

CORRÉLATION EXPÉRIMENTAL/NUMÉRIQUE SUR LA DÉTERMINATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE HORS PLAN DE COMPOSITES À FIBRES DE CARBONE CONTINUES POUR LE NAUTISME DE COMPÉTITION

Monia GRABOW ^a, Vincent KERYVIN ^a, Christophe BALEY ^a, Jean-Claude GRANDIDIER ^b,
Odran FAGHERAZZI ^a, Adrien MARCHANDISE ^a

^a Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

monia.grabow@univ-ubs.fr, vincent.keryvin@univ-ubs.fr, christophe.baley@univ-ubs.fr, odran.fagherazzi@univ-ubs.fr,
adrien.marchandise@univ-ubs.fr

^b ENSMA - Université de Poitiers, UPR CNRS 3346, Pprime, F-86961 Futuroscope Cedex, France
jean-claude.grandidier@ensma.fr

Mots-clés : nautisme, foil, cornière, résistance hors plan, délaminage, corrélation expérimental/numérique

Résumé

Cet article concerne la corrélation de la partie expérimentale et numérique d'un essai de flexion quatre points (F4P) sur cornière composée de fibres de carbone continues unidirectionnelles représentant une géométrie simplifiée d'un hydrofoil. L'objectif est de maîtriser le choix des matériaux dans le coude du foil puisque l'apparition d'une contrainte hors plan trop élevée risque de délaminer le composite. Commenant à l'échelle *cornière*, l'étude présentée contient une approche complète d'un essai de F4P sur cornière. En appliquant les formules analytiques de Lekhnitskii [5], la contrainte hors plan est déterminée en fonction du chargement. La partie expérimentale comprend une instrumentation vaste : capteurs de déplacement et d'émission acoustique, jauges de déformation et stéréo-corrélation d'images numériques garantissant des résultats expérimentaux précis. Le modèle numérique éléments finis valide le résultat analytique permettant par la suite d'entreprendre les étapes suivantes de l'étude : la corrélation expérimental/numérique sur la semi-structure, puis sur l'hydrofoil.

1 Introduction

De façon prononcée depuis 2012, les voiliers de compétition sont munis d'hydrofoils, des ailes sous-marines en matériau composite stratifié (fibre de carbone, matrice époxy). Ces derniers sont fixés sous les coques, permettant par effet de portance de sustenter les voiliers au-dessus de l'eau et d'atteindre une vitesse plus importante lors d'une compétition en mer.

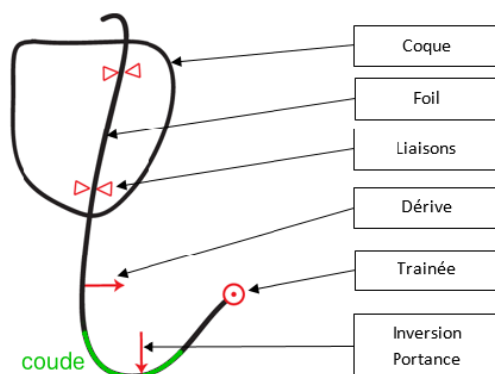


FIGURE 1 – Représentation schématique d'un foil et des efforts apparaissant lors de son utilisation en mer



FIGURE 2 – Absolute Dreamer "Easy To Fly" : 8 mètres Flying Cat ©Y.Zedda/AbsoluteDreamer

Le contexte de cette étude est de maîtriser le choix des matériaux dans le coude du foil (voir Fig. 1). En effet,

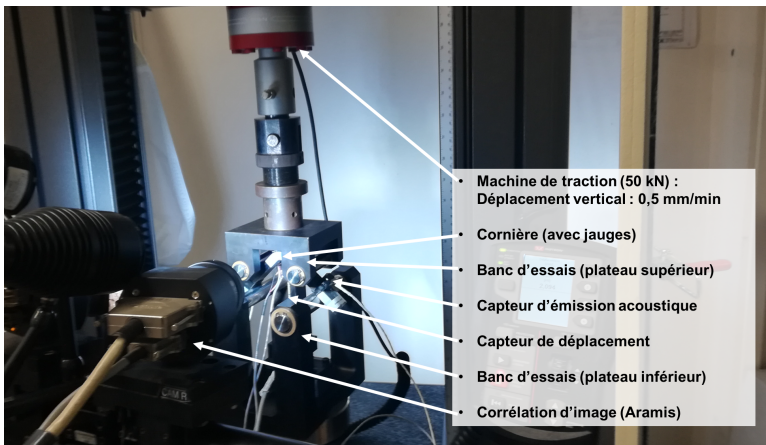


FIGURE 3 – Montage de l'essai de F4P sur cornière

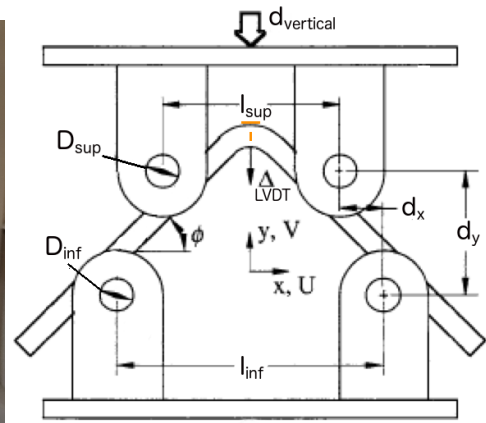


FIGURE 4 – Cornière en F4P selon la norme [2]

lors d'une inversion de portance, le coude du foil est soumis à une sollicitation générant une contrainte de traction hors-plan. Si cette dernière est trop élevée, elle peut induire une rupture du foil par délaminage. La tenue mécanique hors-plan est donc une faiblesse principale de cette innovation technologique.

Afin d'aborder cette problématique, des essais de flexion quatre points (F4P) sur cornière, inspirés de ceux de Charrier [3, 4] suivant la norme [2], ont été entrepris avant de passer par la suite à des dimensions plus grandes, la semi-structure (le coude) et le vrai foil. Pour les essais de F4P sur cornière, un empilement à plis unidirectionnels a été choisi. La résistance hors plan a été calculée par la méthode des éléments finis (FEM) et par des solutions analytiques (résistance des matériaux (RDM) et Lekhnitskii [5]). Ces premiers résultats permettent de se projeter sur l'étude des semi-structures et de l'hydrofoil lui-même.

2 Étude expérimentale

L'essai de F4P sur cornière a été effectué à l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL) à Lorient. Les cornières, ayant été drapées manuellement, étaient composées de plis unidirectionnels (~35 % masse résine) avec de fibres de carbone de module intermédiaire (IM) et d'une résine époxy à basse T_g (~120°C). Après dépose des plis pré-impregnés, une cuisson autoclave à 3 bars de pression permettait d'achever la réticulation de la matrice. La cornière testée a été montée sur un banc d'essais conçu et fabriqué en amont. La machine de traction, une Instron 8803, a été équipée d'une cellule de force de 50 kN dont le déplacement vertical a été réglé à 0.5 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$. L'instrumentation comprenait un capteur de déplacement (LVDT), des capteurs d'émissions acoustiques, deux jauges de déformation mono-axe, une de 2 mm collée dans l'épaisseur au centre et une deuxième de 10 mm posée au centre du rayon extérieur de la cornière (voir marquage orange en Fig. 4), ainsi qu'un système de stéréo-corrélation d'images numériques (Aramis, GOMD). La Fig. 3 présente le montage de l'essai de F4P sur cornière. L'essai, conduit en déplacement imposé, était stoppé après l'apparition d'une chute de force.

3 Méthodes d'analyse

3.1 Méthode analytique

La contrainte hors plan a été calculée en deux étapes d'après les formules analytiques définies dans la norme [2]. Tout d'abord, il a fallu calculer le CBS (*Curved Beam Strength*) par une approche *résistance des matériaux* (RDM)

$$CBS = \left(\frac{P}{2w \cos(\phi)} \right) \left(\frac{d_x}{\cos(\phi)} + (D + t) \tan(\phi) \right) \quad (1)$$

avec

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{-d_x(D + t) + d_y \sqrt{d_x^2 + d_y^2 - D^2 - 2Dt - t^2}}{d_x^2 + d_y^2} \right) \quad (2)$$

et

$$d_y = d_x \tan(\phi_i) + \frac{D + t}{\cos(\phi_i)} - \Delta \quad (3)$$

ainsi que

$$D = \frac{D_{inf} + D_{sup}}{2}, \quad (4)$$

où P est la force à rupture, w la largeur de la cornière, ϕ et ϕ_i sont respectivement l'angle à rupture et l'angle initial entre le bras et l'horizontal, d_x et d_y sont les distances entre les centres des rouleaux des palonniers inférieurs et supérieurs, D_{inf} et D_{sup} les diamètres des rouleaux inférieurs et supérieurs, t l'épaisseur de la cornière et Δ le déplacement vertical à rupture du LVDT (Fig. 4).

Ensuite, la résistance hors plan σ_{33}^R (*Interlaminar Tensile Strength ILTS*) a été calculée par l'équation développée par *Lekhnitskii* [5] à partir d'une analyse en élasticité plane

$$\sigma_{33}^R = -\frac{CBS}{r_o^2 g} \left[1 - \frac{1 - \rho^{\kappa+1}}{1 - \rho^{2\kappa}} \left(\frac{r_m}{r_o} \right)^{\kappa-1} - \frac{1 - \rho^{\kappa-1}}{1 - \rho^{2\kappa}} \rho^{\kappa+1} \left(\frac{r_o}{r_m} \right)^{\kappa+1} \right] \quad (5)$$

avec

$$g = \frac{1 - \rho^2}{2} - \frac{\kappa}{\kappa + 1} \frac{(1 - \rho^{\kappa+1})^2}{1 - \rho^{2\kappa}} + \frac{\kappa \rho^2}{\kappa - 1} \frac{(1 - \rho^{\kappa-1})^2}{1 - \rho^{2\kappa}} \quad (6)$$

et

$$\kappa = \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}, \quad \rho = \frac{r_i}{r_o}, \quad r_m = \left[\frac{(1 - \rho^{\kappa-1})(\kappa + 1)(\rho r_o)^{\kappa+1}}{(1 - \rho^{\kappa+1})(\kappa - 1)r_o^{-(\kappa-1)}} \right]^{\frac{1}{2\kappa}} \quad (7)$$

où r_o et r_i sont les rayons intérieur et extérieur de la partie courbée de la cornière, r_m la position radiale de la contrainte hors plan maximale et E_r , E_θ sont les modules radial et tangent de la cornière.

σ_{33}^R a été aussi calculée par la méthode simplifiée (RDM) dans la cas où la proportion/ratio $\frac{E_\theta}{E_r}$ est inférieur à 20

$$\sigma_{33}^R = \frac{3 CBS}{2t\sqrt{r_i r_o}}. \quad (8)$$

3.2 Méthode numérique

Pour déterminer les champs de contraintes et de déformations dans le rayon de la cornière, une simulation par éléments finis a été réalisée avec le code de calcul propriétaire Abaqus [1]. Le modèle a été construit via l'exécution d'un script python. De cette façon, les propriétés principales de celui-ci pouvaient être fixées librement : géométrie et maillage de la cornière, propriétés et orientations matériaux, rayons des rouleaux, distance entre les rouleaux inférieurs (idem pour ceux supérieurs). Les plis unidirectionnels, 35 au total, étaient supposés isotropes transverses avec un comportement linéaire élastique. Un élément volumique linéaire (C3D8) a été défini par épaisseur. Les dimensions de la cornière testée ainsi que les propriétés matériaux de celle-ci sont résumées en Tab. 1 et Tab. 2. Les appuis inférieurs et supérieurs ont été supposés rigides avec des diamètres de $D_{inf} = 22$ mm et $D_{sup} = 18$ mm et des entraxes de $l_{inf} = 91.26$ mm et de $l_{sup} = 82.38$ mm, respectivement (Fig. 4). Le contact entre rouleaux et échantillon était sans frottements.

TABLE 1 – Dimensions géométriques de la cornière testée

largeur w	épaisseur t	longueur L	rayon intérieur r_i
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
24.8	10.77	115	6.34

TABLE 2 – Propriétés d'élasticité des matériaux de la cornière testée

$E1$	$E2$	$E3$	ν_{12}	ν_{23}	G_{12}	G_{23}
[MPa]	[MPa]	[MPa]			[MPa]	[MPa]
160000	8000	8000	0.3	0.3	4000	3077

4 Résultats

La Fig. 5 présente le faciès de rupture observé expérimentalement à un tiers de l'épaisseur de la cornière ce qui correspond à l'estimation de *Lekhnitskii* [5]. La courbe violette en Fig. 6 représente l'évolution de la force en fonction du déplacement expérimentalement mesurée. La courbe se comporte de façon quasi linéaire jusqu'à un déplacement vertical de 1.6 mm avant que la raideur de cette dernière augmente légèrement au fur et à mesure de la charge jusqu'au premier délaminage apparaissant à une force de rupture de 5595 N et à un déplacement vertical de 2.07 mm mesuré par le capteur de déplacement. Aucun événement jusqu'au premier endommagement n'a été enregistré par les capteurs d'émission acoustique. La Fig. 7 présente la déformation locale (calculée à

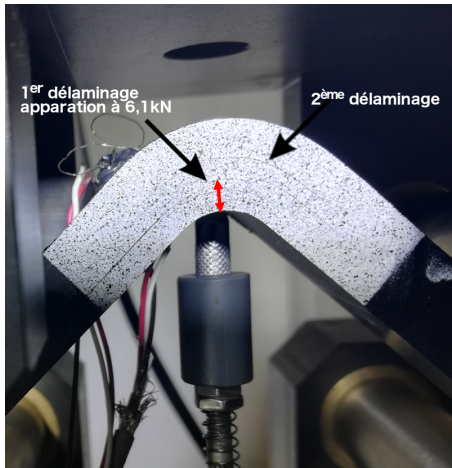


FIGURE 5 – Faciès de rupture observé à 3.6 mm du rayon intérieur

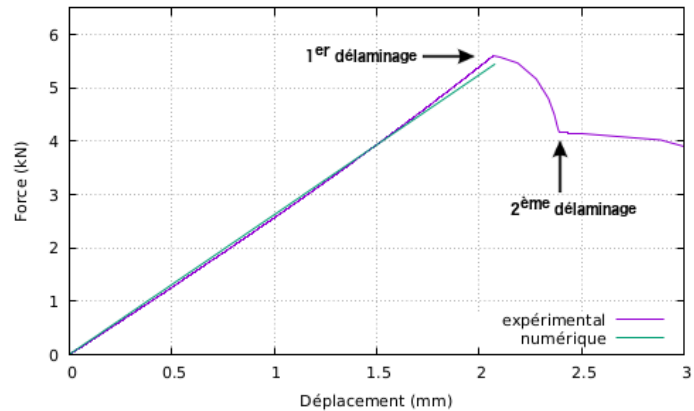


FIGURE 6 – Diagramme force/déplacement de la cornière sollicitée en F4P

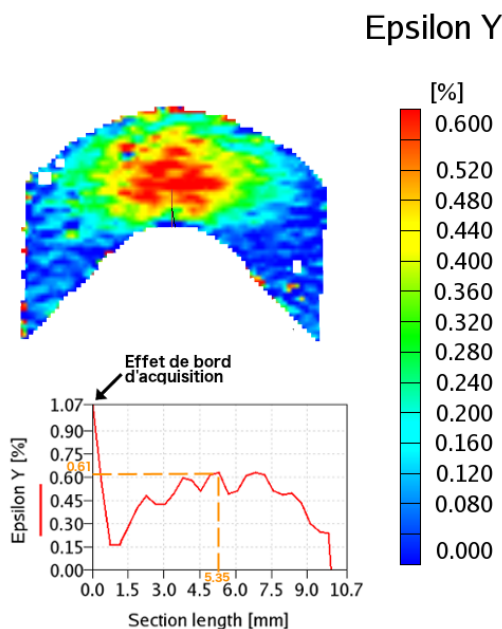


FIGURE 7 – Déformation locale avant rupture (Y désigne l'axe vertical)

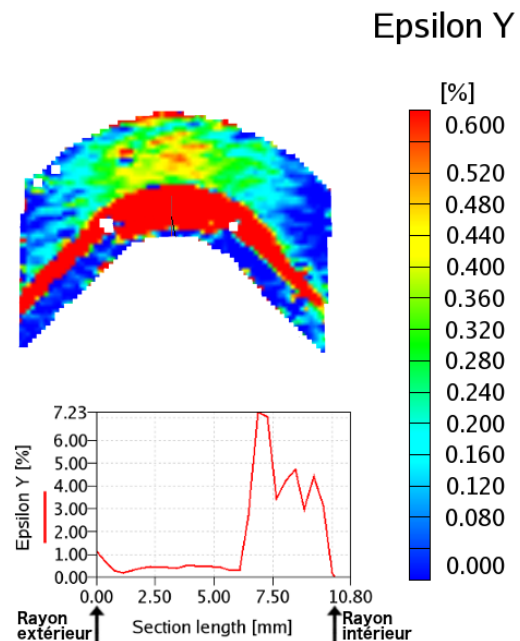


FIGURE 8 – Déformation locale au premier endommagement se situant à un tiers de l'épaisseur (Y désigne l'axe vertical)

partir des champs de déplacement mesurés par la stéréo-corrélation d'image) suivant l'épaisseur (direction y) de la cornière juste avant rupture, et la Fig. 8 montre celle-ci juste après. Pour chaque figure, un tracé de l'évolution de la déformation hors plan le long de l'épaisseur de la cornière est extrait. Au premier endommagement, la déformation atteint son maximum à 7.1 mm mesuré à partir du rayon extérieur. Ce résultat est donc en accord

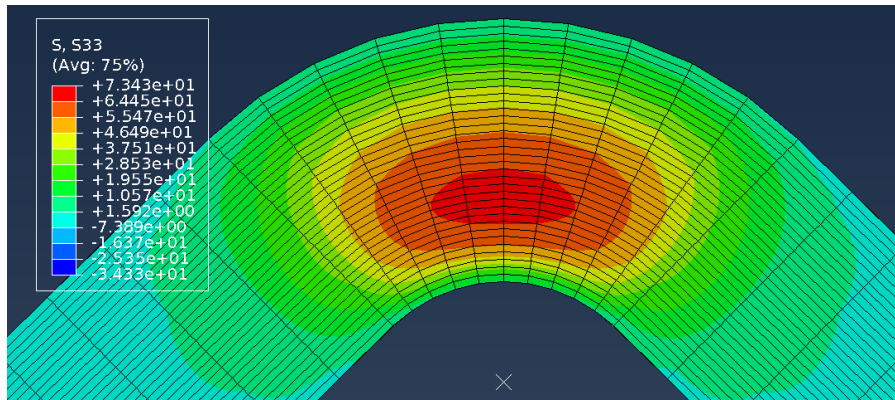


FIGURE 9 – Iso-valeurs de la contrainte hors plan sur une face de la cornière. La contrainte hors plan maximale S33 se trouve à un tiers de l’épaisseur.

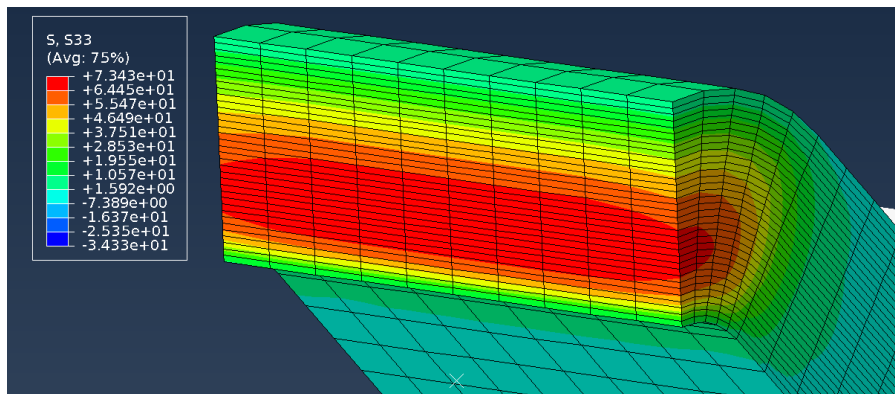


FIGURE 10 – Iso-valeurs de la contrainte hors plan à l’intérieur de la cornière. La contrainte hors plan S33 est répartie de manière homogène sur l’épaisseur.

avec le faciès de rupture observé expérimentalement en Fig. 5. La jauge dans l’épaisseur montre une déformation de 0.51 % juste avant le premier endommagement. Cette valeur est légèrement inférieure à la valeur enregistrée par la stéréo-corrélation d’image (Fig. 7 : *Section length* à 5.35 mm donne une déformation de 0.61 %). Cette différence peut être expliquée par le fait que la stéréo-corrélation d’image mesure une déformation locale alors que la jauge mesure une déformation sur toute sa longueur (ici 2 mm). De manière générale, il est recommandé pour les prochains essais, de coller la jauge au niveau de la fissure suspectée pour obtenir plus d’information sur la déformation dans la zone d’intérêt.

La contrainte hors plan σ_{33}^R a été calculée via les équations analytiques Eq. 5 (solution avancée) et Eq. 8 (solution simplifiée). En rentrant la force à rupture (5595 N) et le déplacement vertical à rupture (2.07 mm) expérimentalement mesurés, les solutions avancée et simplifiée donnaient des résultats de 64.7 MPa et de 70.3 MPa pour la contrainte hors-plan, respectivement. Ces résultats ont été confirmés par le modèle numérique.

TABLE 3 – Résumé des résultats de l’essai F4P sur cornière. Les valeurs en parenthèses montrent l’écart en % par rapport à la valeur numérique.

	expérimentalement mesuré	analytiquement calculé (Lekhnitskii)	analytiquement calculé (simplifiée)	numériquement simulé
d_v^R [mm]	2.07			2.07 (donnée)
P [N]	5595 (2.6 %)			5452
σ_{33}^R [MPa]		64.7 (13.4 %)	70.3 (4.4 %)	73.4

En rentrant le déplacement vertical à rupture expérimentalement mesurée (pilotage en déplacement), des valeurs numériques de 73.4 MPa pour la contrainte hors plan et de 5452 N pour la force à rupture ont été calculées. L’évolution de la force en fonction du déplacement (LVDT) est représentée en Fig. 6 en vert. Le modèle

numérique est en adéquation avec la courbe expérimentale avant que cette dernière ne dévie légèrement de la courbe numérique. Enfin, les Fig. 9 et Fig. 10 présentent la contrainte hors plan σ_{33}^R (S33) ainsi que sa répartition dans l'épaisseur et dans la largeur de la cornière. La Tab. 3 résume les résultats où P et d_v^R représentent la force et le déplacement vertical à rupture.

5 Conclusion et perspectives

Dans l'étude présentée, la corrélation entre l'expérience et la simulation numérique d'un essai de flexion quatre points sur cornière a été faite. Pour cela, une cornière composée de fibres de carbone unidirectionnelles de module intermédiaire et d'une résine epoxy à basse T_g a été testée suivant la norme [2]. Pour réaliser cet essai, une vaste instrumentation a été mise en place pour garantir des résultats exploitables. En utilisant les solutions analytiques de Lekhnitskii [5] (Eq. 5) et la solution simplifiée (résistances des matériaux, Eq. 8) la résistance au délaminage hors plan a pu être calculée et vérifiée par le résultat du modèle numérique (Tab. 3). L'évolution numérique de la force en fonction du déplacement était sensiblement identique à l'expérimental (Fig. 6). Grâce à cette conformité, les essais de F4P sur semi-structure peuvent être entrepris par la suite. Il s'agit d'une géométrie dont la dimension est similaire au coude du vrai foil. Le changement de dimension va demander une préparation d'essai plus importante (conception du banc d'essai, calcul des contraintes limites etc.), une instrumentation encore plus vaste (plusieurs jauges, capteurs d'émission acoustique, LVDTs etc.) ainsi que la conception d'un modèle numérique permettant de prévoir le déroulement de l'essai F4P sur semi-structure.

Références

- [1] www.simulia.com/ (13/12/2018).
- [2] ASTM D6415 / D6415M-06a(2013). Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2013.
- [3] J.-S. Charrier. *Développement de méthodologies dédiées à l'analyse robuste de la tenue de structures composites sous chargements complexes tridimensionnels*. PhD thesis, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2013.
- [4] J.-S. Charrier, F. Laurin, N. Carrere, and S. Mahdi. Determination of the out-of-plane tensile strength using four-point bending tests on laminated L-angle specimens with different stacking sequences and total thicknesses. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 81 :243–253, feb 2016.
- [5] S. G. Lekhnitskii. Anisotropic plates. No. *FTD-HT-23-608-67*, 1968.