



Conception de panneaux à âmes ouvertes : Validation expérimentale et optimisation de forme

Florian Dommange, Roch Casamatta,
Alain Desrochers et Elijah Van Houten
Université de Sherbrooke

27 juillet 2020

Conception de panneaux à âmes ouvertes : Validation expérimentale et optimisation de forme

Auteurs : Florian Dommene, Roch Casamatta, Alain Desrochers et Elijah Van Houten

Introduction

L'industrie des transports cherche aujourd'hui à baisser les émissions polluantes en réduisant la consommation d'énergie fossile des véhicules classiques (à moteur à combustion interne) ou en passant vers des véhicules électriques. Le point commun de ces deux solutions réside dans le besoin de réduire la masse actuelle des véhicules.

L'aluminium, par ses propriétés est le matériau de choix pour atteindre cette objectif. Par conséquence, il est de plus en plus utilisé dans la fabrication de pièces pour les véhicules terrestres. Cependant, l'aluminium possède des propriétés mécaniques inférieures à l'acier ce qui nécessite de revoir le design pour l'adapter à l'aluminium.

Un bon exemple de l'utilisation de l'aluminium pour réduire le poids des véhicules est les panneaux en sandwich. Ces panneaux légers permettent aussi le passage de services (électrique, pneumatique) dans leur âme, ce qui réduit la hauteur des planchers. L'objectif global de ce travail est de créer un outil informatique permettant de concevoir et d'optimiser un panneau à âme tressée en aluminium en fonction d'un cahier des charges en flexion. Cet outil sera construit autour d'un modèle analytique, plus rapide à exécuter qu'une simulation numérique.

Revue de la littérature

Les panneaux sandwichs sont des panneaux constitués de deux peaux externes et d'une âme au milieu. Leur avantage s'explique facilement : en augmentant la hauteur des panneaux, on améliore les critères de résistance et de rigidité. L'âme du panneau étant faite pour ajouter peu de poids et un maximum d'épaisseur : la masse d'un panneau sandwich est donc sensiblement la même qu'un panneau d'un seul bloc, mais ses caractéristiques mécaniques sont améliorées (cf Figure 1).

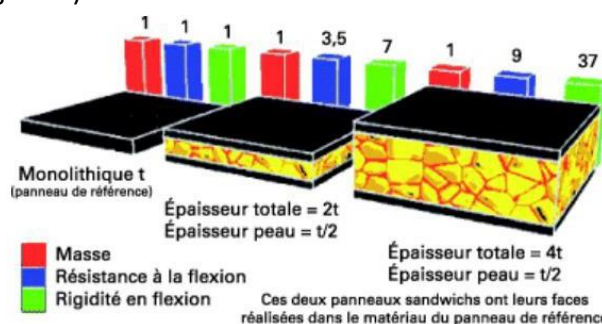


Figure 1 : Comparaison entre une plaque et un panneau en sandwich [1].

Il existe différentes familles de panneaux sandwichs. Les plus utilisés dans l'industrie sont actuellement ceux en nid d'abeille et en mousse, ce qui permet une réduction importante du poids. Cependant, d'autres structures d'âmes sont possibles pour augmenter encore plus la rigidité des panneaux (cf Figure 2).

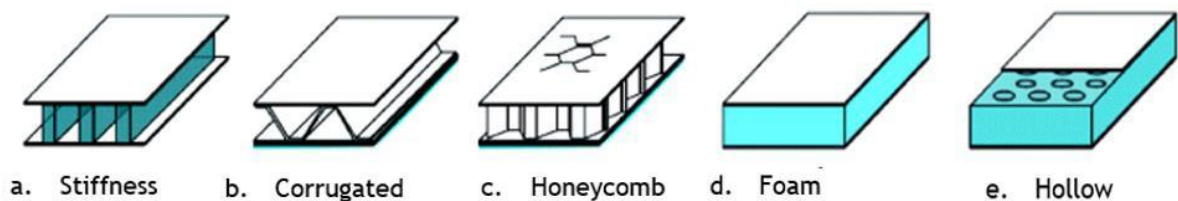


Figure 2 : Schéma de différente technologie d'âme pour les panneaux en sandwich [1].

Définition du concept du panneau à âme pliée

Le design du panneau choisi prend les caractéristiques d'un panneau sandwich *corrugated* (cf Figure 2) mais en modifiant la structure de façon à tresser l'âme du panneau. Inspiré des travaux de Sun [2] (cf Figure 3), le concept du panneau permet d'avoir plusieurs bandelettes qui composent l'âme, ces bandelettes sont tressées et orientées de façon à obtenir une bonne rigidité tout en laissant passer les services demandés.

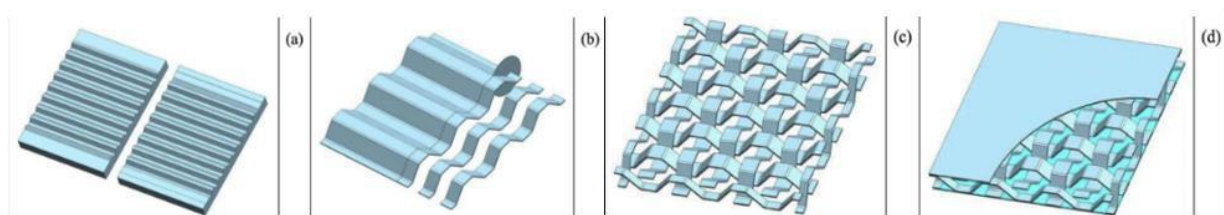


Figure 3 : Fabrication de l'âme tressé [2].

Création d'une méthode expérimentale calculant la rigidité en flexion

Actuellement, il n'existe pas de modèle analytique permettant de calculer la rigidité en flexion d'un panneau à âme tressée. Il a été choisi de le construire en se basant sur celui d'un panneau *one-way corrugated* (cf Figure 2b). Cependant, avant de construire de nouveaux modèles analytiques, il faut définir une méthode de calcul expérimentale de rigidité permettant de valider les futurs modèles créés. Cette méthode sera elle-même validée en calculant expérimentalement les rigidités d'un panneau *one-way corrugated* dont les valeurs théoriques de rigidités sont connues.

Description et justification du choix du modèle analytique de flexion pour un panneau *one-way corrugated*

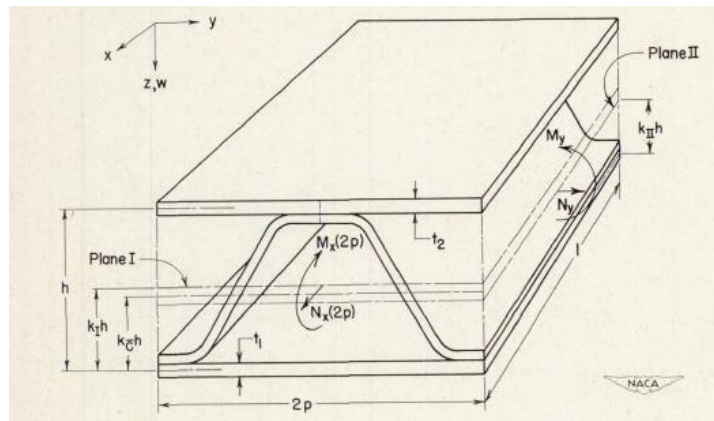


Figure 4 : Schéma paramétré du modèle analytique [3].

Le modèle choisi (cf Figure 4) est décrit dans la revue technique numéro 2289 écrite par Charles Libove et Ralph E. Hubka en 1951 [3], et il fut publié par la National Advisory Committee for Aeronautics. Il permet de calculer les rigidités en flexion suivant les axes x et y ainsi que les coefficients de Poissons associés à la flexion, en assumant les hypothèses suivantes : la rigidité suivant l'axe z est infinie, le flambement local n'est pas pris en compte et l'âme présente plusieurs ondulations. Ce modèle a été choisi, car il est explicite et utilisé par plusieurs auteurs [4] [5]. Il permettra de valider les méthodes de calculs expérimentaux développées.

Conception et fabrication du panneau pour les essais

N'ayant pas de cahier des charges précis lors de la conception du panneau *one-way corrugated*, celui-ci a été conçu pour pouvoir être comparé à un panneau en nid d'abeilles acheté dans le commerce. Les deux ont donc la même épaisseur totale et la même épaisseur de tôles. Le panneau a été fabriqué en aluminium par collage et rivetage (cf Figure 5).

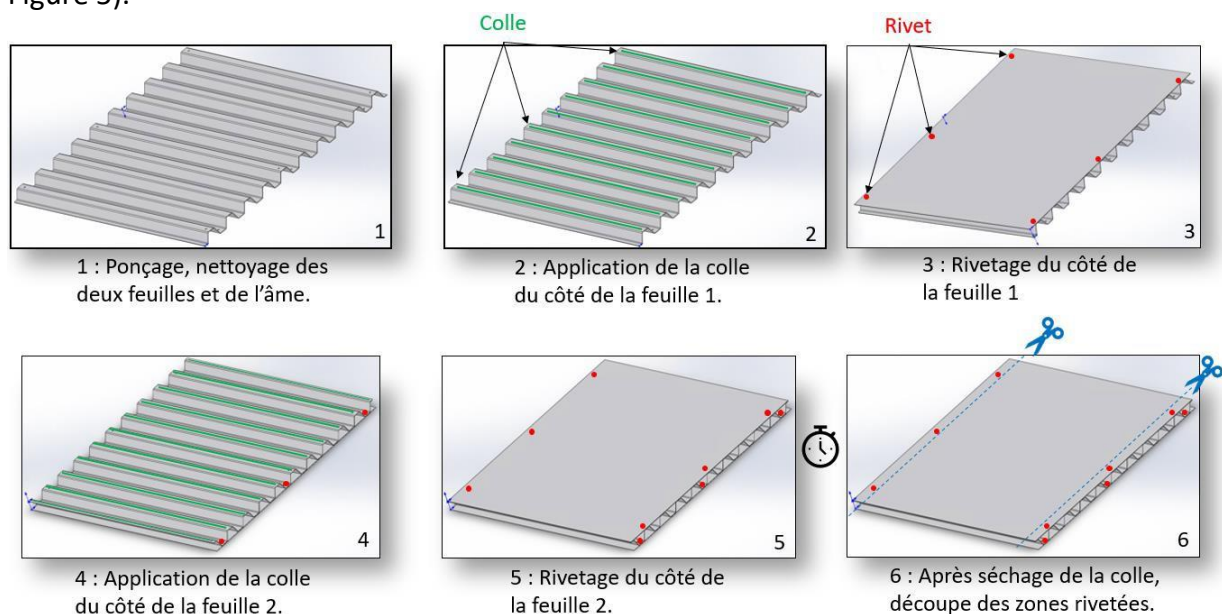


Figure 5 : Méthode de fabrication du panneau *one-way corrugated*.

Mesures expérimentales par corrélation d'images 3D

Les mesures de déplacements et de courbures du panneau, durant les essais en flexion, ont été réalisées grâce au système de corrélation d'images 3D (cf Figure 6) développé par *Correlated Solutions* (Irmo, USA).



Figure 6 : Exemple de système de corrélation d'images 3D [6].

La mise en place de ce système nécessite les opérations suivantes :

- Application d'un mouché sur la surface d'intérêt (cf Figure 7a) ;
- Positionnement et réglage des caméras ;
- Calibration du système grâce à la plaque dédiée à cet effet (cf Figure 7b).

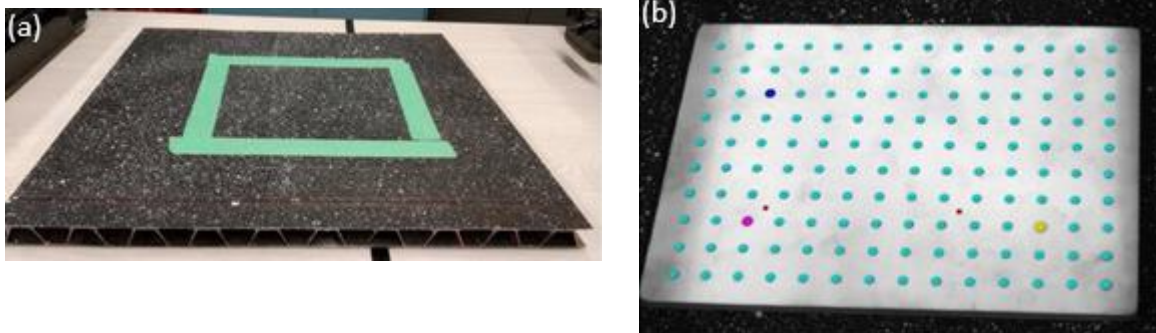


Figure 7 : (a) mouché et zone vue par les caméras, (b) Plaque de calibration).

Les champs de variables sont ensuite calculés à partir des différentes images prises durant les essais et grâce au logiciel de traitement VIC-3D.

Conception et fabrication du montage expérimental

Ayant pour objectif le calcul des rigidités en flexion, le montage a été conçu pour qu'une zone du panneau soit soumise uniquement à un moment de flexion (cf Figure 8). Le montage a été fabriqué avec des profilés rainurés en aluminium de 60x60mm, ce qui permet d'avoir un montage modulable pour réaliser les essais d'estimation de rigidités suivant les axes x et y, mais aussi pour réaliser les essais sur les futurs panneaux. Des renforts permettent d'éviter les battements et l'ouverture du montage pendant le chargement. De plus, ce montage offre un champ de vision adéquat pour la mise en place du système de corrélation d'images (cf Figure 9).

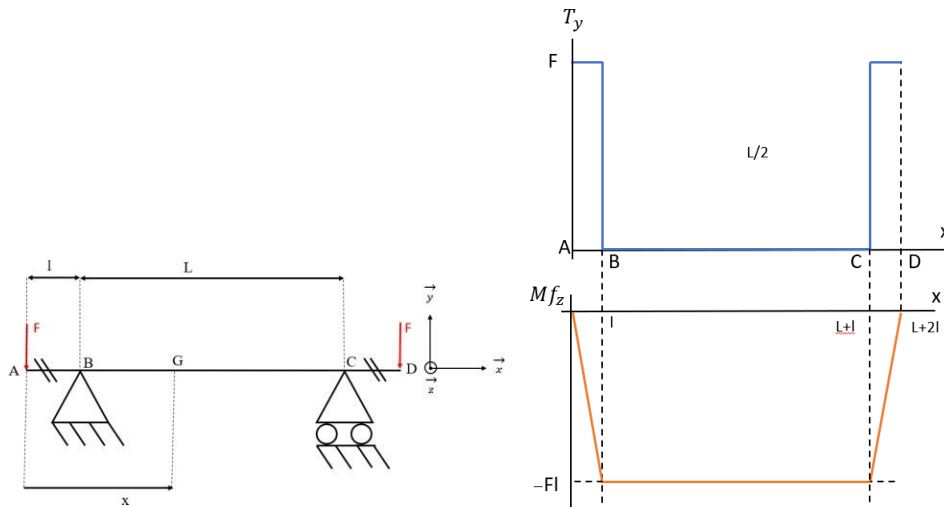


Figure 8 : Schéma de flexion à 4 points et graphe des efforts tranchant et fléchisseur.

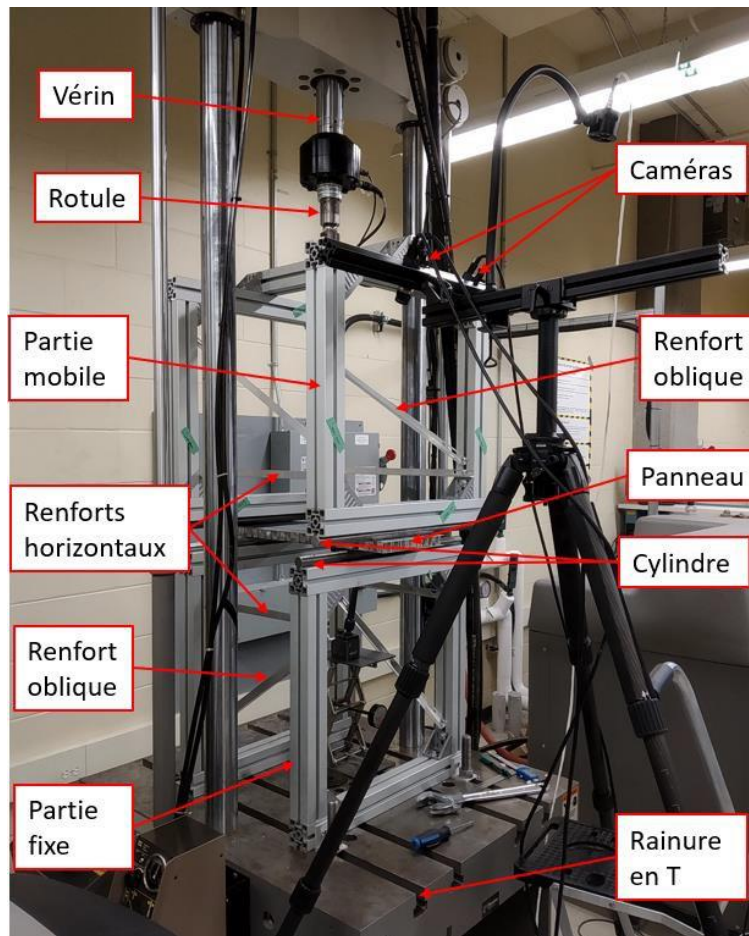


Figure 9 : Montage fabriqué.

Analyse de données et calcul de rigidité suivant l'axe x (R_x)

Le traitement des images sur le logiciel VIC-3D permet d'exprimer les variables dans le repère inhérent au panneau (axe z normal à la face supérieure), mais dont l'origine est toutefois inconnue. Néanmoins, d'après le modèle analytique, la forme théorique de la

courbe obtenue lorsque les déplacements suivant l'axe z sont tracés en fonction de la position suivant l'axe y, est un polynôme de degré 2. La méthode de calcul de la rigidité est donc basée non pas sur les valeurs numériques de déplacements, mais sur la courbure obtenu grâce à la dérivé du polynôme représentant les déplacements

La méthode d'extraction et d'analyse des données pour le calcul de la rigidité suivant l'axe x est la suivante :

- Huit lignes perpendiculaires aux isolignes de déplacements (la variable de position x reste constante le long de ces lignes) sont tracées d'un bord à l'autre de chaque image (cf Figure 10) ;
- Les variables de position y et de déplacements w sont extraites, les valeurs vides causées par les trous dans les champs de variables sont supprimées ;
- Pour chaque ligne, une régression polynomiale de degré 2 est appliquée aux valeurs extraites, puis les valeurs aberrantes sont supprimées grâce à la méthode de l'écart type. Enfin la rigidité est calculée.

À partir de toutes les rigidités calculées (une pour chaque ligne et une pour chaque valeur d'effort), une rigidité moyenne est calculée.

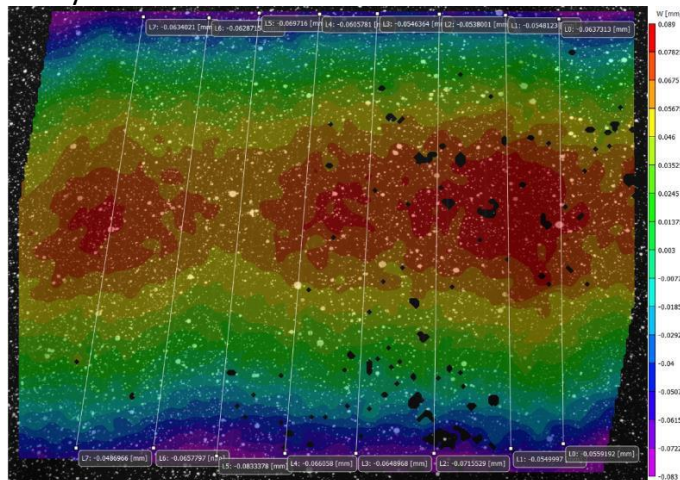
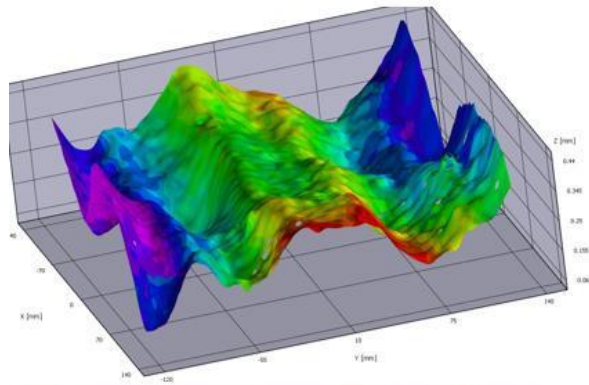


Figure 10 : Vue 2D du champ de déplacements suivant l'axe z pour l'essais de rigidité suivant l'axe x.

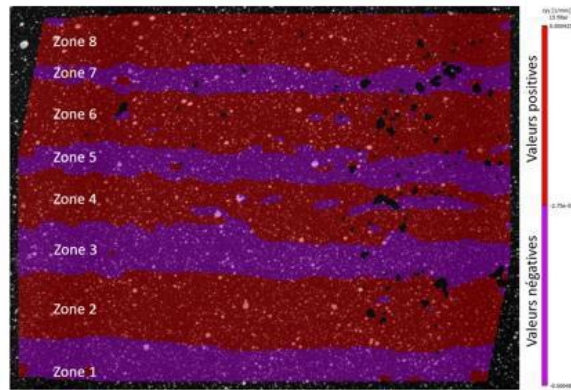
Analyse de données et calcul de rigidité suivant l'axe y (R_y)

La méthode de calcul de rigidité suivant l'axe y est la même que celle calculant la rigidité suivant l'axe x.

Toutefois, la méthode d'extraction et d'analyse de données est différente, car le panneau présente des ondulations (cf Figure 11) qui perturbent la forme parabolique des déplacements.



Vue 3D du champ de déplacement suivant l'axe z pendant l'essai de rigidité suivant l'axe y



Vue 2D du champ de courbure suivant l'axe y pendant l'essai de rigidité suivant l'axe y

Figure 11 : Ondulation perturbant le calcul de rigidité suivant l'axe y.

La méthode d'extraction et d'analyse est donc la suivante :

- Trois lignes horizontales (la position y et le déplacement w sont constants sur une ligne) ont été tracées dans chaque zone (cf Figure 11). Les lignes sont tracées d'un bord à l'autre de l'image (cf Figure 12a).
- Les variables de position y et de déplacement w sont extraites, puis les valeurs vides sont supprimées ;
- Pour chaque ligne les valeurs moyennes de y et w sont calculées, les lignes tracées sont alors transformées en points (cf Figure 12b) ;
- Les points $(y_{moy} ; w_{moy})$ sont séparés en deux groupes : ceux extraits et calculés dans les zones à courbure positive et ceux dans les zones à courbures négatives. Deux régressions polynomiales d'ordre deux et deux valeurs de rigidités ($R_{y moy}^{inf}$ et $R_{y moy}^{sup}$) sont calculées à partir de ces deux groupes.

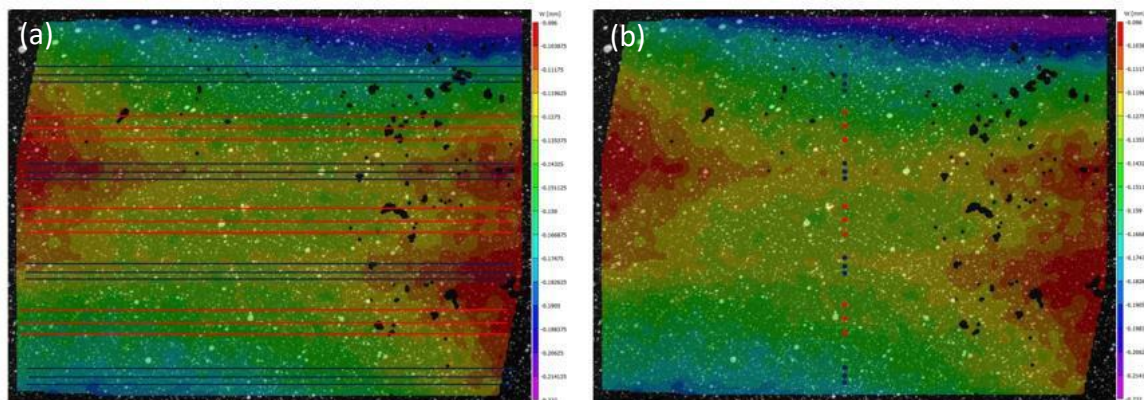


Figure 12 : Groupes d'extraction de variables.

Après avoir appliqué cette méthode d'extraction à différents essais, nous avons remarqué que pour obtenir une régression quadratique valide, il fallait que les données extraites respectent les points suivants :

- Les données doivent être extraites de manière symétrique par rapport au centre du panneau (cf Figure 11) qui se trouve dans la zone 4 de la Figure 11. Incidemment, aucune donnée ne sera extraite de la zone 8 ;
- Le calcul de régression doit être effectué avec plus de 3 zones. Le champ de vision des caméras (cf Figure 11) permet uniquement d'extraire, en respectant le point précédent, les données de quatre zones à courbures négatives (zones 1, 3, 5 et 7) et

de trois zones à courbures positives (zones 2, 4 et 6). La valeur de R_y retenue est donc celle calculée localement dans les zones à courbures négatives.

Analyse de données et calcul de rigidité pour une plaque en aluminium

Pour valider les méthodes développées, des essais de flexion sur une plaque, dont la rigidité théorique est connue grâce à la théorie de la résistance des matériaux, ont été réalisés. La comparaison entre la rigidité calculée expérimentalement et celle calculée analytiquement permet une validation partielle des méthodes.

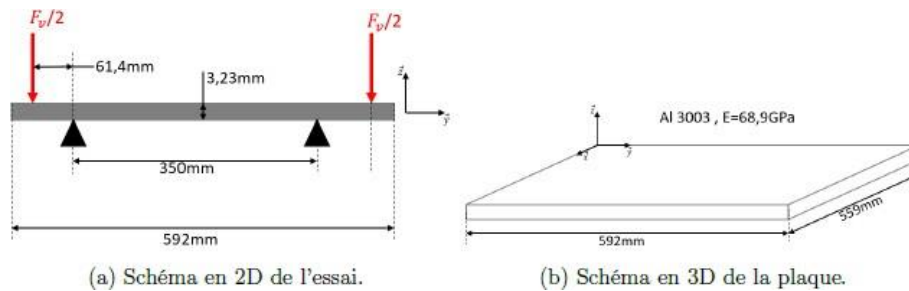


Figure 13 : Schéma de l'essai de la plaque en aluminium.

Résultats

Calcul de R_x :

R_{x-moy} (Nmm^2)	σ (Nmm^2)	Erreur %
1.26E10	8.13E8	-16.8

Table 1 : Résultats du calcul expérimental de R_x .

Calcul de R_y :

R_{th} Nmm^2	$R_y^{inf moy}$ (Nmm^2)	σ^{inf} (Nmm^2)	Erreur ^{inf} %
9.953E9	1.091E10	8.07E7	9.65

Table 2 : Résultats de calcul expérimental de R_y .

Calcul de la rigidité de la plaque :

Rigidité théorique	Rigidité déterminée avec la méthode de calcul pour R_x	Rigidité déterminée avec la méthode de calcul pour R_y
1.078E8 Nmm^2	1.308E8	$R_y^{inf moy} = 1.30E8$ et $R_y^{sup moy} = 1.30E8$
Écart type (Nmm^2)	6.35E6	$\sigma^{inf} = 5.81E6$ et $\sigma^{sup} = 6.22E6$
Erreur relative %	21.35	$e^{inf} = 20.90$ et $e^{sup} = 20.51$

Table 3 : Résultats de calcul expérimental de la rigidité de la plaque.

Comme indiqué précédemment, seule la valeur calculée avec les valeurs acquises dans les zones à courbures négatives est retenue. Il existe un écart important entre les valeurs de rigidité théoriques et expérimentales. Cela fait l'objet d'investigations plus poussées.

Optimisation de la forme du panneau par *Particle Swarm* (essai particulaire)

Après avoir défini le modèle de comportement du panneau, il faut trouver, en fonction de tous les paramètres possibles de fabrication, quel est le panneau optimal. Pour cela, il faut s'aider d'un algorithme d'optimisation stochastique permettant de trouver une valeur minimum dans un champ de possibilités à N-dimensions. En effet, les possibilités de formes du panneau sont très nombreuses, comme en témoigne la figure suivante.

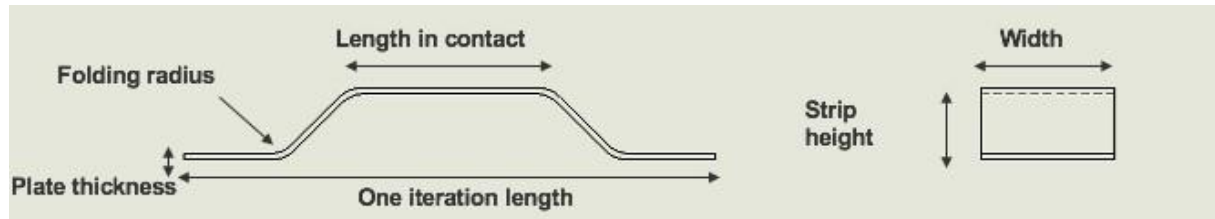


Figure 14 : Paramètres permettant la fabrication de l'âme du panneau.

La figure 14 présente la majeure partie des paramètres composant l'âme du panneau pour une seule itération et une seule bandelette. D'autres paramètres comme le nombre de bandelettes dans un panneau et le nombre d'itérations (périodes) dans une bandelette sont également à prendre en compte. Et ce n'est que pour les paramètres dits géométriques ; la topologie du panneau et l'assemblage des bandelettes (écartement) étant d'autres paramètres importants à prendre en compte.

C'est pourquoi, pour répondre à un tel problème d'optimisation, il a fallu se tourner vers un algorithme capable de traiter un nombre de calculs important pour trouver une valeur optimale : l'Algorithme par Essaim particulaire.

Résultats de l'optimisation

La figure 19 montre les résultats de l'optimisation pour un panneau avec une seule bandelette :

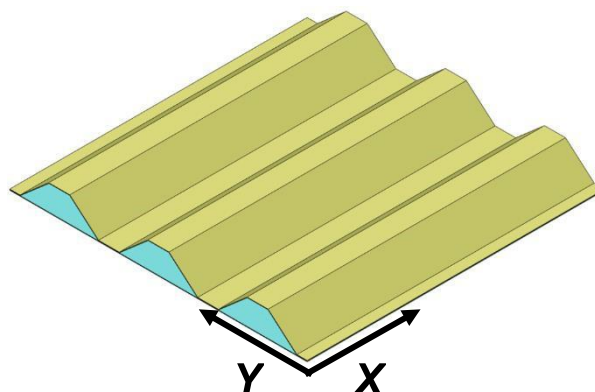


Figure 19 : Modélisation du résultat d'optimisation à une seule bandelette.

En fonction des contraintes imposées, on obtient un panneau 28 % plus lourd qu'un panneau en nid d'abeille aux mêmes dimensions, mais 10 fois plus rigide dans la direction X et aussi rigide dans la direction Y. Le temps de calcul de l'optimisation a été de 1,7 heure sur un

ordinateur personnel « ordinaire ».

Les résultats de l'optimisation pour le panneau à plusieurs bandelettes sont quant à eux, les suivants :

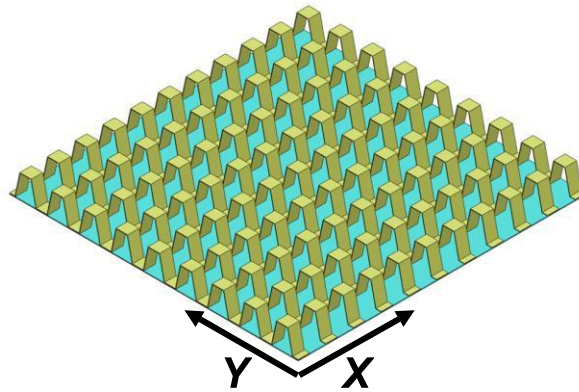


Figure 20 : Modélisation du résultat d'optimisation à plusieurs bandelettes dans une direction.

Le panneau obtenu est 8 % plus lourd qu'un panneau en nid d'abeille de mêmes dimensions, mais il est 3,73 fois plus rigide dans la direction X et aussi rigide dans la direction Y ; le temps de calcul de l'algorithme a été de 3,05 heures.

Conclusion

Une méthode de calcul de rigidité de panneaux structuraux, fondée sur des mesures expérimentales de déflexion utilisant la corrélation d'images, a été proposée. Une erreur de 20% entre les valeurs de rigidité théoriques et expérimentales a été observée et fait l'objet d'investigations plus poussées.

Les tests d'optimisation qui découlent des premières configurations de panneaux sont quant à eux prometteurs. En effet, le panneau à plusieurs bandelettes répond tout à fait au cahier des charges demandé : passages de services, rigidité supérieure au panneau à âme en nid d'abeille et masse comparable.

Les panneaux issus du processus d'optimisation développé, ouvrent enfin de nouvelles perspectives pour des travaux futurs, notamment sur des panneaux orthotropes avec bandelettes disposées dans les deux directions.

Bibliographie

- [1] C. Binetruy, « Structures sandwiches », *Matériaux : Etude et propriétés des métaux*, oct. 2008.
- [2] Y. Sun, L. Guo, T. Wang, S. Zhong, et H. Pan, « Bending behavior of composite sandwich structures with graded corrugated truss cores », *Composite Structures*, vol. 185, p. 446-454, févr. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.11.043.
- [3] C. Libove et R. E. Hubka, « Elastic constants for corrugated-core sandwich plate », p. 108.
- [4] T.-S. Lok et Q.-H. Cheng, « Elastic Stiffness Properties and Behavior of Truss-Core Sandwich Panel », *Journal of Structural Engineering*, vol. 126, n° 5, p. 552-559, mai 2000, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:5(552).
- [5] J. Difs et A. Ro, « Multi-scale modelling of corrugated core steel sandwich panels subjected to out-of-plane loads », p. 95.
- [6] « Control 2017 | GOM ». <https://www.gom.com/events/exhibitions/control-2017.html> (consulté le août 03, 2020).
- [7] M. Zubair et M. Moinuddin, « Joint Optimization of Microstrip Patch Antennas Using Particle Swarm Optimization for UWB Systems », *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, p. 1-8, 2013, doi: 10.1155/2013/649049.
- [8] A. E. M. Bouzid, « Optimisation par la méthode des essais particulaires d'une fonction trogonométrique ». 2009.