

# Conception et qualification de panneaux composites de cloisonnage

## *Design and validation of composite bulkhead*

Nicolas Calvet<sup>1,2</sup>, Christian Hochard<sup>1</sup>, Guilherme Machado<sup>1</sup>, Thomas Choynet<sup>2</sup>, Simon Vasseur<sup>2</sup>

1 : Matériaux et Structures, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique  
LMA - UMR 7031 AMU - CNRS - Centrale Marseille  
4, impasse Nikola Tesla  
CS 40006  
13453 Marseille Cedex 13  
e-mail : lma@lma.cnrs-mrs.fr

2 : IDEOL  
Espace Mistral - Bât B  
375, avenue du Mistral  
13600 La Ciotat  
e-mail : contact@ideol-offshore.com

### Résumé

Le projet de recherche a pour origine une application industrielle dans l'éolien offshore flottant dans laquelle une membrane en matériau composite est soumise à une pression latérale produisant une grande déflexion. Pour reproduire ce chargement en laboratoire, une machine d'essais est conçue afin de réaliser des essais de gonflement sur une membrane circulaire en matériau composite. L'objectif est de produire un chargement biaxial uniforme sur la membrane. Pour ce faire, la membrane est bridée et mise sous une pression uniforme à l'aide d'un fluide hydraulique. La corrélation d'images numériques en trois dimensions est utilisée pour mesurer le champ de déplacements de la membrane pour différents niveaux de chargement statique. Les contraintes au sein de la membrane sont calculées à partir des courbures mesurées, ce qui permet de déterminer les propriétés du matériau. Enfin, les résultats expérimentaux sont comparés à une modélisation par éléments finis.

### Abstract

The origin of this research project is an industrial application in the field of floating offshore wind in which a composite membrane is under a lateral pressure producing a large deflection. To simulate this load in laboratory, a test device is designed to perform bulge tests with a circular membrane made from a composite material to get a uniform biaxial load on the membrane. To do that, the membrane is fixed between two flanges and put under pressure by a hydraulic fluid. Digital Image Correlation in three dimensions is used to measure the displacements field for several level of static load. Stresses in the membrane are calculated from the measured curvatures allowing to get the material properties. Finally, experimental results are compared to a finite element model.

**Mots Clés** : membrane composite, essai de gonflement, corrélation d'images numériques 3D, méthode des éléments finis

**Keywords** : composite membrane, bulge test, 3D digital image correlation, finite element method

## 1. Introduction

La transition énergétique actuelle voit émerger de nouveaux moyens de production d'énergie. Parmi ceux-ci, l'éolien offshore flottant est une solution ayant sa carte à jouer dans le futur mix énergétique grâce à ses nombreux avantages : production d'énergie sans émission de CO<sub>2</sub>, utilisation du vent qui est une source d'énergie renouvelable, l'aspect flottant permet de s'éloigner des côtes pour profiter d'un vent plus constant et de réduire l'impact visuel depuis les côtes, la construction des flotteurs permet la création d'emplois locaux, etc... Dans ce contexte, la société IDEOL a développé un nouveau type de flotteur pour les éoliennes offshore avec la technologie Damping Pool<sup>®</sup> permettant un amortissement des mouvements de l'ensemble de l'éolienne et de sa fondation flottante. Cette fondation flottante peut être fabriquée en acier ou en béton. Le projet de

recherche présenté dans cet article a pour but d'intégrer des matériaux composites au flotteur en béton afin d'optimiser sa masse. Le composant faisant l'objet de notre étude est un panneau subissant une pression latérale. Afin de concevoir et de qualifier ce nouveau composant, une modélisation numérique et des essais mécaniques sont réalisés. La solution étudiée est une membrane, c'est-à-dire une structure ayant un rapport entre son épaisseur et sa longueur caractéristique suffisamment faible pour que sa rigidité en flexion soit négligeable. Une première partie de l'étude a consisté à concevoir un banc d'essais pour caractériser cette membrane. Le but des essais étant d'obtenir une réponse du matériau similaire à celle obtenue dans l'application finale dans laquelle le chargement est biaxial, un essai de traction uniaxial serait inadapté et un essai biaxial doit donc être réalisé. Parmi les nombreux essais biaxiaux existants et étant donné la géométrie et le chargement que subit la structure dans l'application finale, l'essai le plus adapté est l'essai de gonflement sur une plaque. Un matériau composite verre/époxy est sélectionné pour convenir à l'application dans l'éolien offshore. Ce matériau est mis en œuvre sous forme d'un stratifié quasi-isotrope composé de plusieurs plis. L'épaisseur de ces plis constitue une limite concernant les dimensions de la membrane car celle-ci doit avoir un rapport épaisseur sur longueur très faible. Le respect d'un certain rapport épaisseur sur longueur a donc été le critère déterminant les dimensions du banc d'essai à concevoir. La corrélation d'images numériques en 3D permet de mesurer les courbures de la membrane gonflée. Les contraintes au sein du matériau sont déterminées sans considérer le comportement constitutif du matériau. Elles sont calculées à partir des courbures, de la pression appliquée et de l'épaisseur de la membrane. L'essai de gonflement constitue ainsi un essai de caractérisation du matériau. Enfin, les résultats des essais mécaniques sont comparés aux résultats de la modélisation par éléments finis afin de développer un outil fiable de dimensionnement de membranes composites sous pression.

## **2. Conception d'une membrane en matériau composite**

### **2.1 Exemples de membranes**

Une membrane est une structure ayant un rapport épaisseur sur longueur caractéristique (côté d'un rectangle ou rayon pour une forme circulaire) très faible (on le donne souvent inférieur à 1/50) travaillant en tension dans son plan. Sa rigidité en flexion est négligée. La conception d'une structure en matériaux composite ayant un comportement de membrane permet un allègement considérable par rapport à une version classique en métal. Des cloisons pour la pressurisation des fuselages d'avion ont été construites en matériaux composites en forme de dôme afin d'obtenir des contraintes essentiellement dans le plan et permettent un gain de masse considérable [1,2]. Une autre application se trouve dans la conception de réservoirs sous pression qui peuvent également être fabriqués en matériaux composites et avoir un comportement de membrane. De nombreux exemples sont présents dans le domaine de l'architecture où des membranes mises en tension sont utilisées comme éléments de couverture [3]. Dans le domaine nautique, les voiles de bateaux peuvent également être vues comme des membranes d'un point de vue mécanique. Cet article présente un projet de recherche concernant une nouvelle application des membranes composites : celle d'une membrane composite intégrée dans une structure de génie civil en béton pour la production d'énergie en éolien offshore.

### **2.2 Solution étudiée**

La solution étudiée dans ce projet de recherche est une membrane en matériau composite stratifié de type verre/époxy qui est soumise à une pression latérale produisant une grande déflexion, c'est-à-dire un déplacement dans la direction normale à la membrane significativement plus grand que l'épaisseur de celle-ci. Ce choix a été fait pour permettre d'avoir une structure très légère. La fibre de verre a été choisie car elle est peu onéreuse, elle a une déformation à rupture et une résistance

très élevées et c'est un matériau déjà très utilisé dans le domaine nautique et l'effet de l'environnement marin sur celui-ci est donc connu.

Une première partie de l'étude a consisté à concevoir une structure pour les essais mécaniques ayant des dimensions permettant de rester dans un comportement de membrane. Plusieurs critères ont permis d'évaluer le comportement membrane de la structure. Une première approche a été de considérer une structure ayant un rapport épaisseur sur longueur inférieure à  $1/50$ . Ensuite, l'analyse des contraintes permet d'avoir un éclairage sur le comportement membrane de la structure. Une membrane sous pression travaille en tension dans son plan alors qu'une plaque épaisse sous le même chargement travaille en flexion. La comparaison des contraintes sur la peau supérieure et sur la peau inférieure de la membrane permet de voir si la structure est en tension ou en flexion. Lorsque les contraintes sont de même signe sur la peau supérieure et inférieure, la structure est en tension et peut être considérée comme une membrane. Lorsque les contraintes sont de signes opposés sur la peau supérieure et inférieure, la structure est en flexion et ne peut pas être considérée comme une membrane mais comme une plaque en flexion. L'analyse a été faite pour plusieurs dimensions pour observer l'impact du rapport épaisseur sur longueur sur le comportement membrane (Fig. 1).

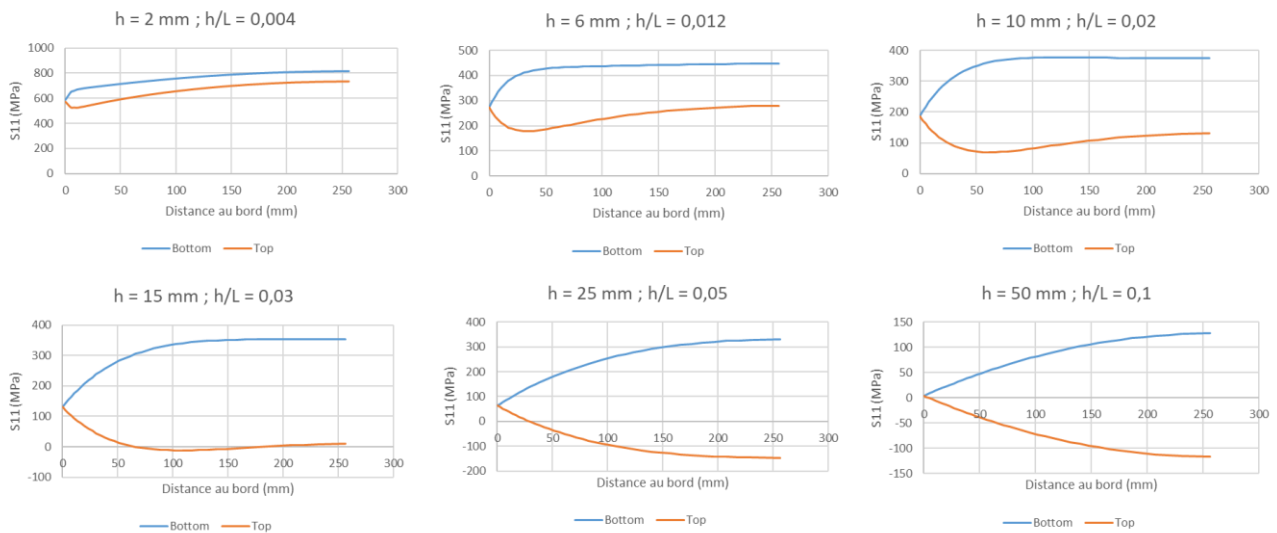


Fig. 1. Influence du rapport épaisseur sur longueur ( $h/L$ ) sur le comportement membrane

La figure 1 montre les contraintes depuis le bord d'une membrane circulaire jusqu'à son centre. Pour un rapport épaisseur sur longueur de  $0,1$ , on voit que les contraintes de la peau supérieure et inférieure de la membrane sont de signes opposés du bord jusqu'au centre de la membrane. Ce résultat est caractéristique d'une plaque en flexion. Pour un rapport épaisseur sur longueur de  $0,004$ , les contraintes de la peau supérieure et inférieure sont de même signe et quasiment égales du bord jusqu'au centre. Ce résultat est caractéristique d'une membrane en tension. Les figures représentant les résultats entre les deux valeurs extrêmes de rapport épaisseur sur longueur illustrent la transition entre le comportement d'une membrane en tension et le comportement d'une plaque en flexion.

Un autre élément d'analyse est de comparer le modèle numérique à un modèle analytique. La membrane étudiée dans le projet de recherche subit une grande déflexion (un déplacement maximal dans la direction normale au plan de la membrane considérablement plus grand que l'épaisseur de la membrane). La théorie en petite déflexion n'est donc pas suffisante dans notre cas (voir Fig. 2). Le modèle analytique repose alors sur les solutions aux équations aux dérivées partielles non-linéaires de Föppl – von Kármán développées en 1907 [4]. Ces équations ont été résolues approximativement par Hencky en 1921 [5], Föppl en 1924 [6] et Seide en 1977 [7]. D'après ces résultats, la déflexion s'exprime par (Eq. 1) :

$$w = \eta h \left[ \frac{p_0}{E} \left( \frac{a}{h} \right)^4 \right]^{1/3} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec :

$w$  : la déflexion ;

$\eta$  : un coefficient sans dimension dépendant du modèle (voir Tab. 1) (Dans le modèle « exact value » de la Fig. 3,  $\eta = \frac{[3(1-\nu^2)]^{1/3}}{4}$ . Pour  $\nu = 0.3$ ,  $\eta = 0,3494$ .) ;

$h$  : l'épaisseur de la plaque ;

$p_0$  : la pression uniforme appliquée ;

$E$  : le module d'Young ;

$a$  : la largeur de la plaque.

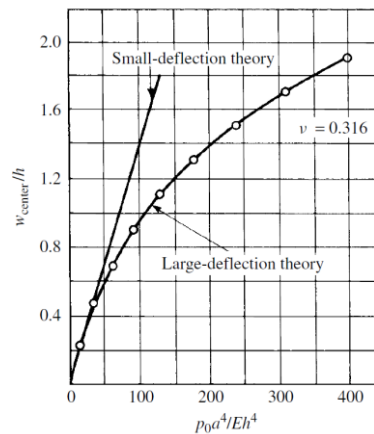


Fig. 2. Déflexion d'une plaque carrée soumise à une pression latérale [8]

	Seide	Hencky	Föppl
$\eta$	0,2866	0,284	0,317

Tab. 1. Coefficients des solutions analytiques

Le modèle analytique, par les simplifications qu'il fait, n'est valable que pour un comportement membrane. La comparaison de la déflexion de la membrane obtenue à partir de la modélisation par éléments finis avec les résultats obtenus à partir du modèle analytique permet de déterminer à partir de quel rapport épaisseur sur longueur la réponse de la structure ne correspond plus au modèle analytique (Fig. 3). Le modèle analytique n'étant valable que pour un comportement membrane, le rapport épaisseur sur longueur à partir duquel les résultats ne coïncident plus peut être considéré comme la limite à partir de laquelle la structure ne peut plus être considérée comme une membrane.

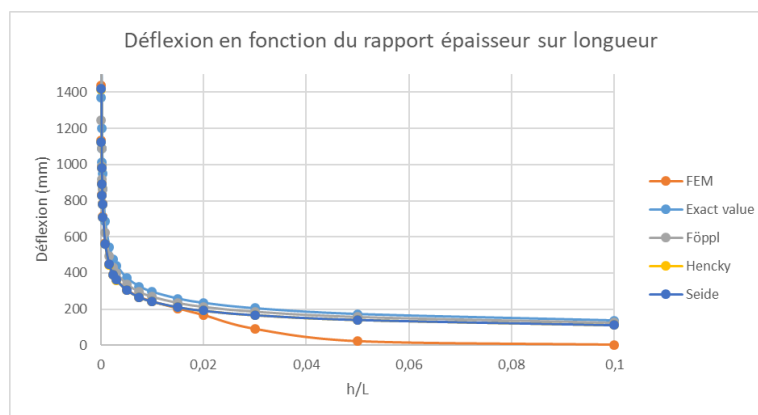


Fig. 3. Comparaison du modèle éléments finis avec les modèles analytiques

La figure 3 montre que les modèles analytiques correspondent bien aux résultats obtenus avec la modélisation par éléments finis pour un rapport épaisseur sur longueur inférieur à 1/50 mais divergent de ceux-ci au-delà de cette valeur. Cette comparaison permet de nous renseigner sur la validité des modèles analytiques qui peuvent être utilisés comme un outil simple de prédimensionnement d'une membrane sous pression latérale en grande déflexion comme c'est le cas dans notre application.

### 3. L'essai biaxial

Un essai biaxial consiste à charger une structure selon deux directions de contraintes simultanément. Plusieurs types d'essais biaxiaux existent. Une revue des différents essais biaxiaux existants pour les matériaux composites a été faite par Makris et al. [9] dans laquelle ces essais sont classés dans deux catégories : les essais utilisant un seul système de chargement et les essais utilisant au moins deux systèmes de chargement. Dans la première catégorie, la proportion des contraintes dans les deux axes dépend de la géométrie de l'éprouvette et de la configuration de la fixation alors que dans la seconde catégorie elle est directement gérée par l'intensité des chargements appliqués (fig. 4 et 5 [10]).

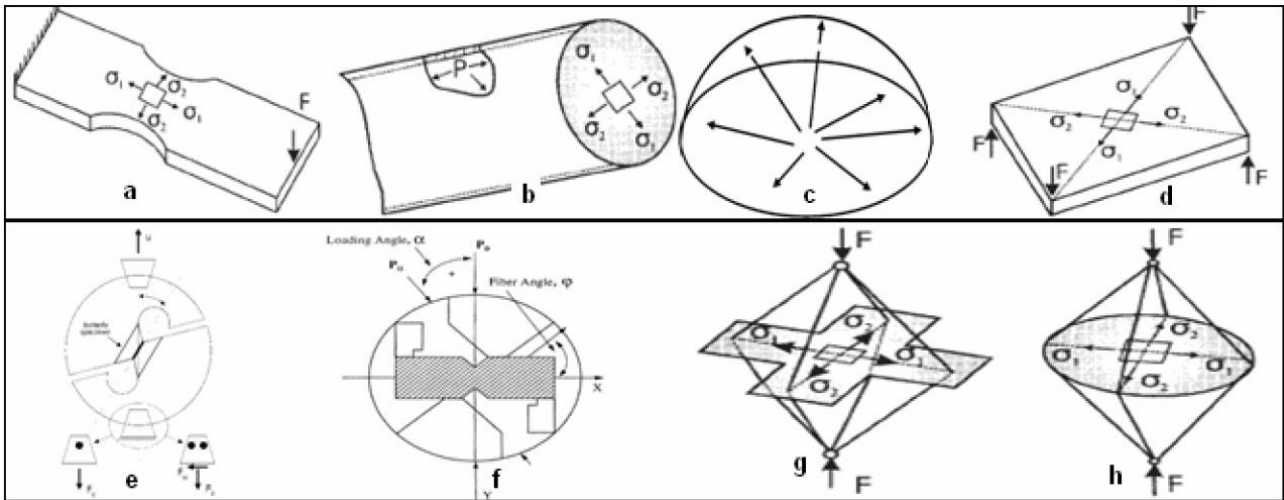


Fig. 4. Essais biaxiaux avec un système de chargement : a) Flexion sur poutre console ; b) Essai de gonflement sur tube ; c) Essai de gonflement sur plaque ; d) Flexion anticlastique ; e) Méthode Arcan ; f) Méthode Iosipescu ; g,h) Montages spéciaux.

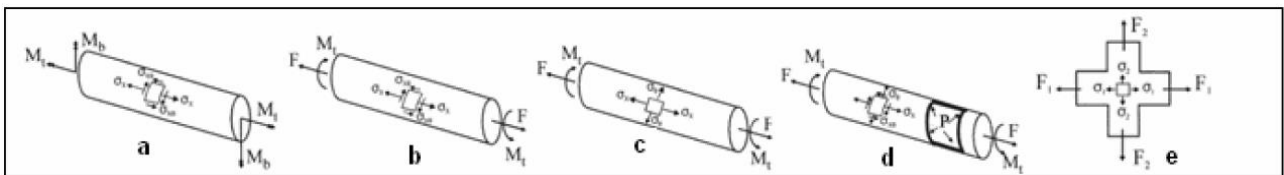


Fig. 5. Essais biaxiaux avec plusieurs systèmes de chargement : a) Barre en flexion – torsion ; b) Tube en torsion-traction ; c) Tube en traction sous pression ; d) Tube en flexion-torsion sous pression ; e) Epreuve cruciforme sous chargement biaxial.

On retrouve dans la première catégorie les essais de flexion sur poutre console, les essais de flexion anticlastique sur des plaques rectangulaires ou rhomboïdales, les essais de gonflement, les chargements équi-biaxiaux sur des éprouvettes en forme de disque, les essais sur des éprouvettes cruciformes avec un pantographe spatial par lequel est transmis l'effort appliqué, les essais sur éprouvettes en forme de papillon sur des montages Arcan et des essais sur montage Iosipescu. Dans la seconde catégorie, on retrouve des barres sous flexion/torsion, des tubes soumis à une

combinaison de chargement axial et de torsion ou bien de pression interne ou externe et des éprouvettes cruciformes sous chargement biaxial dans le plan.

Le travail de recherche présenté dans cet article contribue à l'acquisition de données expérimentales dans les essais biaxiaux sur des matériaux composites en se distinguant de l'essai biaxial sur éprouvette cruciforme qui est plus répandu. Le choix d'utiliser l'essai de gonflement sur une plaque circulaire a été fait pour se rapprocher au maximum de la configuration de l'application finale dans laquelle une membrane est soumise à une pression latérale.

## 4. Dispositif expérimental

### 4.1 Conception du banc d'essais

Afin de faire des essais de gonflement sur la membrane en composite, la conception d'un banc d'essais a été faite. La contrainte était de respecter un certain rapport épaisseur sur longueur pour rester dans un comportement de membrane en limitant la flexion au maximum tout en restant dans des dimensions contenues. Le montage est inspiré de la norme ISO 1808 [11] qui concernent la détermination de la courbe contrainte-déformation biaxiale au moyen de l'essai de gonflement hydraulique avec systèmes de mesure optiques. Le principe est de fixer une membrane à son bord entre deux brides et de la faire gonfler en appliquant une pression sur une de ses faces jusqu'à rupture. La déformation de la membrane et la pression appliquée sont mesurées au cours de l'essai.

Plusieurs éléments constituent le montage d'essai :

- Dans notre cas, la fixation est assurée par deux brides en acier : une bride pleine et une bride plate de 730 mm de diamètre laissant une zone libre à la membrane de 513,5 mm (Fig. 6 et 7). 20 boulons en dimension M33 sont utilisés pour le serrage de l'ensemble devant résister à l'effort résultant de la pression appliquée sur la membrane.
- La pression est appliquée à l'aide d'une pompe hydraulique permettant une montée en pression progressive jusqu'à la rupture de la membrane composite.
- Deux caméras enregistrent les images de la déformation de la membrane et la corrélation d'images numériques détermine le déplacement de chaque point d'un mouchetis de peinture à chaque instant d'enregistrement de la caméra.
- Une membrane en fluoroélastomère est placée entre le fluide sous pression et la membrane composite afin d'assurer l'étanchéité au niveau de la fixation et pour éviter des projections du fluide au moment de la rupture de la membrane composite. La membrane en fluoroélastomère est choisie pour sa déformation à rupture qui est beaucoup plus importante que celle de la membrane composite ( $\geq 165\%$  contre environ  $1,5\%$  pour le composite) afin de ne pas rompre avant la membrane composite, son module de Young beaucoup plus faible que celui de la membrane composite (environ 2000 fois plus faible) pour ne pas perturber la déformation de cette dernière et ses qualités de résistance à l'huile pour une durabilité de ses propriétés mécaniques.
- La membrane composite est un stratifié quasi-isotrope fabriqué à partir de plis tissés en fibres de verre préimprégnées d'une matrice époxy. L'épaisseur d'un pli est d'environ 0,25 mm et constitue une limite inférieure d'épaisseur de la membrane. Le stratifié doit être quasi-isotrope car le chargement est uniforme selon toutes les directions. Cet aspect constitue également une limite en épaisseur de la membrane car pour avoir un stratifié quasi-isotrope il est nécessaire de le fabriquer en plaçant les plis dans plusieurs directions et cela entraîne donc une augmentation inévitable du nombre de plis. La membrane composite doit être plate et doit donc avoir une séquence de drapage symétrique (les orientations des plis doivent être symétriques par rapport au plan médian du stratifié), ce qui entraîne une multiplication par deux du nombre de plis.

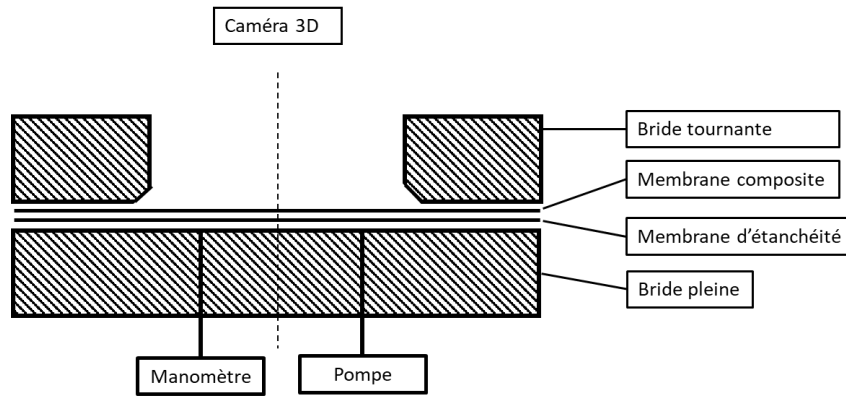


Fig. 6. Schéma du montage d'essai

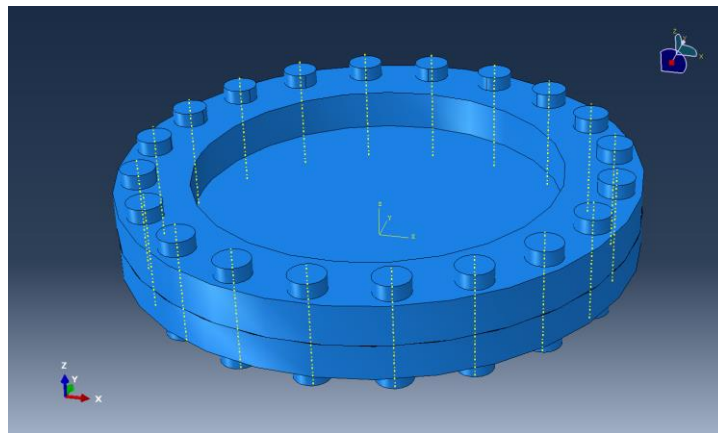


Fig. 7. Dessin numérique du montage d'essai : Membrane composite fixée entre deux brides

#### 4.2 Mesure de champ par corrélation d'images numériques

La corrélation d'images numériques en trois dimensions est une technique expérimentale permettant de mesurer le champ de déplacements à la surface d'un objet. Elle est utilisée par exemple en 2D pour des essais sur des éprouvettes cruciformes en composite [12] ou bien en 3D pour des essais de gonflement sur des membranes en polymère [13] ou en métal. Cette technique est basée sur la comparaison d'images prises à différents niveaux de déformation et donc de chargement. Pour cela, la surface sur laquelle la mesure est faite doit avoir une texture ou un mouchetis de peinture pour que chaque point de référence ait un niveau de gris qui lui est propre pour être identifié et suivi. Dans notre cas, la corrélation d'images numériques en 3D permet de mesurer la déflexion de la membrane qui peut être comparée à la modélisation par éléments finis. Elle permet également de mesurer les courbures en chaque point de la membrane. Celles-ci permettent de calculer les contraintes au sein du matériau, l'essai effectué constitue ainsi un essai de caractérisation mécanique du matériau utilisé. En supposant un mouvement quasi statique, les équations d'équilibre en chaque point pour une membrane isotrope axisymétrique peuvent être exprimées par (Eq. 2 et Eq. 3 [14]) :

$$\sigma_m = \frac{P}{2h\kappa_c} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\sigma_c = \frac{P}{2h\kappa_c} \left( 2 - \frac{\kappa_m}{\kappa_c} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec :

- $\sigma_m$  : la contrainte méridienne ;
- $\sigma_c$  : la contrainte circonférentielle ;
- $P$  : la pression normale agissant uniformément ;
- $h$  : l'épaisseur courante ;
- $\kappa_c$  : la courbure circonférentielle ;
- $\kappa_m$  : la courbure méridienne.

La corrélation d'images numériques utilisée au cours de l'essai de gonflement nous permet donc de déterminer le comportement du matériau sous chargement biaxial. A partir des résultats des essais mécaniques, une modélisation par éléments finis fidèle à la réalité peut être développée pour le dimensionnement de membranes en matériaux composites pour l'application finale.

## 5. Modèle numérique

Afin d'estimer la réponse de la membrane composite au chargement biaxial, une modélisation numérique par la méthode des éléments finis a été faite. Cela permet de connaître approximativement la déflexion de la membrane et la pression appliquée pour laquelle la rupture interviendra en connaissant la déformation à rupture du matériau utilisé. Ce modèle sera ensuite évalué et modifié pour correspondre aux résultats expérimentaux.

### 5.1 Détails de la modélisation

La modélisation est faite par la méthode des éléments finis avec le logiciel Abaqus. Une membrane est modélisée par une coque de 2 mm d'épaisseur. Des propriétés élastiques homogénéisées calculées à partir de la théorie des stratifiés sont utilisées pour définir le comportement du matériau. L'analyse est faite avec le mode non-linéaire géométrique activé. Une pression de 4 MPa est appliquée de manière uniforme sur une face de la membrane. Les déplacements et la rotation autour de l'axe tangentiel au bord de la membrane sont bloqués pour reproduire les conditions aux limites de la membrane fixée entre les deux brides dans l'essai de gonflement. La membrane est maillée par des éléments linéaires (quadrilatères à 4 nœuds).

### 5.2 Résultats

Un stratifié de type verre/époxy a une déformation à rupture d'environ 1,5%. Les résultats montrent que pour une pression appliquée de 1,73 MPa, la déflexion est de 37,57 mm (Fig. 8) et la déformation maximale est de 1,628 %, ce qui correspond environ à la rupture de la membrane. La rupture de la membrane composite devrait donc apparaître approximativement à ce niveau de chargement. La figure 8 montre la déformation de la membrane sans appliquer de facteur d'échelle.

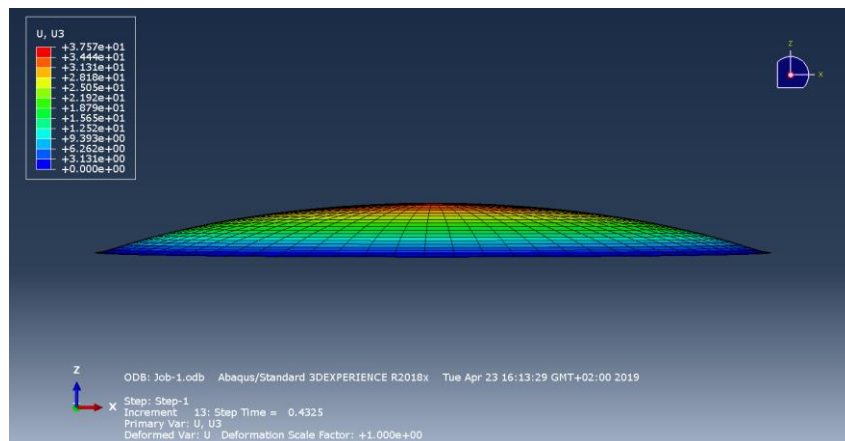


Fig. 8. Déplacements de la membrane sous une pression de 1,73 MPa



Cette modélisation permet de prédire approximativement la réponse de la membrane composite sous une pression latérale. Ces résultats devront être comparés aux résultats expérimentaux afin de déterminer si la modélisation par éléments finis décrit suffisamment bien le comportement mécanique de la membrane pour être utilisé comme outil de dimensionnement. Dans le cas contraire, la modélisation par éléments finis sera modifiée pour décrire plus fidèlement le comportement de la membrane composite sous pression latérale.

## 6. Conclusion

Une membrane en matériau composite sous pression latérale en grande déflexion est étudiée. Un banc d'essai a été conçu afin de réaliser des essais biaxiaux sur cette membrane afin de la caractériser. Une étude préliminaire a permis de déterminer les dimensions nécessaires pour que la structure en matériau composite soit sollicitée dans un régime de membrane. Un montage expérimental a été conçu en respectant ce critère. Une modélisation par éléments finis a été faite afin de prédire la réponse de la membrane à la pression appliquée et de préparer un modèle numérique qui sera réajusté en fonction des résultats des essais mécaniques. Ce travail de recherche sur l'essai de gonflement d'une membrane composite contribue au développement des essais biaxiaux sur les matériaux composites. La suite des travaux consistera à utiliser le banc d'essai conçu pour réaliser les essais biaxiaux.

## Références

- [1] S. Venkatesh, M. Govindan Kutty, B. Varughese, G. Kotresh, S. Manju, A. Rinku R. & Sundaram, « Design of a composite rear pressure bulkhead for a light transport aircraft », ISAMPE National Conference on Composite Structures (ISAMPE-8), 2009
- [2] S. Roth, D. Benz, A. Reichle, R. Teske, P. Zimmermann, P. Hager, W. Poenitzsch, « Fiber reinforced pressure bulkhead with integrated frame », United States Patent, 1991
- [3] G. Colasante, « Tensile structures: biaxial testing and constitutive modelling of coated fabrics at finite strains », 2014.
- [4] A. Föppl, « Vorlesungen über Technische Mechanik », Vol. 5, p. 132, 1907.
- [5] H. Hencky, « Die Berechnung dünner rechteckiger Platten mit verschwindender Biegesteifigkeit », ZAMM 1, 81-89, 1921.
- [6] A. Föppl et L. Föppl, « Drang und Zwang », 2nd Edition, Vol. 1, p. 226. R. Oldenbourg, Munich, 1924.
- [7] P. Seide, « Large deflection of rectangular membranes under uniform pressure », Int. J. Non-Linear Mechanics, Vol. 12, pp. 397-406, 1977.
- [8] K. Marguerre, « Neue Festigkeitsprobleme des Ingenieurs », Springer-Verlag, Berlin, 1950.
- [9] A. Smits, C. Ramault, A. Makris, D. Van Hemelrijck, A. Clarke, C. Williamson, M. Gower, R. Shaw, R. Mera, E. Lamkanfi, W. Van Paepgem, « A Review of Biaxial Test Methods for Composites », in Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures, E.E. Gdoutos, ed. (Dordrecht: Springer Netherlands), pp. 933–934, 2007.
- [10] A. Zouani, T. Bui-Quoc, M. Bernard, « A proposed device for biaxial tensile fatigue testing », in Fatigue and Fracture, ASME PVP-323, vol 1, 331-339, 1996.
- [11] International standard, « Metallic materials – Sheet and strip – Determination of biaxial stress-strain curve by means of bulge test with optical measuring systems », ISO 16808, 2014.
- [12] D. Van Hemelrijck, C. Ramault, A. Makris, A. Clarke, C. Williamson, M. Gower, R. Shaw, R. Mera, E. Lamkanfi, W. Van Paepgem, « Biaxial testing of fibre reinforced composites », 16<sup>th</sup> International conference on composite materials, 2007.
- [13] G. Machado, D. Favier, G. Chagnon, « Membrane Curvatures and Stress-strain Full Fields of Axisymmetric Bulge Tests from 3D-DIC Measurements. Theory and Validation on Virtual and Experimental results ». in Experimental Mechanics 52, 865–880, 2012.
- [14] R. Hill, « A theory of the plastic bulging of a metal diaphragm by lateral pressure », in The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 41, 1133–1142, 1950.