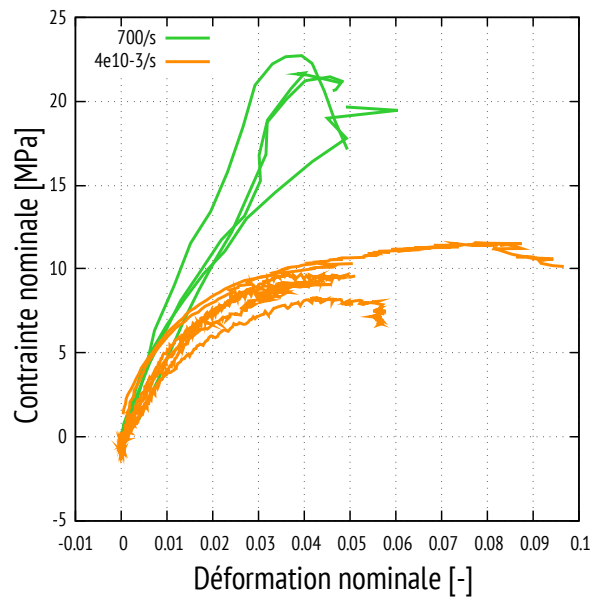


Figure 29 – Répétabilités des essais de cisaillement en compression hors plan, à 25°C et 8% d'humidité dans les échantillons, pour deux vitesses de déformations différentes et un saut de vitesse de 6 décades

En MPa	G (données [DNV-CN30(2006)]) (données [GER(1987)] 3 plies) (données [GER(1987)] even plies)	τ_{lim}
0.0012/s	262 [63] (325) (431) (327)	9.1 [0.7]
970/s	/	15.9 [3.1]

Tableau 5 – Résultats des paramètres de caractérisation du comportement du contreplaqué en cisaillement hors plan, les écart-types sont présentés en MPA, entre crochets.

Le rapport [DNV-CN302006]) et Gerrard [GER(1987)] proposent un module en cisaillement plus élevé que celui que nous avons déterminé en quasi-statique et à 20°C. D'après les travaux du DNV, l'abaissement de température jusqu'à -170°C a pour effet de doubler la valeur du module élastique.

Le cisaillement étudié ici est celui d'un empilement de 5 plis avec 3 plis sollicités en roulant et 2 sollicités en cisaillement transverse, ce qui fait un rapport de plis de 1.5. Ce même rapport pour le contreplaqué étudié en compression hors plan est de 1.25 dans le rapport [DNV-CN302006]) et chez Gerrard [GER(1987)]. Or, d'après Gerrard [GER(1987)], augmenter cette proportion diminue sensiblement le module de cisaillement ; on peut alors supposer que le module de cisaillement soit alors plus faible.

La contrainte τ_{lim} augmente fortement avec l'augmentation de la vitesse. Les essais sont réalisés avec un écart de vitesse de déformation de l'ordre de 6 décades et à cette différence, le rapport entre les contraintes limites est de 1,75. En compression hors plan, l'effet de la vitesse de déformation est équivalent, avec un rapport de 1,73 entre ces deux contraintes dans les mêmes conditions d'essai, comme présenté Tableau 4. La vitesse de déformation semble avoir le même effet sur le contreplaqué, que la sollicitation soit en compression ou en cisaillement hors plan.

6 Conclusion

Ce chapitre propose un modèle permettant d'interpoler le comportement du contreplaqué de bouleau en compression hors plan à un taux d'humidité de 8% pour une large gamme de vitesse de déformation, et de température. Une erreur maximale en contrainte de 7% pour une déformation maximale de 30% a été observée entre le résultat de l'interpolation et les données expérimentales. L'effet de la variation du taux d'humidité dans le contreplaqué a été étudié et l'évolution des paramètres d'interpolation avec l'humidité a été décrite. Une forme mathématique permettant de modéliser la contrainte nominale en fonction de la déformation nominale du contreplaqué de bouleau, en compression hors plan, est proposée et se montre applicable pour l'ensemble des trois phases de déformation : élastique, écrouissage et densification finale. Des valeurs de contrainte limite élastique viennent enrichir la compilation de résultats rassemblée par Gerhards [GER(1982)].

Le comportement en cisaillement hors plan est étudié à 25°C, 8% d'humidité dans le contreplaqué et l'effet de la vitesse de déformation constaté est du même ordre de grandeur, en compression comme en cisaillement.

7 Références

- [ADA(1998)] – C. ADALIAN, *Comportement du bois en compression dynamique multiaxiale - Application à la simulation de crashes de conteneurs*, PhDThesis, Mechanics, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, 1998, 382.
- [ARS(2011)] - A. ARSWENDY, T. MOAN, *Failure analysis of a liquid natural gas (LNG) containment system – Bending failure of plywood component*, Wood Material Science and Engineering, November 2011, No. 7, pp. 30-40
- [AVA(2001)] - M. AVALLE, G. BELINGARDI, and R. MONTANINI, *Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram*, International Journal of Impact Engineering, 2001, Vol. 25, n° 5, pp. 455 –472.
- [BOL(1953)] - K. H. BOLLER, *Strength of wood at low temperatures*, Low temperature test methods and standards for containers, Committee on packing, packaging and preservation, 1953, pp. 64-76.
- [DNV-CN30(2006)] – *Sloshing analysis of lng membrane tanks*, Classification notes No. 30.9, DNV, Det Norske Veritas, Veritasveien 1, NO-1322 Høvik, Norway, 2006.
- [EIS(2014)] - G. EISENACHER, R. SCHEIDEMANN, M. NEUMANN, B. DROSTE, and H. VÖLZKE, *Dynamic crushing characteristics of spruce wood under large deformations*, Wood Science and Technology, September 2013, Vol. 47, pp. 369–380.
- [EN789] – *En 789: 2004 timber structures-test methods-determination of mechanical properties of wood based panels*, 2004.
- [GER(1982)] - C. C. GERHARDS, *Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects*, Wood and Fiber, 1982, Vol. 14, n° 1, pp. 4-36.
- [GER(1987)] – C. GERRARD, *The equivalent orthotropic elastic properties of plywood*, Wood Science and Technology, 1987, No. 21, pp. 335-348.
- [GIB(1997)] – L. J. GIBSON, M. F. ASHBY. *Cellular solids - Structure and properties*. New York: Cambridge University Press, 1997.
- [JIN(2014)] – L. JING, Z. WANG, V.P.W. SHIM, L. ZHAO, *An experimental study of the dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores subjected to blast loading*, International Journal of Impact Engineering, September 2014, Vol. 71, pp. 60-72
- [JOR(2016)] – J.L. JORDAN, D.T. CASEM, J.M. BRADLEY, et al., *Mechanical Properties of Low Density Polyethylene*, Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2016, Vol. 2, n°4, pp. 411-420
- [LI(2006)] - Q. M. LI,* I. MAGKIRIADIS AND J. J. HARRIGAN, *Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids*, Journal of Cellular Plastics, September 2006, Vol. 42, n°5, pp371-392
- [MOU(2006)] – M. MOUTEE, *Modélisation du comportement mécanique du bois en séchage*, PhDThesis, Département des sciences du bois et de la forêt, Faculté de Foresterie et géomatique de l'Université de Laval, Québec, 2006, 173.
- [NAV(2005)] – P. NAVI, F. HEGER. *Comportement thermo-hydrromécanique du bois: applications technologiques et dans les structures*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

- [ORG(1998)] – L. ORGEAS, D. FAVIER et G. RIO, « *Déformation superélastique non homogène d'une éprouvette de traction NiTi. Expérience et modélisation numérique.* », Revue européenne des éléments finis, 1998, pp. 1-26
- [PAI(2010)] - J. K. PAIK, J. M. SOHN, Y. S. SHN et Y. S. SUH, *Nonlinear Structural analysis of membrane-type LNG carrier cargo containment system under cargo static pressure loads at the cryogenic condition with a temperature of -163°C*, Ships and Offshore Structures, November 2010, Vol. 6, No. 4, 2011, pp. 311–322
- [REI(1997)] - S. R. REID, C. PENG, *Dynamic uniaxial crushing of wood*, International Journal of Impact and Engineering 1997, Vol. 19, n° 5-6, pp. 531-570
- [TAN(2005)] - P.J. TAN, S.R. REID, J.J. HARRIGAN, Z. ZOU, S. LI, *Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. part i—experimental data and observations*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids October 2005, Vol. 53, n°10, pp. 2174–2205
- [UPM(2008)] – Visa Plywood, *Handbook of Finnish plywood*, Lahti, Finland, www.wisa.plywood.com
- [USDA(2010)] - United States Department of Agriculture, Forest Service. *Wood Handbook Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*. Wisconsin: Forest Products Laboratory, 2010.
- [WID(2004)] - S. WIDEHAMMAR, *Stress-Strain Relationships for Spruce Wood: Influence of Strain Rate, Moisture Content and Loading Direction*, Society for Experimental Mechanics, Février 2004, Vol. 44, n° 1, pp. 44-48.
- [WOL(2007)] – M.P. WOLCOTT, F.A. KAMKE, and D.A. DILLARD, *Fundamentals of flakeboard manufacture: viscoelastic behavior of the wood component*, Wood and Fiber Science, 2007, Vol. 22, n°4, pp. 345–361.
- [WOU(2016)] – J. WOUTS, G. HAUGOU, M. OUDJENE, D. COUTELLIER, and . MORVAN, *Strain rate effects on the compressive response of wood and energy absorption capabilities—part a: Experimental investigations*, Composite Structures, 2016, Vol. 149, pp. 315–328.
- [ZHA(2007)] - J. ZHAO, W. G. KNAUSS, and G. RAVICHANDRAN, *Applicability of the time-temperature superposition principle in modeling dynamic response of a polyurea*, Mechanics of Time-Dependent Materials, December 2007, Vol. 11, n° 3, pp. 289–308.

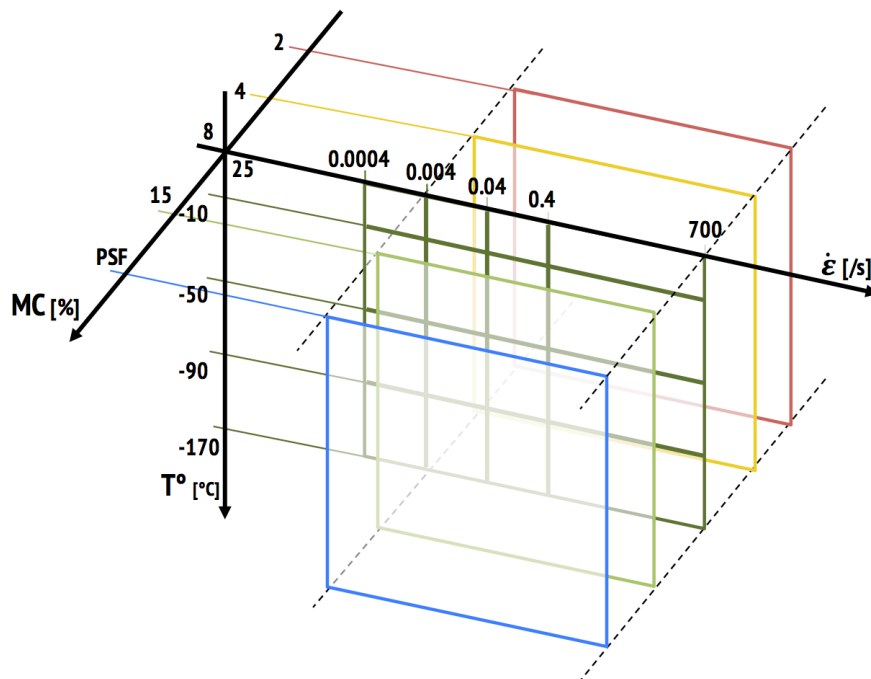
Conclusion et perspectives

L'origine de la thématique de ce travail est un contrat industriel pour la société GTT conceptrice de méthaniers. Les cuves isolantes de ces navires maintiennent le méthane liquide à -163°C et pression atmosphérique. Du contreplaqué de bouleau est largement utilisé dans la fabrication de leurs différents types de cuves. Cela implique que ce contreplaqué soit soumis à des variations de températures importantes entre la température ambiante et la température cryogénique. Le retour d'expérience de l'utilisation de ces bateaux a montré que ces cuves pouvaient être soumises à du sloshing, vagues de méthane provoquées par les mouvements du navire, venant solliciter dynamiquement le contreplaqué dans sa direction hors plan. Cette direction hors plan du contreplaqué correspond la direction radiale du bois clair pour les différents plis constituant ce contreplaqué. Une étude bibliographique montre que ce phénomène de sloshing dans les cuves est largement étudié et que des simulations numériques existent, basées sur un comportement élastique du contreplaqué, à température ambiante comme cryogénique, pour ses directions du plan (longitudinale et transverse pour le bois clair) mais également pour sa direction hors plan qui correspond à la direction radiale du bois clair pour chacun des plis. Or la littérature concernant le bois clair montre que son comportement radial en compression est de type matériau cellulaire, qu'il dépend de la vitesse de sollicitation et qu'il est sensible au taux d'humidité et à la température.

Notre recherche bibliographique a montré qu'aucune étude prenant en compte les effets croisés de ces conditions d'essais sur le comportement hors plan du contreplaqué n'est disponible. L'ensemble de ce travail bibliographique est présenté dans le chapitre I.

L'objectif de ce travail de thèse est donc de déterminer et modéliser le comportement en compression hors plan d'un contreplaqué de bouleau en prenant en compte les effets croisés de la vitesse de déformation, de la température et de l'humidité. Une étude moins ambitieuse a permis de déterminer le comportement en cisaillement hors plan du contreplaqué à température ambiante, 8% d'humidité, en fonction de la vitesse de déformation. Une série d'expériences en compression confinée a aussi permis de relier le comportement du contre-plaqué à celui du bois clair.

En ce qui concerne la compression hors plan, le plan d'expérience ci-dessous a été retenu. La mise en condition climatique et la mesure de l'humidité ont éprouvé différentes techniques. Les échantillons étaient pesés avant et après chaque essai.



Les valeurs limites de la vitesse de déformation 700/s, de la température -170°C et le paramètre humidité d'une manière générale, concourent à choisir des échantillons de petites dimensions. Or les essais normalisés sur le bois (EN 789) sont réalisés sur des échantillons dont les dimensions sont incompatibles avec les contraintes imposées par le dispositif d'essais dynamique choisi, les barres de Hopkinson (SHPB), même à température ambiante. Le premier travail a donc été de définir une géométrie d'éprouvette compatible avec les essais dynamiques et quasi-statiques à température ambiante. Pour cela, on a vérifié que l'éprouvette circulaire de 28 mm de diamètre et de 12 mm d'épaisseur, permettait d'obtenir le même comportement mécanique en contrainte versus déformation que l'éprouvette utilisée dans la norme EN 789. On a également vérifié que le diamètre de l'échantillon et la géométrie de l'échantillon n'avaient pas d'influence sur le comportement. La réalisation des essais quasi-statiques et dynamiques a nécessité le développement de deux enceintes climatiques spécifiques avec des systèmes de régulation de la température via la mesure de la température à l'intérieur de la cellule climatique mais aussi au cœur de l'échantillon. Le calcul de la déformation de l'échantillon pendant les essais quasi-statiques a été réalisé à partir du déplacement de la traverse de la machine de compression corrigé de la raideur machine, raideur évaluée pour chaque condition d'essai. En dynamique, le calcul de la déformation de l'échantillon est réalisé à partir des signaux de jauges de déformation placées sur les barres d'entrée et de sortie du dispositif SHPB.

En ce qui concerne l'étude du cisaillement transverse, le seul dispositif disponible était celui de Iosipescu, utilisé par la norme ASTM D 5379. Ce dispositif ne permet pas de faire des essais dynamiques. Un montage spécifique et une éprouvette ont alors été conçus. Un logiciel de corrélation d'image permet le calcul des

déformations dans les zones cisillées. Le dispositif créé a alors été validé, en condition quasi-statique, par comparaison avec le dispositif de losipescu.

L'ensemble du travail de mise au point des protocoles et la validation des essais de compression et de cisaillement hors plan du contreplaqué sont présentés chapitre II et III.

Le dernier chapitre présente les résultats obtenus dans toutes les directions du bois en compression et notamment un très large développement en compression hors plan. Une première étude propose un modèle de comportement à 8% d'humidité, décrit par quatre paramètres, la contrainte origine d'écroûissage, le module d'écroûissage, le module de densification et l'exposant de densification. Basé sur les travaux de Gibson et Ashby, 1997, ce modèle exclue la partie élastique de la réponse du contreplaqué. Cette étude permet aussi d'identifier une équivalence temps-température pour chacun des paramètres et un modèle global est présenté pour la contrainte origine d'écroûissage et le module d'écroûissage sur les graphiques ci-dessous :

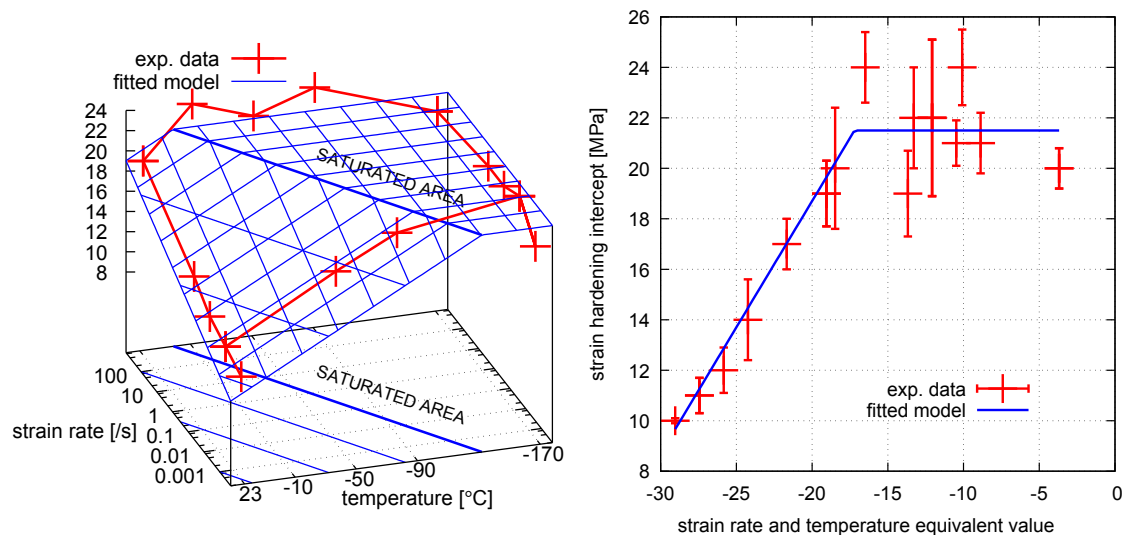


Figure 1 – Left, 3D view of the hardening intercept σ_{int}^h evolution as a function of temperature and strain rate. Iso-values lines at specific σ_{int}^h value of 9.5, 13.5, 17.5 and 21.5 MPa are plotted on base and surface. Right, evolution of the hardening intercept coefficient as a function of strain-rate-and-temperature- equivalent-value $TTE = C_{SR} \cdot \log_{10}(\dot{\epsilon}) + C_T \cdot T$. Errorbars correspond to one standard deviation of the coefficient.

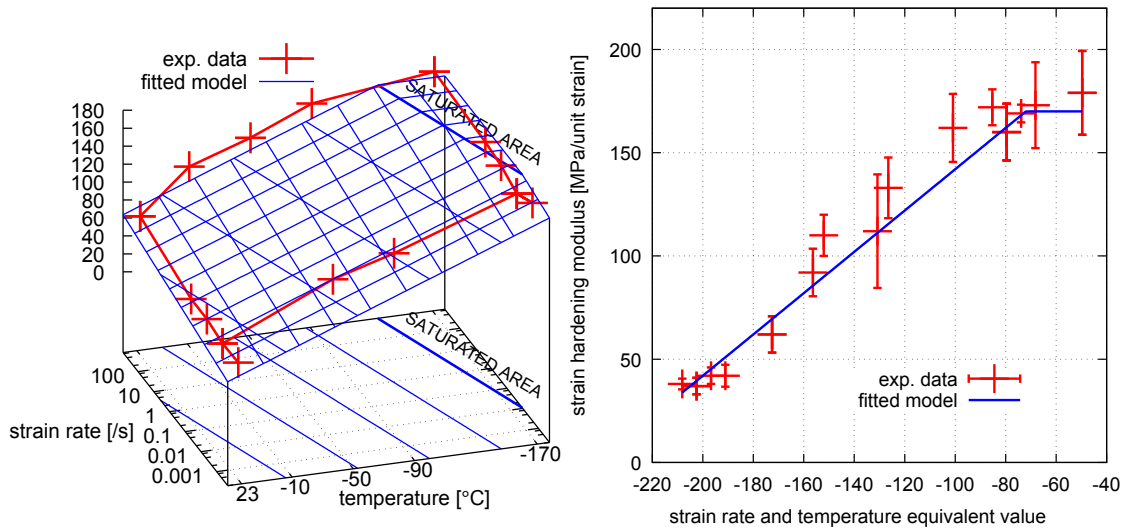


Figure 2 – Left, 3D view of hardening modulus coefficient σ_{mod}^h evolution as a function of temperature and strain rate. Iso-values lines at specific σ_{mod}^h value of 50., 80., 110., 140. and 170 MPa are plotted on base and surface. Right, evolution of the hardening modulus coefficient as a function of strain-rate-and-temperature-equivalent-value $TTE = C_{SR} \cdot \log_{10}(\dot{\epsilon}) + C_T \cdot T$. Errorbars correspond to one standard deviation of the coefficient.

14 paramètres sont nécessaires pour décrire ce modèle. De plus, nos résultats nous permettent d'enrichir la compilation de résultats proposée par Gerhards en 1982 et regroupant les résultats de nombreux auteurs sur le bois.

Les équivalences temps-température sur la contrainte origine et le module d'écroissage ne coïncident pas en termes de ratio d'évolution tel que classiquement proposé dans le modèle WFL. Cela indiquerait que les mécanismes mis en jeu dans les deux phénomènes seraient physiquement différents. L'un traduit en effet l'apparition des premiers flambements de parois cellulaires quand le second traduit la progression et la propagation de ce flambement aux autres cellules. Une vérification par simulation numérique aux éléments finis avec un maillage reproduisant la structure cellulaire permettrait peut-être de rendre compte des mécanismes en jeu et de vérifier les équivalences trouvées.

Un autre paramètre a été largement étudié dans cette première partie du Chapitre IV, la déformation de densification ϵ_D . Cette déformation marque la frontière entre les deux stades classiques de déformation ultime des matériaux cellulaires, entre comportement de plateau et densification. Nos résultats semblent indiquer que la valeur de ϵ_D est très peu sensible aux conditions d'essais, à une valeur de 37% de déformation nominale.

Ce travail à 8% d'humidité a ensuite été mené pour différentes humidités, de 2% à 15% dans le contreplaqué. En dessous de 15% d'humidité, très peu de travaux existent, pourtant les résultats montrent que même à faible taux, le comportement du contreplaqué est encore sensible à une variation d'humidité. Il conduit d'ailleurs à modifier les équivalences temps-température précédentes. Elles n'ont pas été identifiées par faute de données pour chaque humidité, les échantillons n'ayant été testés qu'aux vitesses de déformations et températures extrêmes. Comme à 8%, des saturations aux conditions extrêmes apparaissent.

Tenant compte de ces évolutions, une seconde modélisation du comportement est proposée, et ses paramètres identifiés pour chaque catégorie d'essai. La modélisation est basée sur les travaux d'Orgéas, complétée par un modèle Mehl-Avrami, le modèle de comportement complet proposé étant tel que:

$$f_{qs}(\varepsilon) = \sigma_{int}^h * \tanh\left(\frac{\sigma^{elas} * \varepsilon}{\sigma_{int}^h}\right) + \sigma_{mod}^h * \varepsilon + \left(\log\left(\frac{1}{\varepsilon_{sup} - \varepsilon}\right)\right)^K$$

En fixant la valeur de K à 5 et la valeur de ε_{sup} comme une proportion de ε_D , il est possible d'obtenir un modèle qui corresponde à la réponse en compression hors plan du contreplaqué, à toute humidité comprise en 2% et 15%, toute vitesse de déformation comprise entre 0.0004/s et 0.4/s et toute température entre 25°C et -170°C. Ce modèle ne s'appuie que sur des paramètres matériaux tels que le module élastique, le module d'écrouissage, la contrainte d'écrouissage ou la déformation de densification.

En ce qui concerne le cisaillement hors plan, les résultats de nos campagnes d'essais ont pu révéler la même influence de la vitesse de déformation qu'en compression hors plan. Une étude plus détaillée en fonction des différentes conditions d'essais permettrait d'enrichir un modèle qui s'apparenterait à un modèle à rupture fragile.

En conclusion, nos travaux ont permis de trouver des paramètres qui permettent de décrire le comportement du contreplaqué en compression hors plan à de grandes déformations, jusqu'à densification, quand la littérature propose des modèles aux petites déformations. Le comportement fragile en cisaillement hors plan montre une sensibilité à la vitesse de déformation du même ordre de grandeur que le comportement en compression.

Les perspectives envisagées à ces travaux de thèse pourraient être les suivantes :

En compression :

- Enrichissement du modèle de comportement en compression hors plan par des essais aux températures intermédiaires et vitesses intermédiaires à 8% d'humidité. Cela correspondrait à rajouter des points aux Figure 1 et Figure 2 dans le centre du domaine expérimental. Cela permettrait notamment de vérifier la linéarité du modèle et la validité de l'équivalence temps-température proposés ;
- Approfondir l'étude de la déformation maximale ε_{sup} en fonction de la déformation de densification ε_D en reliant ces valeurs à la porosité ou la densité du contreplaqué. Cette étude permettrait d'avoir un modèle dont les coefficients sont pleinement dépendants des caractéristiques matériaux. Aujourd'hui ε_{sup} est un multiple de la valeur de ε_D mais on ne sait pas comment il évolue en fonction de la température (la vitesse de déformation et l'humidité ne semblant pas jouer de rôle prépondérant d'après les résultats du Chapitre IV).

En cisaillement, il est évident qu'il faut compléter le plan d'expérience pour parvenir à un modèle complet du type de celui de la compression. En vue d'obtenir une simulation numérique d'un impact tel que présenté dans le contexte de cette thèse, les essais à température cryogénique sont à privilégier en premier ;

En maîtrisant la modélisation du contreplaqué en compression hors plan et en cisaillement hors plan, la simulation numérique d'un impact sur le complexe d'isolation utilisé par GTT est complètement envisageable, et permettrait ainsi d'évaluer les capacités d'absorption d'énergie du contreplaqué lors d'un impact sur la couche primaire d'étanchéité, mais aussi les efforts maximums de compression du contreplaqué, et donc le chargement maximal des parois verticales des caissons soumis au flambement.

Comportement en compression et cisaillement d'un contre plaqué de bouleau, essais aux grandes vitesses de déformation et températures cryogéniques

Résumé de thèse

Le bois est un matériau naturel qui partage avec d'autres matériaux cellulaires la propriété de pouvoir subir par exemple de fortes déformations de compression avec un effort stable jusqu'à densification. Cette propriété est particulièrement recherchée dans le cas de structures devant subir des chocs. Le bois est ainsi utilisé dans la conception de conteneurs pour produits radioactifs, et dans la structure isolante de méthaniers. Dans ce dernier cas, il peut être soumis à de fortes déformations, à grande vitesse de déformation, et pour des températures ambiantes à cryogéniques. Pourtant, le comportement du bois et plus particulièrement dans le cas des méthaniers, le comportement du contre-plaqué, n'est que très peu étudié dans ces conditions extrêmes de température cryogéniques et de grande vitesse de déformation. De plus, l'influence de la teneur en humidité du bois sur son comportement en sollicitation sévère n'est que très peu connue.

Ces sujets sont au coeur de ce travail de doctorat, avec d'abord l'étude du comportement en compression hors plan d'un contre-plaqué de bouleau de la température ambiante à cryogénique de 100K, pour des vitesses de déformation du régime quasi-statique à plusieurs centaines par secondes, et pour des humidité du bois de 2 à 15% ; ensuite par des essais en cisaillement qui ont été effectués à grande vitesse de déformation pour une humidité de 8%. La réalisation de ces essais a nécessité le développement de nouveaux montages et la mise au point de protocoles dont les validations sont discutées à partir de comparaisons aux essais normalisés.

Abstract

The wood is a natural cellular material. Like other cellular materials, wood is able to carry a stable load under compression up to the densification. This is a key property for the use of cellular materials and wood based materials for cushioning and choc absorber design. Wood is for example used for radioactive material containers and plywood is involved in the insulation complex of LNG carriers. In this case, plywood may be submitted to high strain rate loads at cryogenic temperature. However, the behaviour of plywood under such extreme conditions is not well established in the literature, nor the influence of the moisture content on the mechanical behaviour in such conditions. In the present study, the out of plane compression behaviour of birch plywood is presented for ambient down to cryogenic temperatures, for strain rate from 0,001 up to 700/s and for moisture contents in the range 2-15%. Shear tests are also presented for various strain rates at ambient temperature and 8% moisture content. The apparatus specially designed and the test protocols are discussed, and the results compared to international standards when available.