

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR : MÉCANIQUE,  
PHYSIQUE, MICRO ET NANOÉLECTRONIQUE

LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET D'ACOUSTIQUE

BW IDEOL

## THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ D'AIX-MARSEILLE

DISCIPLINE : SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE DES SOLIDES

par

Nicolas CALVET

---

Conception d'une membrane composite sous  
pression et de sa liaison flexible

---

Soutenue le 30 septembre 2021 devant le jury composé de :

Christophe BOIS	Professeur des Universités, I2M	Rapporteur
Jean-François CARON	Directeur de Recherche, Laboratoire Navier	Rapporteur
Bruno CASTANIE	Professeur des Universités, Institut Clément Ader	Examineur
Caroline PETIOT	Docteur, Composite Senior Scientist, Airbus SAS	Examinatrice
Thomas CHOISNET	Directeur Technique et Innovation, BW Ideol	Invité
Simon VASSEUR	Resp. Ingénierie Structure et Mécanique, BW Ideol	Invité
Guilherme MACHADO	Maître de Conférence AMU/LMA	Co-encadrant
Christian HOCHARD	Professeur AMU/LMA	Directeur de thèse

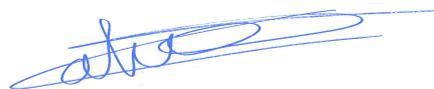
Numéro national de thèse/suffixe local : 2017AIXM0001/001ED62



Je soussigné, Nicolas Calvet, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Christian Hochard et Guilherme Machado, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Marseille le 31 juillet 2021



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



# Résumé

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse de doctorat s'inscrivent dans le cadre d'une thèse en Convention Individuelle de Formation par la Recherche avec l'entreprise BW Ideol qui a développé un flotteur pour éolienne en mer. Ce flotteur est compartimenté afin d'assurer sa flottabilité en situation accidentelle dans laquelle une voie d'eau apparaîtrait. L'objectif de la thèse est d'étudier une solution de type membrane pour le cloisonnage de ce flotteur. La structure étudiée est une membrane subissant une pression latérale dont les bords sont fixés. Les travaux s'articulent autour d'analyses numériques avec des modélisations par éléments finis de la solution étudiée et de travaux expérimentaux permettant de valider les solutions retenues. La conception de montages d'essais mécaniques permet d'effectuer ces travaux expérimentaux dans des dimensions réduites par rapport aux cloisons réelles. La dimension des montages d'essais doit être suffisante pour permettre une sollicitation en membrane pour correspondre à la solution étudiée mais doit permettre des essais en laboratoire. La fabrication des membranes testées est faite à partir de matériaux composites de type fibres de verre préimprégnées de résine époxyde. Plusieurs stratifiés sont testés et comparés afin de déterminer la meilleure solution pour la conception des cloisons. Des essais mécaniques sont faits sur des membranes circulaires et carrées. Une liaison flexible est conçue afin de maximiser la tenue de la membrane en réduisant la courbure du bord de celle-ci qui provoque sa rupture prématurée. La pression appliquée et les déformations de la membrane sont mesurées au cours de l'essai et comparées aux résultats numériques obtenus par la modélisation par éléments finis. Une mesure de champ est faite avec deux caméras en utilisant la corrélation d'images numériques en trois dimensions. Cela permet de mesurer les déplacements et déformations de toute la surface de la membrane et également de mesurer les courbures principales de celle-ci afin de calculer les contraintes au sein de la membrane circulaire. Les résultats obtenus à échelle réduite sont extrapolés vers l'échelle réelle afin de dimensionner la cloison de BW Ideol. Des méthodes de fabrication adaptées à l'échelle réelle sont proposées. Celles-ci sont testées avec des essais réalisés sur un nouveau montage d'essai permettant de valider ces méthodes.

Mots clés : cloison, matériaux composites, membrane, essai de gonflement



# Abstract

The research work presented in this doctorate thesis are in the frame of a collaboration with BW Ideol which developed a wind turbine floating foundation. This foundation is partitioned to ensure its buoyancy in an accidental case where a hole in the hull lead to a water filling of the structure. The thesis purpose is to study a membrane solution to design the floating foundation bulkheads. The structure studied is a membrane under lateral pressure with clamped edges. A membrane is a plate with no bending stiffness and with constant stress through its thickness. This work is based on numerical analysis with finite element analysis and experimental work to validate the solution. Design of test devices allows to perform tests on reduced-scale bulkheads. Test devices size must lead to a membrane sollicitation of the structure tested but cannot be too large to be feasible in a laboratory. Membranes tested are made from epoxy resin pre-impregnated glass fibres. Several laminates are tested and compared to find the best solution for the bulkheads design. Tests are done with circular and square membranes. To maximize the membrane strength, a flexible part is designed to reduce curvature at the membrane edge. This allows to reduced stress concentration at the edge and homogenize stress on the whole structure. Pressure and strain are registered and compared to the numerical analysis. Two cameras are used to measure the whole surface displacement and deformation and to measure principal curvature of the circular membrane. This allows to calculate principal stress inside the membrane without knowing the material behaviour. Reduced-scale results are extrapolated to the real scale and the real bulkhead is designed, showing that the composite membrane is a solution to design a very light bulkhead.

Keywords: bulkhead, composite materials, membrane, bulge test



# Table des matières

Résumé	III
Abstract	V
Table des matières	VII
Table des figures	XI
Liste des tableaux	XXI
Introduction	1
<b>1 Contexte et objectif</b>	<b>5</b>
1.1 Contexte industriel	7
1.1.1 L'éolien en mer flottant et BW Ideol	7
1.1.2 Les matériaux composites dans les applications marines	8
1.1.3 Les matériaux composites dans le secteur du génie civil	9
1.1.4 Les cloisons internes du flotteur de BW Ideol	10
1.1.5 Structures similaires existantes	12
1.2 Objet d'étude : membrane en matériau composite sous pression en grande déflexion	14
1.2.1 Hypothèses vérifiées par une membrane	14
1.2.2 Comparaison de la solution membrane à la solution de plaque en flexion	14
1.2.3 Modèle analytique de membranes sous pression en grande déflexion	15
1.2.4 L'essai de gonflement	19
1.3 Objectifs de la thèse	20
<b>2 Conception d'un montage d'essai de gonflement</b>	<b>21</b>
2.1 Détermination de la taille du montage d'essai	23
2.1.1 Objectif	23
2.1.2 Analyse numérique par éléments finis des contraintes dans l'épaisseur de plaques carrées	23
2.1.3 Validité des solutions analytiques en fonction du rapport épaisseur sur longueur	26
2.1.4 Validation de la taille du montage en configuration circulaire	27
2.1.5 Conclusion	31

## Table des matières

2.2	Montage d'essai conçu . . . . .	32
2.2.1	Description du montage . . . . .	32
2.2.2	Modélisation par éléments finis de la déformation des brides de fixation . . . . .	35
2.2.3	Calcul du serrage et de la tenue des vis de fixation . . . . .	37
2.2.4	Conception d'un masque pour tester des membranes carrées . . . . .	38
2.3	Conclusion . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Membranes circulaires</b>	<b>43</b>
3.1	Modélisation par éléments finis d'une membrane circulaire sous pression idéale . . . . .	45
3.2	Conception d'une liaison flexible optimale . . . . .	50
3.2.1	Essais préliminaires réalisés sans liaison flexible optimale . . . . .	50
3.2.2	Essai réalisé avec une liaison flexible non-optimisée . . . . .	59
3.2.3	Conception d'une liaison flexible optimisant la tenue de la membrane composite . . . . .	64
3.2.4	Essais réalisés avec la liaison flexible optimisée . . . . .	72
3.2.5	Conclusion . . . . .	84
3.3	Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d'images numériques en trois dimensions . . . . .	85
3.3.1	Équilibre d'une membrane circulaire sous pression . . . . .	85
3.3.2	Essai de gonflement réalisé sur une membrane circulaire avec liaison flexible optimisée avec mesure de champ . . . . .	86
3.3.3	Conclusion . . . . .	94
3.4	Membranes libres de glisser . . . . .	95
3.4.1	Description des essais réalisés . . . . .	95
3.4.2	Conclusion . . . . .	101
<b>4</b>	<b>Membranes carrées</b>	<b>103</b>
4.1	Approche simplifiée d'une membrane carrée sous pression . . . . .	105
4.1.1	Solutions analytiques . . . . .	105
4.1.2	Modélisation par éléments finis d'une membrane carrée sous pression idéale . . . . .	107
4.2	Conception d'une liaison flexible optimale . . . . .	110
4.2.1	Essai réalisé sur membrane quasi-isotrope sans liaison flexible . . . . .	110
4.2.2	Conception de la liaison flexible optimale . . . . .	114
4.2.3	Essai réalisé sur membrane quasi-isotrope avec liaison flexible . . . . .	120
4.3	Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope . . . . .	129
4.3.1	Objectif . . . . .	129
4.3.2	Configuration de l'essai . . . . .	130
4.3.3	Comparaison de l'impact de l'orientation des fibres par calcul par éléments finis simplifié . . . . .	130
4.3.4	Résultat expérimental . . . . .	132
4.3.5	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques . . . . .	135

4.3.6	Conclusion	140
4.4	Membranes avec concentration de contraintes	141
4.4.1	Objectif et contexte	141
4.4.2	Essai réalisé sur membrane circulaire entaillée	141
4.4.3	Essai réalisé sur membrane carrée entaillée	143
4.4.4	Utilisation d'un critère non-local prédisant la tenue des membranes	145
4.4.5	Conclusion	148
<b>5</b>	<b>Application à la conception d'une cloison à échelle réelle</b>	<b>149</b>
5.1	Conception de la cloison à échelle réelle	151
5.1.1	Objectifs	151
5.1.2	Dimensionnement de la membrane	152
5.1.3	Dimensionnement de la liaison flexible à l'échelle réelle	154
5.1.4	Calcul de la réponse de la cloison à échelle réelle sous chargement hydrostatique	158
5.1.5	Procédés de fabrication adaptables à l'échelle réelle	161
5.1.6	Conclusion	163
5.2	Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application	164
5.2.1	Objectifs	164
5.2.2	Conception du montage d'essai	164
5.2.3	Essais réalisés	167
	<b>Conclusion</b>	<b>175</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>179</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>188</b>
A	Equilibre d'une membrane sous pression	188
B	Influence de la taille des facettes sur le calcul des contraintes à partir de la mesure des courbures principales sur des sections de la membrane	193
C	Méthode de calcul des courbures sur sections	195
D	Calcul des contraintes principales sur une section de la membrane circulaire	197
E	Influence de la taille des facettes sur le calcul des contraintes à partir de la mesure des courbures principales sur toute la surface de la membrane avec lissage	199



# Table des figures

1.1	Démonstrateur Floatgen de BW Ideol au large du Croisic en opération depuis 2018 . . . . .	7
1.2	Application des matériaux composites dans les navires militaires [3]	8
1.3	Poutre renforcée à l'effort tranchant par collage de tissu de fibres de carbone [15] . . . . .	9
1.4	Compartimentage du flotteur de BW Ideol par des cloisons internes	10
1.5	Schématisation de la sollicitation mécanique de la cloison étudiée . .	11
1.6	Cloisons ondulées d'un cargo [19] . . . . .	12
1.7	Cloison plate avec raidisseur pour la pressurisation d'avion [20] . . .	12
1.8	Structure sandwich [22] . . . . .	13
1.9	Cloison de pressurisation d'un avion en forme de dôme [23] . . . . .	13
1.10	Comparaison des diagrammes de contraintes dans une plaque en flexion et une membrane . . . . .	15
1.11	Comparaison de la déflexion d'une plaque selon la théorie linéaire et non-linéaire - Rotations du bord libres [37]. $w_{center}$ : déflexion ; $h$ : épaisseur ; $p_0$ : pression appliquée ; $a$ : largeur ; $E$ : module de Young	16
1.12	Comparaison de la déflexion d'une plaque selon la théorie linéaire et non-linéaire - Rotations du bord bloquées [38]. $w_{center}$ : déflexion ; $h$ : épaisseur ; $p_0$ : pression appliquée ; $a$ : largeur ; $E$ : module de Young	16
1.13	Membrane carrée sous pression latérale . . . . .	17
1.14	Principe de l'essai de gonflement . . . . .	19
2.1	Modélisation par éléments finis d'une plaque carrée sous pression pour l'analyse des contraintes dans l'épaisseur en fonction du rapport épaisseur sur longueur . . . . .	24
2.2	Contraintes dans l'épaisseur en fonction du rapport épaisseur sur longueur . . . . .	25
2.3	Ecart relatif entre les contraintes sur la peau supérieure et les contraintes sur la peau inférieure au centre de plaques carrées en fonction du rapport épaisseur $h$ sur longueur $L$ . . . . .	26
2.4	Comparaison des déflexions analytiques et de la modélisation par éléments finis en fonction du rapport épaisseur $h$ sur longueur $L$ . .	27
2.5	Modélisation par éléments finis d'une plaque circulaire sous pression pour l'analyse des contraintes dans l'épaisseur en fonction du rapport épaisseur sur longueur . . . . .	28
2.6	Définition de la direction méridienne et de la direction circonférentielle d'une membrane circulaire déformée . . . . .	29

*Table des figures*

2.7	Contraintes dans l'épaisseur en fonction du rapport épaisseur sur longueur pour une plaque circulaire . . . . .	29
2.8	Ecart relatif entre les contraintes sur la peau supérieure et inférieure au centre de plaques circulaires et carrées en fonction du rapport épaisseur h sur diamètre D ou longueur L . . . . .	30
2.9	Schéma du montage d'essai de gonflement circulaire. A : bride plate ; B : bride pleine ; C : membrane composite testée ; D : membrane d'étanchéité. . . . .	33
2.10	Photographie du montage circulaire . . . . .	33
2.11	Dessin du montage d'essai circulaire . . . . .	34
2.12	Conditions aux limites et interaction dans la modélisation axisymétrique	36
2.13	Résultats de la modélisation par éléments finis dans les brides à 25 bar	36
2.14	Couple de serrage des boulons en fonction de la pression appliquée et du coefficient de frottement entre pièces . . . . .	37
2.15	Dessin du montage d'essai carré . . . . .	39
2.16	Conditions aux limites de la modélisation par éléments finis du masque	40
2.17	Interaction entre les pièces dans la modélisation par éléments finis du masque . . . . .	40
2.18	Déplacement du masque pour une pression appliquée de 25 bar . . .	41
2.19	Photographie du montage carré . . . . .	41
3.1	Modélisation par éléments finis d'une membrane circulaire idéale . .	45
3.2	Déformations maximales principales de la membrane circulaire idéale	46
3.3	Direction des déformations maximales principales de la membrane circulaire idéale . . . . .	46
3.4	Définition des directions principales d'une membrane circulaire déformée	47
3.5	Déformations circonférentielles et section d'analyse des déformations méridiennes et circonférentielles de la membrane circulaire idéale . .	47
3.6	Comparaison des déformations méridiennes et circonférentielles de la membrane circulaire idéale . . . . .	48
3.7	Contraintes maximales principales d'une membrane circulaire idéale	49
3.8	Comportement en traction simple non-linéaire réel et comportement linéaire calculé à plusieurs niveaux de déformation . . . . .	51
3.9	Schéma du placement des jauges sur la membrane circulaire testée sans liaison flexible . . . . .	52
3.10	Membrane composite testée sans liaison flexible à pression nulle et à pression à rupture . . . . .	53
3.11	Zone de rupture de la membrane circulaire testée sans liaison flexible	53
3.12	Endommagement du bord de la membrane composite testée sans liaison flexible . . . . .	54
3.13	Déformation en fonction de la pression de la membrane composite testée sans liaison flexible . . . . .	55
3.14	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la membrane composite testée sans liaison flexible . . . . .	56

3.15 Déformation maximale principale de la membrane composite testée sans liaison flexible . . . . .	57
3.16 Zoom sur la déformation maximale principale de la membrane composite testée sans liaison flexible . . . . .	58
3.17 Déformation sur la peau supérieure et inférieure de la membrane composite testée sans liaison flexible . . . . .	58
3.18 Schéma du montage d'essai de gonflement circulaire avec la liaison flexible non-optimisée . . . . .	60
3.19 Zoom sur la liaison flexible circulaire non-optimisée . . . . .	61
3.20 Déformation en fonction de la pression de la membrane composite testée avec une liaison flexible non-optimisée . . . . .	61
3.21 Comparaison de la zone de rupture de la membrane circulaire testée avec une liaison flexible non-optimisée et de la membrane circulaire testée sans liaison flexible . . . . .	62
3.22 Déformation maximale principale de la membrane circulaire testée avec une liaison flexible non-optimisée à pression à rupture . . . . .	63
3.23 Schéma du montage d'essai de gonflement circulaire avec liaison flexible. A : bride plate; B : bride pleine; C : membrane composite testée; membrane d'étanchéité; E : liaison flexible. . . . .	64
3.24 Conditions aux limites pour la modélisation par éléments finis utilisée pour l'optimisation de la liaison flexible circulaire . . . . .	66
3.25 Longueur L et épaisseur h variées dans l'étude paramétrique . . . . .	67
3.26 Maximisation de la pression spécifique pour la conception de la liaison flexible circulaire . . . . .	68
3.27 Schéma du montage d'essai de gonflement circulaire avec la liaison flexible optimisée . . . . .	69
3.28 Zoom sur la liaison flexible circulaire optimisée . . . . .	70
3.29 Contact entre la membrane composite et la liaison flexible optimisée . . . . .	70
3.30 Comparaison de la répartition des déformations avec différentes liaisons flexibles . . . . .	71
3.31 Etapes de fabrication de la liaison circulaire optimisée. 1 : fabrication d'un stratifié sous forme de disque de diamètre extérieur de 730 mm et de 5 mm d'épaisseur; 2 : traçage des cercles de 513,5 mm et de 441,5 mm correspondant aux limites de l'épaisseur décroissante de la liaison flexible et des cercles de 42 mm permettant le passage des vis pour le serrage; 3 : découpe grossière d'un disque central correspondant à la zone où la membrane est libre de gonfler; 4 : usinage de la forme finale de la liaison flexible et perçage des trous pour le passage des vis de serrage. . . . .	73
3.32 Schéma du placement des jauges sur la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée . . . . .	74
3.33 Zone de rupture de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée . . . . .	75

Table des figures

3.34 Déformation en fonction de la pression de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée . . . . .	76
3.35 Niveau d'isotropie en fonction de la pression de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée . . . . .	77
3.36 Taux de biaxialité en fonction de la pression de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée . . . . .	78
3.37 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée . . . . .	79
3.38 Ecart relatif entre les contraintes sur la peau supérieure et la peau inférieure de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée d'après la modélisation numérique au niveau des jauges de déformation . . . . .	80
3.39 Comparaison des déformations en fonction de la pression des membranes testées sans liaison flexible, avec liaison flexible non-optimisée et avec liaison flexible optimisée. <i>N.B. : la membrane sans liaison flexible est plus épaisse que les deux autres.</i> . . . . .	81
3.40 Comparaison de la répartition des déformations dans les membranes testées sans liaison flexible et avec liaison flexible optimisée (LFO) . . . . .	82
3.41 Comparaison des déformations sur les peaux supérieures et inférieures des membranes testées sans liaison flexible et avec liaison flexible optimisée (LFO) . . . . .	83
3.42 Comparaison des pressions spécifiques atteintes par les membranes testées sans liaison flexible, avec liaison flexible non-optimisée et avec liaison flexible optimisée . . . . .	83
3.43 Définition des directions des courbures et contraintes principales d'une membrane circulaire déformée . . . . .	85
3.44 Surface de mesure par les caméras pour la mesure de champ sur la membrane circulaire . . . . .	87
3.45 Membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée avec la mesure de champ . . . . .	88
3.46 Coordonnée z à pression à rupture de la membrane circulaire avec mesure de champ . . . . .	89
3.47 Déformation maximale principale à pression à rupture de la membrane circulaire avec mesure de champ . . . . .	89
3.48 Définition des sections à $0^\circ$ et $22,5^\circ$ pour le traitement des résultats expérimentaux avec la mesure de champ . . . . .	90
3.49 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la coordonnée z de la membrane circulaire avec mesure de champ . . . . .	90
3.50 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la déformation méridienne de la membrane circulaire avec mesure de champ . . . . .	91
3.51 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la déformation circonférentielle de la membrane circulaire avec mesure de champ . . . . .	91

3.52	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques des contraintes calculées à partir des courbures à 3,55 bar avec un lissage des résultats expérimentaux . . . . .	93
3.53	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques des contraintes calculées à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux . . . . .	93
3.54	Montage d'essai avec membrane libre de glisser. A : bride plate ; B : bride pleine ; C : membrane composite ; D : membrane d'étanchéité ; E : liaison flexible ; F : câle permettant d'éviter le serrage de la membrane composite. . . . .	95
3.55	Membrane circulaire quasi-isotrope non-serrée . . . . .	96
3.56	Zone de rupture de la membrane quasi-isotrope non-serrée . . . . .	96
3.57	Déflexion de la membrane quasi-isotrope non-serrée à pression maximale $P = 0,34$ bar . . . . .	97
3.58	Déformation maximale principale de la membrane quasi-isotrope non-serrée à pression maximale $P = 0,34$ bar . . . . .	98
3.59	Membrane circulaire orthotrope non-serrée après rupture . . . . .	99
3.60	Zone de rupture de la membrane orthotrope non-serrée . . . . .	99
3.61	Déflexion de la membrane orthotrope non-serrée à la fin de l'essai à $P = 0,37$ bar . . . . .	100
3.62	Déformation maximale principale de la membrane orthotrope non-serrée à la fin de l'essai à $P = 0,37$ bar . . . . .	101
4.1	Membrane carrée sous pression latérale . . . . .	106
4.2	Modélisation par éléments finis d'une membrane carrée idéale . . . . .	107
4.3	Contraintes maximales principales d'une membrane carrée idéale . . . . .	108
4.4	Direction des contraintes maximales principales d'une membrane carrée idéale . . . . .	109
4.5	Déformations maximales principales d'une membrane carrée idéale . . . . .	109
4.6	Localisation de la jauge de déformation sur la membrane carrée testée sans liaison flexible . . . . .	111
4.7	Zone de rupture de la membrane carrée testée sans liaison flexible . . . . .	111
4.8	Coordonnée Z de la membrane carrée testée sans liaison flexible juste avant sa rupture . . . . .	112
4.9	Déformation maximale principale de la membrane carrée testée sans liaison flexible juste avant sa rupture . . . . .	113
4.10	Dessin du montage d'essai carré avec la liaison flexible . . . . .	115
4.11	Zoom sur la liaison flexible carrée . . . . .	116
4.12	Conditions aux limites pour la modélisation par éléments finis utilisée pour l'optimisation de la liaison flexible carrée . . . . .	116
4.13	Zones de contact sur la modélisation par éléments finis utilisée pour l'optimisation de la liaison flexible carrée . . . . .	117
4.14	Surface d'application de la pression pour l'optimisation de la liaison flexible carrée . . . . .	117

## Table des figures

4.15 Maximisation de la pression spécifique pour la conception de la liaison flexible carrée . . . . .	118
4.16 Déformation dans la liaison flexible pour la conception de la liaison flexible carrée . . . . .	119
4.17 Membrane carrée quasi-isotrope testée avec la liaison flexible après l'essai . . . . .	121
4.18 Zone de rupture de la membrane carrée quasi-isotrope testée avec la liaison flexible après rupture . . . . .	121
4.19 Coordonnée hors plan expérimentale de la membrane carrée testée avec la liaison flexible à la fin de l'essai à 10,45 bar . . . . .	122
4.20 Déformation maximale principale expérimentale de la membrane testée avec la liaison flexible juste avant sa rupture à 10,45 bar . . . . .	122
4.21 Définition des sections à 0° et à 90° sur la membrane testée avec la liaison flexible . . . . .	123
4.22 Comparaison des coordonnées z expérimentales et numériques de la membrane carrée testée avec la liaison flexible . . . . .	124
4.23 Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques de la membrane carrée testée avec la liaison flexible . . . . .	124
4.24 Coordonnée z du masque avant l'essai avec la membrane carrée testée avec la liaison flexible . . . . .	125
4.25 Déformation maximale numérique de la membrane carrée testée avec la liaison flexible à pression à rupture . . . . .	125
4.26 Déformation maximale numérique de la liaison flexible carrée à pression à rupture . . . . .	126
4.27 Comparaison des résultats expérimentaux, numériques et analytiques de la membrane carrée avec liaison flexible . . . . .	127
4.28 Augmentation de la pression et pression spécifique grâce à l'utilisation de la liaison flexible . . . . .	127
4.29 Augmentation de la déformation au centre par rapport à la déformation au bord avec l'utilisation de la liaison flexible . . . . .	128
4.30 Direction des contraintes maximales principales d'une membrane carrée idéale . . . . .	129
4.31 Comparaison des orientations des fibres sur les membranes carrées quasi-isotrope et orthotrope . . . . .	130
4.32 Modélisation par éléments finis d'une membrane carrée idéale . . . . .	131
4.33 Comparaison des déformations maximales principales des membranes carrées quasi-isotrope et orthotrope . . . . .	131
4.34 Membrane carrée orthotrope testée avec la liaison flexible après l'essai	132
4.35 Zone de rupture de la membrane carrée orthotrope testée avec la liaison flexible après rupture . . . . .	132
4.36 Déformation en fonction de la pression mesurée par la jauge de déformation au bord de la membrane carrée orthotrope . . . . .	133
4.37 Coordonnée z de la membrane carrée orthotrope à la fin de l'essai à une pression de 11,74 bar . . . . .	134

4.38 Déformation maximale principale expérimentale de la membrane carrée orthotrope juste avant sa rupture à une pression de 11,74 bar	134
4.39 Définition des sections à 0°, 90° et 45° et -45° sur la membrane carrée orthotrope	135
4.40 Comparaison des coordonnées z expérimentales et numériques sur les sections à 0° et 90° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 11,74 bar	136
4.41 Comparaison des coordonnées z expérimentales et numériques sur les sections à 45° et -45° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 11,74 bar	136
4.42 Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à 0° et 90° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 11,74 bar	137
4.43 Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à 45° et -45° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 11,74 bar	137
4.44 Comparaison des coordonnées z expérimentales et numériques sur les sections à 0° et 90° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 6 bar	138
4.45 Comparaison des coordonnées z expérimentales et numériques sur les sections à 45° et -45° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 6 bar	138
4.46 Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à 0° et 90° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 6 bar	139
4.47 Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à 45° et -45° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 6 bar	139
4.48 Augmentation de la pression et pression spécifique grâce à l'utilisation de la liaison flexible et de l'orientation des fibres	140
4.49 Membrane circulaire avec entaille après rupture	141
4.50 Déformation maximale principale de la membrane circulaire entaillée juste avant l'apparition de la fissure (P=0,31 bar)	142
4.51 Membrane carrée avec entaille après rupture	143
4.52 Déformation maximale principale de la membrane carrée entaillée juste avant l'apparition de la fissure (P=0,40 bar)	144
4.53 VCR d'application du critère non-local sur la membrane circulaire entaillée	146
4.54 Comparaison du critère local et du critère non-local pour la prédiction de la pression de rupture avec la pression atteinte expérimentalement avec la membrane circulaire avec entaille	146
4.55 VCR d'application du critère non-local sur la membrane carrée entaillée	147

Table des figures

4.56	Comparaison du critère local et du critère non-local pour la prédiction de la pression de rupture avec la pression atteinte expérimentalement avec la membrane carrée avec entaille . . . . .	148
5.1	Directions des déformations maximales principales d'une membrane carrée idéale . . . . .	151
5.2	Direction des contraintes maximales principales d'une membrane carrée idéale . . . . .	152
5.3	Membrane carrée sous pression latérale . . . . .	153
5.4	Conditions aux limites pour le dimensionnement de la liaison flexible de la cloison à échelle réelle . . . . .	154
5.5	Pression spécifique en fonction des dimensions de la liaison flexible de la cloison à échelle réelle . . . . .	155
5.6	Pression à rupture en fonction des dimensions de la liaison flexible de la cloison à échelle réelle . . . . .	156
5.7	Déformation de la liaison flexible à pression à rupture en fonction des dimensions de la liaison flexible de la cloison à échelle réelle . . . . .	157
5.8	Déflexion de la cloison sous chargement hydrostatique . . . . .	158
5.9	Déformation de la cloison sous chargement hydrostatique . . . . .	159
5.10	Déformation de la liaison flexible sous chargement hydrostatique . . . . .	160
5.11	Méthode de fabrication par décalage des plis de préimprégné pour l'obtention de l'épaisseur décroissante de la liaison flexible . . . . .	161
5.12	Méthode de fabrication par bout à bout d'UD pour la fabrication des cloisons à échelle réelle . . . . .	162
5.13	Table rainurée utilisée pour le bridage du montage d'essai carré . . . . .	164
5.14	Photographie du montage d'essai carré . . . . .	165
5.15	Dessin du montage d'essai carré . . . . .	166
5.16	Membrane carrée orthotrope boulonnée après rupture . . . . .	167
5.17	Zone de rupture de la membrane carrée orthotrope boulonnée à la fin de l'essai . . . . .	168
5.18	Membrane carrée quasi-isotrope boulonnée après rupture . . . . .	169
5.19	Zones de rupture de la membrane carrée quasi-isotrope boulonnée . . . . .	169
5.20	Zone de rupture de la membrane carrée quasi-isotrope boulonnée après rupture . . . . .	170
5.21	Zone de collage entre la membrane composite et la liaison flexible . . . . .	171
5.22	Membrane carrée boulonnée et collée à la fin de l'essai . . . . .	172
5.23	Membrane carrée boulonnée et collée après rupture . . . . .	172
5.24	Zone de rupture de la membrane carrée boulonnée et collée . . . . .	173
5.25	Décalage entre deux liaisons flexible lors de l'essai de la membrane carrée boulonnée et collée . . . . .	173
.1	Membrane déformée caractérisée par des cercles méridiens et circonférentiels [68] . . . . .	188
.2	Élément de volume dont les longueurs d'arcs valent $R_\theta d\theta$ et $R_\varphi d\varphi$ [68] . . . . .	188

.3	Forces méridiennes sur l'élément de volume [68] . . . . .	189
.4	Contrainte méridienne agissant sur la membrane [68] . . . . .	190
.5	Impact de la taille des facettes sur la contrainte circonférentielle . .	193
.6	Impact du pas entre les facettes sur la contrainte circonférentielle .	194
.7	Surface axisymétrique d'une membrane déformée . . . . .	195
.8	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte méridienne de la membrane circulaire avec mesure de champ . . . . .	197
.9	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle de la membrane circulaire avec mesure de champ à 3,55 bar . . . . .	198
.10	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle de la membrane circulaire avec mesure de champ à 7,1 bar . . . . .	198
.11	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle calculée à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux et une taille de facettes de 40 pixels et un pas de 20 pixels . . . . .	199
.12	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle calculée à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux et une taille de facettes de 80 pixels et un pas de 40 pixels . . . . .	200
.13	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle calculée à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux et une taille de facettes de 100 pixels et un pas de 50 pixels . . . . .	200
.14	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle calculée à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux et une taille de facettes de 150 pixels et un pas de 75 pixels . . . . .	201



# Liste des tableaux

3.1	Propriétés du stratifié $[0/60/-60]_s$ de 1055ES18 à $0^\circ$ . . . . .	51
3.2	Propriétés du stratifié $[0/60/-60]_s$ de 1055ES18 à $30^\circ$ . . . . .	51
3.3	Propriétés à $0^\circ$ du stratifié $[0/45]_s$ du M34N/42%/202T2/G-68 . . . . .	65
3.4	Propriétés à $22,5^\circ$ du stratifié $[0/45]_s$ du M34N/42%/202T2/G-68 . . . . .	65
3.5	Propriétés à $0^\circ$ des plis du M34N/42%/202T2/G-68 . . . . .	98
3.6	Propriétés à $90^\circ$ des plis du M34N/42%/202T2/G-68 . . . . .	98
4.1	Propriétés à $0^\circ$ du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37% $[0/45]_s$ . . . . .	110
4.2	Propriétés à $22,5^\circ$ du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37% $[0/45]_s$ . . . . .	110
4.3	Propriétés à $0^\circ$ du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37% $[0]_4$ . . . . .	131
4.4	Propriétés à $90^\circ$ du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37% $[0]_4$ . . . . .	131
4.5	Module de cisaillement du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37% . . . . .	131
.1	Ecart entre contraintes expérimentales et numériques en fonction des tailles et pas de facettes . . . . .	201



# Introduction

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans le cadre d'une thèse de Doctorat en convention individuelle de formation par la recherche en entreprise (CIFRE) avec BW Ideol, une entreprise ayant développé un nouveau type de flotteur pour éolienne en mer pouvant être construit en béton armé ou en acier, et le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. Le flotteur développé par BW Ideol est compartimenté par des cloisons afin d'assurer sa flottabilité en situation accidentelle au cours de laquelle une voie d'eau apparaîtrait. L'objectif de la thèse est de contribuer au développement d'une nouvelle solution pour la conception des cloisons du flotteur de BW Ideol. Afin de concevoir une structure légère, la solution étudiée est une membrane en matériau composite pour remplacer les cloisons en béton armé. La cloison avec la solution de membrane composite se distingue des cloisons déjà existantes par le fait qu'elle ne participe pas à la tenue structurale du flotteur. Elle résiste seulement à une pression latérale liée au remplissage en eau d'un compartiment en situation accidentelle. La structure étudiée est donc une membrane dont les bords sont fixés subissant une pression latérale. La thèse a également pour objectif de travailler sur la liaison qui permet de fixer la cloison sur le flotteur. Utiliser des membranes en matériau composite pour le cloisonnage du flotteur pourrait permettre de réduire les coûts de fabrication et l'allègement engendré pourrait avoir des impacts indirects comme par exemple une répartition des masses différente ou bien encore l'utilisation d'un béton moins léger et donc moins onéreux. Ces travaux s'appuient sur des études expérimentales et numériques. Des modélisations par éléments finis sont faites afin de simuler numériquement la solution étudiée. Des montages d'essais sont conçus afin de réaliser des essais à échelle réduite représentatifs de la cloison. Des essais mécaniques sont réalisés dans de nombreuses configurations afin de trouver la solution optimale.

Dans un premier chapitre, une brève présentation du contexte de l'éolien en mer flottant et de l'activité de BW Ideol est faite. Une revue bibliographique présente l'utilisation des matériaux composites dans des applications marines, dans le secteur du génie civil et donne des exemples de structures sous pression similaires déjà existantes dans le domaine aéronautique, spatial ou de l'énergie. L'objet d'étude est présenté et la solution de membrane composite est explicitée en présentant les hypothèses que vérifie une membrane ainsi que les outils analytiques et expérimentaux existants pour leur étude. Enfin les objectifs de la thèse sont énoncés.

Le deuxième chapitre porte sur la conception du montage d'essais qui a été utilisé pour obtenir les résultats expérimentaux au cours de cette thèse. Ce montage

## Liste des tableaux

d'essai consiste à mettre sous pression une membrane dont le bord est fixé, ce qui correspond au chargement et aux conditions aux limites de la cloison du flotteur de BW Ideol. Afin d'être réalisable en laboratoire, les essais sont faits à une échelle réduite par rapport aux dimensions de la cloison. La taille du montage d'essai est déterminée afin de pouvoir tester des structures vérifiant les hypothèses de membrane tout en assurant une faisabilité en laboratoire convenable pour être capable d'effectuer un nombre important d'essais. Cela est fait avec des modélisations par éléments finis faisant varier le rapport épaisseur sur longueur des plaques modélisées, en analysant les contraintes dans l'épaisseur de celles-ci et en comparant ces résultats aux résultats du modèle analytique de membrane sous pression. Le montage d'essais conçu est ensuite détaillé en justifiant le choix des pièces le composant. La raideur du montage doit être assurée afin d'avoir des conditions aux limites bien définies permettant de ne mesurer que les déformations des membranes testées. Ce montage est de forme circulaire afin d'obtenir de premiers résultats sur un cas axisymétrique simple. Il est ensuite adapté pour pouvoir tester des membranes carrées se rapprochant de la forme des cloisons de BW Ideol en ajoutant un masque rigide masquant la forme circulaire.

Le troisième chapitre présente les résultats des travaux réalisés sur des membranes circulaires. Tout d'abord, une modélisation par éléments finis d'une membrane circulaire est faite avec des éléments de membrane afin de déterminer la réponse de la structure dans le cas où les hypothèses de membrane sont vérifiées. Il est montré qu'il est nécessaire d'ajouter une pièce qui sera appelée liaison flexible afin d'augmenter la tenue de la membrane. Cette pièce est dimensionnée pour maximiser la pression à rupture de la membrane tout en minimisant la masse de l'ensemble de la structure membrane - liaison flexible.

Des essais sont réalisés en utilisant la technique de corrélation d'images numériques en trois dimensions pour mesurer le champ de déplacements et de déformations de la surface de la membrane lors de son gonflement. A partir des coordonnées mesurées dans l'état déformé, les courbures sont calculées et les contraintes sont directement calculées à partir de l'équation d'équilibre d'une membrane sous pression sans avoir besoin de connaître le comportement du matériau constituant la membrane. Ces essais pourraient alors constituer un moyen d'étudier le comportement d'un matériau composite sous chargement biaxial.

Enfin, des essais sont réalisés pour évaluer l'importance de la fixation des membranes. Pour cela, des membranes non-fixées sont testées en les laissant libres de glisser sur la liaison flexible. Il sera montré que la pression à rupture est considérablement réduite, démontrant l'importance de fixer le bord de la membrane.

Le quatrième chapitre porte sur les travaux concernant les membranes de forme carrée. Une démarche similaire à celle adoptée pour les membranes circulaires est utilisée. L'importance d'utiliser une liaison flexible pour augmenter la tenue de la membrane est démontrée en comparant un essai réalisé sans liaison flexible à un essai réalisé avec une liaison flexible optimisée pour maximiser la pression à

rupture tout en diminuant la masse de l'ensemble membrane - liaison flexible. En observant les directions des contraintes principales au sein de la membrane carrée, deux stratifiés sont comparés pour évaluer l'impact de l'orientation des fibres sur la tenue de la membrane. Il est montré qu'une membrane orthotrope permet d'obtenir la plus grande pression à rupture.

Pour clore ce chapitre, des essais sont réalisés pour étudier la tenue de membranes avec entaille. Cela permet de mesurer la dégradation de la tenue de la membrane en comparant la pression à rupture de ces membranes entaillées avec la pression à rupture atteinte par les membranes sans entaille. Il est également montré que l'utilisation d'un critère non-local permet une meilleure prédiction de la tenue des membranes en comparaison à un critère de rupture concernant une valeur locale de déformation ou de contrainte.

Le cinquième chapitre clôture cette thèse en extrapolant les résultats obtenus à l'échelle réduite vers l'échelle réelle correspondant aux dimensions d'une cloison de flotteur de BW Ideol. Pour cela, le modèle analytique des membranes sous pression est utilisé pour établir une similitude d'échelle entre l'échelle réduite et l'échelle réelle. A partir de cela, la liaison flexible est dimensionnée en utilisant le critère d'optimisation de pression spécifique utilisé pour les essais réalisés à échelle réduite. Des méthodes de fabrication de la membrane et de la liaison flexible sont proposées afin d'être adaptées à l'échelle réelle. Alors qu'à l'échelle réduite la liaison flexible était composée d'une pièce unique, il est proposé d'utiliser quatre pièces distinctes pour faciliter la fabrication, le transport et l'assemblage sur le flotteur.

Afin de tester ces solutions, un nouveau montage d'essai est conçu pour réaliser des essais utilisant les méthodes de fabrication proposées ainsi que la liaison flexible en quatre parties. Il sera montré que ce dernier aspect a un impact important sur la tenue de la membrane, montrant la pertinence de réaliser ces essais pour valider la solution de membrane pour la conception des cloisons de BW Ideol.



# 1. Contexte et objectif

*Ce premier chapitre présente le contexte dans lequel se déroule la thèse. Les cloisons de compartimentage des flotteurs de BW Ideol y sont présentées comme application des travaux de thèse dont le sujet est d'étudier des membranes composites sous pression. Les hypothèses vérifiées par une membrane y sont présentées ainsi que les outils analytiques existants. L'essai de gonflement est présenté car il servira à obtenir les résultats expérimentaux de ces travaux de thèse.*

## Sommaire

1.1	Contexte industriel . . . . .	7
1.1.1	L'éolien en mer flottant et BW Ideol . . . . .	7
1.1.2	Les matériaux composites dans les applications marines . . . . .	8
1.1.3	Les matériaux composites dans le secteur du génie civil . . . . .	9
1.1.4	Les cloisons internes du flotteur de BW Ideol . . . . .	10
1.1.5	Structures similaires existantes . . . . .	12
1.2	Objet d'étude : membrane en matériau composite sous pression en grande déflexion . . . . .	14
1.2.1	Hypothèses vérifiées par une membrane . . . . .	14
1.2.2	Comparaison de la solution membrane à la solution de plaque en flexion . . . . .	14
1.2.3	Modèle analytique de membranes sous pression en grande déflexion . . . . .	15
1.2.4	L'essai de gonflement . . . . .	19
1.3	Objectifs de la thèse . . . . .	20



## 1.1. Contexte industriel

### 1.1.1. L'éolien en mer flottant et BW Ideol

La transition énergétique actuelle voit émerger de nouveaux modes de production d'énergie durables et respectueux de l'environnement. Parmi eux, l'éolien en mer flottant a un rôle clé à jouer de part ses nombreux atouts : la source d'énergie que constitue le vent est renouvelable ; c'est un mode de production d'électricité peu émetteur de CO<sub>2</sub> comparativement aux autres modes de production [1] ; les éoliennes flottantes peuvent être installées dans des eaux plus profondes et donc plus loin des côtes que les éoliennes posées, ce qui permet de bénéficier de vents plus forts et plus constants et de réduire l'impact visuel depuis la côte. Dans ce contexte, BW Ideol a développé une fondation flottante avec sa technologie breveté Damping Pool. Ce concept est basé sur une fondation flottante en forme d'anneau. L'eau présente dans le bassin en son centre agit comme un amortisseur de l'excitation générée par les vagues heurtant la structure [2]. BW Ideol a mis en service la première éolienne en mer en France en 2018 avec son projet de démonstrateur d'éolien flottant Floatgen installé au large du Croisic sur le site d'expérimentation en mer de l'Ecole Centrale de Nantes SEM-REV (figure 1.1). Dans ce projet, une turbine d'une puissance de 2 MW repose sur une fondation flottante de 36 mètres de côté et de 7,5 mètres de tirant d'eau construite en béton par Bouygues Travaux Publics. Un autre démonstrateur de BW Ideol est opérationnel depuis 2018 au Japon avec une turbine de 3 MW reposant sur une fondation flottante en acier.



FIGURE 1.1. – Démonstrateur Floatgen de BW Ideol au large du Croisic en opération depuis 2018

BW Ideol travaille sur de nombreux autres projets pré-commerciaux et commerciaux notamment en Europe, au Japon et aux USA. BW Ideol poursuit le développement de sa technologie, notamment en étudiant l'intégration de matériaux composites par exemple pour la conception des cloisons de son flotteur qui constitue l'application des travaux de recherche présentés dans cette thèse.

### 1.1.2. Les matériaux composites dans les applications marines

Si les premières versions des flotteurs de BW Ideol ont été fabriquées principalement en béton et en acier, une réflexion sur l'intégration de matériaux composites a été initiée afin de poursuivre l'amélioration de la technologie déjà développée. De part leurs nombreuses qualités, les matériaux composites de type polymère renforcé par des fibres (FRP) sont déjà couramment utilisés pour des applications marines. Les structures marines sont soumises à des conditions environnementales sévères. Les matériaux composites sont particulièrement adaptés à ces conditions de part leur résistance à la corrosion et leurs rigidité et résistance spécifique dans un secteur où la masse est un aspect fondamental pour des structures flottantes. Les matériaux composites sont utilisés dans la construction navale depuis plusieurs décennies notamment pour la construction de navires militaires et civils pour la fabrication de nombreux composants (exemples sur la figure 1.2). Cette famille de matériaux est également utilisée dans le secteur des énergies renouvelables en mer, par exemple pour la fabrication de pales d'éoliennes ou encore dans le secteur offshore pétrolier pour la fabrication de pipelines, de plateformes flottantes ou bien encore pour la réparation de structures immergées [3, 4, 5, 6].

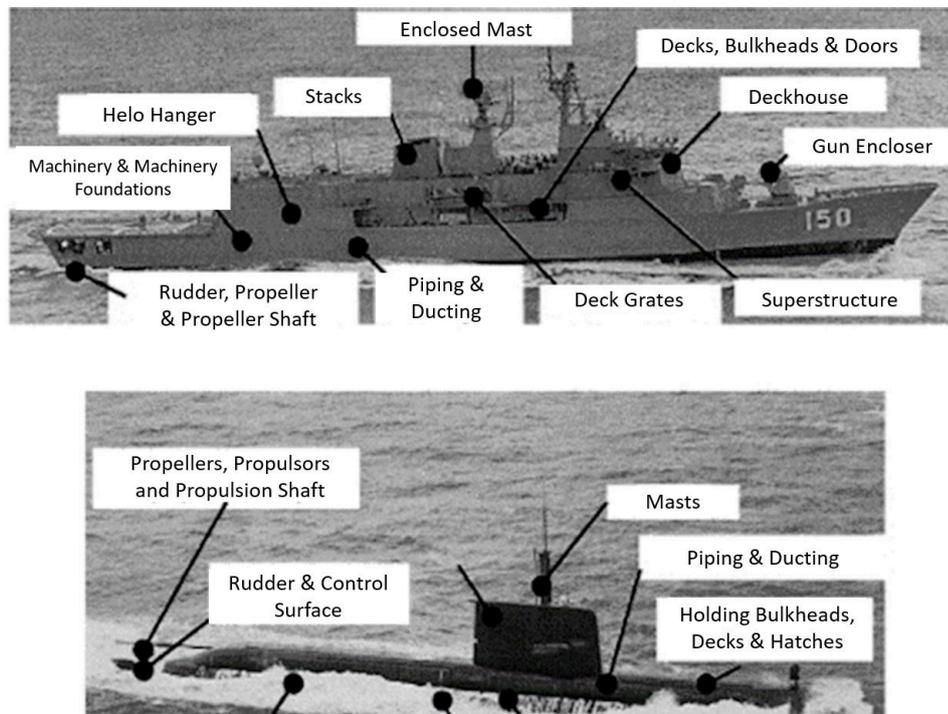


FIGURE 1.2. – Application des matériaux composites dans les navires militaires [3]

### 1.1.3. Les matériaux composites dans le secteur du génie civil

Les matériaux composites de type FRP sont également utilisés dans le génie civil en particulier pour le renforcement et la réparation d'ouvrages existants [7, 8, 9, 10, 11], y compris dans des environnements marins [12, 13]. Ces matériaux sont sélectionnés pour leurs propriétés mécaniques spécifiques limitant la masse ajoutée à l'ouvrage en comparaison à l'emploi de matériaux plus classiquement utilisés dans ce secteur tels que le béton ou l'acier. Deux techniques de mise en œuvre de ces renforts composites existent : le collage de plaques et la stratification directe de tissus par imprégnation de matrice polymère [14]. Les principaux types de renforcement des ouvrages de génie civil sont le renfort à la flexion avec les deux techniques présentées précédemment appliquées sur les faces inférieures de dalles ou de poutres en flexion, à la compression par confinement de poteaux ou encore à l'effort tranchant comme illustré sur la figure 1.3.

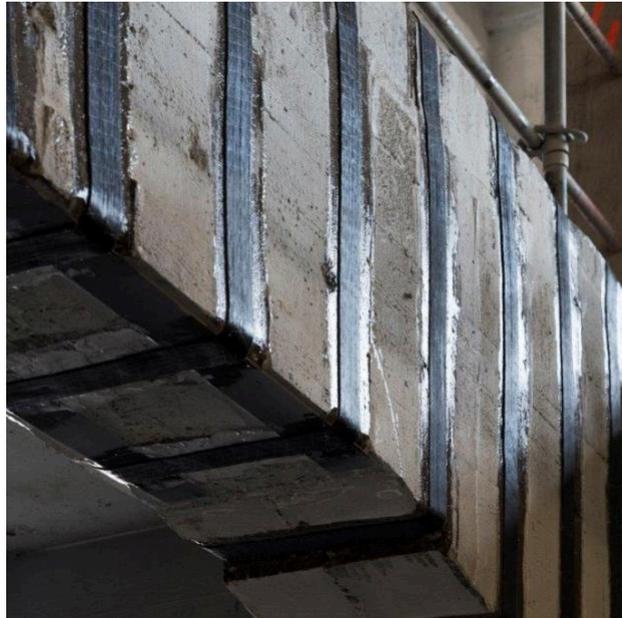


FIGURE 1.3. – Poutre renforcée à l'effort tranchant par collage de tissu de fibres de carbone [15]

### 1.1.4. Les cloisons internes du flotteur de BW Ideol

Le flotteur de BW Ideol est compartimenté par des cloisons internes afin d'assurer sa flottabilité en situation accidentelle, c'est-à-dire dans le cas où une voie d'eau apparaîtrait à la suite d'une collision avec un objet ou d'un autre évènement imprévu. Ce compartimentage est illustré sur le schéma de principe sur la figure 1.4 représentant une section horizontale du flotteur.

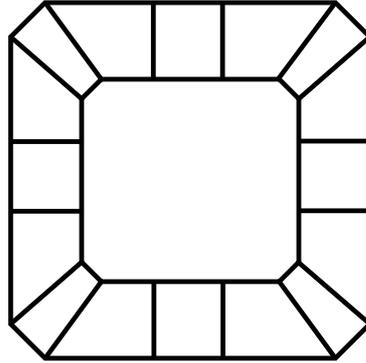


FIGURE 1.4. – Compartimentage du flotteur de BW Ideol par des cloisons internes

Les cloisons permettant ce compartimentage sont actuellement fabriquées en béton armé ou en acier en fonction de la version du flotteur. Dans un objectif d'amélioration de sa technologie (en terme de masse, temps de construction, coût), le remplacement du béton armé ou de l'acier par un matériau composite pour la fabrication de ces cloisons est étudié en raison des qualités de ce type de matériau présentées dans la section 1.1.2. Contrairement aux versions en béton armé ou en acier, les cloisons en matériaux composites étudiées dans ces travaux de thèse ne participent pas à la raideur du flotteur. La sollicitation à laquelle est soumise cette cloison est une pression latérale due à l'eau présente dans un compartiment. Bien que les dimensions de ces cloisons varient en fonction de la version du flotteur considérée, la thèse s'appuie sur la base de cloisons ayant une dimension de 10 m de côté. Pour un premier dimensionnement, la pression considérée est calculée d'après la méthode de calcul définie dans le standard DNV "Design of Floating Wind Turbine Structures" [16] :

"The design tank pressure acting on the internal tank wall shall be taken as :

$$p_d = \rho g_0 h_{op} \left( \gamma_{f,G,Q} + \frac{a_v}{g_0} \gamma_{f,E} \right) \quad (1.1)$$

In which :

$a_v$  : maximum vertical acceleration ( $m.s^{-2}$ ), taken as the coupled motion response applicable to the tank in question. For preliminary design calculations of tank pressures,  $a_v$  may be taken as  $0.25g_0$ . For final design,  $a_v$  shall be documented, e. g. by dynamic analysis.

$g_0 = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$  : acceleration of gravity ;

## 1. Contexte et objectif – 1.1. Contexte industriel

$\rho$  : density of liquid, minimum density equal to that of seawater ( $1025 \text{ kg.m}^{-3}$ );  
 $\gamma_{f,G,Q}$  : load factor for permanent and variable functional loads;  
 $\gamma_{f,E}$  : load factor for environmental loads;  
 $h_{op}$  : vertical distance (m) from the load point to the position of maximum filling height. For tanks adjacent to the sea that are situated below the extreme operational draught ( $T_E$ ), the maximum filling height for ULS design is not to be taken less than the extreme operational draught."

Dans notre cas, on a :

$$a_v = 2,4525 \text{ m.s}^{-2};$$

$$g_0 = 9,81 \text{ m.s}^{-2};$$

$$\rho = 1025 \text{ kg.m}^{-3};$$

$$\gamma_{f,G,Q} = 1;$$

$$\gamma_{f,E} = 1,35;$$

$$h_{op} = 12,82 \text{ m}.$$

En considérant un compartiment complètement rempli, cela donne une pression de design de  $p_d = 0,172 \text{ MPa}$  en bas de cloison. Cette pression de design dépend de la hauteur d'eau présente au dessus du point considéré. Une pression uniforme sera cependant utilisée dans les essais mécaniques réalisés au cours de ces travaux en testant des structures de taille réduite, ce qui permet de réaliser de nombreux essais (avec différentes géométries, conditions aux limites, matériaux, ...) qui seraient difficiles à réaliser sur des structures de 10 mètres de côté. La structure étudiée peut donc être simplifiée par une plaque carrée fixée à son bord subissant une pression latérale comme schématisé sur la figure 1.5.

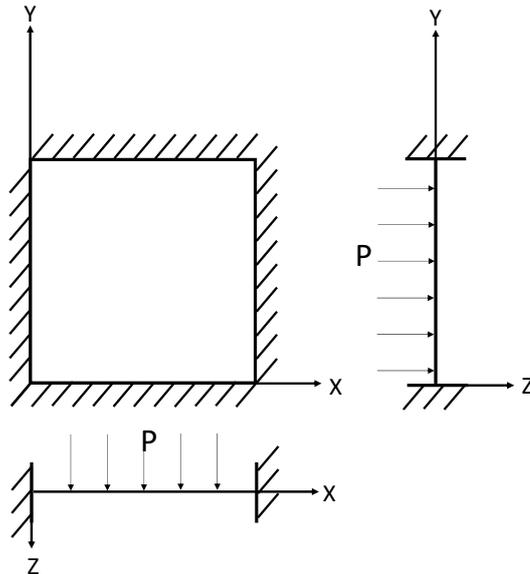


FIGURE 1.5. – Schématisation de la sollicitation mécanique de la cloison étudiée

### 1.1.5. Structures similaires existantes

Le cloisonnage des flotteurs de BW Ideol permet son compartimentage de manière similaire aux bateaux pour assurer leur flottabilité. Le secteur aérospatial est un autre domaine dans lequel des cloisons sont utilisées, notamment pour la pressurisation des avions ou bien pour compartimenter des lanceurs spatiaux [17]. Actuellement, plusieurs types de cloisons existent :

- Les cloisons ondulées, pour lesquelles l’ondulation permet d’augmenter la raideur en flexion de la plaque, est une solution très répandue notamment pour le cloisonnage de navires de grandes dimensions [18] (figure 1.6) ;



FIGURE 1.6. – Cloisons ondulées d’un cargo [19]

- Les cloisons plates avec raidisseur sont constituées d’une plaque sur laquelle sont ajoutées des pièces permettant d’augmenter sa raideur en flexion. Les cloisons pour la pressurisation des avions est un exemple de ce type de structure (figure 1.7) ;

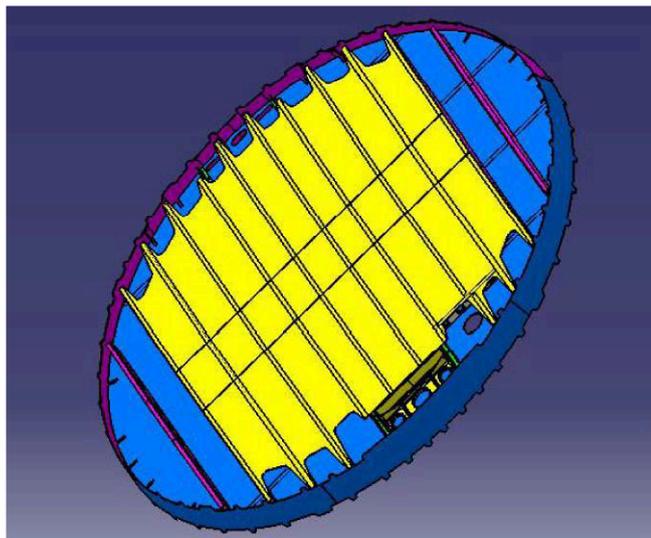


FIGURE 1.7. – Cloison plate avec raidisseur pour la pressurisation d’avion [20]

## 1. Contexte et objectif – 1.1. Contexte industriel

- Les cloisons sous forme de structures sandwich sont une bonne solution pour augmenter la raideur en flexion sans augmenter significativement la masse de la structure [21] (figure 1.8) ;

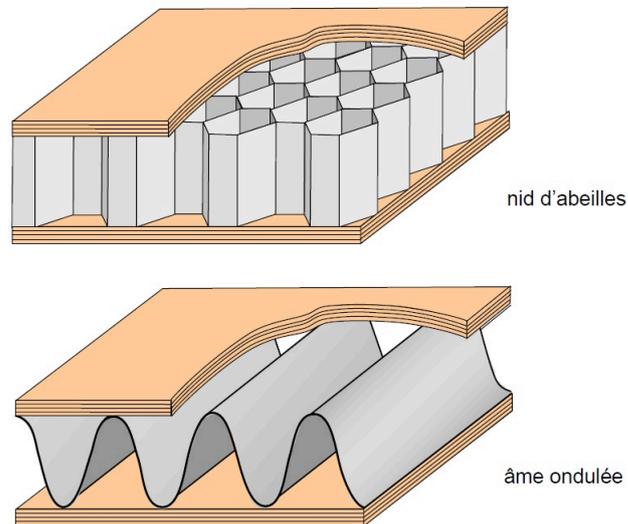


FIGURE 1.8. – Structure sandwich [22]

- Un autre exemple de cloison de pressurisation est donné par les cloisons en forme de dôme. La forme sphérique permet de faciliter une sollicitation en membrane (figure 1.9).

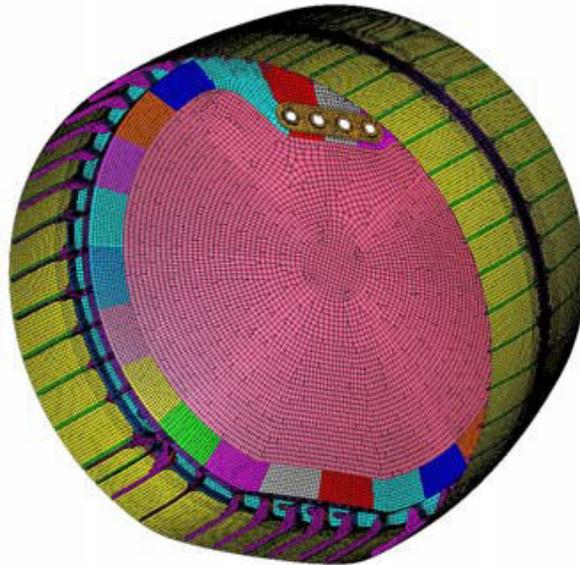


FIGURE 1.9. – Cloison de pressurisation d'un avion en forme de dôme [23]

## 1.2. Objet d'étude : membrane en matériau composite sous pression en grande déflexion

Les structures de cloisonnage existantes présentées dans la partie 1.1.5 sont généralement sollicitées en flexion ; c'est le cas des cloisons ondulées, raidies et sandwich. Dans le cas des cloisons en forme de dôme, la forme sphérique permet de faciliter une sollicitation en membrane. De manière similaire, les réservoirs sous pression ont généralement une forme cylindrique pour favoriser ce type de sollicitation [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31]. Le travail présenté dans cette thèse a pour objectif d'étudier une solution de type membrane pour la conception de cloisons en matériaux composites pour le flotteur de BW Ideol. La faible épaisseur d'une membrane permet de proposer une solution très légère mais contrairement aux cloisons de pressurisation en forme de dôme ou aux réservoirs cylindriques, la structure étudiée ici doit nécessairement être plate car la pression peut être appliquée de chaque côté de la cloison en fonction du compartiment rempli. Dans ces travaux, les membranes étudiées sont fabriquées à partir de fibres de verre préimprégnées de résine époxyde. Ce type de matériau est choisi pour ses propriétés mécaniques qui offrent une grande résistance et sont couramment utilisés dans des applications marines. Le coût financier est également un critère qui a mené à ce choix vis-à-vis des fibres de carbone.

### 1.2.1. Hypothèses vérifiées par une membrane

Une membrane est une structure vérifiant les hypothèses suivantes [32] :

- L'épaisseur est petite en comparaison de ses dimensions dans le plan ou bien de son rayon de courbure dans le cas d'une membrane courbe. Une membrane idéale peut donc être considérée comme une surface. Il est communément donné un rapport épaisseur ( $h$ ) sur longueur ( $L$ )  $\frac{h}{L} < \frac{1}{50} = 0,02$  [33] pour considérer une structure comme étant une membrane ;
- La rigidité de flexion est négligeable et, ainsi, une membrane est incapable de supporter un moment de flexion ou un cisaillement hors plan et résiste donc à un chargement seulement *via* des contraintes dans le plan ;
- En conséquence des deux premières hypothèses, les contraintes dans le plan d'une membrane sont supposées constantes dans l'épaisseur.

### 1.2.2. Comparaison de la solution membrane à la solution de plaque en flexion

La conception des cloisons avec une solution de type membrane est étudiée car ce type de sollicitation permet d'exploiter toute l'épaisseur de la structure car la contrainte est constante dans l'épaisseur alors qu'une plaque en flexion a une face en traction et une autre en compression, ce qui entraîne une absence de sollicitation de son centre (figure 1.10). Il sera montré dans les chapitres suivants

1. Contexte et objectif – 1.2. Objet d'étude : membrane en matériau composite sous pression en grande déflexion

que la répartition des déformations est homogène au sein d'une membrane circulaire sous pression. Cette solution se distingue d'une plaque encastree en flexion pour laquelle une concentration de déformation est présente au bord. L'homogénéité des déformations au sein d'une structure est recherchée lors d'une optimisation topologique ayant pour objectif de minimiser la masse d'une structure [34, 35, 36] ; les zones non-sollicitées sont supprimées afin de diminuer la masse de la structure. L'objectif étant de concevoir une cloison légère, la solution membrane constitue donc une solution optimale.

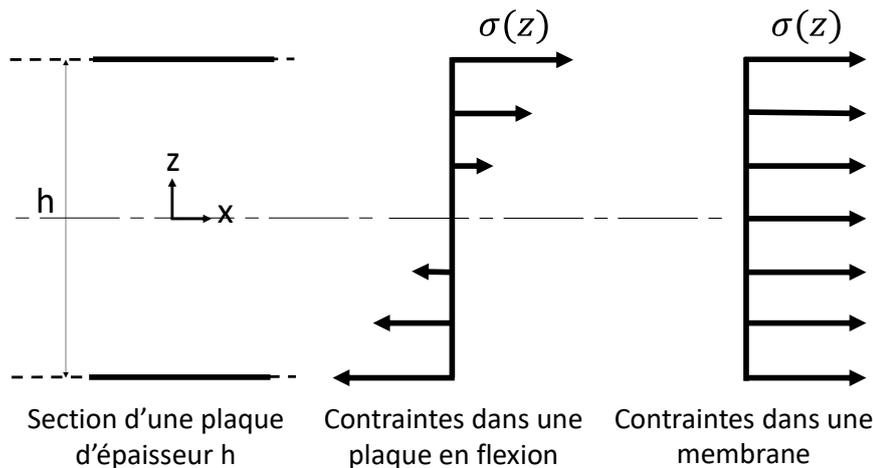


FIGURE 1.10. – Comparaison des diagrammes de contraintes dans une plaque en flexion et une membrane

### 1.2.3. Modèle analytique de membranes sous pression en grande déflexion

La sollicitation en membrane étudiée implique une grande déflexion ( $w$ ) de la structure en comparaison à son épaisseur ( $h$ ) afin que le plan moyen de la structure se mette sous tension et que les contraintes de membrane deviennent dominantes. Au-delà d'un certain niveau de déflexion ( $w > h$ ), la sollicitation de membrane prédomine devant la flexion. Dans ce cas, la théorie en grande déflexion est nécessaire pour décrire le comportement d'une telle structure et, dans ce cas, la relation entre la pression appliquée et la déflexion de la structure est non-linéaire [33]. Suivant les conditions aux limites, c'est-à-dire si les rotations sont bloquées (figure 1.12) ou libres (figure 1.11), les effets de membrane modifient considérablement l'amplitude de la déflexion. En effet, en considérant  $w > h$  et donc  $\frac{w}{h} > 1$ , l'écart entre le résultat de la théorie en grande déflexion et celui de la théorie en petite déflexion est non négligeable et croit lorsque le rapport  $\frac{w}{h}$  augmente.

1. Contexte et objectif – 1.2. Objet d'étude : membrane en matériau composite sous pression en grande déflexion

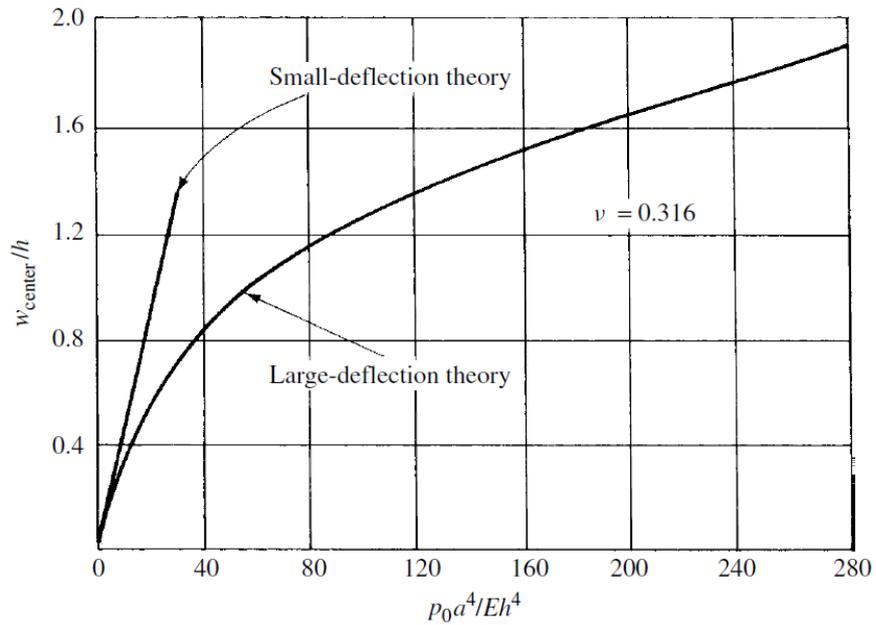


FIGURE 1.11. – Comparaison de la déflexion d'une plaque selon la théorie linéaire et non-linéaire - Rotations du bord libres [37].  $w_{center}$  : déflexion ;  $h$  : épaisseur ;  $p_0$  : pression appliquée ;  $a$  : largeur ;  $E$  : module de Young

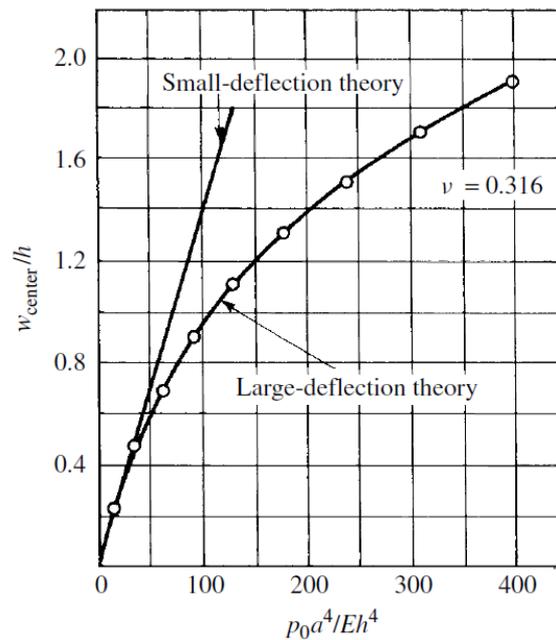


FIGURE 1.12. – Comparaison de la déflexion d'une plaque selon la théorie linéaire et non-linéaire - Rotations du bord bloquées [38].  $w_{center}$  : déflexion ;  $h$  : épaisseur ;  $p_0$  : pression appliquée ;  $a$  : largeur ;  $E$  : module de Young

1. Contexte et objectif – 1.2. Objet d'étude : membrane en matériau composite sous pression en grande déflexion

Le modèle analytique repose sur les solutions aux équations de Föppl - von Kármán qui décrivent la déflexion et les contraintes au sein d'une membrane sous pression en grande déflexion (équations 1.2 et 1.3).

$$D\nabla^4 w - h \left( \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) = P(x, y) \quad (1.2)$$

$$\nabla^4 F + E \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} = 0 \quad (1.3)$$

avec :

—  $w$ , la déflexion ;

—  $F$ , la fonction d'Airy telle que  $\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}$ ,  $\sigma_{yy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}$ ,  $\sigma_{xy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}$  ;

—  $E$ , le module de Young ;

—  $h$ , l'épaisseur ;

—  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ , la rigidité en flexion ;

—  $\nu$ , le coefficient de Poisson ;

—  $P(x, y)$ , la pression appliquée ;

—  $\nabla^4 = \Delta^2 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2}$ , l'opérateur bi-harmonique.

Une résolution par séries de Fourier [39] permet d'exprimer la déflexion (équation 1.4) et les contraintes (équations 4.1 et 4.2) au bord et au centre d'une membrane carrée de côté  $L$  et d'épaisseur  $h$  sous pression latérale  $P$  (figure 1.13).

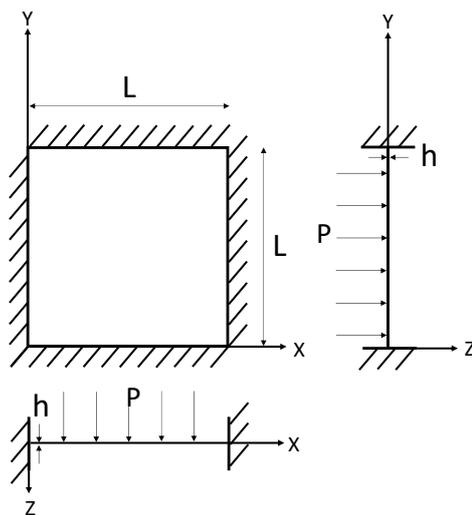


FIGURE 1.13. – Membrane carrée sous pression latérale

1. Contexte et objectif – 1.2. Objet d'étude : membrane en matériau composite sous pression en grande déflexion

La déflexion s'exprime selon :

$$w = \eta h \left[ \frac{P}{E} \left( \frac{L}{h} \right)^4 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1.4)$$

Les contraintes valent :

$$\sigma_{xi} = \alpha_i \left[ E \left( \frac{PL}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1.5)$$

$$\sigma_{yi} = \beta_i \left[ E \left( \frac{PL}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1.6)$$

Avec :

—  $\eta = 0,2866$  ;

—  $\alpha_2 = 0,1324$  et  $\beta_2 = 0,3200$  en  $x = \frac{L}{2}$ ,  $y = 0$  ;

—  $\alpha_3 = 0,3200$  et  $\beta_3 = 0,1324$  en  $x = 0$ ,  $y = \frac{L}{2}$  ;

—  $\alpha_4 = 0,2682$  et  $\beta_4 = 0,2682$  en  $x = \frac{L}{2}$ ,  $y = \frac{L}{2}$ .

Ces expressions de la déflexion et des contraintes serviront par la suite à dimensionner le montage d'essai conçu pour réaliser des essais à échelle réduite et pour réaliser une similitude d'échelle permettant d'extrapoler à l'échelle réelle les résultats expérimentaux obtenus à l'échelle réduite. Ce modèle analytique doit être considéré comme un outil permettant une première approche pour connaître la réponse au chargement des membranes étudiées dans ces travaux mais des modélisations numériques par éléments finies sont utilisées pour affiner les résultats en fonction des matériaux et conditions aux limites considérées qui peuvent se différencier de celles considérées pour obtenir les solutions aux équations de Föppl-von Kármán présentées ci-dessus.

### 1.2.4. L'essai de gonflement

L'essai mécanique se rapprochant le plus du chargement et des conditions au bord de la cloison faisant l'objet de ce travail de recherche est l'essai de gonflement (figure 1.14). Cet essai consiste à appliquer une pression sur une face d'une membrane dont le bord est fixé [40].

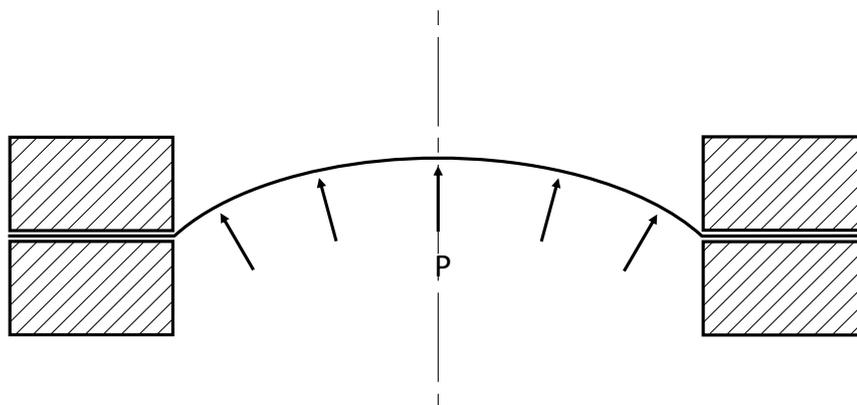


FIGURE 1.14. – Principe de l'essai de gonflement

De nombreuses études concernant des plaques en grande déflexion ont été faites avec des montages expérimentaux similaires à l'essai de gonflement dans les années 1940 par le "National Advisory Committee for Aeronautics" (NACA) qui était l'agence fédérale américaine chargée de la recherche dans le domaine de l'aéronautique entre 1915 et 1958 dont l'activité a ensuite été reprise par la NASA. Le besoin était d'acquérir des connaissances concernant les contraintes présentes dans des pièces structurelles d'avion pouvant subir des chargements de pression latérale notamment lors d'amerrissages [41]. De nombreux essais ont été faits par le NACA sur des plaques métalliques rectangulaires et circulaires [42, 43] et ont permis de vérifier la validité des solutions aux équations de Föppl - von Kármán qui avait été résolues par Hencky en 1921 [44] et Föppl en 1924 [45]. Ce type d'essai est de nos jours toujours utilisé pour tester sous chargement biaxial des matériaux métalliques [46, 47, 48, 49] mais également des polymères [50, 51]. L'essai de gonflement a également été utilisé pour caractériser un tissu de nylon recouvert de néoprène [52]. Concernant les matériaux composites de type FRP, l'essai biaxial sur éprouvettes cruciformes est plus couramment utilisé [53].

### 1.3. Objectifs de la thèse

L'objectif de la thèse est d'étudier des membranes en matériaux composites subissant une pression latérale dans le but d'utiliser ce type de structure comme solution pour la conception de cloisons légères pour les flotteurs de BW Ideol. Ce travail s'appuie sur des résultats expérimentaux, des simulations numériques et des outils analytiques.

Les résultats expérimentaux obtenus durant la thèse sont réalisés sur des membranes représentant des cloisons à échelle réduite. Différentes configurations de membranes composites sous pression sont étudiées : membranes circulaires et carrées, membranes quasi-isotropes et orthotropes, sans liaison flexible et avec liaison flexible, sans concentration de contraintes et avec concentration de contraintes sur membranes entaillées, différentes conditions aux bords sont également étudiées et présentées dans cette thèse. Pour faire ces essais, un montage d'essai a été conçu et validé au début de la thèse se rapprochant des montages utilisés pour réaliser l'essai de gonflement présenté dans la section précédente et permettant dans notre cas de tester des membranes composites représentant des cloisons à échelle réduite. Ces dimensions ont été définies pour permettre de tester des structures respectant les hypothèses de membrane. Le but est de concevoir et de tester expérimentalement différentes solutions afin de valider une solution optimale pour la conception des cloisons de BW Ideol.

Des simulations numériques avec des modélisations par éléments finis sont faites afin de simuler la réponse des membranes composites à leur chargement. Celles-ci ont plusieurs rôles : dimensionner le montage d'essai, tester différentes configurations (forme circulaire ou carrée, conditions aux limites, matériaux, stratifiés, ...), approfondir l'analyse des expériences réalisées notamment sur les zones non-couvertes par les systèmes de mesure utilisés et, enfin, d'être un outil de conception pour les cloisons à échelle réelle.

Les outils analytiques permettent de prédimensionner les structures étudiées et d'établir des similitudes d'échelles entre les différentes échelles considérées : l'échelle réelle des cloisons et les différentes échelles réduites utilisées dans les travaux expérimentaux.

Ces trois moyens d'analyses se complétant les uns les autres doivent permettre une meilleure compréhension du comportement des membranes composites sous pression et doivent aboutir à la conception d'une solution optimale de type membrane composite pour la fabrication des cloisons des flotteurs de BW Ideol. Les résultats obtenus devront donc être transposables à l'échelle réelle d'un point de vue structural mais également concernant les méthodes de fabrication et d'assemblage sur chantier de la cloison avec la coque des flotteurs.

## 2. Conception d'un montage d'essai de gonflement

*Dans ce deuxième chapitre, la conception du montage d'essai utilisé lors de ces travaux de thèse est présentée. Ses dimensions ont été déterminées afin d'assurer une sollicitation de membrane tout en permettant la réalisation de ces essais en laboratoire. Pour cela, des modélisations par éléments finis ont été faites dans le but de déterminer les dimensions nécessaires pour respecter les hypothèses vérifiées par une membrane. Le montage d'essai et les pièces le composant sont présentés ainsi que les calculs permettant d'assurer une raideur suffisante du montage pour avoir des conditions aux limites bien contrôlées. Un montage d'essai circulaire est d'abord utilisé pour sa simplicité (calcul en 2D, essai sur membranes quasi-isotropes, ...) et son applicabilité à de nombreuses applications (cloisons de pressurisation d'avion ou de compartimentage de lanceurs spatiaux, réservoir sous pression,...). Celui-ci est adaptable en utilisant une pièce supplémentaire masquant la forme circulaire afin de tester également des membranes de forme carrée se rapprochant de la configuration de l'application que constitue les cloisons de BW Ideol.*

### Sommaire

2.1	Détermination de la taille du montage d'essai . . . . .	23
2.1.1	Objectif . . . . .	23
2.1.2	Analyse numérique par éléments finis des contraintes dans l'épaisseur de plaques carrées . . . . .	23
2.1.2.1	Détails de la modélisation . . . . .	23
2.1.2.2	Analyse sur une section des contraintes dans l'épaisseur . . . . .	24
2.1.2.3	Ecart relatif des contraintes dans l'épaisseur . . . . .	25
2.1.3	Validité des solutions analytiques en fonction du rapport épaisseur sur longueur . . . . .	26
2.1.4	Validation de la taille du montage en configuration circulaire . . . . .	27
2.1.4.1	Détails de la modélisation . . . . .	28
2.1.4.2	Analyse sur une section des contraintes dans l'épaisseur . . . . .	28
2.1.4.3	Ecart relatif des contraintes dans l'épaisseur . . . . .	30
2.1.5	Conclusion . . . . .	31
2.2	Montage d'essai conçu . . . . .	32
2.2.1	Description du montage . . . . .	32

2. Conception d'un montage d'essai de gonflement –

2.2.2	Modélisation par éléments finis de la déformation des brides de fixation . . . . .	35
2.2.2.1	Détails de la modélisation par éléments finis . . . . .	35
2.2.2.2	Résultat . . . . .	36
2.2.3	Calcul du serrage et de la tenue des vis de fixation . . . . .	37
2.2.4	Conception d'un masque pour tester des membranes carrées . . . . .	38
2.3	Conclusion . . . . .	42

## 2.1. Détermination de la taille du montage d'essai

### 2.1.1. Objectif

Le but est de concevoir un montage d'essai permettant de tester des structures vérifiant les hypothèses de membrane décrites dans le premier chapitre afin de valider expérimentalement la solution de membrane composite pour la conception des cloisons des flotteurs de BW Ideol. Les cloisons réelles ayant une surface d'environ 100 m<sup>2</sup>, les essais mécaniques sont faits à échelle réduite afin d'être réalisables en laboratoire. Les membranes composites étudiées sont des stratifiés fabriqués à partir de plis de fibres de verre préimprégnées de résine époxyde. L'épaisseur d'un stratifié est un facteur limitant la taille du montage d'essai car un stratifié est constitué de plusieurs plis qui ont une certaine épaisseur et un nombre minimal de plis est en général nécessaire par exemple afin d'avoir un stratifié symétrique par rapport à son plan moyen ou encore pour obtenir un stratifié quasi-isotrope. Le montage d'essai doit donc être suffisamment grand afin de vérifier les hypothèses de membrane. Bien qu'il soit communément admis qu'un rapport épaisseur sur longueur inférieur à 1/50 permet à une structure d'être considérée comme une membrane [33], des modélisations par éléments finis sont faites afin de vérifier cette valeur.

### 2.1.2. Analyse numérique par éléments finis des contraintes dans l'épaisseur de plaques carrées

Afin de déterminer le rapport épaisseur sur longueur nécessaire pour dimensionner le montage d'essai permettant de tester des membranes, une modélisation par éléments finis est faite afin d'analyser les contraintes dans l'épaisseur de plaques de dimensions variables. Cela permet de vérifier la troisième hypothèse du comportement de membranes selon laquelle les contraintes sont constantes dans l'épaisseur qui est la conséquence des deux premières hypothèses.

#### 2.1.2.1. Détails de la modélisation

Une plaque carrée de 10 000 mm de côté est modélisée, correspondant à une cloison simplifiée. Afin de réduire les temps de calcul, seul un quart de la plaque est modélisé et des symétries sont appliquées. Pour faire varier le rapport épaisseur sur longueur, la longueur est fixe et l'épaisseur varie. Un comportement matériau linéaire est utilisé avec un module de Young de 15 GPa et un coefficient de Poisson de 0,3. Ces propriétés sont choisies pour correspondre à celles d'un stratifié quasi-isotrope de verre/époxy. La non-linéarité géométrique est prise en compte car les déflexions peuvent être grandes. Les déplacements du bord sont bloqués et les rotations sont libres. Une pression uniforme est appliquée sur une face de la plaque. Cette pression est variable selon les épaisseurs et correspond dans chaque cas à une

## 2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.1. Détermination de la taille du montage d'essai

pression permettant d'atteindre une déformation maximale de 2,5%, correspondant à une valeur standard de limite à rupture d'un matériau verre/époxy [54, 55]. Des éléments de coques linéaires à quatre noeuds avec intégration réduite sont utilisés pour mailler la plaque (éléments S4R d'ABAQUS). Les résultats sont analysés sur les peaux supérieures et inférieures d'une section orthogonale au bord de la plaque allant du centre jusqu'au bord. Le chargement, les conditions aux limites et la section d'analyse sont présentés sur la figure 2.1.

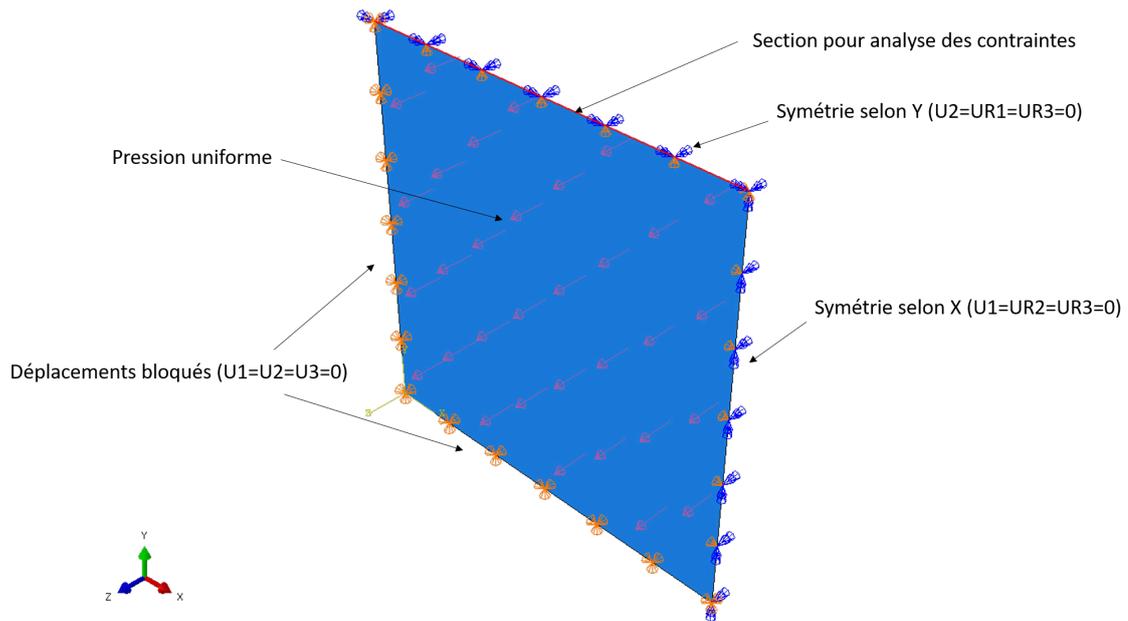


FIGURE 2.1. – Modélisation par éléments finis d'une plaque carrée sous pression pour l'analyse des contraintes dans l'épaisseur en fonction du rapport épaisseur sur longueur

### 2.1.2.2. Analyse sur une section des contraintes dans l'épaisseur

Les contraintes sur les peaux supérieures et inférieures des plaques sont analysées du bord des plaques jusqu'à leur centre pour plusieurs rapport épaisseur sur longueur. La figure 2.2 montre la différence entre un comportement de membrane et un comportement de plaque en flexion. Pour le rapport épaisseur sur longueur le plus petit, l'écart entre les contraintes sur la peau supérieure et les contraintes sur la peau inférieure est très faible, traduisant un comportement de membrane. Pour le rapport épaisseur sur longueur le plus grand, cet écart est très grand et les contraintes sont de signes opposés, ce qui traduit un comportement de flexion. La comparaison des contraintes sur les peaux supérieures et inférieures des plaques avec un rapport épaisseur sur longueur intermédiaire montre la transition entre ces deux cas. On peut observer que la plaque ayant un rapport épaisseur sur longueur égal à 1/50 correspondant à la valeur habituellement donnée pour caractériser une

## 2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.1. Détermination de la taille du montage d'essai

plaque ayant un comportement de membrane [33] n'a pas des contraintes constantes dans son épaisseur même si toute l'épaisseur est en traction.

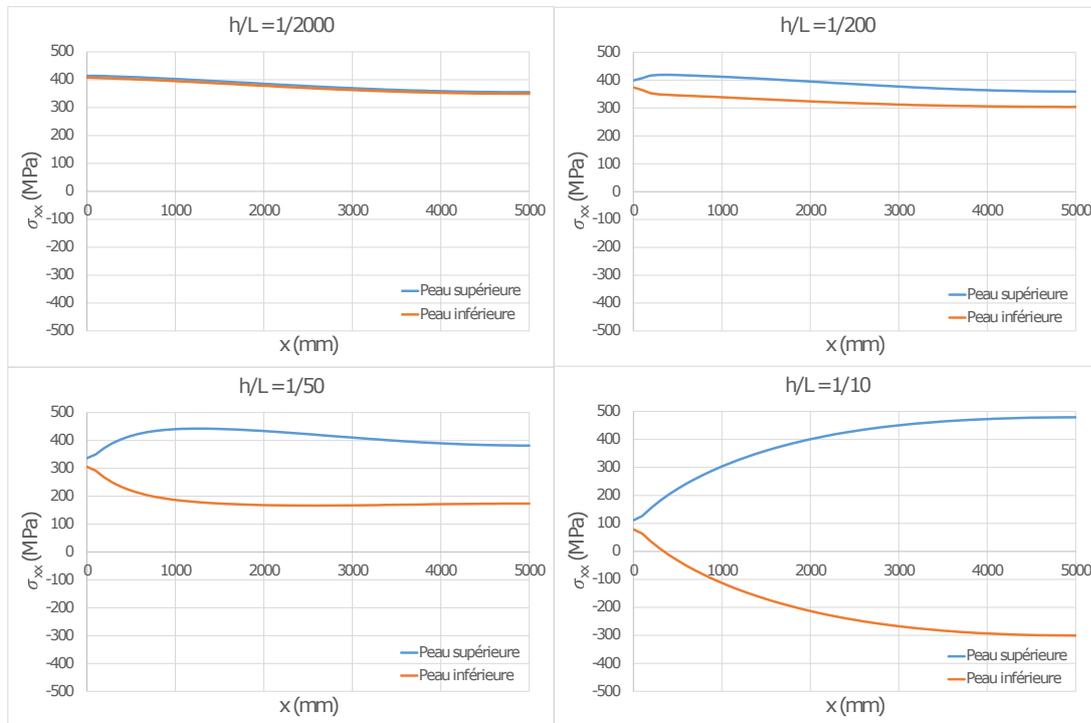


FIGURE 2.2. – Contraintes dans l'épaisseur en fonction du rapport épaisseur sur longueur

### 2.1.2.3. Ecart relatif des contraintes dans l'épaisseur

Afin de quantifier les variations des contraintes dans l'épaisseur des plaques, l'écart relatif entre la contrainte sur la peau supérieure et la contrainte sur la peau inférieure au centre des plaques est calculé. Un écart relatif de 0% signifie que les contraintes sont constantes dans l'épaisseur et correspond à un comportement de membrane idéale. Un écart relatif de 200% signifie que les contraintes sur les peaux supérieures et inférieures sont de signes opposés et de valeurs absolues égales et correspond à un comportement de flexion pure. La figure 2.3 montre qu'il y a un continuum de comportement entre ces deux comportements parfaits. Dans notre cas, le plus petit écart relatif vaut 2% pour le rapport 1/2000 et le plus grand vaut 163% pour le rapport 1/10. Ces deux cas se rapprochent donc des cas idéals de membrane pure et de flexion pure. Dans le cas d'un rapport 1/50 correspondant à la valeur habituellement donnée pour caractériser une membrane, les peaux supérieures et inférieures sont bien toutes deux en tension mais l'écart relatif n'est pas nul et vaut 55%, ce qui signifie que le rapport 1/50 ne correspond pas à un comportement de membrane idéale.

## 2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.1. Détermination de la taille du montage d'essai

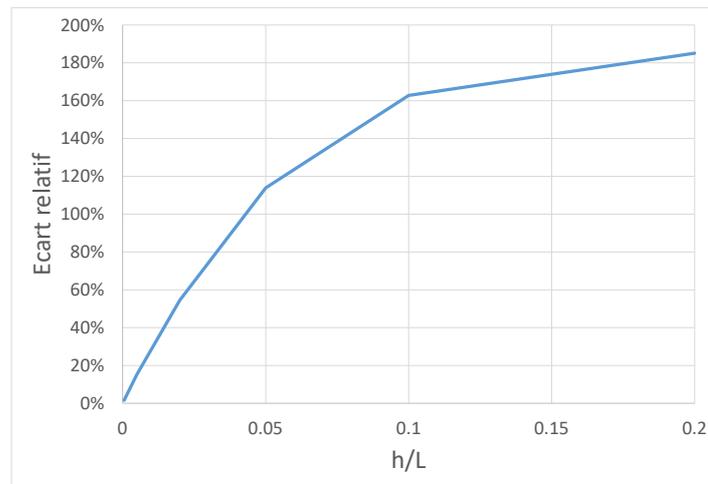


FIGURE 2.3. – Ecart relatif entre les contraintes sur la peau supérieure et les contraintes sur la peau inférieure au centre de plaques carrées en fonction du rapport épaisseur  $h$  sur longueur  $L$

### 2.1.3. Validité des solutions analytiques en fonction du rapport épaisseur sur longueur

Une autre méthode pour déterminer la taille du montage d'essai permettant de tester des membranes est d'évaluer pour quel rapport épaisseur sur longueur les solutions analytiques pour les membranes sous pression en grande déflexion sont valables. La modélisation par éléments finis de la section 2.1.2 est utilisée. Cette fois-ci, les déflexions au centre obtenues avec la modélisation par éléments finis sont comparées aux déflexions données par le modèle analytique présenté dans la section 1.2.3. Cela permet de voir à partir de quel moment la flexion négligée dans le modèle analytique a un impact non négligeable sur la réponse de la structure. De la même manière que précédemment, les résultats sont analysés à un niveau de 2,5% de déformation afin que les structures soient à un niveau de sollicitation comparable. La figure 2.4 montre qu'à partir d'un rapport épaisseur sur longueur supérieur à 0,05 les solutions divergent, ce qui veut dire que la flexion devient trop importante pour être négligée comme le fait le modèle analytique.

## 2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.1. Détermination de la taille du montage d'essai

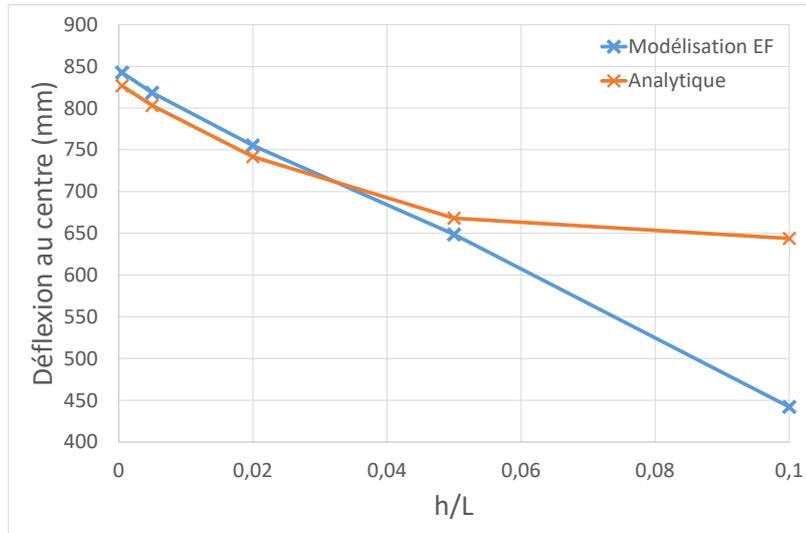


FIGURE 2.4. – Comparaison des déflexions analytiques et de la modélisation par éléments finis en fonction du rapport épaisseur  $h$  sur longueur  $L$

### 2.1.4. Validation de la taille du montage en configuration circulaire

Bien que les cloisons du flotteur de BW Ideol soient carrées, un montage d'essai circulaire est utilisé car en profitant de l'axisymétrie de la géométrie et des conditions aux limites, une modélisation par éléments finis axisymétrique (et donc en deux dimensions permettant d'avoir un modèle léger) peut être utilisée pour analyser de manière approfondie la réponse de la membrane composite à son chargement. Tester des membranes quasi-isotropes devient également pertinent puisque la géométrie, les conditions aux limites et le chargement sont axisymétriques et ne présentent donc aucune direction préférentielle. Cette forme correspond également aux applications citées dans le premier chapitre comme par exemple les cloisons de pressurisation d'avion, les cloisons de compartimentage de lanceurs spatiaux ou bien les dômes constituant les extrémités des réservoirs cylindriques sous pression. La forme circulaire permet également d'utiliser des brides habituellement utilisées pour les pipelines facilement disponibles sur le marché dans des dimensions correspondant aux membranes testées. Comme cela sera présenté dans le chapitre 3, ce choix permet de mesurer les courbures des membranes déformées et ainsi de calculer les contraintes au sein de celles-ci sans avoir besoin de connaître le comportement mécanique du matériau ; seules la pression appliquée, l'épaisseur de la membrane et les courbures de la membrane déformée sont nécessaires pour leur calcul. Avec l'utilisation de ces brides, le montage d'essai est aisément adaptable car il permet de tester des membranes circulaires mais également des membranes carrées en ajoutant une pièce rigide supplémentaire masquant la forme circulaire.

## 2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.1. Détermination de la taille du montage d'essai

Des brides de 513,5 mm de diamètre intérieur ont été sélectionnées car elles sont disponibles rapidement sur le marché et permettent d'être manipulées assez facilement. Afin de valider l'analyse faite dans la section 2.1.2 en configuration carrée, la même analyse est faite en configuration circulaire. Bien que le paramètre clé soit le rapport épaisseur sur longueur pour déterminer si une plaque a un comportement de membrane, cette analyse est faite pour vérifier que la forme circulaire ne modifie pas les conclusions faites dans le cas des plaques carrées.

### 2.1.4.1. Détails de la modélisation

La même modélisation par éléments finis que dans le cas carré est faite mais cette fois-ci la membrane est circulaire et a un diamètre  $D=513,5$  mm (figure 2.5).

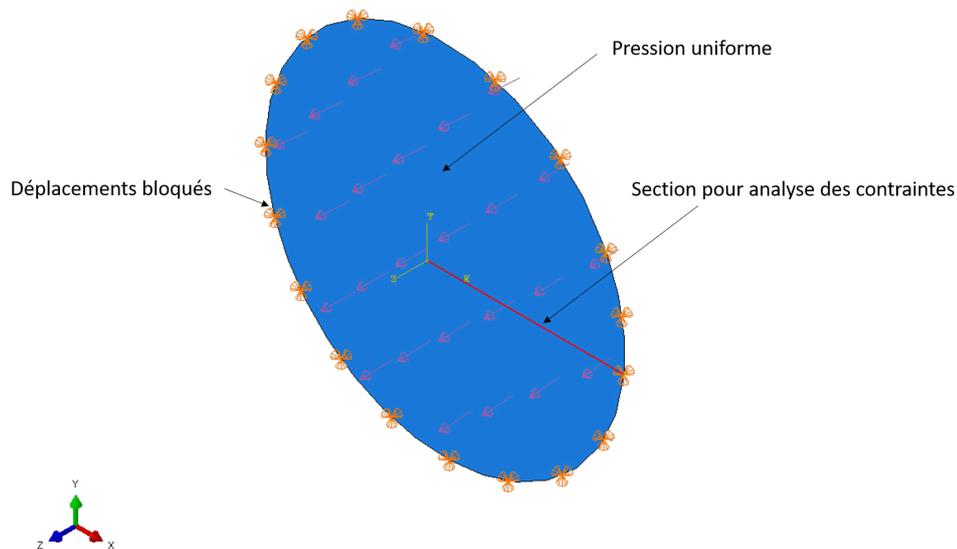


FIGURE 2.5. – Modélisation par éléments finis d'une plaque circulaire sous pression pour l'analyse des contraintes dans l'épaisseur en fonction du rapport épaisseur sur longueur

### 2.1.4.2. Analyse sur une section des contraintes dans l'épaisseur

Les contraintes méridiennes (direction définie sur la figure 2.6) sur la peau supérieure et inférieure des plaques sont représentées en fonction de la coordonnée radiale  $r$  normalisée avec le rayon  $R$  de la plaque sur la figure 2.7 pour plusieurs rapports épaisseur  $h$  sur diamètre  $D$ .

Comme dans la configuration carrée, un rapport épaisseur sur diamètre petit entraîne une faible variation de contraintes dans l'épaisseur. Cette variation augmente lorsque le rapport épaisseur sur diamètre augmente.

2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.1. Détermination de la taille du montage d'essai

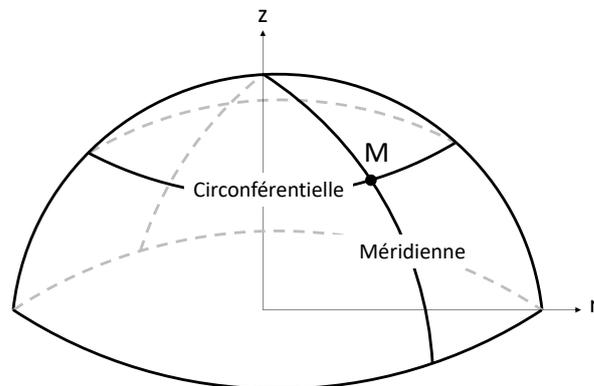


FIGURE 2.6. – Définition de la direction méridienne et de la direction circonférentielle d'une membrane circulaire déformée

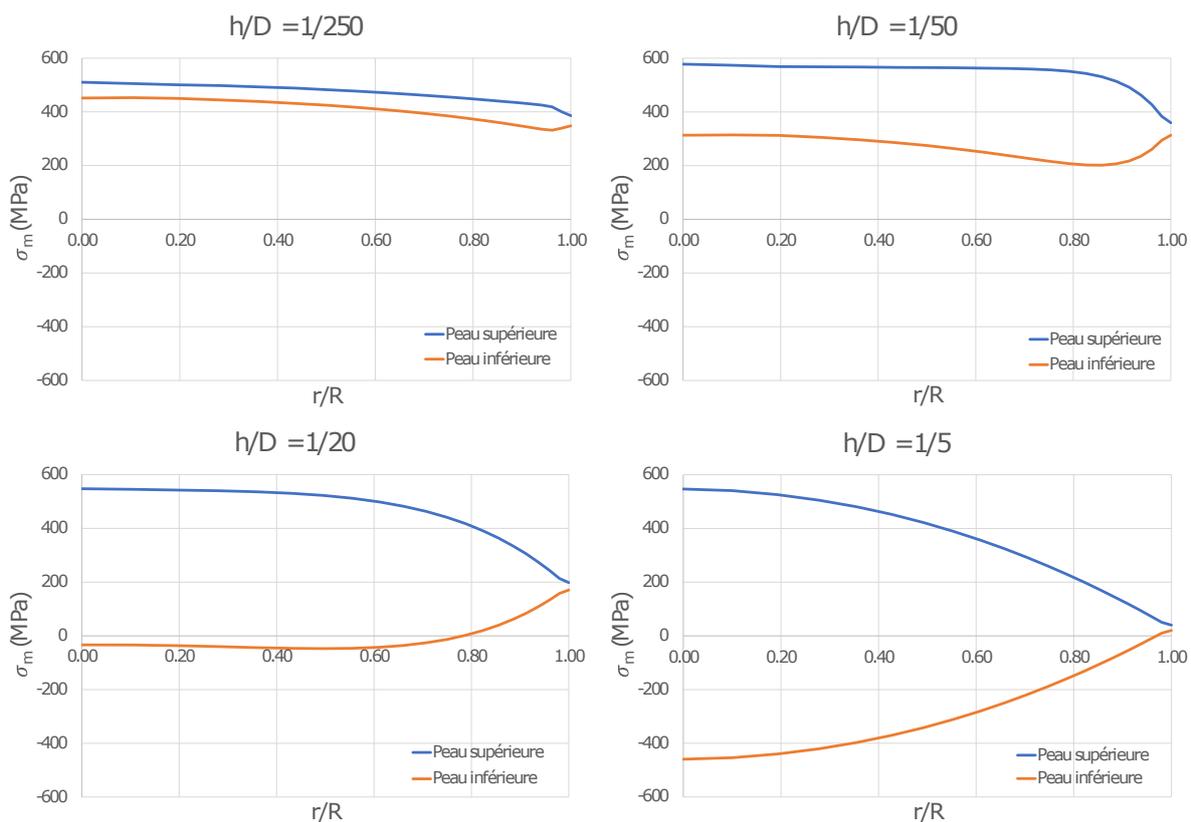


FIGURE 2.7. – Contraintes dans l'épaisseur en fonction du rapport épaisseur sur longueur pour une plaque circulaire

### 2.1.4.3. Ecart relatif des contraintes dans l'épaisseur

L'écart relatif entre les contraintes sur la peau supérieure et inférieure des plaques est représenté en fonction du rapport épaisseur  $h$  sur diamètre  $D$  sur la figure 2.8 et comparé au cas des plaques carrées. On peut voir que les écarts relatifs en fonction des rapport épaisseur sur diamètre (ou longueur) sont les mêmes et qu'il n'y a donc aucune différence entre des plaques de forme carrée ou circulaire concernant l'influence de ces rapports sur le comportement en membrane ou en flexion.

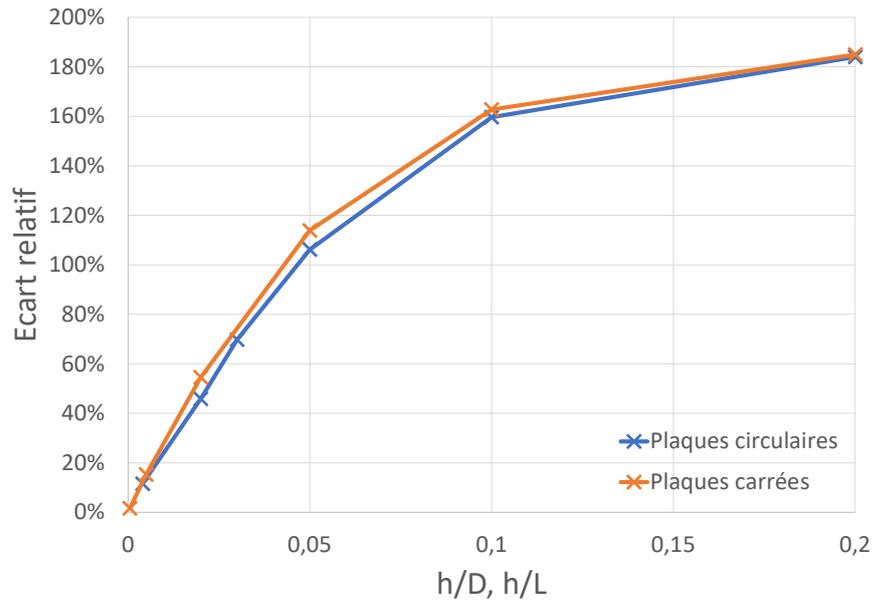


FIGURE 2.8. – Ecart relatif entre les contraintes sur la peau supérieure et inférieure au centre de plaques circulaires et carrées en fonction du rapport épaisseur  $h$  sur diamètre  $D$  ou longueur  $L$

### 2.1.5. Conclusion

L'analyse des contraintes dans l'épaisseur des plaques en fonction du rapport épaisseur sur longueur a permis de montrer qu'il y a un continuum de solutions entre les deux cas parfaits de membrane pure et de flexion pure. L'objectif est de se rapprocher au maximum du cas de membrane pure tout en prenant en compte des contraintes extérieures : la taille du montage d'essai doit permettre de tester des membranes mais sa taille doit rester raisonnable pour être adapté à des essais en laboratoire, pour être manipulable facilement et pour que son coût soit maîtrisé. En conclusion, bien que le rapport épaisseur sur longueur de 1/50 habituellement admis pour caractériser une membrane entraîne effectivement des contraintes de traction dans toute l'épaisseur à la fois dans le cas de plaques carrées et de plaques circulaires, l'écart relatif entre les contraintes sur la peau supérieure et les contraintes sur la peau inférieure n'est pas nul et vaut environ 50%. Dans les dimensions des brides de 513,5 mm de diamètre, ce rapport de 1/50 correspondrait à des membranes d'environ 10 mm d'épaisseur. Les préimprégnés utilisés au cours de cette thèse permettent de fabriquer des membranes dont l'épaisseur varie entre 0,85 mm et 2,1 mm ; ce qui correspond à des rapports épaisseur sur longueur entre 1/604 et 1/245 qui sont ainsi bien inférieurs à 1/50, qui correspondent à des épaisseurs permettant d'avoir des écarts relatifs entre les contraintes sur la peau supérieure et inférieure très faibles et qui permettent donc d'assurer un comportement de membrane.

## 2.2. Montage d'essai conçu

### 2.2.1. Description du montage

Afin d'utiliser des pièces déjà présentes dans le commerce, des brides habituellement utilisées pour les pipelines sont utilisées afin de fixer les membranes testées. De part leurs dimensions, celles-ci sont bien adaptées aux essais de gonflement réalisés au cours de cette thèse. Un schéma du montage d'essai conçu est présenté sur la figure 2.9, une photographie sur la figure 2.10 et un dessin sur la figure 2.11. Celui-ci est constitué de plusieurs pièces :

- Deux brides en acier fixent la membrane testée. Une bride pleine (B) de 48 mm d'épaisseur sert de fond au montage. Une bride plate (A) de 56 mm sert à fermer le montage. Celle-ci a un diamètre intérieur de 513,5 mm permettant de laisser la membrane se déformer. Les deux brides ont un diamètre extérieur de 730 mm. Elles sont serrées avec 20 boulons de 33 mm de diamètre ;
- La membrane composite testée (C) est serrée entre les deux brides ;
- Une membrane en caoutchouc EPDM (D) est placée entre la membrane composite et la bride pleine afin d'assurer l'étanchéité du montage au moment de la rupture de la membrane composite ;
- De l'huile hydraulique est utilisée comme fluide pour la mise sous pression. Ce choix est fait car c'est un fluide quasiment incompressible et il évite donc une explosion au moment de la rupture de la membrane ;
- Une pompe manuelle est utilisée pour mettre l'huile sous pression ;
- Un manomètre connecté à un système d'acquisition de données mesure la pression appliquée au cours de l'essai ;
- La mesure des déformations de la membrane est faite avec des jauges de déformation et deux caméras permettant une mesure du champ de déplacements et de déformations grâce à la corrélation d'images numériques en trois dimensions.

2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.2. Montage d'essai conçu

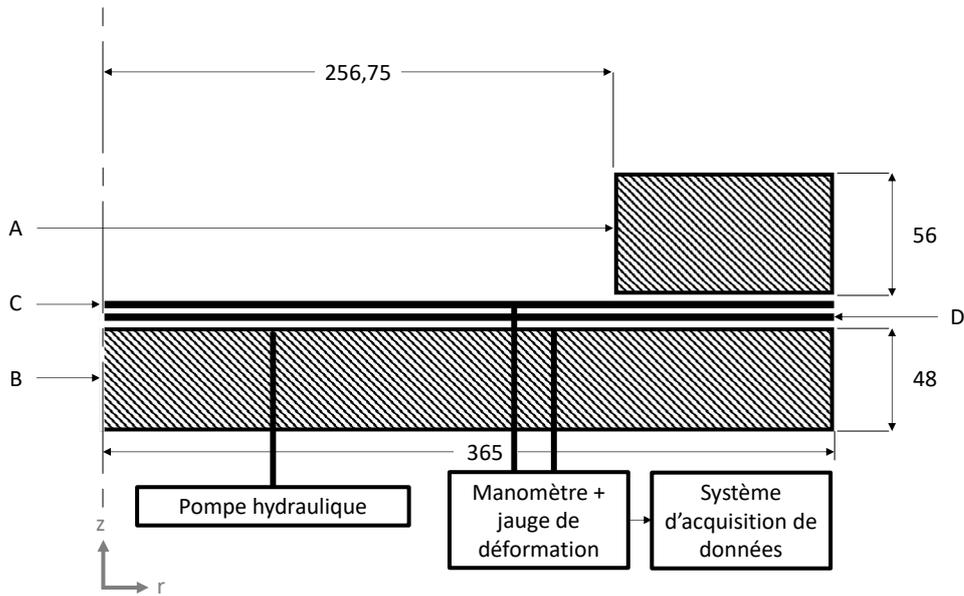


FIGURE 2.9. – Schéma du montage d'essai de gonflement circulaire. A : bride plate ; B : bride pleine ; C : membrane composite testée ; D : membrane d'étanchéité.



FIGURE 2.10. – Photographie du montage circulaire

2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.2. Montage d'essai conçu

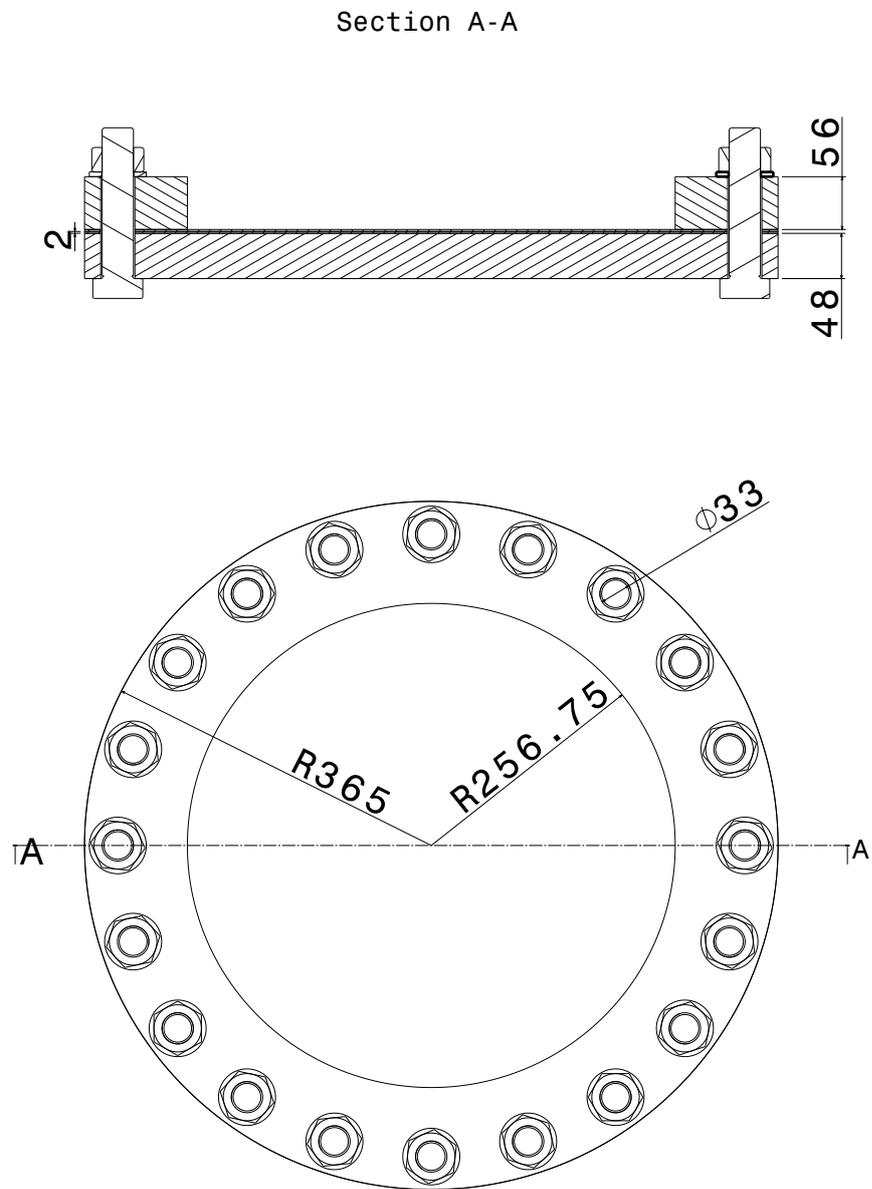


FIGURE 2.11. – Dessin du montage d'essai circulaire

### 2.2.2. Modélisation par éléments finis de la déformation des brides de fixation

Le montage est constitué de deux brides habituellement utilisées pour le raccordement de tuyauterie. Les brides retenues sont une bride plate (type 01) et pleine (type 05) dans la dimension DN 500 (diamètre nominal de 500 mm) et PN 25 (pression nominale de 25 bar) selon la norme NF EN 1092-1. Une modélisation par éléments finis est faite afin de vérifier que la déformation des brides est négligeable devant la déformation de la membrane testée afin que les résultats soient facilement interprétables. En effet, les déplacements et les déformations doivent être négligeables pour ne pas modifier la géométrie et les conditions aux limites au cours de l'essai.

#### 2.2.2.1. Détails de la modélisation par éléments finis

La modélisation est faite avec des éléments finis axisymétriques linéaires à 4 noeuds avec intégration réduite. Ce type de modélisation est adapté lorsque le problème est axisymétrique, c'est-à-dire lorsqu'une structure a une géométrie, des chargements, des conditions aux limites qui présentent une symétrie de révolution et que le comportement des matériaux considérés est isotrope [56]. La membrane modélisée correspond à la membrane la plus épaisse et donc la plus raide testée au cours de ces travaux. Il s'agit d'une membrane d'une épaisseur de 2,1 mm en verre/époxy. Un comportement isotrope correspondant au comportement du stratifié quasi-isotrope présenté dans les tableaux 3.1 et 3.2 est implémenté avec  $E = 16,4GPa$  et  $\nu = 0,3$ . Les brides sont modélisées avec un module de Young de  $E = 210GPa$  et un coefficient de Poisson de  $\nu = 0,3$ . Les conditions aux limites sont résumées sur la figure 2.12. Une pression uniforme de 2,5 MPa correspondant à la pression nominale des brides est appliquée sur la face inférieure de la membrane et sur la face supérieure de la bride pleine (il est à noter que la pression maximale effectivement atteinte au cours des essais est de moins de 1,2 MPa, ce calcul est donc conservatif). Une axisymétrie selon Y est appliquée : les déplacements selon les axes X et Z et la rotation selon l'axe Y sont bloqués. Le déplacement selon Y du noeud fléché sur la figure est bloqué. Le serrage des boulons est simulé par une pression de 9 MPa correspondant à l'effort nécessaire pour l'équilibre est appliquée sur la face supérieure de la bride plate et sur la face inférieure de la bride pleine comme représenté sur la figure 2.12. L'interaction entre les pièces est modélisée avec du contact afin de rendre possible le glissement entre celles-ci.

## 2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.2. Montage d'essai conçu

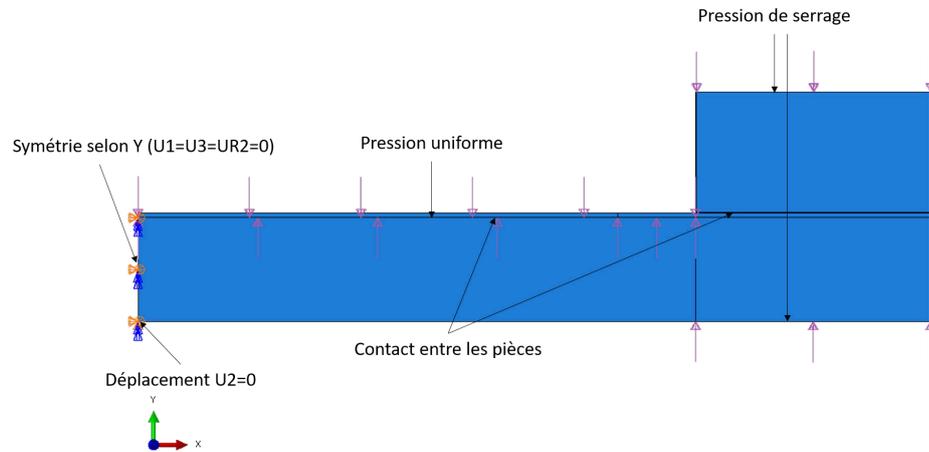


FIGURE 2.12. – Conditions aux limites et interaction dans la modélisation axisymétrique

### 2.2.2.2. Résultat

La figure 2.13 représente les déplacements des brides au cours de l'essai. Le déplacement maximal obtenu vaut moins de 0,5 mm et correspond au déplacement de la bride plate selon l'axe y. Ces résultats montrent que le déplacement des brides est très faible. Les résultats ne seront donc pas affectés par la déformation des brides.

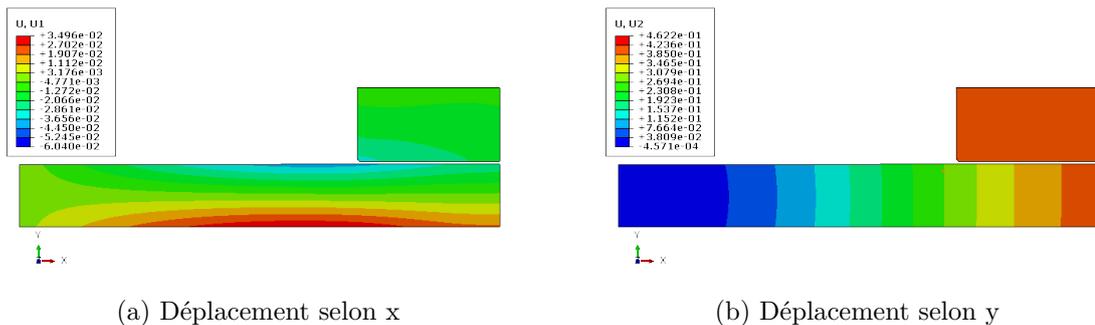


FIGURE 2.13. – Résultats de la modélisation par éléments finis dans les brides à 25 bar

### 2.2.3. Calcul du serrage et de la tenue des vis de fixation

La fixation de la membrane testée est assurée par le serrage des brides avec 20 boulons en dimension M33 de classe 10.9, ce qui signifie que leur limite élastique vaut 900 MPa et leur résistance vaut 1000 MPa. La norme NF E25-030-1 est utilisée pour déterminer le couple de serrage à appliquer. Selon cette norme, la valeur du couple appliqué doit garantir une précharge comprise en une valeur  $F_0^{max}$  calculée pour atteindre une contrainte équivalente à 90% de la limite d'élasticité de la vis et  $F_0^{min}$  qui est fonction de la précision du moyen de serrage et du coefficient de frottement.  $F_0^{min}$  doit être choisie afin que :

$$F_0^{min} \geq F_A^{max} + \frac{F_t^{max}}{\mu_p^{min}} \quad (2.1)$$

avec :

- $F_A^{max}$  la force extérieure axiale maximale ;
- $F_t^{max}$  la force transversale maximale ;
- $\mu_p^{min}$  le coefficient de frottement minimal au plan de joint.

Dans notre cas, l'effort extérieur correspond à la pression appliquée au cours de l'essai. L'effort appliqué est calculé pour une surface d'application de la pression correspondant à un disque de 730 mm de diamètre. Ce choix est conservatif car ce diamètre correspond au diamètre extérieur des brides alors que si le contact de la bride plate est maintenu, la pression ne s'applique que sur la surface intérieure de la bride plate, soit 513,5 mm. Le couple de serrage est alors donné en fonction de la pression appliquée sur la figure 2.14. Les boulons ont été lubrifié avec de la graisse Molykote® permettant d'obtenir un coefficient de frottement  $\mu = 0,08$  [57]. Un couple de serrage de 500 Nm permet donc d'appliquer un pression de 20 bar en gardant le contact entre les pièces et donc en assurant l'étanchéité du montage. Ce couple de serrage a été utilisé pour des essais allant jusqu'à 11,7 bar et a permis d'assurer l'étanchéité durant chaque essai.

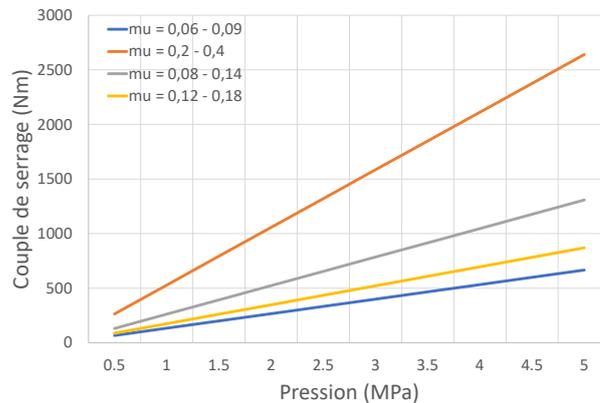


FIGURE 2.14. – Couple de serrage des boulons en fonction de la pression appliquée et du coefficient de frottement entre pièces

### 2.2.4. Conception d'un masque pour tester des membranes carrées

Afin de tester des membranes carrées, un masque en carbone est ajouté au-dessus de la membrane testée afin de masquer la partie circulaire du montage. La figure 2.15 présente le dessin du montage avec le masque conçu. Celui-ci permet de tester des membranes carrées de 363 mm de côté.

La conception a été faite afin de limiter au maximum son déplacement pour que celui-ci n'impacte pas le déplacement de la membrane et pour que la condition au bord de celle-ci soit similaire au cas circulaire où le bord est fixé entre les brides. Le masque doit donc également permettre de transmettre l'effort de serrage jusqu'au bord de la membrane. La raideur du masque doit être suffisamment grande pour garantir ces critères. Le masque est constitué de 48 plis de préimprégné Hexcel HexPly (M18/1 43% G939) assemblés selon la séquence de drapage  $[0/15/30/45/60/75]_s$ . La cuisson a été faite sur deux jours, 8 heures par jour à 150 ° C. Contrairement aux autres matériaux utilisés au cours de ces travaux, ce matériau n'a pas été caractérisé pour connaître ses propriétés. Celles-ci sont donc issues des données fournies par Hexcel. Après cuisson, le masque a une épaisseur de 16 mm. D'après Hexcel, le taux de fibres est de 55% pour une épaisseur de 0,227 mm. Dans notre cas, nous avons 48 plis donnant une épaisseur de 16 mm. On a donc une épaisseur par pli de 0,333 mm. L'épaisseur supplémentaire correspond à un excès de résine. La cuisson n'a pas permis un compactage et un écoulement de la résine suffisant. La rigidité donnée par Hexcel est donc réévaluée en prenant en compte le taux de fibres. La rigidité du stratifié est ensuite calculée avec la théorie des stratifiés et vaut 35 GPa.

La membrane modélisée est la même que pour la conception du montage circulaire. Il s'agit donc comme précédemment d'une membrane d'une épaisseur de 2,1 mm en verre/époxy avec un comportement isotrope correspondant au comportement du stratifié quasi-isotrope présenté dans les tableaux 3.1 et 3.2 :  $E = 16,4 \text{ GPa}$  et  $\nu = 0,3$ . Des éléments coques volumiques sont utilisés afin de modéliser le masque et la membrane. Un quart des pièces est modélisé afin de diminuer le temps de calcul. La figure 2.16 présente les conditions aux limites. Une pression uniforme de 25 bar est appliquée sur la face inférieure de la membrane. Cette surface comprend également la surface située sous le masque et s'arrête au niveau de la bride plate. La surface du masque en contact avec la bride plate est encastrée tout comme la surface de la membrane en contact avec la bride pleine qui se situe directement en-dessous de la bride plate. Des symétries sont appliquées aux bords de la membrane et du masque afin de reconstituer les pièces dans leur intégralité. Comme présenté sur la figure 2.17, aucun déplacement relatif entre la membrane et le masque n'est possible sur la zone située sous la bride plate alors que l'interaction est modélisée par du contact permettant du glissement entre les pièces au-delà de cette zone.

2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.2. Montage d'essai conçu

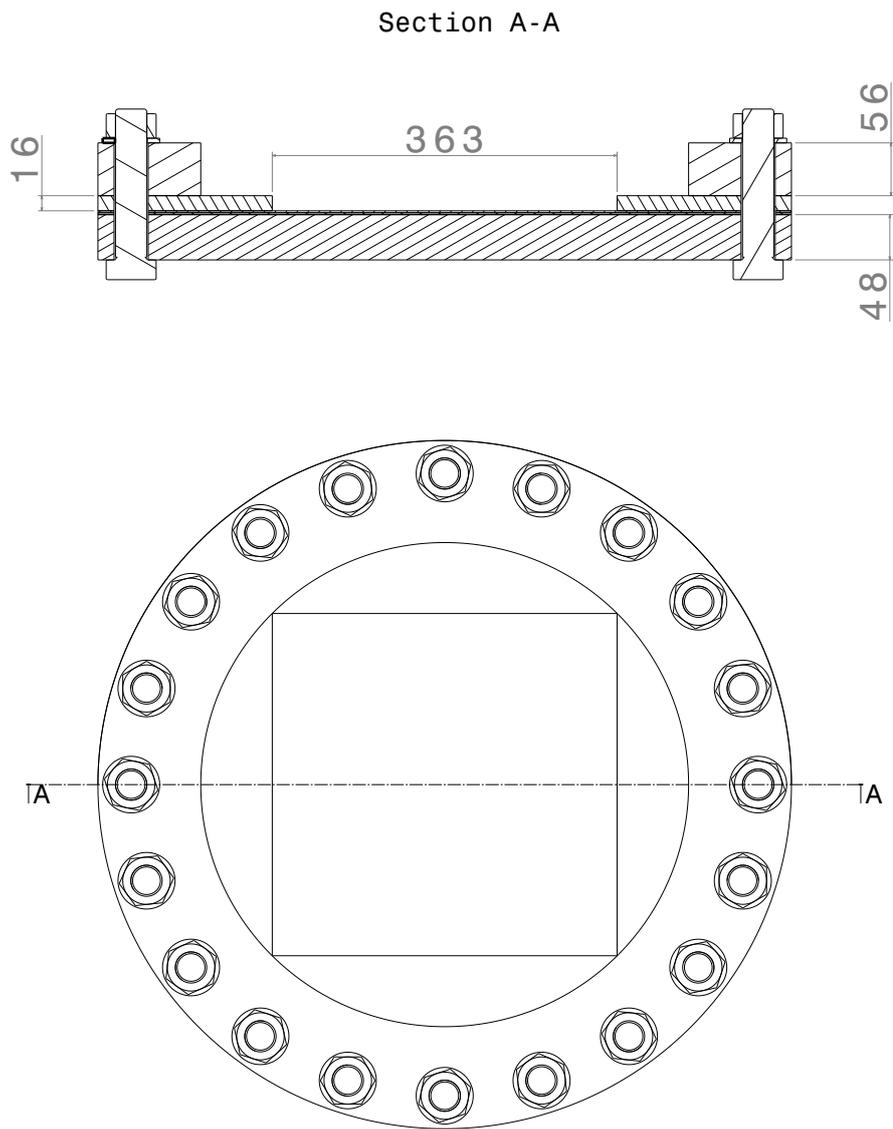


FIGURE 2.15. – Dessin du montage d'essai carré

2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.2. Montage d'essai conçu

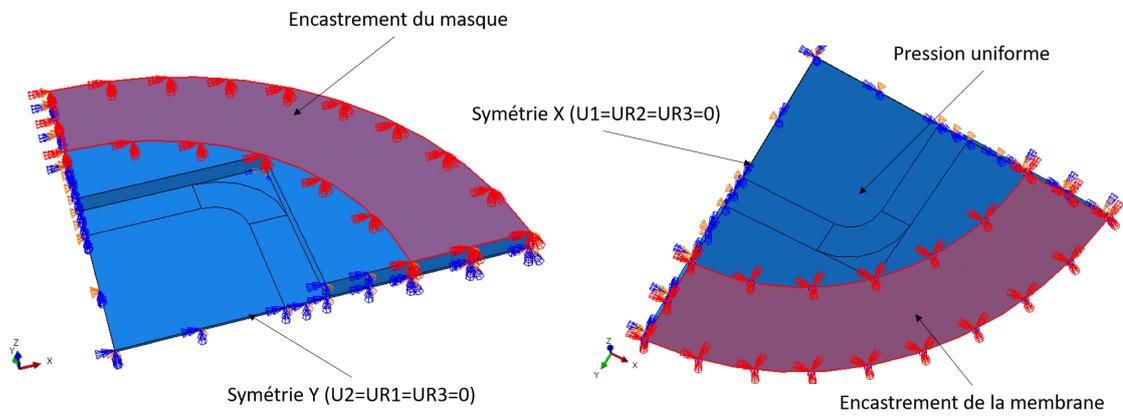


FIGURE 2.16. – Conditions aux limites de la modélisation par éléments finis du masque

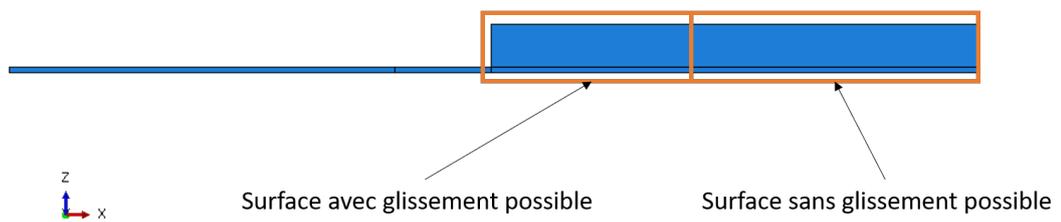


FIGURE 2.17. – Interaction entre les pièces dans la modélisation par éléments finis du masque

## 2. Conception d'un montage d'essai de gonflement – 2.2. Montage d'essai conçu

La figure 2.18 montre que le déplacement maximal du masque vaut 3 mm. Cette géométrie est donc retenue car le déplacement du masque est limité et cela permet de concevoir une pièce dans des dimensions raisonnables. Cette conception est conservatrice car les essais réalisés ont été fait avec des membranes moins épaisses (0,9 mm au lieu des 2,1 mm modélisés) avec le même type de matériau et donc moins raides et la pression maximale atteinte vaut 11,7 bar, soit 47% de la pression appliquée lors de cette modélisation. Dans cette configuration, le déplacement du masque vaut cette fois-ci 1 mm.

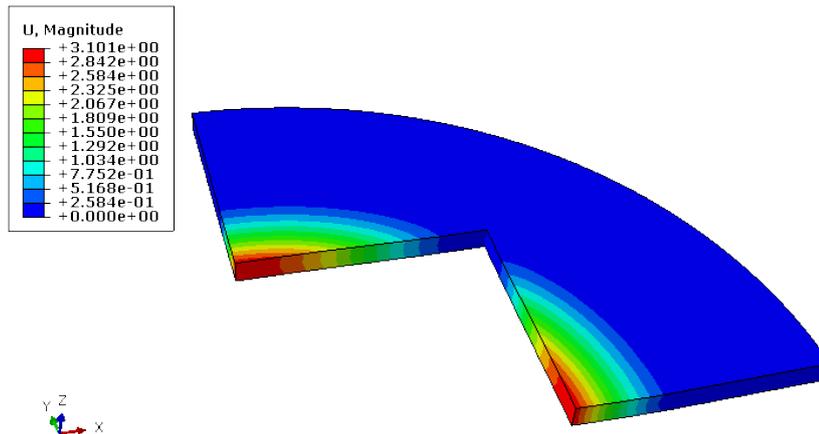


FIGURE 2.18. – Déplacement du masque pour une pression appliquée de 25 bar

Une photographie du montage avec le masque conçu est présentée sur la figure 2.19.

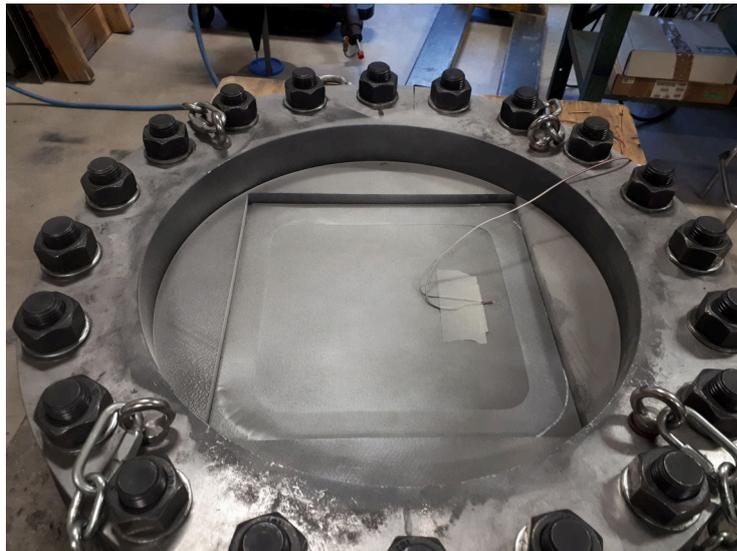


FIGURE 2.19. – Photographie du montage carré

## 2.3. Conclusion

Un montage d'essai a été entièrement conçu au début de la thèse pour effectuer des essais de gonflement permettant de valider la solution de membrane composite pour la conception des cloisons de compartimentage des flotteurs de BW Ideol.

Les pièces composant le montage ont été sélectionnées afin d'assurer une raideur suffisante pour éviter une déformation perturbant l'analyse des résultats d'essai.

La dimension a été déterminée afin d'assurer un comportement de membrane avec comme paramètre clef le rapport épaisseur sur longueur qui doit être le plus faible possible pour se rapprocher du comportement d'une membrane idéale. Les premiers essais ont été faits avec un rapport de 1/245 et les suivants ont été réalisés avec des rapports encore plus faibles alors qu'il est communément admis qu'un rapport de 1/50 caractérise une membrane.

Un masque en carbone a été conçu et fabriqué afin de masquer la forme circulaire du montage pour tester des membranes carrées.

Le montage est donc adaptable en fonction de la configuration des essais réalisés, ce qui permet de tester de nombreuses solutions différentes : membranes circulaires, membrane carrées, stratifiés (épaisseur, matériau, orientation des fibres), conditions aux limites (membranes fixées ou libres de glisser), ajout de pièce améliorant la tenue de la membrane, membranes avec concentration de contraintes, ...

### 3. Membranes circulaires

*Ce troisième chapitre présente les travaux réalisés sur des membranes de forme circulaire.*

*Pour commencer, une modélisation par éléments finis est faite afin de déterminer la réponse de la membrane composite circulaire dans le cas où celle-ci aurait un comportement de membrane pure. Pour cela, des éléments de membrane sont utilisés afin d'éliminer toute flexion au bord de la membrane. La répartition et les directions des déformations et des contraintes sont analysées afin de pouvoir ensuite comparer les résultats expérimentaux à ce cas idéal. Les essais réalisés sont ensuite présentés.*

*Un premier essai montre la nécessité de réduire la courbure au bord de la membrane afin d'augmenter la tenue de celle-ci car la membrane a rompu à son bord alors que sa zone centrale était sollicitée à un niveau de déformation bien en-deçà de la limite à rupture du matériau. La tenue de la membrane est améliorée en ajoutant une liaison flexible au bord de la membrane qui permet de maîtriser la courbure à son bord et donc de diminuer la flexion sur cette zone. Un critère d'optimisation de la liaison flexible est utilisé pour prendre en compte la masse ajoutée à la structure. Cela permet d'augmenter la tenue de la membrane tout en maîtrisant son gain de masse et par conséquent le coût ajouté. La déformation devient alors quasiment homogène sur toute la surface de la membrane, ce qui permet de se rapprocher du résultat obtenu avec la membrane idéale.*

*Dans un deuxième temps, une mesure de champ est faite avec deux caméras permettant de couvrir une zone étendue de la membrane alors que des jauges de déformation étaient auparavant utilisées. En utilisant la corrélation d'images numériques en trois dimensions (3D-DIC), cela permet de mesurer le champ de déplacements et de déformations mais également de calculer les courbures et ensuite les contraintes au sein de la membrane seulement à partir de l'équation d'équilibre d'une membrane sous pression sans avoir besoin de connaître le comportement du matériau. Les résultats sont comparés à une modélisation par éléments finis pour valider la méthode de calcul des contraintes.*

*Pour finir, sont présentés des essais réalisés avec une condition au bord différente : la membrane composite n'est plus serrée entre les deux brides. Celle-ci devient alors libre de glisser. Cela permet de démontrer l'importance de la fixation du bord de la membrane. En effet, le fait de ne pas fixer le bord de la membrane engendre la rupture de cette dernière à un niveau de pression beaucoup plus faible que dans le cas des membranes serrées entre les brides. Cette rupture prématurée est due à un flambement au bord de la membrane. Celui-ci est causé par une compression dans la direction circonférentielle présente au bord de la membrane.*

## Sommaire

3.1	Modélisation par éléments finis d'une membrane circulaire sous pression idéale . . . . .	45
3.2	Conception d'une liaison flexible optimale . . . . .	50
3.2.1	Essais préliminaires réalisés sans liaison flexible optimale . . . . .	50
3.2.1.1	Objectif . . . . .	50
3.2.1.2	Membrane composite testée . . . . .	50
3.2.1.3	Instrumentation . . . . .	52
3.2.1.4	Résultats expérimentaux . . . . .	53
3.2.1.5	Comparaison avec modélisation numérique . . . . .	55
3.2.1.6	Conclusion . . . . .	58
3.2.2	Essai réalisé avec une liaison flexible non-optimisée . . . . .	59
3.2.3	Conception d'une liaison flexible optimisant la tenue de la membrane composite . . . . .	64
3.2.3.1	Choix d'une géométrie aisément fabricable . . . . .	64
3.2.3.2	Matériau utilisé pour la conception et fabrication de la liaison flexible optimisée . . . . .	65
3.2.3.3	Description de la modélisation numérique par éléments finis utilisée . . . . .	65
3.2.3.4	Maximisation de la pression spécifique . . . . .	67
3.2.3.5	Liaison flexible circulaire optimale . . . . .	68
3.2.4	Essais réalisés avec la liaison flexible optimisée . . . . .	72
3.2.4.1	Objectif et configuration de l'essai . . . . .	72
3.2.4.2	Résultats expérimentaux . . . . .	75
3.2.4.3	Comparaison avec modélisation numérique . . . . .	79
3.2.4.4	Comparaison avec les essais réalisés sans la liaison flexible optimisée . . . . .	81
3.2.5	Conclusion . . . . .	84
3.3	Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d'images numériques en trois dimensions . . . . .	85
3.3.1	Équilibre d'une membrane circulaire sous pression . . . . .	85
3.3.2	Essai de gonflement réalisé sur une membrane circulaire avec liaison flexible optimisée avec mesure de champ . . . . .	86
3.3.2.1	Configuration de l'essai . . . . .	86
3.3.2.2	Résultats et observations . . . . .	87
3.3.3	Conclusion . . . . .	94
3.4	Membranes libres de glisser . . . . .	95
3.4.1	Description des essais réalisés . . . . .	95
3.4.1.1	Montage d'essai . . . . .	95
3.4.1.2	Essai sur membrane quasi-isotrope . . . . .	96
3.4.1.3	Essai sur membrane orthotrope . . . . .	98
3.4.2	Conclusion . . . . .	101

### 3.1. Modélisation par éléments finis d’une membrane circulaire sous pression idéale

Une modélisation par éléments finis est faite afin de déterminer la répartition des déformations sur une membrane circulaire sous pression. Cette membrane est considérée comme étant idéale car elle est modélisée avec des éléments membranes et ceux-ci ne représentent donc que le feuillet moyen de la structure, aucune variation de contrainte dans l’épaisseur ne peut ainsi exister, aucune flexion ne peut donc être présente et le comportement de membrane est idéal. Le diamètre de celle-ci vaut 513,5 mm et correspond au diamètre intérieur de la bride plate du montage d’essai présenté dans le chapitre 2.2. L’épaisseur vaut 2 mm pour correspondre à l’épaisseur des premières membranes testées. Le matériau modélisé a un module de Young de 11 GPa et un coefficient de Poisson de 0,3. La non-linéarité géométrique est prise en compte. Les déplacements du bord sont bloqués et une pression uniforme de 1,9 MPa est appliquée comme illustré sur la figure 3.1 afin d’obtenir une déformation maximale de 2,5% correspondant à une déformation à rupture standard d’un matériau verre/époxy. Des éléments de membrane avec 4 nœuds sont utilisés pour mailler la pièce.

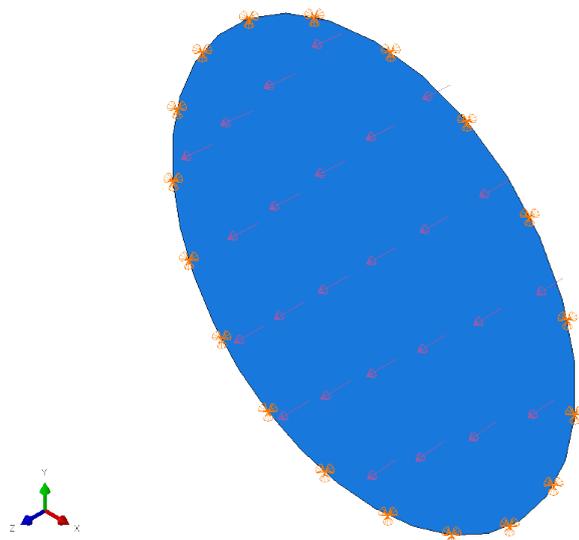


FIGURE 3.1. – Modélisation par éléments finis d’une membrane circulaire idéale

La figure 3.2 montre que les déformations maximales principales sont quasiment uniformes sur la membrane entière (2% d’écart entre les valeurs maximales et minimales) et la figure 3.3 montre que ces déformations maximales principales sont dans la direction méridienne de la membrane comme définie sur la figure 3.4. Les déformations circonférentielles, quant à elles, sont nulles au bord et sont égales aux déformations méridiennes au centre de la membrane comme le montre la figure 3.6 qui compare les déformations méridiennes et circonférentielles sur la section définie

### 3. Membranes circulaires – 3.1. Modélisation par éléments finis d'une membrane circulaire sous pression idéale

comme illustré sur la figure 3.5.

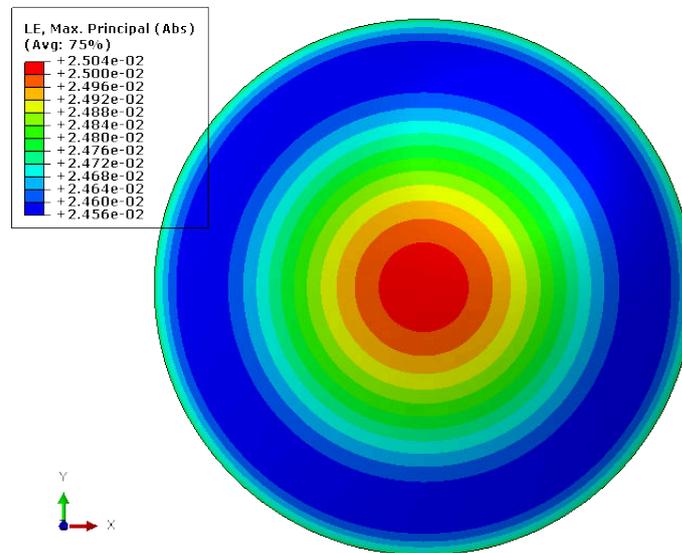


FIGURE 3.2. – Déformations maximales principales de la membrane circulaire idéale

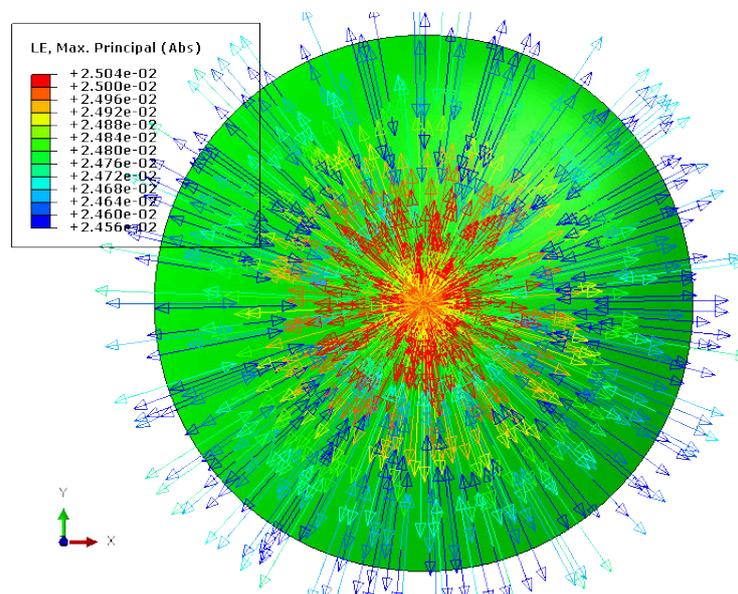


FIGURE 3.3. – Direction des déformations maximales principales de la membrane circulaire idéale

3. Membranes circulaires – 3.1. Modélisation par éléments finis d'une membrane circulaire sous pression idéale

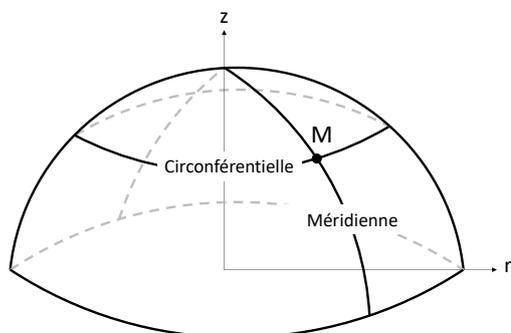


FIGURE 3.4. – Définition des directions principales d'une membrane circulaire déformée

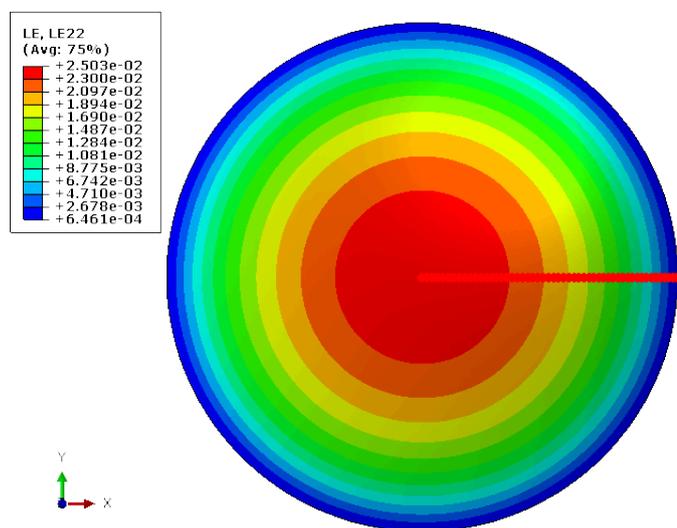


FIGURE 3.5. – Déformations circumférentielles et section d'analyse des déformations méridiennes et circumférentielles de la membrane circulaire idéale

### 3. Membranes circulaires – 3.1. Modélisation par éléments finis d’une membrane circulaire sous pression idéale

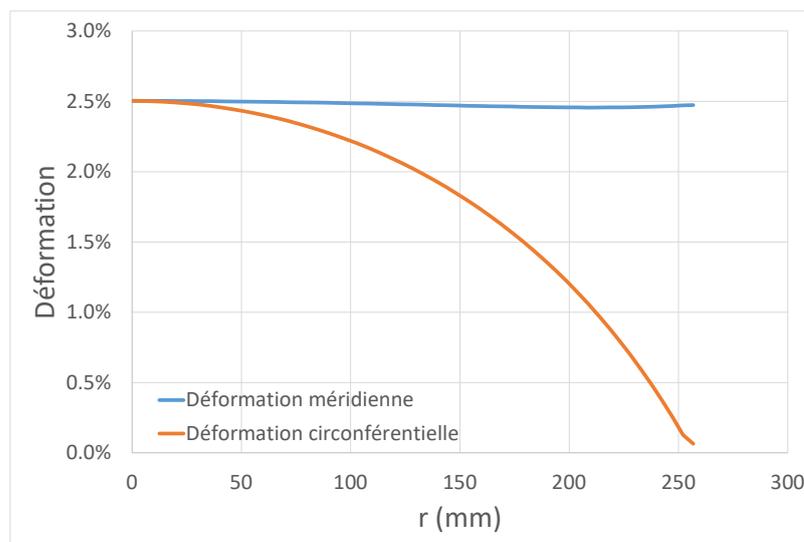


FIGURE 3.6. – Comparaison des déformations méridiennes et circonférentielles de la membrane circulaire idéale

Il a été montré dans les premiers chapitres que les contraintes et les déformations sont constantes dans l’épaisseur d’une membrane. La présente analyse illustre le fait que les déformations sont également quasiment constantes sur toute la surface de la membrane. La figure 3.7 montre que ce n’est pas le cas concernant les contraintes (23% d’écart entre les valeurs maximales et minimales). Ce résultat peut être retrouvé facilement de manière analytique. En effet, en contraintes planes, la loi de comportement s’écrit :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

La déformation méridienne étant quasiment constante du centre au bord de la membrane et la déformation circonférentielle étant nulle au bord et égale à la déformation méridienne au centre (figure 3.6), la contrainte méridienne vaut :

$$\begin{aligned} \text{— au centre : } \sigma_{xx} &= \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{xx} (1+\nu) = \frac{E \varepsilon_{xx}}{1-\nu} \\ \text{— au bord : } \sigma_{xx} &= \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_{xx} \end{aligned}$$

En notant la contrainte au bord  $\sigma_b$  et la contrainte au centre  $\sigma_c$ , on a donc :

$$\sigma_c = (1+\nu)\sigma_b \quad (3.2)$$

Ces relations sont bien vérifiées d’après les résultats de la modélisation par éléments finis. En effet  $\sigma_c = \frac{11000 \times 0,02504}{1-0,3} = 393,5 \text{ MPa}$  et  $\sigma_b = \frac{11000 \times 0,0249}{1-0,3^2} = 300,9 \text{ MPa}$

3. Membranes circulaires – 3.1. Modélisation par éléments finis d'une membrane circulaire sous pression idéale

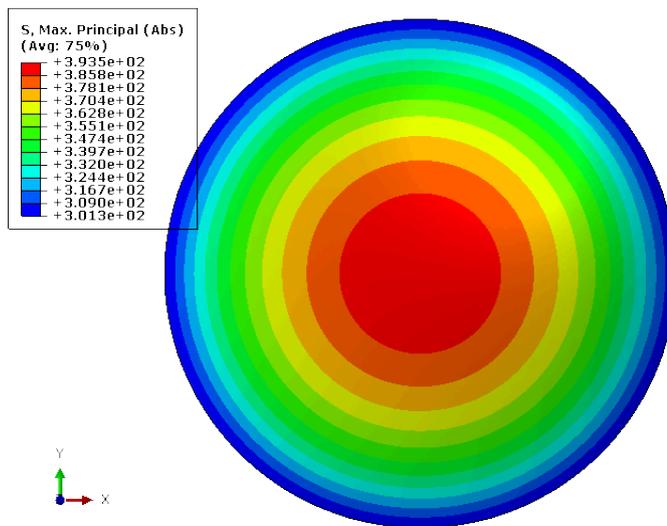


FIGURE 3.7. – Contraintes maximales principales d'une membrane circulaire idéale

Ces résultats pourront être comparés aux résultats expérimentaux pour déterminer si les structures testées ont un comportement se rapprochant de celui de la membrane idéale.

## 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

Cette section présente les résultats des essais de gonflement faits sur des membranes circulaires. Ces résultats ont été significativement améliorés en ajoutant une pièce qu'on appellera "liaison flexible" qui permet d'atténuer la courbure présente au bord de la membrane entraînant la rupture de celle-ci au niveau de sa fixation avec la bride plate. Cette liaison flexible permet d'augmenter la pression à rupture en limitant l'ajout de masse avec l'utilisation d'un critère d'optimisation de sa géométrie prenant en compte à la fois la pression à rupture et la masse de la structure.

### 3.2.1. Essais préliminaires réalisés sans liaison flexible optimale

#### 3.2.1.1. Objectif

Un premier essai de gonflement a été réalisé dans la même configuration que celle du montage d'essai circulaire présenté dans la section 2.2. Cet essai a pour but de tester le montage d'essai conçu et de mesurer la tenue de la membrane composite. Ces résultats montreront par la suite l'intérêt d'ajouter une liaison flexible pour optimiser la tenue de la membrane composite.

#### 3.2.1.2. Membrane composite testée

La membrane composite a été fabriquée à partir d'un tissé déséquilibré pré-imprégné verre/époxy (référence : Hexcel 1055ES18). Ce tissé est déséquilibré car il y a 83% de fibres dans le sens chaîne et 17% de fibres dans le sens trame. Le drapage a été fait pour obtenir un stratifié quasi-isotrope avec une séquence de drapage  $[0/60/-60]_s$ . Le choix d'utiliser un stratifié quasi-isotrope est fait car l'axisymétrie de la géométrie, du chargement et des conditions aux limites entraîne une réponse axisymétrique de la membrane à son chargement ; comme le montre l'analyse faite dans la section 3.1, les contraintes et déformations principales sont orientées selon la direction méridienne de manière axisymétrique. La cuisson de la membrane a été faite sous vide pendant trois heures à 120 ° C. L'épaisseur de la membrane composite après cuisson est de 2,1 mm, ce qui donne un rapport épaisseur sur diamètre de 1/245 (bien inférieur à la limite de 1/50 présentée dans la section 2.1.4). Les propriétés mécaniques du stratifié composant la membrane composite sont présentées dans le tableau 3.1 pour la direction 0 ° correspondant à une direction de fibres et dans le tableau 3.2 pour la direction 30 ° correspondant à la bissectrice entre deux directions de fibres. Ces propriétés sont mesurées avec des essais de traction simple. Le module de Young noté  $E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0,5\%}}$  correspond au module de Young calculé entre 0% et 0,5% de déformation. Pour  $E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{1\%}}$ , le module de Young est calculé entre 0% et 1% de déformation. Quant à  $E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}$ , il correspond au module de Young calculé entre 0% de déformation et la déformation à rupture. Le calcul de ces différents modules de Young permet d'utiliser celui qui correspond

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

à la déformation atteinte lors des essais afin de comparer les résultats expérimentaux avec les résultats des modélisations par éléments finis. Ce choix est fait pour simplifier les modélisations en utilisant un comportement matériau linéaire alors que le comportement réel est légèrement non-linéaire comme le montre la figure 3.8.  $\sigma_r$  et  $\varepsilon_r$  correspondent respectivement à la contrainte à rupture et à la déformation à rupture et  $\nu$  correspond au coefficient de Poisson.

$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0,5\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{1\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}$ (GPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\varepsilon_r$ (%)	$\nu$
16,4	14,5	12,0	307	2,5	0,3

TABLEAU 3.1. – Propriétés du stratifié  $[0/60/-60]_s$  de 1055ES18 à  $0^\circ$

$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0,5\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{1\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}$ (GPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\varepsilon_r$ (%)	$\nu$
16,3	14,6	10,9	282	2,7	0,3

TABLEAU 3.2. – Propriétés du stratifié  $[0/60/-60]_s$  de 1055ES18 à  $30^\circ$

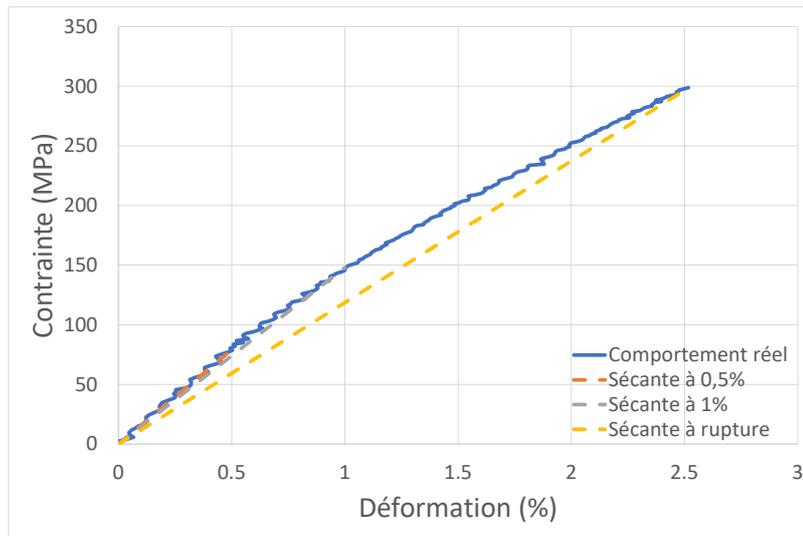


FIGURE 3.8. – Comportement en traction simple non-linéaire réel et comportement linéaire calculé à plusieurs niveaux de déformation

### 3.2.1.3. Instrumentation

Des jauges de déformations sont placées sur la membrane afin de mesurer les déformations méridiennes et circonférentielles à 160 mm du centre de la membrane. Cette distance est choisie afin de mesurer les déformations sur une zone centrale de la membrane (suffisamment loin du bord). Les jauges permettant de mesurer la déformation méridienne  $\varepsilon_m$  sont positionnées sur la direction  $0^\circ$  et  $90^\circ$  pour coïncider avec une direction correspondant à une direction d'orientation des fibres ( $\varepsilon_{m,f}$ ) et à une direction correspondant à la bissectrice entre deux directions d'orientation des fibres ( $\varepsilon_{m,b}$ ). Une jauge de déformation pour mesurer la déformation circonférentielle  $\varepsilon_c$  est placée à 160 mm du centre de la membrane sur la direction  $180^\circ$ , ce qui correspond à une direction d'orientation des fibres ( $\varepsilon_{c,f}$ ). Un schéma du positionnement des jauges est présenté sur la figure 3.9; les directions méridiennes et circonférentielles y sont définies et les traits gris représentent les différentes directions d'orientation des fibres. La pression est mesurée avec un manomètre. Les déformations et la pression sont enregistrées au cours de l'essai toutes les 0,2 secondes.

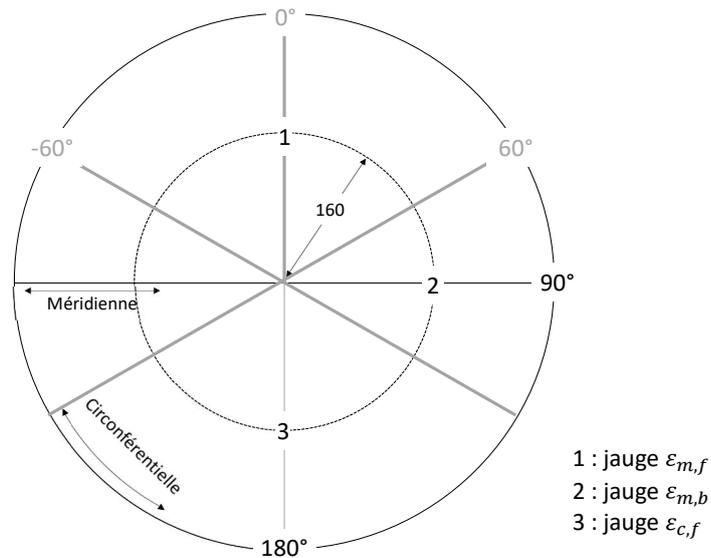


FIGURE 3.9. – Schéma du placement des jauges sur la membrane circulaire testée sans liaison flexible

### 3.2.1.4. Résultats expérimentaux

L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane. La figure 3.10 présente des photographies à deux stades de gonflement de la membrane. La figure 3.10a montre la membrane au début de l'essai à pression nulle et la figure 3.10b montre la membrane dans son état déformé maximal juste avant sa rupture.

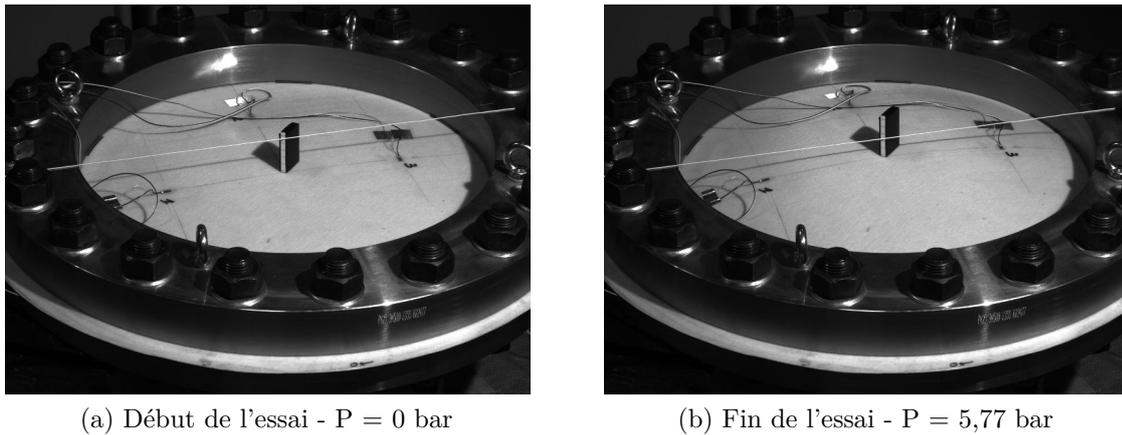


FIGURE 3.10. – Membrane composite testée sans liaison flexible à pression nulle et à pression à rupture

La figure 3.11 montre la membrane après sa rupture. On peut observer que la rupture est apparue au bord de la membrane au niveau de sa fixation avec la bride plate. La rupture est nette sur plusieurs centimètres le long du bord de la bride comme si celle-ci avait poinçonné la membrane composite. La rupture s'est ensuite propagée vers le centre de la membrane.

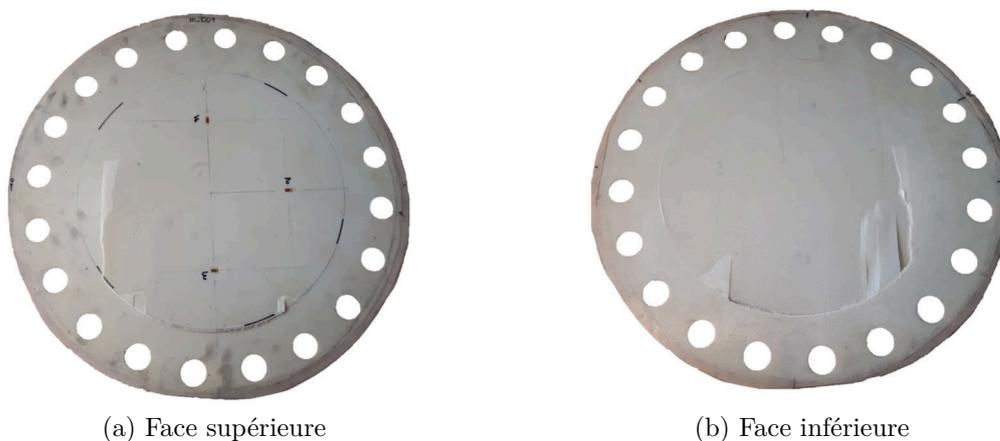


FIGURE 3.11. – Zone de rupture de la membrane circulaire testée sans liaison flexible

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

Certaines zones sont endommagées sans produire de fissure comme le montre la figure 3.12 où on peut observer une zone blanchie au bord de la membrane au niveau du contact avec le bord de la bride plate correspondant à un début de rupture.



FIGURE 3.12. – Endommagement du bord de la membrane composite testée sans liaison flexible

La rupture a eu lieu à une pression de 5,77 bar. La déformation maximale enregistrée est une déformation méridienne sur une direction de fibres et vaut 0,95%. La figure 3.13 présente les déformations mesurées par les trois jauges en fonction de la pression appliquée. On peut voir que la déformation méridienne sur la direction des fibres ( $\epsilon_{m,f}$ ) est très proche de la déformation méridienne sur la bissectrice entre deux directions de fibres ( $\epsilon_{m,b}$ ). Par contre, la déformation circonférentielle ( $\epsilon_{c,f}$ ) est beaucoup plus faible que la déformation méridienne ( $\epsilon_{m,f}$ ) comme c'est le cas pour la membrane idéale analysée dans la section 3.1. On peut noter que la pression au début de l'essai n'est pas nulle. Cela est dû au fait qu'une purge est faite avant de réaliser l'essai afin de chasser l'air présent entre la membrane d'étanchéité et la bride plate. Cette purge a initié la mise sous pression de la membrane et sa déformation.

La déformation maximale mesurée de 0,95% représente 38% de la limite à rupture du matériau présentée dans le tableau 3.1. La zone centrale de la membrane est donc peu sollicitée contrairement à la membrane circulaire idéale analysée précédemment où les déformations méridiennes sont constantes du bord jusqu'au centre de la membrane.

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

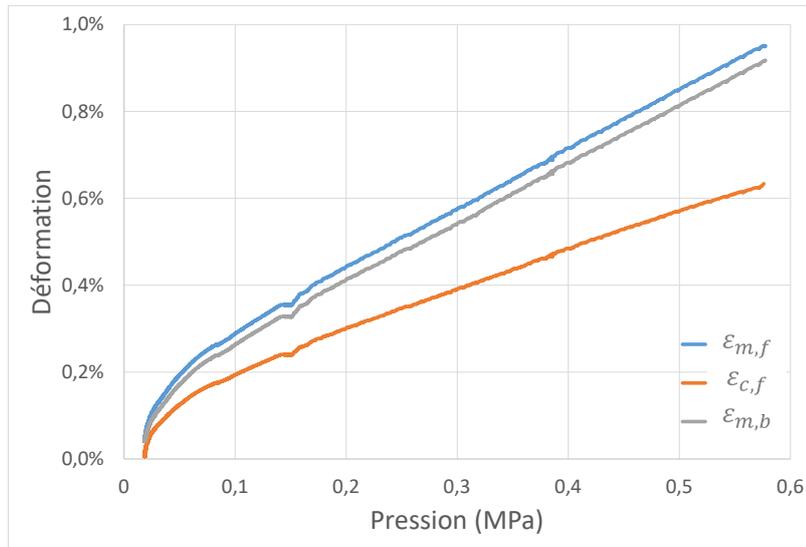


FIGURE 3.13. – Déformation en fonction de la pression de la membrane composite testée sans liaison flexible

#### 3.2.1.5. Comparaison avec modélisation numérique

Les résultats expérimentaux sont comparés avec une modélisation par éléments finis. Cette modélisation est faite avec des éléments axisymétriques car la géométrie de la membrane, le chargement, les conditions aux limites sont axisymétriques et le comportement du matériau est isotrope. Le modèle matériau utilisé est un modèle élastique linéaire. Afin de représenter au mieux la réalité du comportement du matériau, le module de Young utilisé est le module mesuré entre 0% et 1% de déformation présenté dans la section 3.2.1.2 car la zone centrale est sollicitée jusqu'à environ 1% de déformation. La figure 3.14 montre la comparaison des résultats expérimentaux mesurés avec les jauges de déformation et les résultats numériques pris sur la même zone (élément à 160 mm du centre). Les résultats sont très proches notamment à pression à rupture. L'écart présent à des pressions intermédiaires est dû au fait que le modèle du matériau est linéaire dans la modélisation numérique alors qu'il ne l'est pas dans la réalité ; avant la rupture, le module de Young est sous-estimé dans la modélisation par éléments finis et cela explique pourquoi la déformation expérimentale est inférieure à la déformation numérique pour une pression donnée.

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d’une liaison flexible optimale

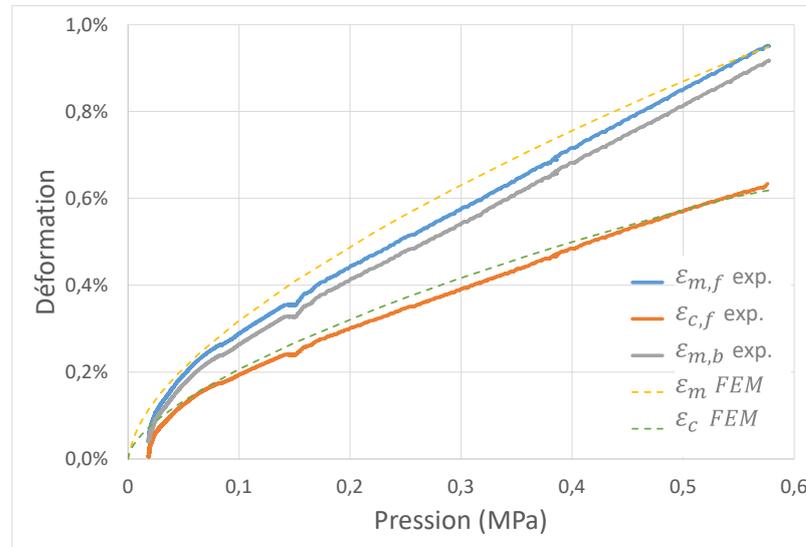


FIGURE 3.14. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la membrane composite testée sans liaison flexible

La modélisation par éléments finis permet également d’approfondir l’analyse des résultats sur des zones où les jauges de déformation ne sont pas présentes. A pression à rupture, une concentration de déformation est localisée sur la face inférieure de la membrane composite au niveau du bord de la bride plate comme le montre la figure 3.15 (zoom sur la figure 3.16). La figure 3.17 trace les déformations maximales principales sur la peau supérieure et inférieure de la membrane en fonction de la coordonnée radiale; elle montre de manière quantitative que les déformations ne sont pas constantes comme dans le cas de la membrane circulaire idéale analysée dans la section 3.1. La déformation maximale est de 3,8% ce qui correspond à 152% de la limite à rupture du matériau qui est de 2,5%. Même en moyennant la déformation sur une épaisseur de pli, on trouve une déformation d’environ 3,2%, ce qui correspond à 128% de la limite à rupture en traction simple. Cela peut s’expliquer par le fait qu’il est courant qu’un matériau ait une limite à rupture en flexion plus élevée qu’en traction [58, 59, 60].

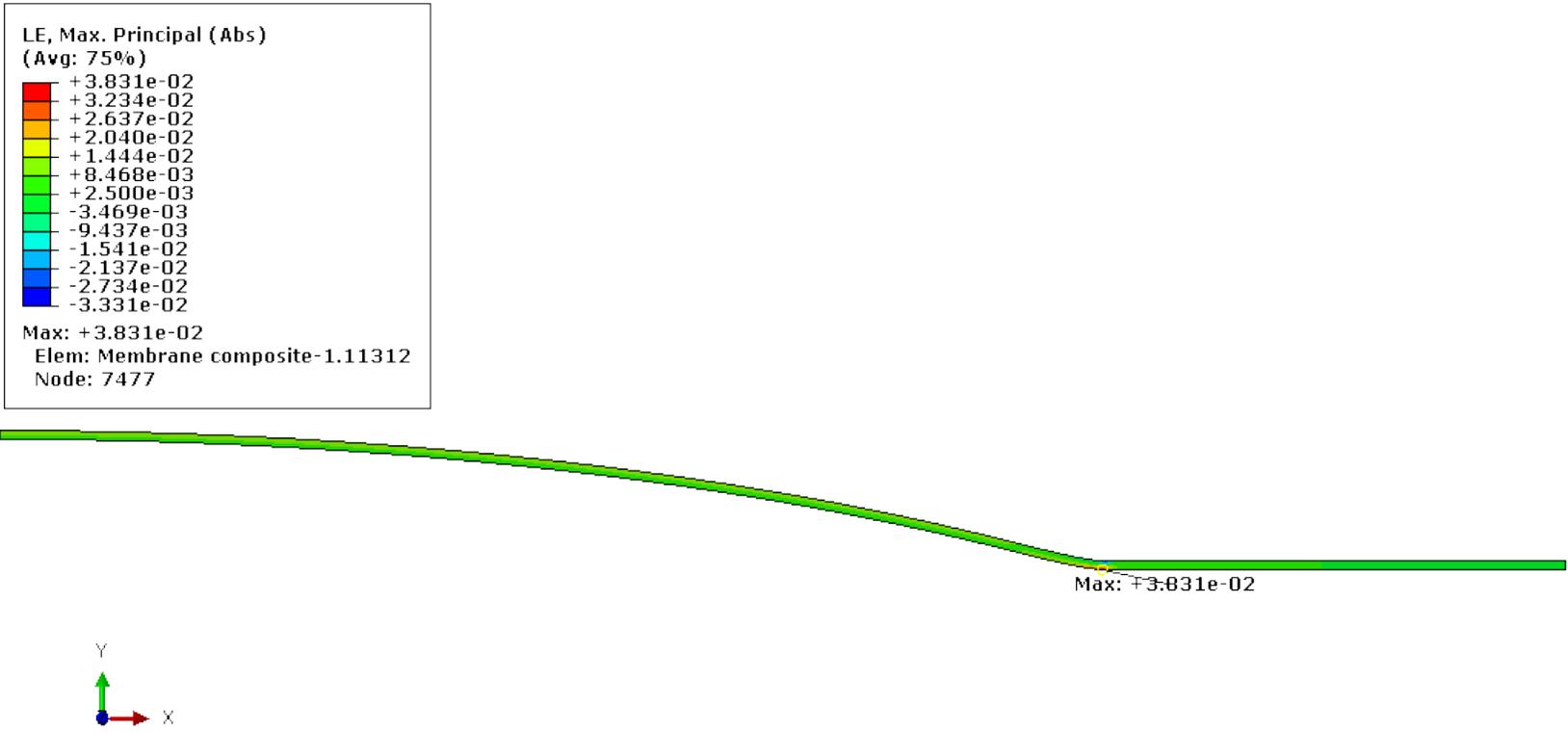


FIGURE 3.15. – Déformation maximale principale de la membrane composite testée sans liaison flexible

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

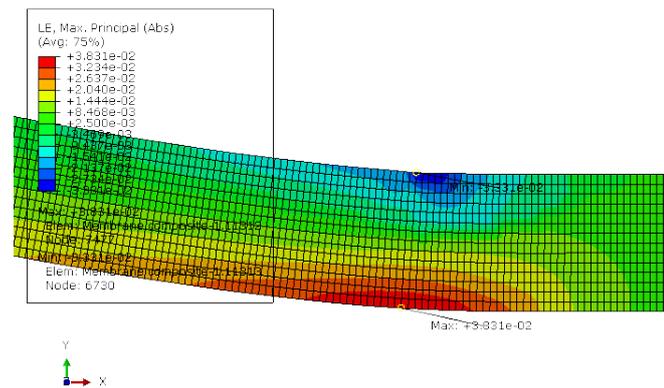


FIGURE 3.16. – Zoom sur la déformation maximale principale de la membrane composite testée sans liaison flexible

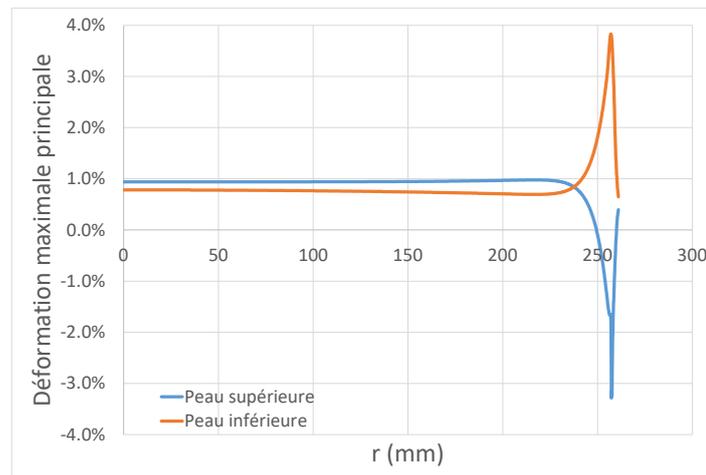


FIGURE 3.17. – Déformation sur la peau supérieure et inférieure de la membrane composite testée sans liaison flexible

#### 3.2.1.6. Conclusion

Le premier essai réalisé a permis de valider le montage d'essai conçu et de mesurer la tenue de la membrane composite. Celle-ci a rompu à son bord au niveau de l'angle de la bride plate. La modélisation par éléments finis montre qu'une déformation correspondant à 152% de la résistance en traction du matériau est présente au bord de la membrane. Le reste de la membrane est sollicité à un niveau de déformation bien inférieur à la limite à rupture du matériau. La membrane idéale a montré qu'il est possible d'obtenir une homogénéité des déformations méridiennes dans toute la membrane. La tenue de la membrane peut donc être augmentée en atténuant la flexion présente au bord qui produit une rupture prématurée.

### 3.2.2. Essai réalisé avec une liaison flexible non-optimisée

Afin d'améliorer la tenue de la membrane composite, une pièce est ajoutée entre celle-ci et la bride plate dans le but de diminuer la courbure (ou d'augmenter le rayon de courbure) au bord de la membrane et donc de diminuer la déformation et la contrainte. Cela permet d'augmenter la tenue de la membrane : la pression maximale appliquée est augmentée.

Le matériau utilisé pour fabriquer la membrane composite est un tissé équilibré serge 2x2 de verre/époxy (référence : Hexcel M34N/42%/202T2/G-68)). Le matériau est différent par rapport au matériau utilisé pour le premier essai par souci d'approvisionnement. Un tissé équilibré avec une épaisseur par pli inférieure à celle du précédent matériau a été retenu, ce qui permet de fabriquer des membranes ayant un rapport épaisseur sur diamètre encore plus faible qu'avec le matériau précédent bien qu'il était déjà très inférieur à la limite de membrane présentée dans le chapitre 2. Pour les mêmes raisons que concernant la membrane testée sans liaison flexible présentée dans la section 3.2.1, un stratifié quasi-isotrope est utilisé. Le tissé étant cette fois-ci équilibré, la séquence de drapage  $[0/45]_s$  permet d'obtenir un stratifié quasi-isotrope. La membrane a été cuite sous vide pendant trois heures à une température de 120 ° C. Après cuisson, l'épaisseur de la membrane est de 0,85 mm ; cela donne un rapport épaisseur sur diamètre très faible valant 1/604.

La liaison flexible non-optimisée est fabriquée à partir du matériau 1055ES18. La géométrie de cette liaison flexible est présentée sur la figure 3.18 avec un zoom sur la liaison flexible sur la figure 3.19.

3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

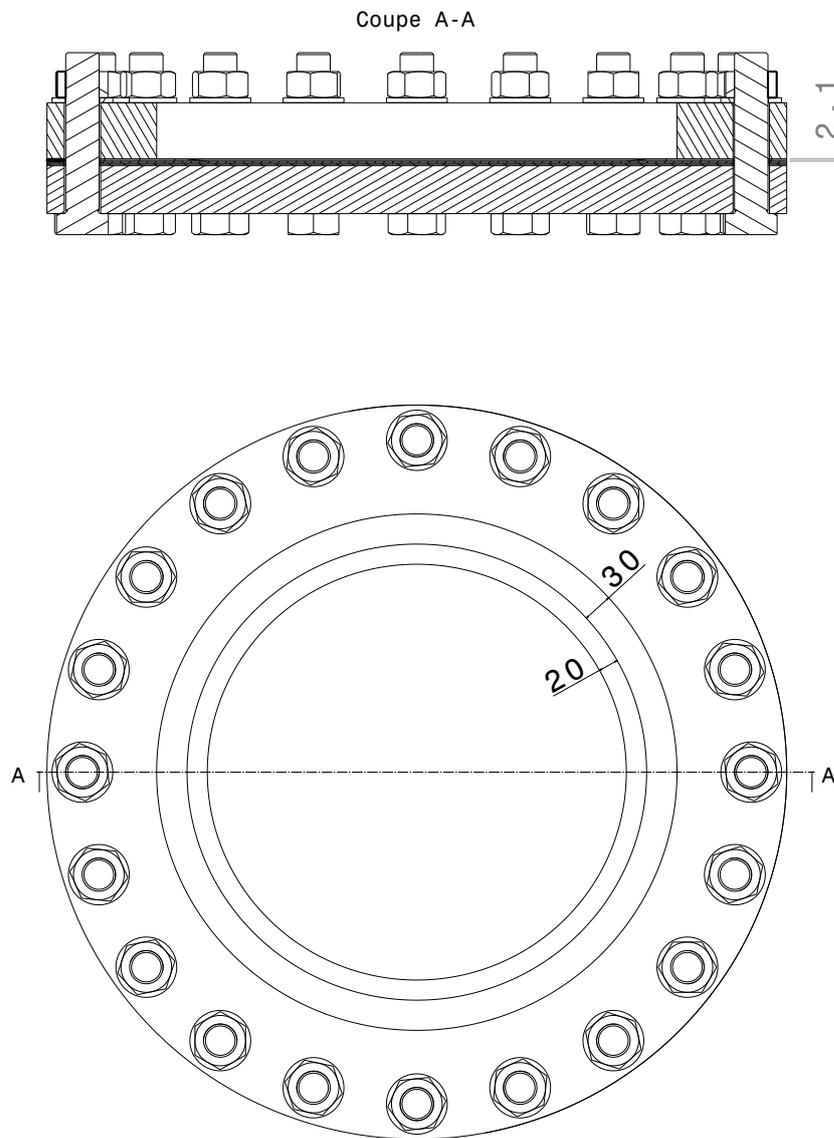


FIGURE 3.18. – Schéma du montage d'essai de gonflement circulaire avec la liaison flexible non-optimisée

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

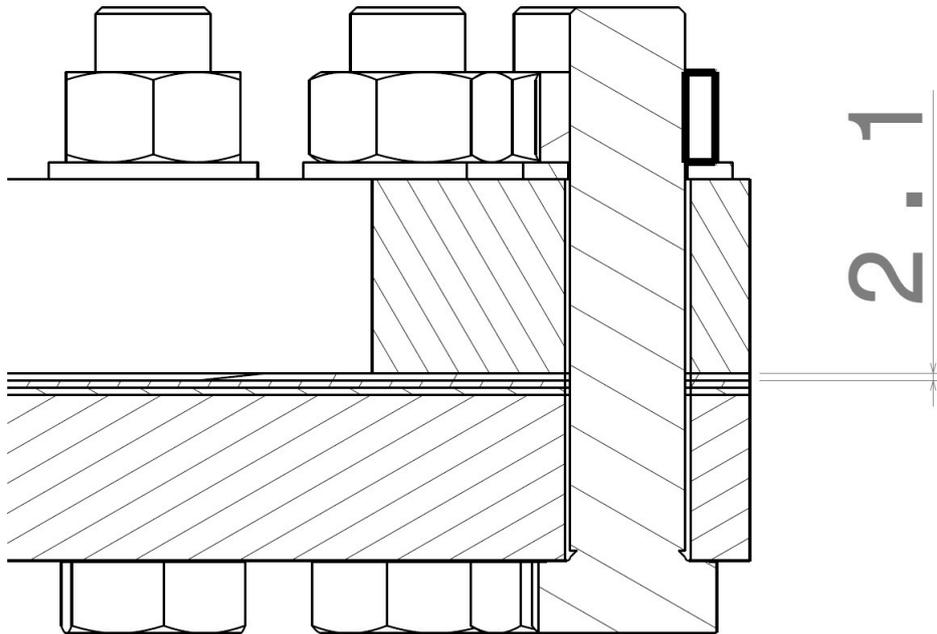


FIGURE 3.19. – Zoom sur la liaison flexible circulaire non-optimisée

Comme le montre la figure 3.20, l'essai a été réalisé jusqu'à une pression de 5 bar pour une déformation maximale atteinte de 1,6%, soit une augmentation de 77% par rapport au premier essai réalisé sans liaison flexible.

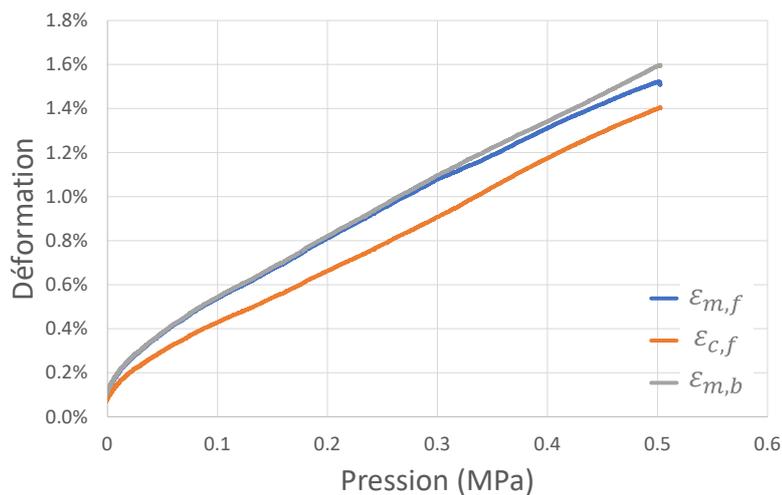
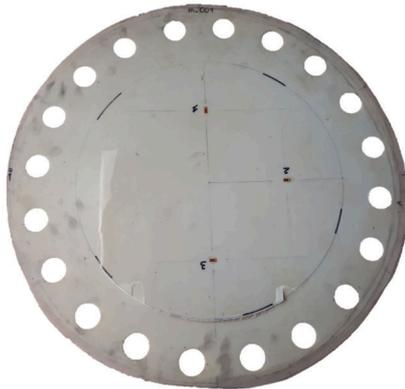


FIGURE 3.20. – Déformation en fonction de la pression de la membrane composite testée avec une liaison flexible non-optimisée

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

Sur la figure 3.21, on peut voir que la zone de rupture de la membrane testée avec cette liaison non-optimisée est similaire à celle de la membrane testée sans liaison flexible : la rupture s'est produite au bord de la membrane au niveau du bord de la bride plate. La liaison flexible n'était donc pas assez raide et le résultat peut être amélioré pour augmenter encore la sollicitation du centre de la membrane.



(a) Sans liaison flexible



(b) Avec liaison flexible non-optimisée

FIGURE 3.21. – Comparaison de la zone de rupture de la membrane circulaire testée avec une liaison flexible non-optimisée et de la membrane circulaire testée sans liaison flexible

Une concentration de déformation est présente au bord de la membrane comme le montre la figure 3.22 représentant les déformations maximales principales obtenues à partir de la modélisation par éléments finis à pression à rupture. Il est à noter que la liaison flexible non-optimisée a été endommagée durant l'essai (*a priori* avant la membrane) et a donc amplifié la déflexion de la membrane, ce qui a accentué la concentration de déformation au bord de la membrane et a entraîné sa rupture.

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

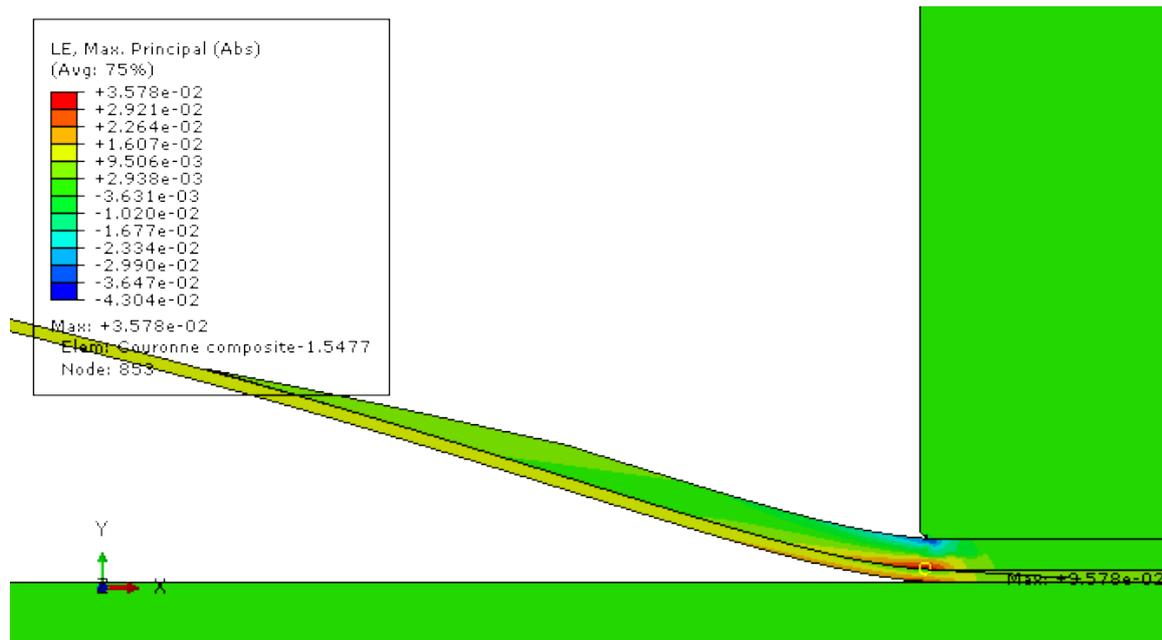


FIGURE 3.22. – Déformation maximale principale de la membrane circulaire testée avec une liaison flexible non-optimisée à pression à rupture

Afin d'améliorer encore ce résultat, une liaison flexible est conçue en optimisant sa géométrie avec un critère d'optimisation présenté dans la section suivante prenant en compte la pression à rupture mais également la masse de l'ensemble membrane-liaison flexible.

### 3.2.3. Conception d'une liaison flexible optimisant la tenue de la membrane composite

#### 3.2.3.1. Choix d'une géométrie aisément fabricable

Une forme triangulaire intuitive et facilement usinable a été choisie pour concevoir la liaison flexible optimale. En effet, cette pièce est fabriquée et usinée manuellement comme présenté sur la figure 3.31 présentant les étapes d'usinage et ne doit donc pas avoir une forme qui serait difficile à obtenir avec notre méthode d'usinage. Cette forme est présentée sur le schéma du montage d'essai comprenant la liaison flexible sur la figure 3.23.

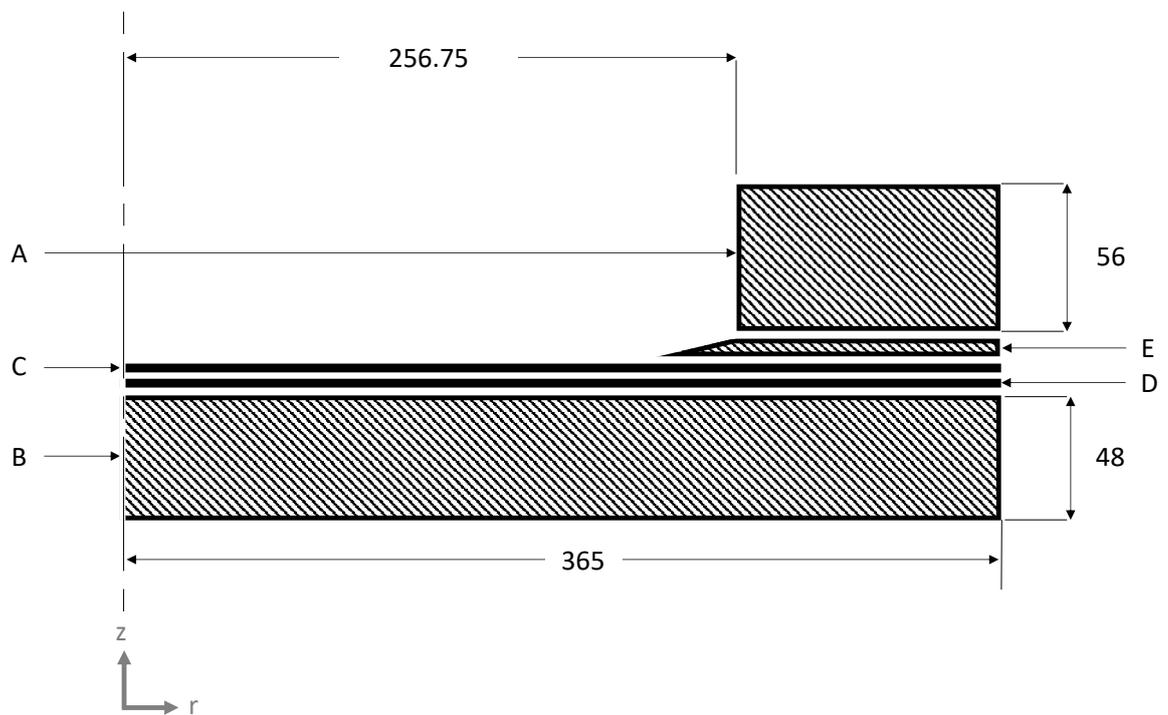


FIGURE 3.23. – Schéma du montage d'essai de gonflement circulaire avec liaison flexible. A : bride plate ; B : bride pleine ; C : membrane composite tetée ; membrane d'étanchéité ; E : liaison flexible.

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d’une liaison flexible optimale

#### 3.2.3.2. Matériau utilisé pour la conception et fabrication de la liaison flexible optimisée

Tout comme la première membrane testée, l’axisymétrie de la géométrie, des conditions aux limites et du chargement mène à choisir un stratifié quasi-isotrope pour fabriquer la liaison flexible. Cette liaison flexible et les membranes composites testées avec celle-ci ont été fabriquées à partir d’un tissu équilibré serge 2x2 de verre/époxy (référence : Hexcel M34N/42%/202T2/G-68). Ce matériau préimprégné permet de fabriquer des membranes moins épaisses que le préimprégné utilisé pour fabriquer la première membrane testée sans liaison flexible car il est équilibré et le nombre de plis nécessaire pour obtenir un stratifié quasi-isotrope est de 4 contre 6 précédemment. De plus, chaque pli est moins épais : 0,21 mm contre 0,35 mm précédemment. Ses propriétés mécaniques sont présentées dans les tableaux 3.3 et 3.4.

$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{1\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}$ (GPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\varepsilon_r$ (%)	$\nu$
15,9	14,0	11,7	278	2,3	0,3

TABLEAU 3.3. – Propriétés à 0° du stratifié  $[0/45]_s$  du M34N/42%/202T2/G-68

$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{1\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}$ (GPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\varepsilon_r$ (%)	$\nu$
14,6	13,1	10,5	272	2,6	0,3

TABLEAU 3.4. – Propriétés à 22,5° du stratifié  $[0/45]_s$  du M34N/42%/202T2/G-68

#### 3.2.3.3. Description de la modélisation numérique par éléments finis utilisée

La modélisation par éléments finis utilisée est la modélisation axisymétrique présentée dans la section 2.2.2.1 à laquelle est ajoutée la liaison flexible. L’interaction entre la liaison flexible et la bride plate et l’interaction entre la liaison flexible et la membrane sont modélisées avec du contact permettant le glissement des pièces les unes par rapport aux autres avec un coefficient de frottement de 0,3. Les mêmes éléments axisymétriques à 4 noeuds avec intégration réduite sont utilisés. Le comportement du matériau est linéaire élastique comme expliqué précédemment. Le module de Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  utilisés correspondent à la moyenne entre les propriétés à 0° et à 22,5° données dans les tableaux 3.3 et 3.4 :  $E = 11\text{GPa}$  ;  $\nu = 0,3$ . La non-linéarité géométrique est prise en compte dans le calcul car la membrane est en grande déflexion. Les conditions aux limites sont présentées sur la figure 3.24 :

- une pression uniforme simulant la pression au cours de l’essai est appliquée sur la surface inférieure de la membrane et sur la surface supérieure de la bride pleine ;

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

- une pression de 9 MPa est appliquée sur la bride plate et sur la bride pleine pour simuler le serrage des boulons ;
- une symétrie selon l'axe Y est appliquée et le déplacement est bloqué selon ce même axe Y comme indiqué sur la figure 3.24.

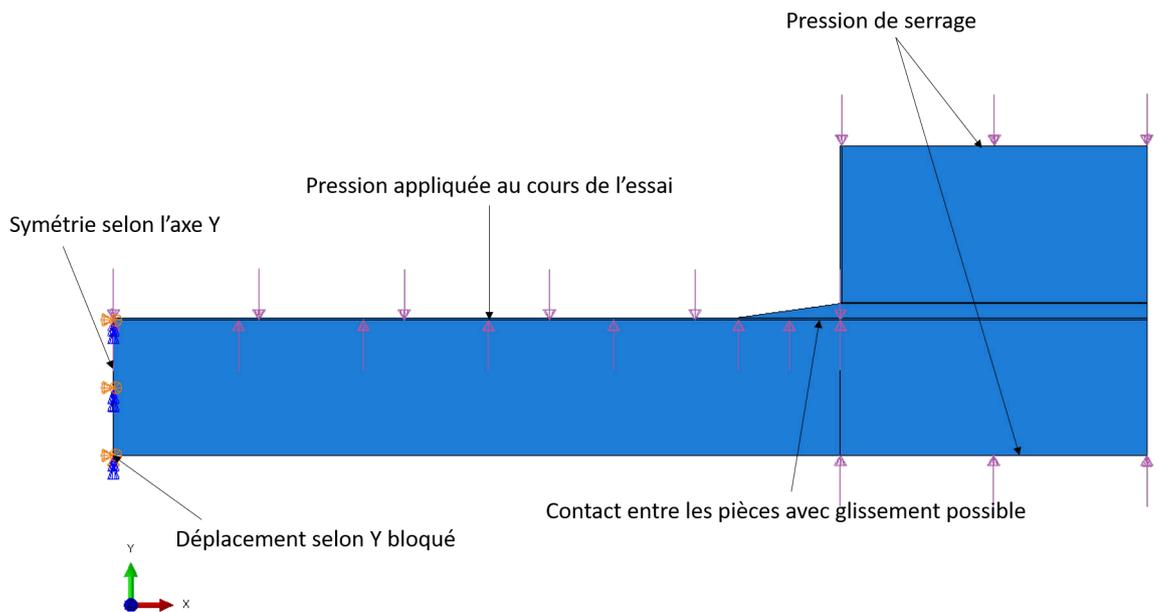


FIGURE 3.24. – Conditions aux limites pour la modélisation par éléments finis utilisée pour l'optimisation de la liaison flexible circulaire

### 3.2.3.4. Maximisation de la pression spécifique

Des essais ont été réalisés avec des liaisons flexibles qui ont permis d’améliorer la tenue de la membrane sans pour autant éviter une rupture au bord. Afin d’augmenter au maximum la tenue de la membrane, une étude paramétrique sur la géométrie de la liaison flexible a été faite avec la modélisation par éléments finis axisymétriques présentée dans la section précédente. Cette étude paramétrique se fait en faisant varier la longueur et l’épaisseur de la liaison flexible (figure 3.25).

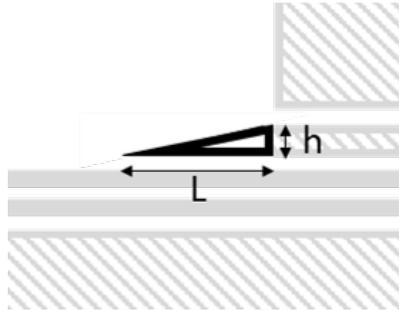


FIGURE 3.25. – Longueur  $L$  et épaisseur  $h$  variées dans l’étude paramétrique

Si le but est de maximiser la tenue de la membrane, cela doit être réalisé sans pour autant ajouter une masse trop importante car l’objectif est de retenir une solution de conception permettant d’obtenir une structure légère. Le critère utilisé pour optimiser la géométrie de la liaison flexible est donc une pression spécifique  $P_s$  définie comme :

$$P_s = \frac{P}{m} \quad (3.3)$$

avec :

- $P$  la pression maximale permettant d’atteindre la déformation à rupture dans la membrane ou la liaison flexible ;
- $m$  la masse de la membrane et de la liaison flexible.

La déformation à rupture utilisée pour déterminer la pression maximale est de 2,6%. Cette valeur est supérieure à la limite à rupture du matériau utilisé comme présenté dans le tableau 3.3 qui est de 2,3%. Ce choix est fait car le critère de pression spécifique a été développé après avoir réalisé l’essai avec la liaison flexible non-optimisée pour lequel une déformation de 2,6% est atteinte dans la membrane au moment de la rupture d’après la modélisation numérique. Le but étant de maximiser la pression à rupture et de minimiser la masse, la pression spécifique doit donc être maximisée. La figure 3.26 trace la pression spécifique en fonction de la longueur et de l’épaisseur de la liaison flexible. L’optimum est atteint pour une épaisseur de 5 mm et une longueur comprise entre 30 et 36 mm. Le choix entre ces longueurs revient à choisir le paramètre prioritaire : la pression à rupture ou bien la masse de la structure. La pression à rupture est retenue car il correspond à un choix conservatif car la membrane est capable de supporter une pression plus

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d’une liaison flexible optimale

importante. De plus, bien que la masse soit plus grande en faisant ce choix, la différence n’est que de 40 grammes entre la liaison flexible de 30 mm et la liaison flexible de 36 mm.

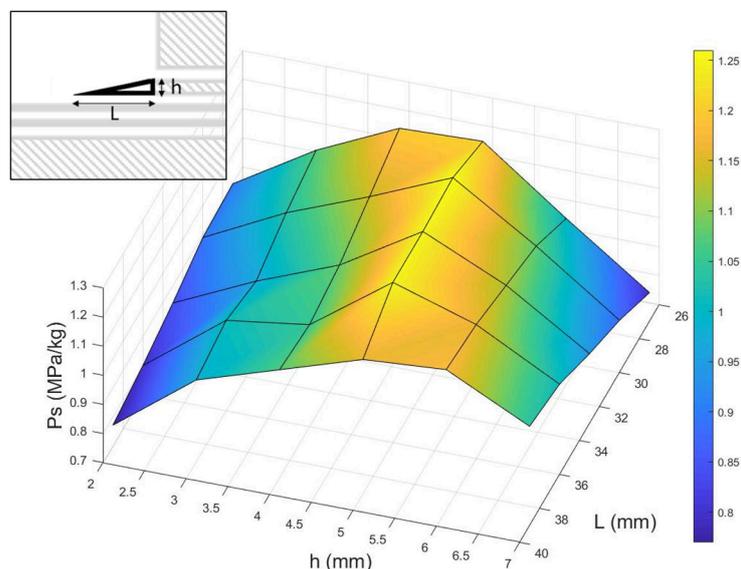


FIGURE 3.26. – Maximisation de la pression spécifique pour la conception de la liaison flexible circulaire

#### 3.2.3.5. Liaison flexible circulaire optimale

La maximisation de la pression spécifique dans la section précédente donne une liaison flexible optimale avec une longueur de 36 mm et une épaisseur de 5 mm. Le dessin du montage d’essai comprenant la liaison flexible est présenté sur la figure 3.27 avec un zoom sur la liaison flexible sur la figure 3.28.

La liaison flexible optimale permet de réduire la courbure au bord de la membrane et ainsi de répartir au maximum les déformations qui étaient initialement concentrées au bord de la membrane au niveau de la bride plate. La figure 3.30 compare la répartition des déformations avec la liaison flexible optimisée à la répartition des déformations avec des liaisons flexibles non-optimales (à une pression de 7,8 bars dans tous les cas). On observe que dans le cas d’une liaison flexible longue et fine, la déformation est concentrée sous la bride plate car la liaison flexible n’est pas assez raide et la concentration de déformation est situé sur la même zone que sans liaison flexible. Dans le cas d’une liaison flexible courte et épaisse, la déformation est concentrée au bord de la liaison flexible car celle-ci est trop raide. Concernant la liaison flexible optimale, la courbure de la membrane est atténuée et la déformation est répartie sur une zone plus étendue et la valeur maximale se situe sous le centre de la liaison flexible.

3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

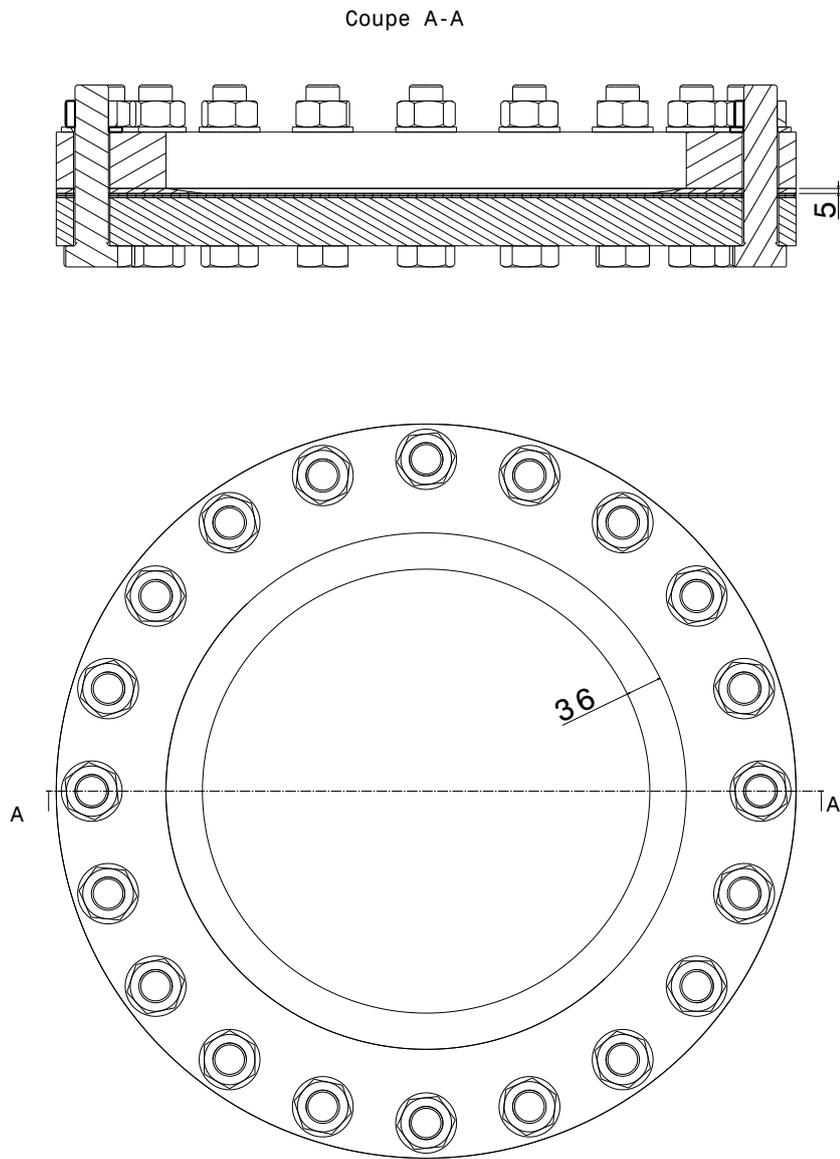


FIGURE 3.27. – Schéma du montage d'essai de gonflement circulaire avec la liaison flexible optimisée

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

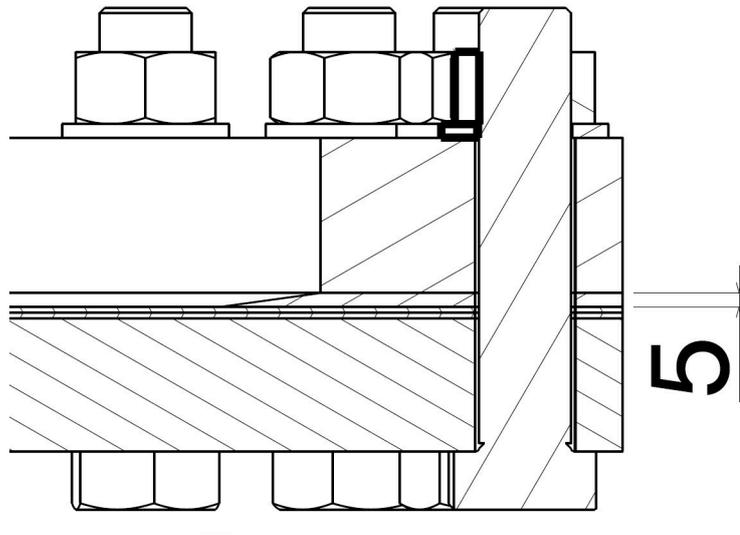


FIGURE 3.28. – Zoom sur la liaison flexible circulaire optimisée

La figure 3.29 montre que le contact entre la membrane et le bout de la liaison flexible optimisée est ouvert à pression à rupture. Cela montre que cette zone ne crée pas de concentration de déformation comme dans le cas d'une liaison flexible trop raide ou de l'absence de liaison flexible où la bride plate crée une concentration de déformation.

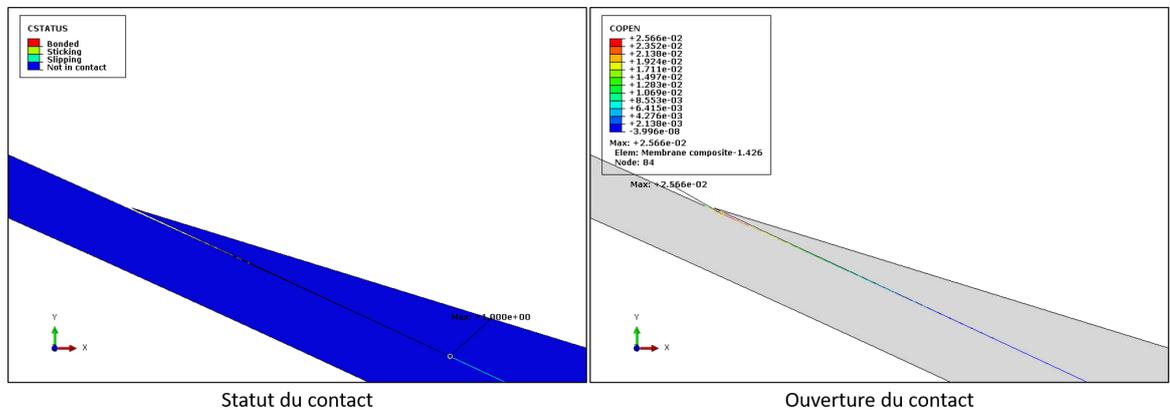


FIGURE 3.29. – Contact entre la membrane composite et la liaison flexible optimisée

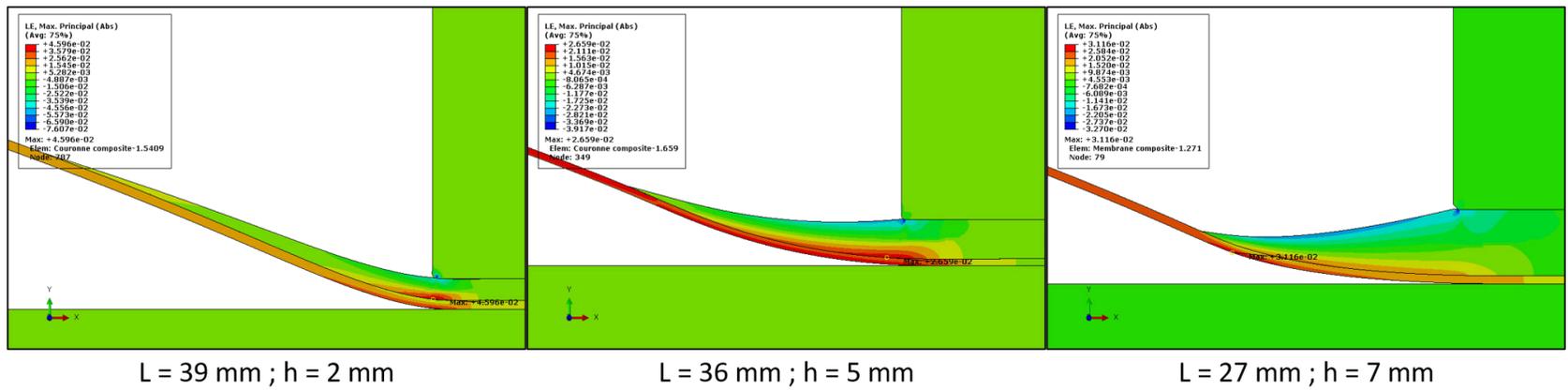


FIGURE 3.30. – Comparaison de la répartition des déformations avec différentes liaisons flexibles

### 3.2.4. Essais réalisés avec la liaison flexible optimisée

#### 3.2.4.1. Objectif et configuration de l'essai

L'essai réalisé sans liaison flexible a montré le besoin d'ajouter une pièce supplémentaire permettant de réduire la courbure pour éviter une rupture prématurée du bord de la membrane alors que le reste de la structure est peu sollicitée. L'essai réalisé avec la liaison flexible non-optimisée a permis d'améliorer la tenue de la membrane sans pour autant permettre d'obtenir une sollicitation optimale. La géométrie de la liaison flexible a donc été optimisée afin de maximiser la pression spécifique. La conception de la liaison flexible a démontré qu'une liaison flexible de 36 mm de longueur et 5 mm d'épaisseur permet d'atteindre cet objectif. La présente section a pour but de vérifier expérimentalement l'intérêt d'utiliser la liaison flexible.

La membrane composite testée est la même que celle testée avec la liaison flexible non-optimisée.

La liaison flexible est fabriquée à partir du même matériau que la membrane composite. Le drapage a été fait avec une séquence de drapage  $[0/15/30/45/60/75]_{2s}$  qui permet d'obtenir une épaisseur de 5 mm et pour obtenir un stratifié quasi-isotrope car, comme la membrane, la géométrie, les conditions aux limites et le chargement sont axisymétriques. La liaison flexible a été cuite sous vide pendant trois heures à une température de 120 ° C. Après cuisson, la liaison flexible a une épaisseur de 5,04 mm, ce qui correspond bien à l'épaisseur souhaitée. La fabrication de la liaison flexible consiste à faire cuire un disque complet et ensuite de l'usiner afin d'obtenir la géométrie souhaitée. Les étapes de l'usinage sont présentées sur la figure 3.31. A partir du disque fabriqué (étape 1), la forme désirée est tracée (étape 2) et le centre du disque est découpé grossièrement (étape 3) avant d'obtenir la forme finale par meulage (étape 4). Les trous permettant le passage des vis de serrage sont réalisés par perçage avec un trépan.

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

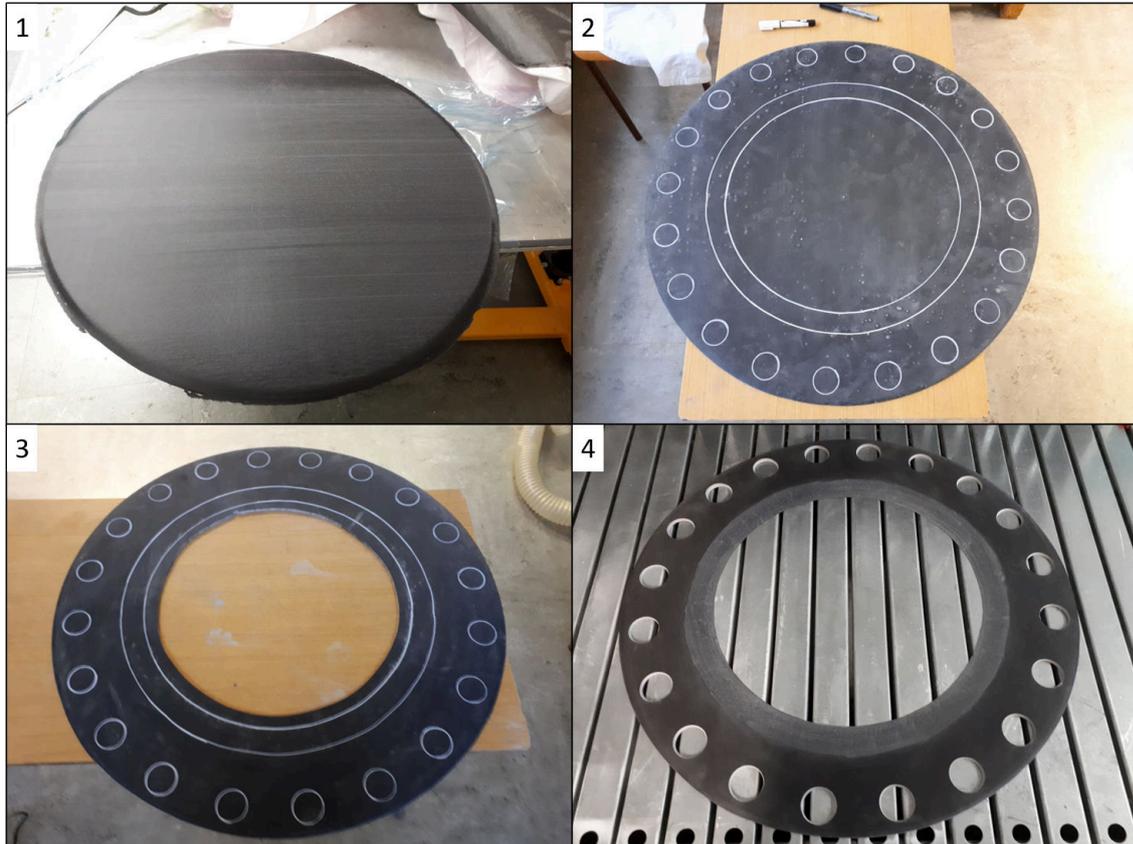


FIGURE 3.31. – Etapes de fabrication de la liaison circulaire optimisée. 1 : fabrication d'un stratifié sous forme de disque de diamètre extérieur de 730 mm et de 5 mm d'épaisseur ; 2 : traçage des cercles de 513,5 mm et de 441,5 mm correspondant aux limites de l'épaisseur décroissante de la liaison flexible et des cercles de 42 mm permettant le passage des vis pour le serrage ; 3 : découpe grossière d'un disque central correspondant à la zone où la membrane est libre de gonfler ; 4 : usinage de la forme finale de la liaison flexible et perçage des trous pour le passage des vis de serrage.

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

Des jauges de déformations sont placées sur la membrane à 110 mm de son centre afin de mesurer les déformations méridiennes et circonférentielles. Comme pour la membrane testée sans liaison flexible, le but est de mesurer les déformations sur une zone centrale de la membrane. Les jauges de mesure de la déformation méridienne  $\epsilon_m$  sont positionnées sur la direction  $0^\circ$  et  $22.5^\circ$  pour coïncider avec une direction correspondant à une direction d'orientation des fibres ( $\epsilon_{m,f}$ ) et à une direction correspondant à la bissectrice entre deux direction d'orientation des fibres ( $\epsilon_{m,b}$ ). Une jauge de déformation pour mesurer la déformation circonférentielle  $\epsilon_c$  est placée sur la direction  $180^\circ$  pour correspondre à une direction d'orientation des fibres ( $\epsilon_{c,f}$ ). Un schéma du positionnement des jauges est présenté sur la figure 3.32. La mesure de la pression appliquée est faite avec un manomètre. Les déformations et la pression sont enregistrées au cours de l'essai toutes les 0,2 secondes.

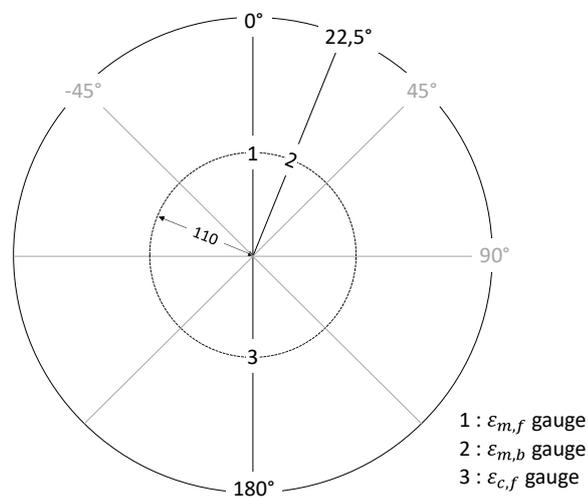


FIGURE 3.32. – Schéma du placement des jauges sur la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée

### 3.2.4.2. Résultats expérimentaux

L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane composite à une pression de 7,93 bar. Contrairement à la membrane testée sans liaison flexible, la rupture n'a pas eu lieu au bord de la membrane au niveau de la fixation. Cela signifie que la liaison flexible a bien rempli son rôle. Ce dernier n'a pas été endommagé pendant l'essai et a pu être réutilisé ultérieurement.

**Zone de rupture** La figure 3.33 montre la membrane après sa rupture. Malgré l'enregistrement de l'essai avec des caméras, il est difficile d'affirmer la zone de départ de la rupture. Il semblerait toutefois que l'origine de la rupture se situe sur une zone centrale de la membrane et que des fissures se soient ensuite propagées dans plusieurs directions. La zone de rupture est donc complètement différente par rapport aux essais réalisés sans liaison flexible ou avec la liaison flexible non-optimisée.



(a) Face supérieure



(b) Face inférieure

FIGURE 3.33. – Zone de rupture de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

**Déformation en fonction de la pression** La déformation maximale atteinte au cours de l'essai est de 2,3%, ce qui correspond à la limite à rupture du matériau constituant la membrane. Les jauges de déformation étant placées sur une zone centrale de la membrane, cela signifie que l'ensemble de la membrane a été sollicitée jusqu'aux limites du matériau. Cela confirme encore une fois que la liaison flexible a bien joué son rôle : la rupture prématurée au bord de la membrane alors que le centre de la membrane est peu sollicité est évitée. La figure 3.34 présente la mesure des déformations en fonction de la pression. Les déformations méridiennes sur la direction des fibres et entre deux directions de fibres sont quasiment égales alors que la déformation circonférentielle est plus faible.

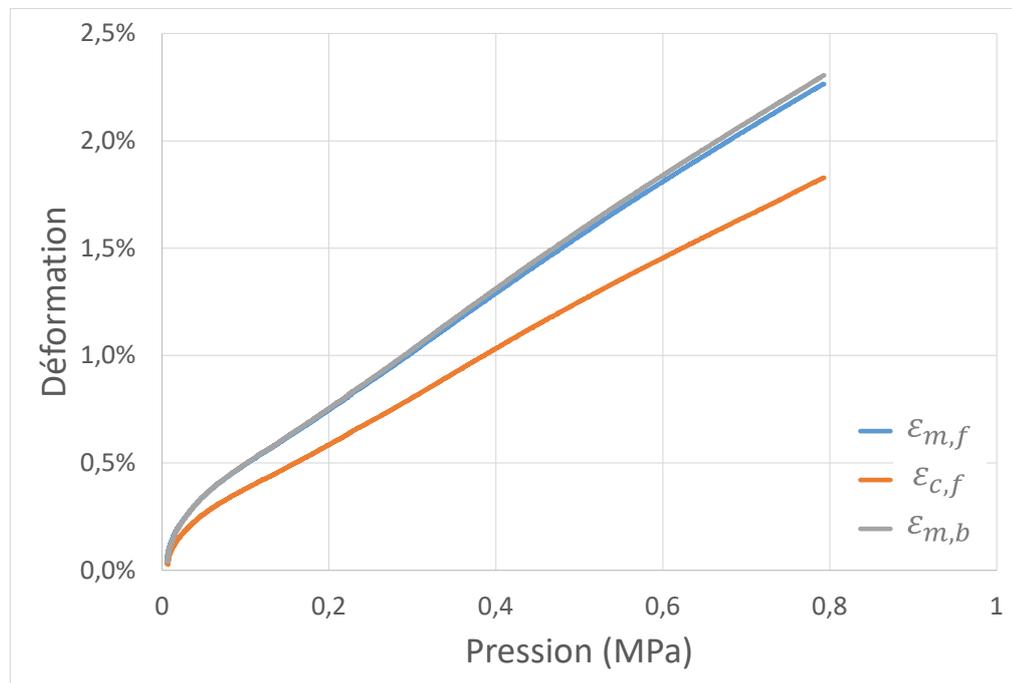


FIGURE 3.34. – Déformation en fonction de la pression de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

**Niveau d'isotropie** La comparaison de la déformation méridienne sur une direction d'orientation des fibres  $\varepsilon_{m,f}$  et de la déformation méridienne sur la bissectrice entre deux directions d'orientation des fibres  $\varepsilon_{m,b}$  permet de mesurer le niveau d'isotropie défini comme :

$$\eta = \frac{\varepsilon_{m,f}}{\varepsilon_{m,b}} \quad (3.4)$$

Le comportement est isotrope dans le cas où  $\varepsilon_{m,f} = \varepsilon_{m,b}$  et donc  $\eta = 100\%$ . La figure 3.35 trace  $\eta$  en fonction de la pression appliquée. Elle montre qu'au début de l'essai  $\varepsilon_{m,f}$  est plus grand que  $\varepsilon_{m,b}$ . Cela peut être expliqué par un régime de flexion initial de la membrane au début de l'essai avant que la membrane se tende et entre dans un comportement de membrane. Cet écart entre les deux déformations est dû à une anisotropie en flexion. A la fin de l'essai,  $\eta$  vaut 98%, ce qui peut être considéré comme une valeur correspondant à un comportement isotrope.

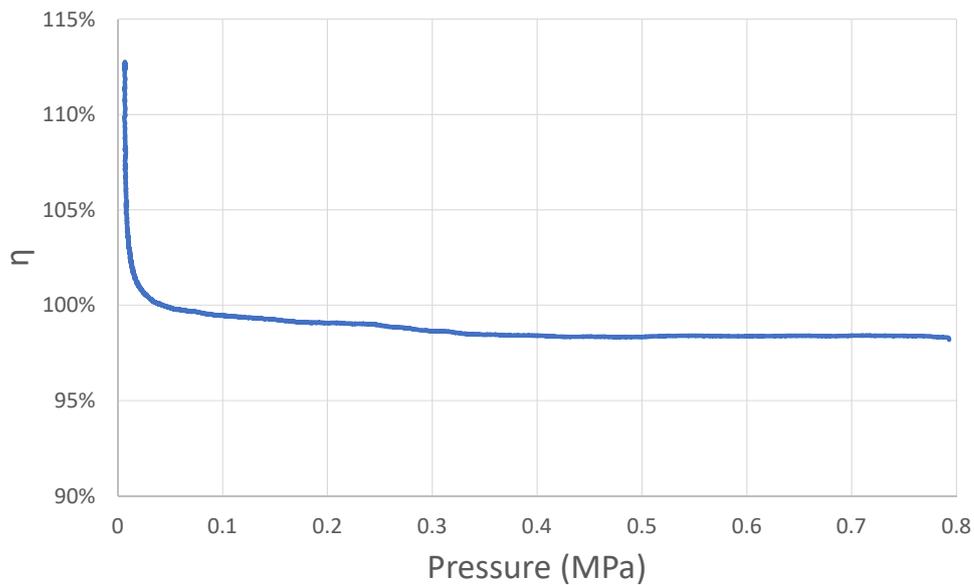


FIGURE 3.35. – Niveau d'isotropie en fonction de la pression de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

**Taux de biaxialité** La mesure de la déformation circonférentielle  $\varepsilon_{c,f}$  et sa comparaison avec la déformation méridienne  $\varepsilon_{m,f}$  permet d'évaluer le taux de biaxialité défini comme :

$$\xi = \frac{\varepsilon_{c,f}}{\varepsilon_{m,f}} \quad (3.5)$$

La figure 3.36 montre que  $\xi$  croît en fonction de la pression appliquée. La déformation circonférentielle vaut 60% de la déformation méridienne au début de l'essai et atteint plus de 80% de cette dernière à la fin de l'essai. Cela confirme peut être l'hypothèse émise précédemment pour le niveau d'isotropie selon laquelle il y a deux régimes au cours de l'essai : un régime de flexion au début et un régime de membrane à partir d'un certain niveau de pression permettant de mettre en tension la membrane.

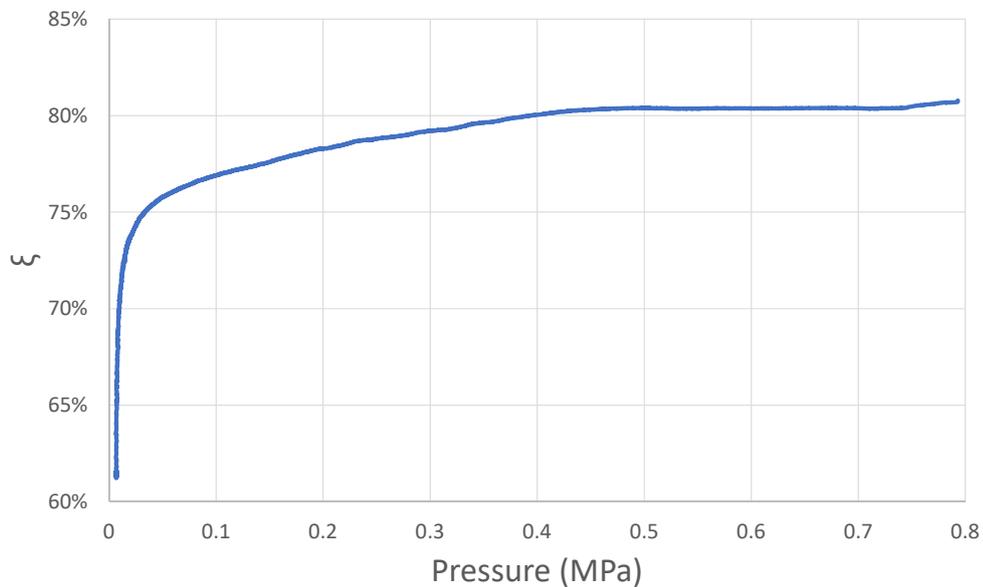


FIGURE 3.36. – Taux de biaxialité en fonction de la pression de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée

### 3.2.4.3. Comparaison avec modélisation numérique

La modélisation axisymétrique développée pour dimensionner la liaison flexible est utilisée pour comparer les résultats expérimentaux aux résultats numériques. Les résultats numériques sont relevés sur un élément à 110 mm du centre de la membrane, correspondant à l’emplacement des jauges de déformation. La modélisation étant axisymétrique et donc faite avec un comportement du matériau isotrope, il n’y a pas de distinction entre une direction correspondant à l’orientation des fibres et la bissectrice entre deux orientations de fibres. La figure 3.37 montre que les résultats sont très proches notamment au moment de la rupture. L’écart constaté à des niveaux de pression intermédiaires est dû au comportement linéaire implémenté dans la modélisation par éléments finis comme présenté dans la section 3.2.1.2 : pour une déformation inférieure à celle considérée pour calculer le module de Young, la rigidité est légèrement sous-estimée par rapport à la rigidité réelle du matériau.

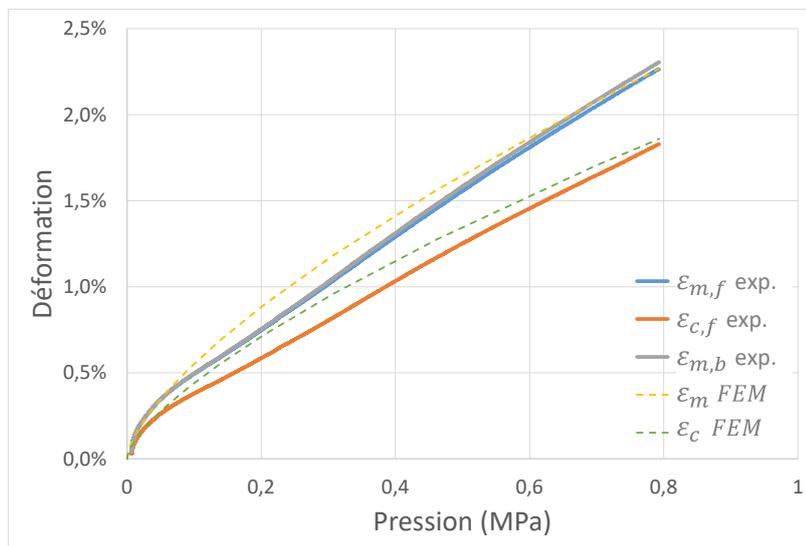


FIGURE 3.37. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée

La modélisation par éléments finis permet d’estimer la déformation maximale dans la membrane et montre que celle-ci se situe au bord et vaut 2,6%, ce qui correspond à 113% de la limite à rupture en traction du matériau qui est de 2,3%. Dans la liaison flexible, il y a 2,9% (126% de la limite à rupture). Ces valeurs supérieures à la limite à rupture du matériau peut s’expliquer par le fait que la limite à rupture en flexion peut être supérieure à la limite à rupture en traction (la limite à rupture du matériau ayant été mesurée par traction simple).

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

La modélisation par éléments finis permet également d'évaluer le gradient de contraintes dans l'épaisseur et de déterminer si celui-ci correspond plutôt à une sollicitation de membrane ou de flexion comme présenté dans la section 1.2.2. Pour cela, les contraintes maximales principales (correspondant aux contraintes méridiennes) de deux éléments sont comparées à 110 mm du centre (correspondant à la zone où sont placées les jauges de déformation) sur la peau supérieure de la membrane et sur la peau inférieure de la membrane. L'écart relatif entre la contrainte sur la peau supérieure et la contrainte sur la peau inférieure est calculé et tracé en fonction de la pression sur la figure 3.38. Un écart relatif nul correspond à un comportement membrane pur et un écart relatif de 200% correspond à un comportement de flexion pure (les contraintes ont des valeurs absolues égales mais sont de signe opposé). La figure 3.38 montre que l'écart relatif décroît en fonction de la pression et donc que le comportement membrane augmente quand la pression augmente. L'écart relatif tend vers 5% à la fin de l'essai, ce qui peut être considéré comme très proche d'un comportement membrane pur. L'évolution de l'écart relatif est similaire à l'évolution du taux de biaxialité et du niveau d'isotropie. Cela confirme qu'au début de l'essai, la membrane est en flexion et que la sollicitation de membrane croît au fur et à mesure de l'essai.

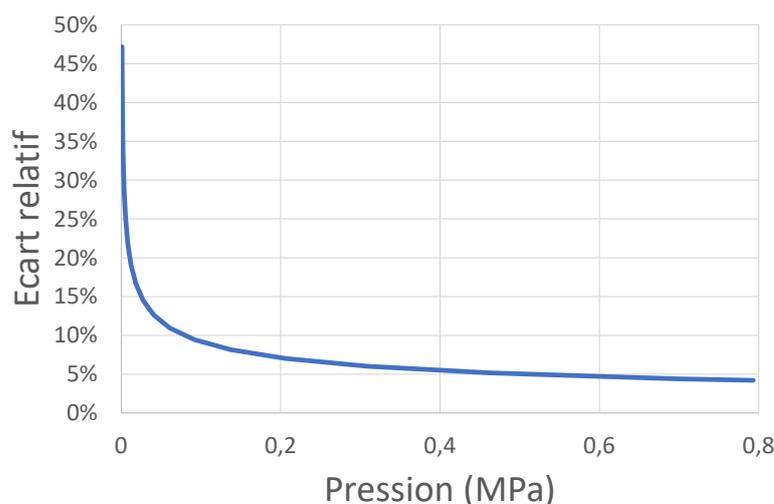


FIGURE 3.38. – Ecart relatif entre les contraintes sur la peau supérieure et la peau inférieure de la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée d'après la modélisation numérique au niveau des jauges de déformation

#### 3.2.4.4. Comparaison avec les essais réalisés sans la liaison flexible optimisée

La section précédente a montré que la zone de rupture de la membrane testée avec la liaison flexible optimisée est très différente par rapport à la zone de rupture de la membrane testée sans liaison flexible ou avec la liaison flexible non-optimisée. Le centre de la membrane testée avec la liaison flexible optimisée a été sollicité jusqu’à 2,3% de déformation, ce qui correspond à 100% de la limite à rupture du matériau. Ce n’est pas le cas de la membrane testée sans liaison flexible dont le centre a atteint au maximum 0,95%, ce qui correspond à 38% de la limite à rupture du matériau. Concernant la déformation maximale atteinte par la membrane testée avec la liaison flexible non-optimisée, celle-ci a atteint au maximum 1,6%, c’est-à-dire 70% de la limite à rupture du matériau utilisé. La figure 3.39 trace les déformations mesurées par les jauges mesurant la plus grande déformation sur chaque membrane en fonction de la pression appliquée.

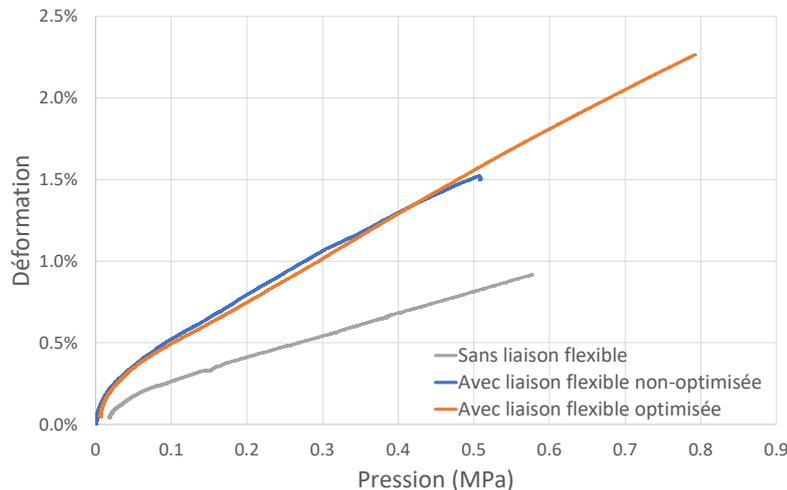


FIGURE 3.39. – Comparaison des déformations en fonction de la pression des membranes testées sans liaison flexible, avec liaison flexible non-optimisée et avec liaison flexible optimisée. *N.B. : la membrane sans liaison flexible est plus épaisse que les deux autres.*

Alors qu’une concentration de déformations est présente au bord de la membrane testée sans liaison flexible comme montré dans la section 3.2.1.5, la liaison flexible permet d’homogénéiser les déformations. La figure 3.40 compare la répartition des déformations dans la membrane testée sans liaison flexible et dans la membrane testée avec la liaison flexible optimisée et la figure 3.41 compare les déformations sur les peaux supérieures et inférieures des deux membranes depuis leur centre jusqu’à leur bord. On voit qu’avec la liaison flexible optimisée, la concentration de déformations est atténuée et la déformation est quasiment constante du bord jusqu’au centre alors qu’une concentration est présente au bord de la membrane

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

testée sans liaison flexible et le reste de la membrane connaît une déformation beaucoup plus faible et est donc beaucoup moins sollicité.

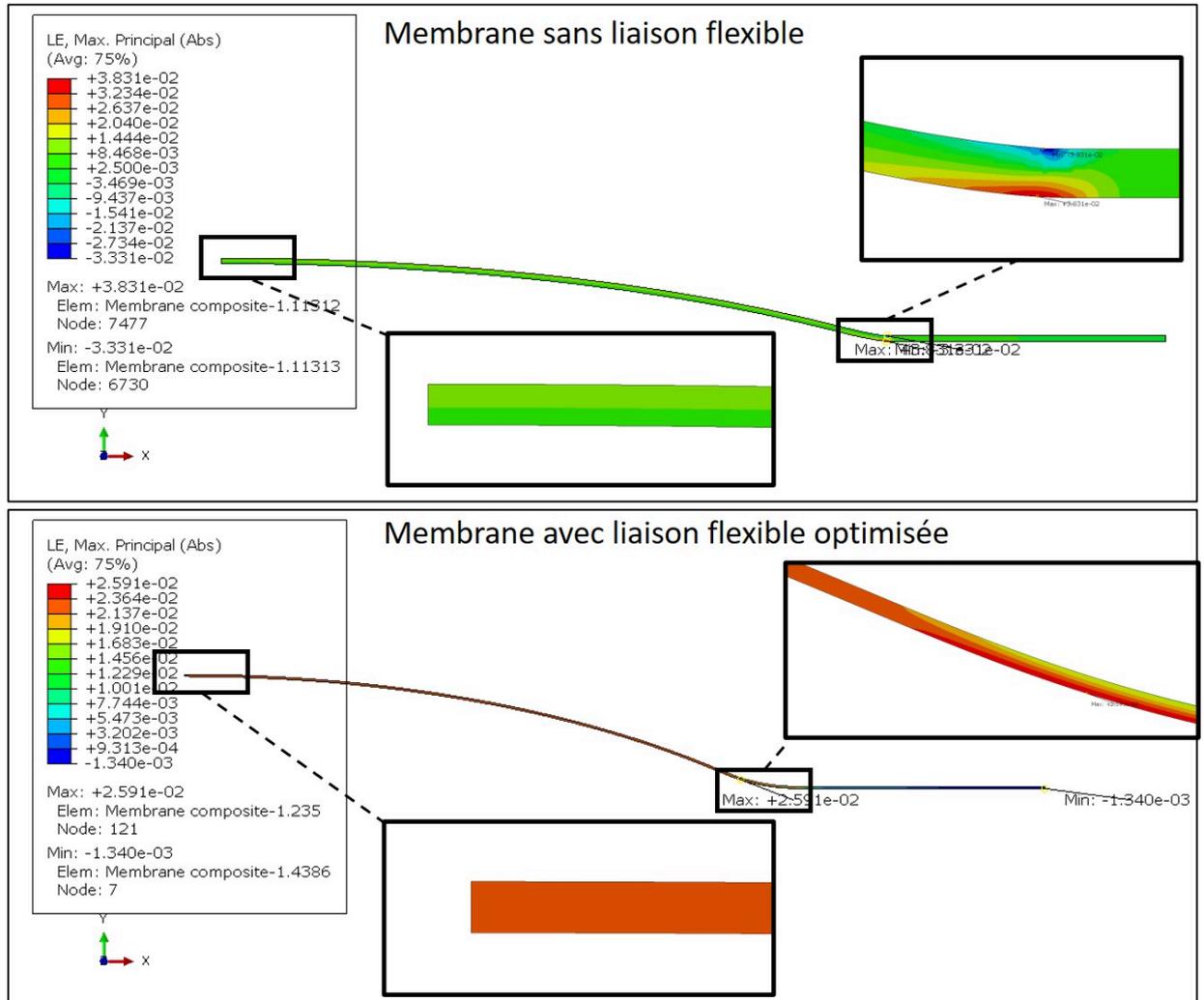


FIGURE 3.40. – Comparaison de la répartition des déformations dans les membranes testées sans liaison flexible et avec liaison flexible optimisée (LFO)

### 3. Membranes circulaires – 3.2. Conception d'une liaison flexible optimale

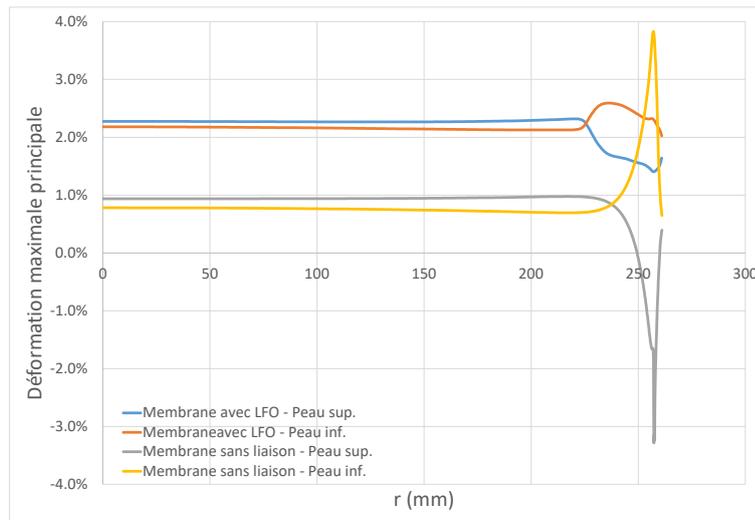


FIGURE 3.41. – Comparaison des déformations sur les peaux supérieures et inférieures des membranes testées sans liaison flexible et avec liaison flexible optimisée (LFO)

La première membrane testée sans liaison flexible étant différente des deux suivantes, le critère de pression spécifique permet de comparer les pressions à rupture tout en prenant en compte la différence d'épaisseur. Ainsi, comme le montre la figure 3.42, la pression spécifique a été considérablement accrue grâce à l'utilisation de la liaison flexible optimisée. La liaison flexible non-optimisée avait déjà permis d'augmenter de 27% la pression spécifique et la liaison flexible optimisée a permis d'augmenter de 89% la pression spécifique par rapport à la membrane sans liaison flexible.

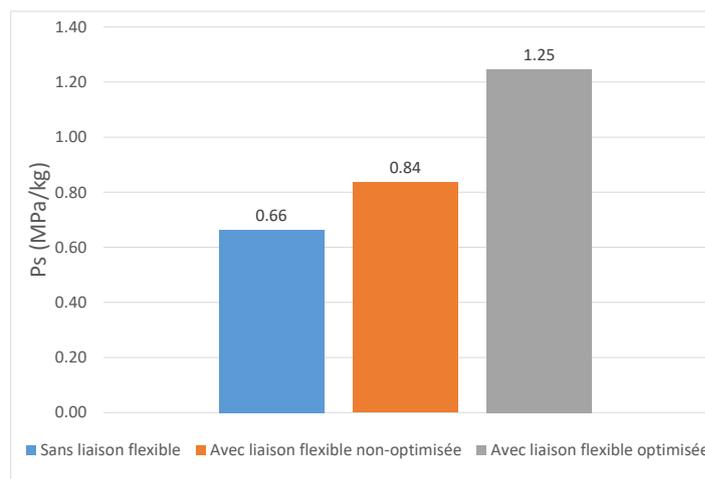


FIGURE 3.42. – Comparaison des pressions spécifiques atteintes par les membranes testées sans liaison flexible, avec liaison flexible non-optimisée et avec liaison flexible optimisée

### 3.2.5. Conclusion

Comme on pouvait s'y attendre, l'essai réalisé sans liaison flexible a conduit à la rupture prématurée de la membrane à son bord au niveau de la fixation avec la bride plate alors que son centre est peu sollicité. Afin de limiter la concentration de déformation entraînant la rupture de la membrane, une liaison flexible est ajoutée à son bord. Cela permet de diminuer la courbure sur cette zone et ainsi de diminuer le niveau de déformation à une pression donnée. Une première liaison flexible a permis d'améliorer la tenue de la membrane sans pour autant solliciter la zone centrale de la membrane jusqu'à la limite à rupture du matériau utilisé. Afin d'améliorer davantage la tenue de la membrane, l'optimisation de la géométrie de la liaison flexible a été faite avec une modélisation par éléments finis. Le but était de maximiser la pression à rupture tout en évitant un gain de masse trop important. Le critère d'optimisation est donc la maximisation de la pression spécifique définie comme le rapport entre la pression à rupture et la masse de l'ensemble membrane-liaison. La liaison flexible optimisée a permis d'atteindre ces deux objectifs et la zone de rupture a été modifiée, l'ensemble de la membrane a été sollicité jusqu'à la limite à rupture du matériau utilisé et la pression spécifique a été significativement augmentée. Cela montre l'intérêt d'utiliser la liaison flexible pour maximiser la tenue de la membrane sans pour autant ajouter de la masse inutile, ce qui répond bien au besoin de développer une solution permettant de concevoir des cloisons légères pour les flotteurs de BW Ideol.

### 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d’images numériques en trois dimensions

Comme introduit dans le chapitre 1, l’essai de gonflement est un essai qui permet de solliciter une structure sous un chargement biaxial. Celui-ci est utilisé pour caractériser les matériaux métalliques et polymères mais l’essai sur éprouvette cruciforme lui est préféré pour tester les matériaux composites sous chargement biaxial. La grande déflexion que subissent les membranes composites testées dans ces travaux de thèse permet de mesurer les courbures principales de celles-ci. Il est montré dans cette section que la mesure de ces courbures permet de calculer directement les contraintes présentes dans la membrane sans connaître le comportement du matériau. Cet essai constitue donc un bon moyen d’étudier le comportement mécanique d’un matériau composite sous chargement biaxial. Pour faire ceci, deux caméras sont utilisées afin de faire une mesure de champ et de la corrélation d’images numériques en trois dimensions. Enfin, une comparaison avec les résultats d’une modélisation par éléments finis est faite.

#### 3.3.1. Équilibre d’une membrane circulaire sous pression

Les courbures et contraintes principales d’une membrane circulaire déformée correspondent aux directions méridiennes et circonférentielles comme représentées sur la figure 3.43.

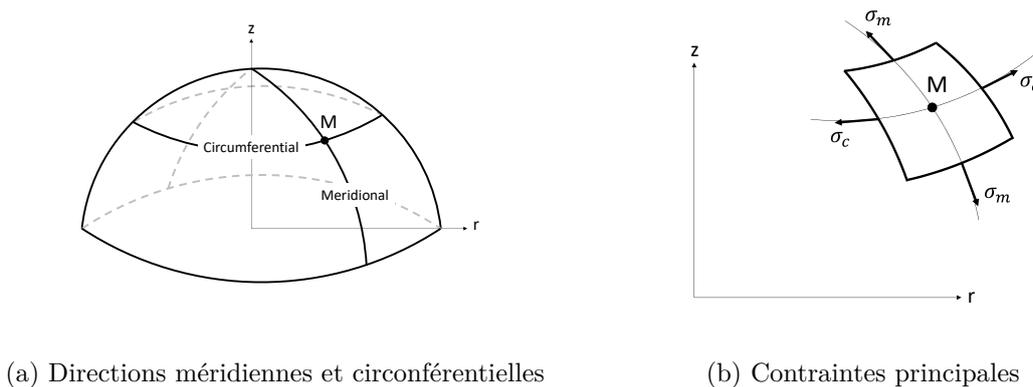


FIGURE 3.43. – Définition des directions des courbures et contraintes principales d’une membrane circulaire déformée

### 3. Membranes circulaires – 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d’images numériques en trois dimensions

Comme démontré dans l’annexe A, l’équilibre d’une membrane circulaire sous pression s’écrit :

$$\frac{\sigma_m}{R_m} + \frac{\sigma_c}{R_c} = \frac{P}{h} \quad (3.6)$$

avec :

- $\sigma_m$  la contrainte méridienne ;
- $\sigma_c$  la contrainte circonférentielle ;
- $R_m$  le rayon de courbure dans la direction méridienne ;
- $R_c$  le rayon de courbure dans la direction circonférentielle ;
- $P$  la pression appliquée ;
- $h$  l’épaisseur de la membrane.

La contrainte méridienne s’exprime :

$$\sigma_m = \frac{P}{2h\kappa_c} \quad (3.7)$$

Et la contrainte circonférentielle vaut :

$$\sigma_c = \sigma_m \left( 2 - \frac{\kappa_m}{\kappa_c} \right) \quad (3.8)$$

#### 3.3.2. Essai de gonflement réalisé sur une membrane circulaire avec liaison flexible optimisée avec mesure de champ

##### 3.3.2.1. Configuration de l’essai

**Membrane composite testée** L’essai a été réalisé avec une membrane identique à la membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée. Il s’agit donc d’un stratifié quasi-isotrope  $[0/45]_s$  fabriqué à partir d’un tissé équilibré serge 2x2 de verre/époxy (référence : Hexcel M34N/42%/202T2/G-68). Comme précédemment, la membrane a une épaisseur de 0,85 mm.

**Mesure de champ et 3D-DIC** Deux caméras sont utilisées afin de faire de la mesure de champ et de la corrélation d’images numériques en trois dimensions (3D-DIC). Cette technique consiste à comparer une image déformée à une image de référence afin de calculer les déplacements et déformations d’une surface. L’image est découpée en facettes sur lesquelles les comparaisons sont faites. Chaque facette est identifiée grâce à un motif aléatoire créé avec un mouchetis de peinture [61, 50, 62]. Dans le cas présent, cette mesure de champ permet de calculer les courbures principales de la membrane à partir de ses coordonnées dans son état déformé.

### 3. Membranes circulaires – 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d’images numériques en trois dimensions

Comme pour tous les essais réalisés, un manomètre mesure la pression et enregistre les valeurs de pression toutes les deux secondes avec un système d’acquisition de données. L’échantillonnage de la mesure de pression se fait toutes les 2 secondes et celle-ci est synchronisée avec la prise des photographies par les caméras servant à faire la mesure de champ. Les objectifs des caméras utilisés dans cet essai permettent d’obtenir une résolution spatiale de 0,12 mm par pixel. La figure 3.44 montre la zone de la membrane couverte par les caméras. Cette zone a été choisie afin de couvrir une grande surface de la membrane comprenant son centre.

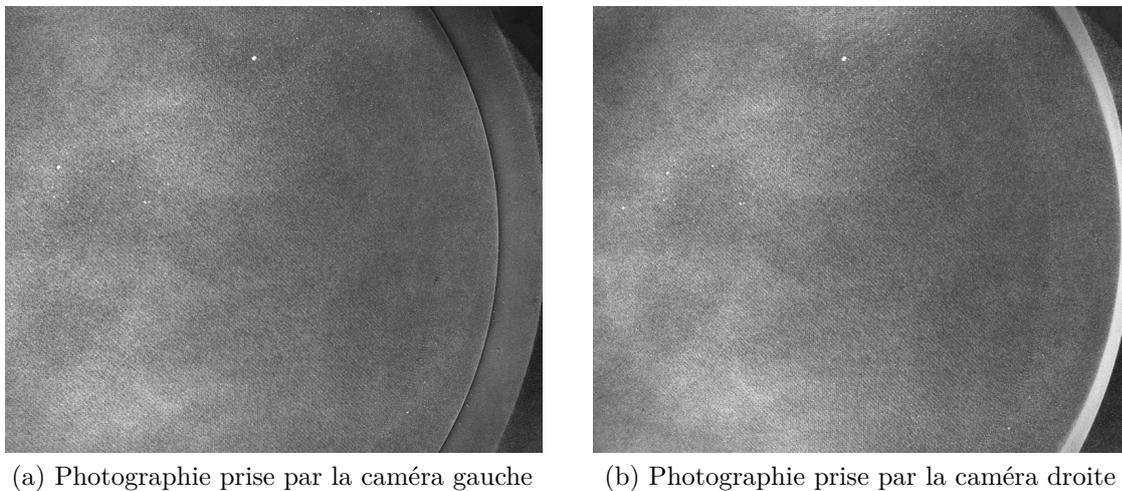


FIGURE 3.44. – Surface de mesure par les caméras pour la mesure de champ sur la membrane circulaire

#### 3.3.2.2. Résultats et observations

L’essai a été réalisé jusqu’à la rupture de la membrane à une pression de 7,1 bar, soit 10% de moins que la même membrane testée précédemment dont le résultat est présenté dans la section 3.2.4. La liaison flexible utilisée est la même que celle utilisée précédemment mais aucun endommagement n’avait été constaté après le premier essai. La baisse de la pression à rupture ne s’explique donc pas par l’utilisation d’une liaison flexible différente. La figure 3.45 montre la membrane après l’essai. On constate que la zone de rupture est similaire à la zone de rupture présente sur la première membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée. Il semblerait que la première fissure apparaît sur une zone centrale de la membrane avant de se diviser en plusieurs fissures se propageant dans plusieurs directions.

3. Membranes circulaires – 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d'images numériques en trois dimensions

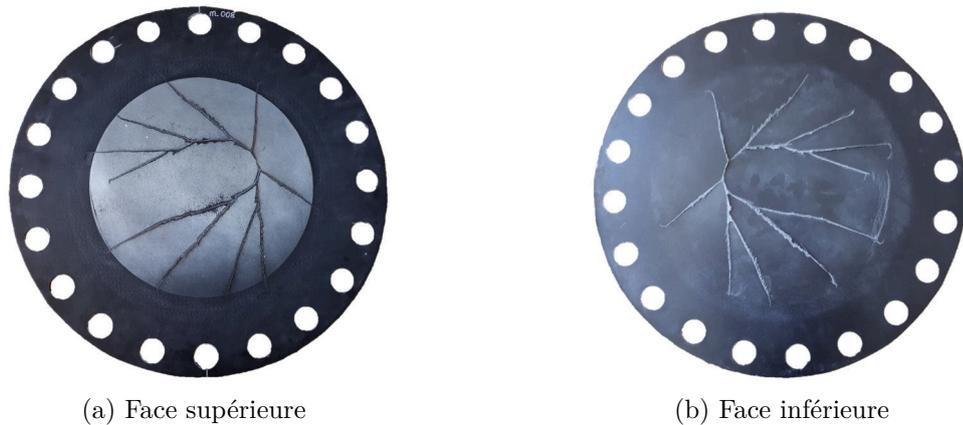


FIGURE 3.45. – Membrane circulaire testée avec la liaison flexible optimisée avec la mesure de champ

Dans le cas présent, la 3D-DIC est faite avec des facettes de 60 pixels et un pas entre facettes de 30 pixels comme justifié en annexe B. Le résultat de la mesure de champ est illustré sur la figure 3.46 qui montre la coordonnée hors plan  $z$  de la membrane à la fin de l'essai à la pression de 7,1 bar et la figure 3.47 qui représente la déformation maximale principale. On observe que la déflexion maximale de la membrane est de 46,6 mm et que la déformation majeure s'approche de la limite à rupture du matériau. En effet, la déformation maximale mesurée est de 2,2% alors que la limite à rupture en traction du matériau est de 2,3%. On peut également voir que le champ de déformation est quasiment uniforme. Cela confirme, tout comme lors du premier essai sur la membrane circulaire avec la liaison flexible optimisée, que la liaison permet de faire en sorte que toute la membrane soit sollicitée en évitant une rupture au bord de la membrane due à une courbure trop importante.

Les résultats expérimentaux sont comparés avec les résultats numériques obtenus avec la modélisation par éléments finis axisymétriques présentée dans la section 3.2.3.3 sur des sections selon une direction d'orientation des fibres (à  $0^\circ$ ) et une direction selon la bissectrice entre deux directions de fibres (à  $22,5^\circ$ ) définies comme sur la figure 3.48 représentant le résultat de la mesure de champ. Ces deux directions sont choisies afin de déterminer si la déformation de la membrane est isotrope. Les déplacements et déformations expérimentaux et numériques sont comparés afin de déterminer si la modélisation numérique permet d'obtenir des résultats proches de la réalité. Si cela est le cas, les résultats numériques sont considérés comme références pour déterminer si le calcul des contraintes à partir des courbures est fiable. Ce calcul est fait à partir des coordonnées  $z$  et  $r$  de la membrane déformée selon la méthode présentée dans l'annexe C. Les résultats sont analysés pour deux niveaux de pression : 7,1 bar correspondant à la pression maximale atteinte et 3,55 bar correspondant à une pression intermédiaire. Pour ce dernier niveau de pression, le module de Young implémenté dans la modélisation par éléments finis vaut 13,5 GPa pour correspondre à la rigidité correspondant

3. Membranes circulaires – 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d'images numériques en trois dimensions

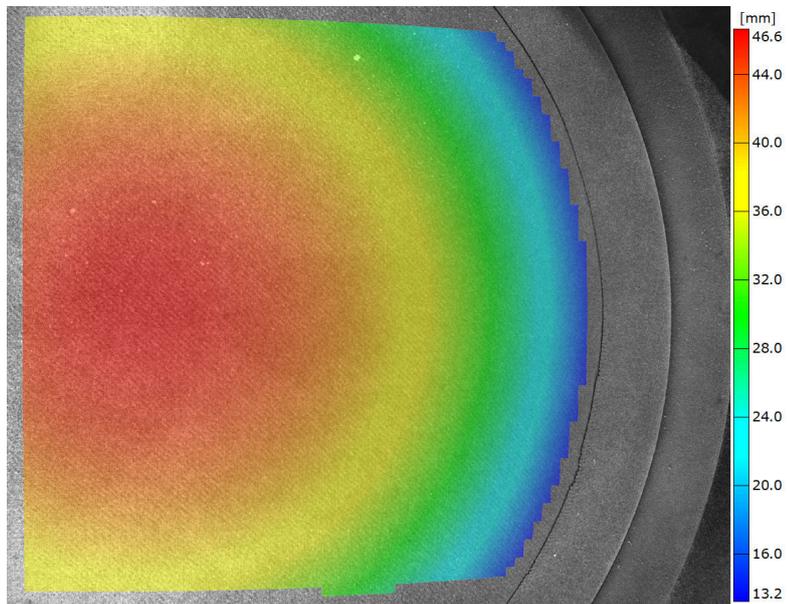


FIGURE 3.46. – Coordonnée z à pression à rupture de la membrane circulaire avec mesure de champ

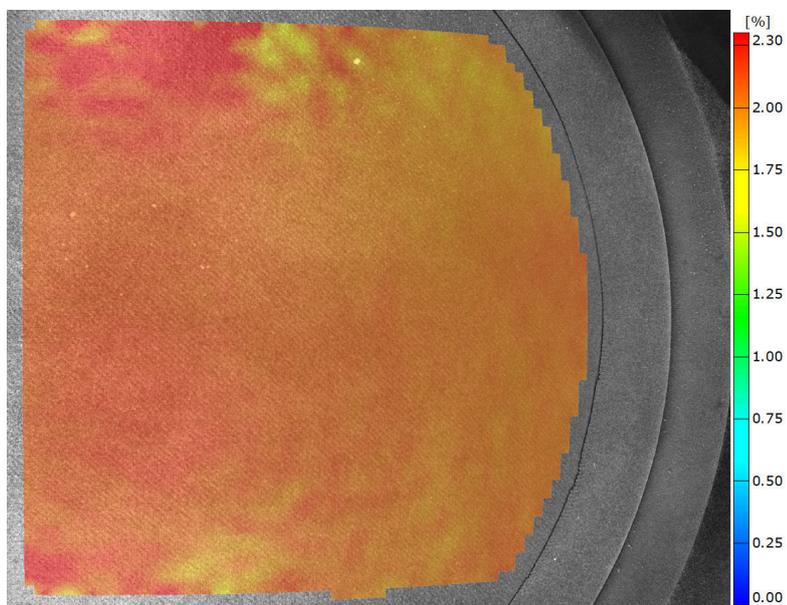


FIGURE 3.47. – Déformation maximale principale à pression à rupture de la membrane circulaire avec mesure de champ

### 3. Membranes circulaires – 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d'images numériques en trois dimensions

au niveau de déformation atteint à cette pression alors qu'il vaut 11 GPa pour la pression maximale.

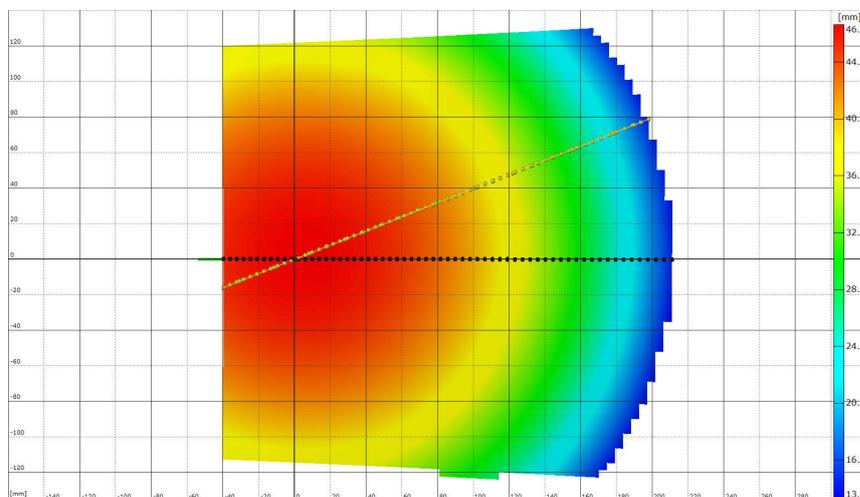


FIGURE 3.48. – Définition des sections à  $0^\circ$  et  $22,5^\circ$  pour le traitement des résultats expérimentaux avec la mesure de champ

La figure 3.49 compare la coordonnée  $z$ . Les résultats expérimentaux et numériques sont très proches pour les deux niveaux de pression et il n'y a pratiquement pas d'écart entre les directions à  $0^\circ$  et à  $22,5^\circ$ .

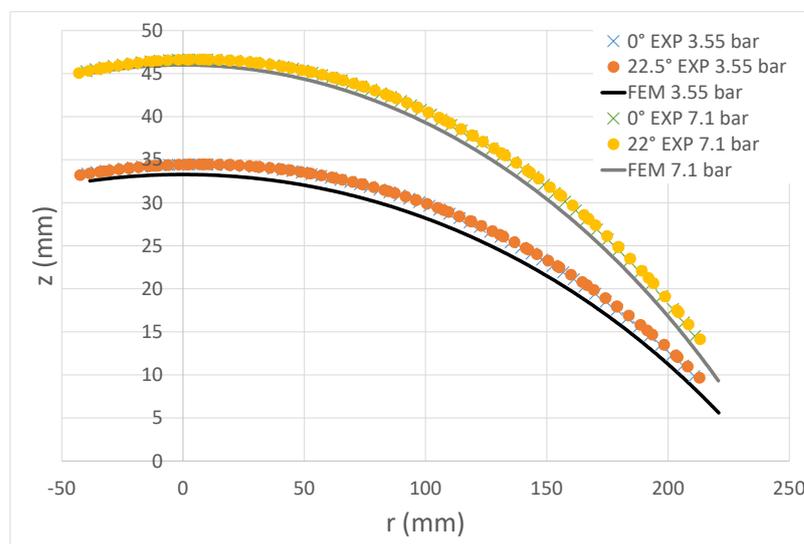


FIGURE 3.49. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la coordonnée  $z$  de la membrane circulaire avec mesure de champ

La figure 3.50 compare la déformation méridienne. Là aussi, les résultats expérimentaux et numériques sont très proches. A 7,1 bar, l'écart est quasiment nul au centre de la membrane et croit vers le bord et c'est l'inverse à 3,55 bar.

3. Membranes circulaires – 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d'images numériques en trois dimensions

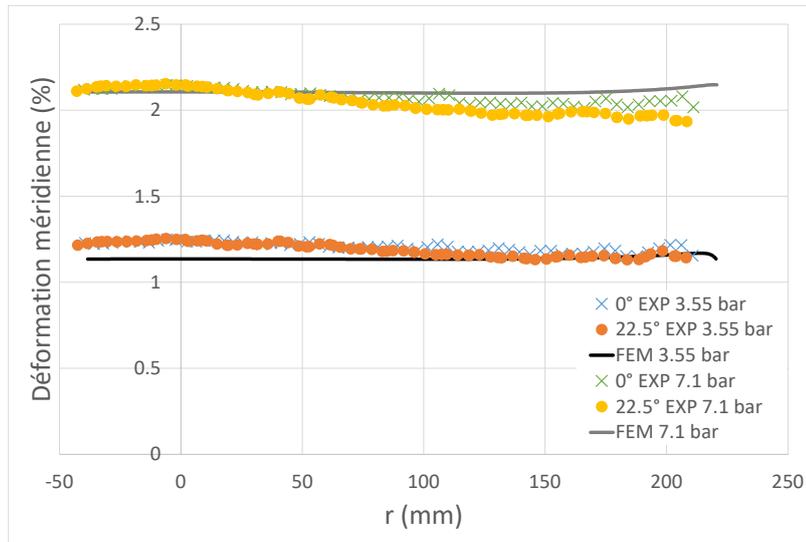


FIGURE 3.50. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la déformation méridienne de la membrane circulaire avec mesure de champ

La figure 3.51 compare la déformation circonférentielle. L'analyse est similaire à celle de la déformation méridienne mais on peut noter un écart un peu plus important entre les directions à 0° et à 22.5° vers le bord de la membrane mais celui-ci reste très faible.

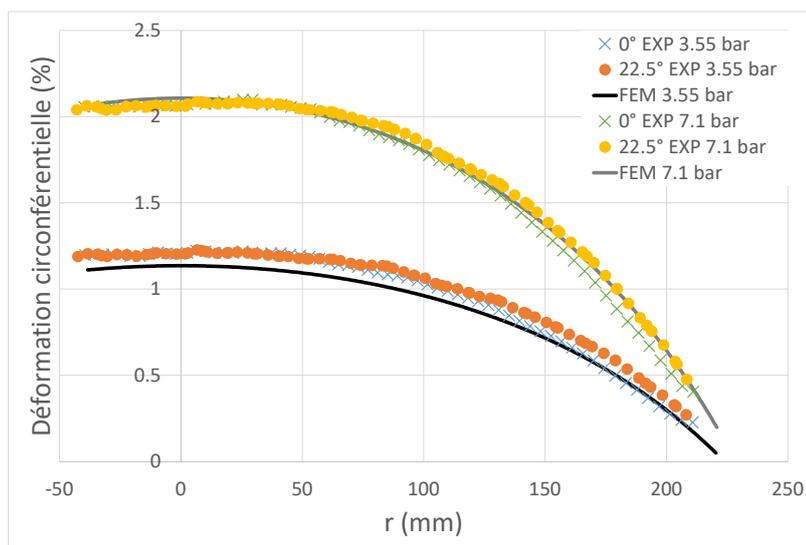


FIGURE 3.51. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la déformation circonférentielle de la membrane circulaire avec mesure de champ

### *3. Membranes circulaires – 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d’images numériques en trois dimensions*

Les déplacements et déformations expérimentaux et numériques sont très proches. Cela permet de dire que la modélisation numérique représente correctement la réalité et que celle-ci peut être utilisée comme référence pour la comparaison des contraintes calculées à partir de la mesure des courbures. Les résultats sur les sections à  $0^\circ$  et à  $22,5^\circ$  sont très proches. Cela permet de dire que le gonflement de la membrane se fait de manière isotrope.

Le calcul des contraintes à partir des courbures sur les sections de la membrane ne permet pas d’obtenir des résultats facilement analysables. En effet, comme présenté dans l’annexe D, les résultats sont très dispersés à cause du bruit de mesure qui a un fort impact sur les dérivées secondes des coordonnées utilisées pour calculer les contraintes. Afin d’améliorer l’analyse des résultats, un code MATLAB développé par Machado [50] est utilisé pour calculer les courbures et contraintes sur toute la surface de la membrane et non plus sur les sections précédemment définies à  $0^\circ$  et  $22,5^\circ$ . Un lissage est ensuite réalisé avec un code MATLAB développé par Garcia [63]. Les résultats expérimentaux et numériques sont présentés à  $P = 3,55$  bar sur la figure 3.52 et à  $P = 7,1$  bar sur la figure 3.53. Dans les deux cas, les contraintes expérimentales sont très proches des résultats numériques. Des analyses ont été faites en faisant varier la taille des facettes pour déterminer laquelle permet d’obtenir les meilleurs résultats comme présenté dans l’annexe E. Les résultats présentés ici sont obtenus avec des facettes de 150 pixels et un pas entre facettes de 75 pixels car la comparaison montre que cette taille et ce pas permet d’obtenir les résultats les plus proches des résultats obtenus avec la modélisation par éléments finis. En effet, l’écart relatif entre les résultats expérimentaux et numérique est de 3% pour la contrainte méridienne et de 6% pour la contrainte circonférentielle.

3. Membranes circulaires – 3.3. Analyse des courbures et calcul des contraintes avec mesure de champ et corrélation d'images numériques en trois dimensions

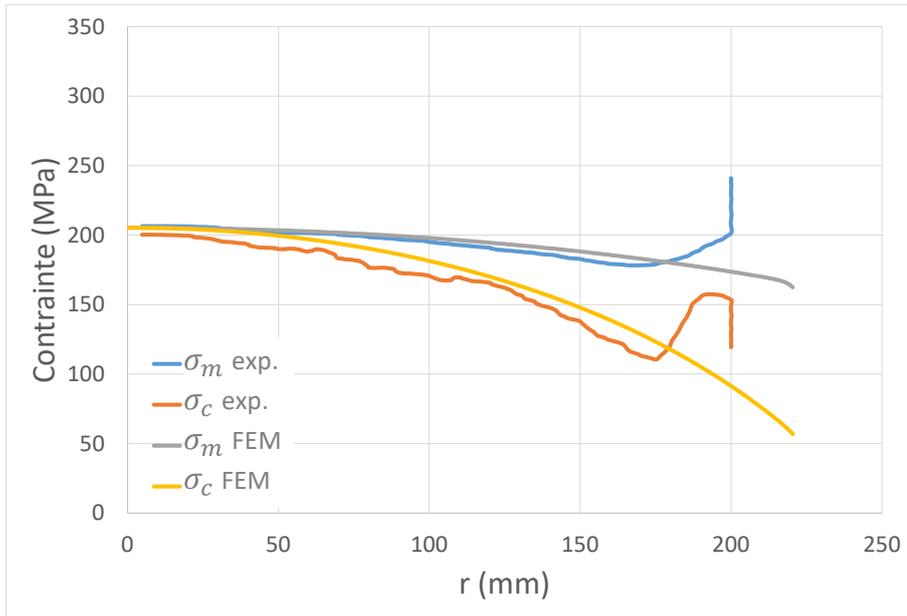


FIGURE 3.52. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques des contraintes calculées à partir des courbures à 3,55 bar avec un lissage des résultats expérimentaux

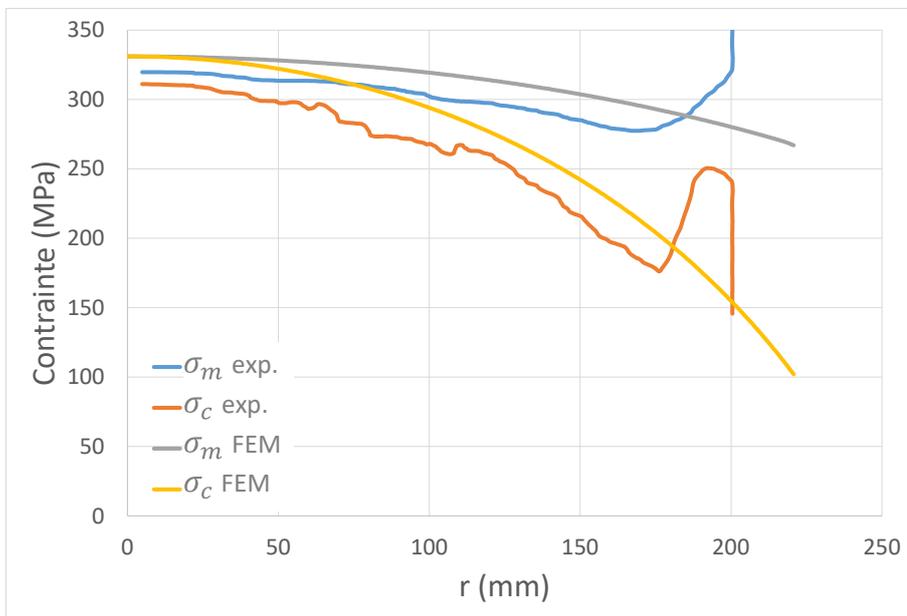


FIGURE 3.53. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques des contraintes calculées à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux

### **3.3.3. Conclusion**

La mesure de champ a été utilisée afin de mesurer les déplacements et déformations sur une zone étendue de la surface de la membrane et non plus ponctuellement comme avec les jauges de déformation utilisées précédemment. Elle permet aussi de calculer les courbures principales de la membrane à partir des coordonnées de la membrane déformée dans le but de calculer les contraintes au sein de la membrane. La comparaison des déplacements et déformations expérimentaux et numériques ont permis de montrer que la modélisation par éléments finis permet d'obtenir des résultats proches de la réalité et qu'elle peut donc être utilisée pour obtenir des résultats de référence concernant les contraintes. Les contraintes numériques peuvent ainsi être comparées aux contraintes calculées à partir des courbures mesurées expérimentalement pour déterminer si celles-ci sont correctes. La mesure des courbures a permis de calculer de manière précise la contrainte méridienne et la contrainte circonférentielle. Cet essai constitue donc un bon moyen d'étudier un matériau composite sous chargement biaxial et d'identifier son comportement mécanique.

### 3.4. Membranes libres de glisser

Les essais présentés jusqu'alors ont été réalisés avec la membrane fixée entre les deux brides. Afin d'évaluer l'importance de la fixation du bord de la membrane, des essais sont réalisés avec des membranes dont les bords ne sont pas fixés. Deux essais ont été réalisés : sur une membrane quasi-isotrope et sur une membrane orthotrope.

#### 3.4.1. Description des essais réalisés

##### 3.4.1.1. Montage d'essai

Les essais sont faits sur des membranes d'un diamètre de 513,5 mm correspondant au diamètre intérieur de la bride plate. La membrane n'est donc pas serrée sous la bride plate et est donc libre de glisser mais le déplacement hors plan de son bord est bloqué par la liaison flexible optimisée présentée précédemment. Afin d'éviter le serrage de la membrane, une cale en forme d'anneau dont l'épaisseur vaut deux fois celle de la membrane est placée sous la bride plate. La figure 3.54 présente le montage d'essai utilisé. Ce montage se distingue du précédent par la présence de la cale (F) permettant d'éviter le serrage de la membrane (C). Deux caméras sont utilisées pour faire de la mesure de champ et de la 3D-DIC avec une résolution de 0,12 mm par pixel.

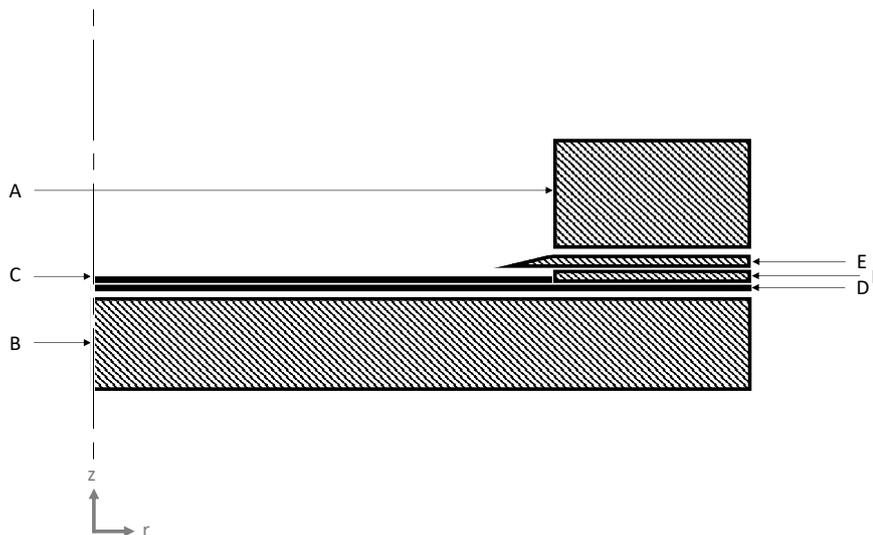


FIGURE 3.54. – Montage d'essai avec membrane libre de glisser. A : bride plate ; B : bride pleine ; C : membrane composite ; D : membrane d'étanchéité ; E : liaison flexible ; F : cale permettant d'éviter le serrage de la membrane composite.

### 3. Membranes circulaires – 3.4. Membranes libres de glisser

#### 3.4.1.2. Essai sur membrane quasi-isotrope

La membrane testée est constituée d'un stratifié quasi-isotrope  $[0/45]_s$  fabriqué à partir du tissé équilibré serge 2x2 de verre/époxy Hexcel M34N/42%/202T2/G-68 d'une épaisseur de 0,85 mm. La rupture de la membrane a eu lieu à une pression de 0,34 bar. En comparaison avec la membrane fixée testée avec la liaison flexible optimisée, cette pression est 23 fois plus faible. La figure 3.55 montre que la rupture est localisée au bord de la membrane.

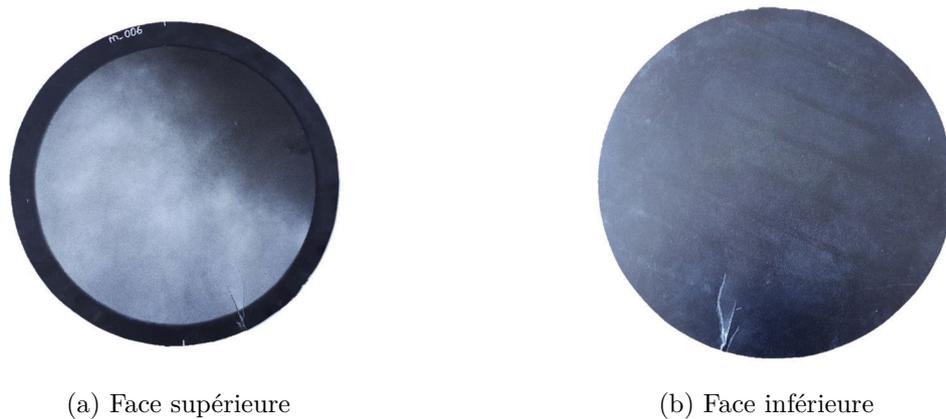


FIGURE 3.55. – Membrane circulaire quasi-isotrope non-serrée

La direction  $0^\circ$  est représentée par les deux traits blancs au bord de la membrane. On peut remarquer que la rupture s'est produite à  $22,5^\circ$ , c'est-à-dire selon la bissectrice entre deux directions de fibres. La figure 3.56a zoome sur la zone de rupture. La figure 3.56b montre qu'il y a un chevauchement au bord de la membrane.

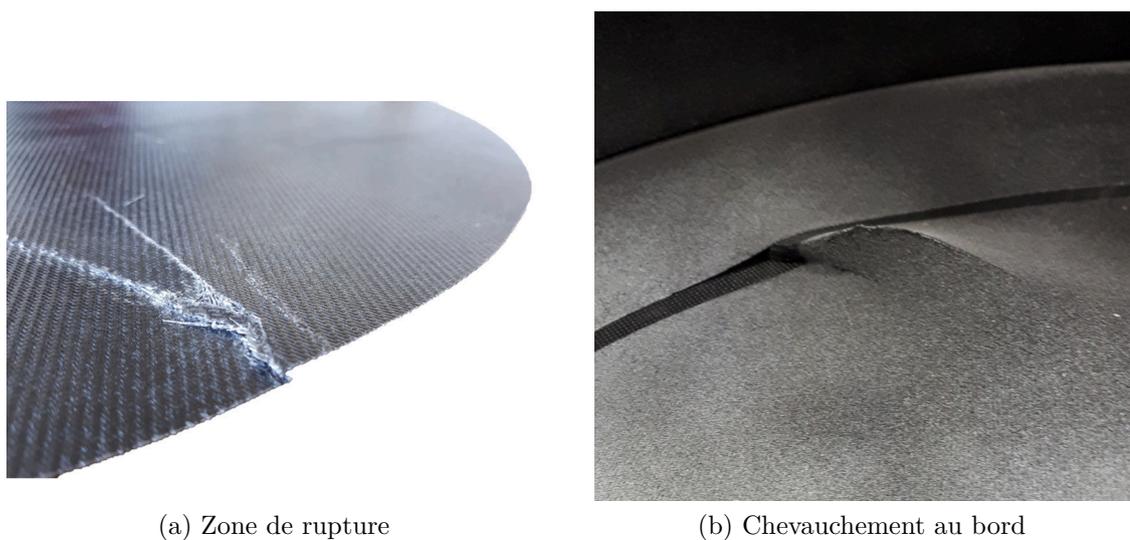


FIGURE 3.56. – Zone de rupture de la membrane quasi-isotrope non-serrée

### 3. Membranes circulaires – 3.4. Membranes libres de glisser

L'absence de mouchetis au bord montre que la membrane a glissé car le mouchetis n'était pas présent sur la partie de la membrane se situant sous la liaison flexible. Ce glissement radial entraîne nécessairement une diminution de la circonférence du bord de la membrane et donc une compression dans la direction circonférentielle sur cette zone. La membrane étant très peu épaisse, son bord en compression a flambé, ce qui a provoqué sa rupture. La figure 3.57 montre la déflexion de la membrane juste avant sa rupture à une pression de 0,34 bar et la figure 3.58 montre sa déformation majeure au même instant. On peut voir une ondulation au bord de la membrane montrant que cette zone peut être sujette à un flambement. La déformation maximale mesurée est de 0,4%, soit seulement 17% de la limite à rupture du matériau.

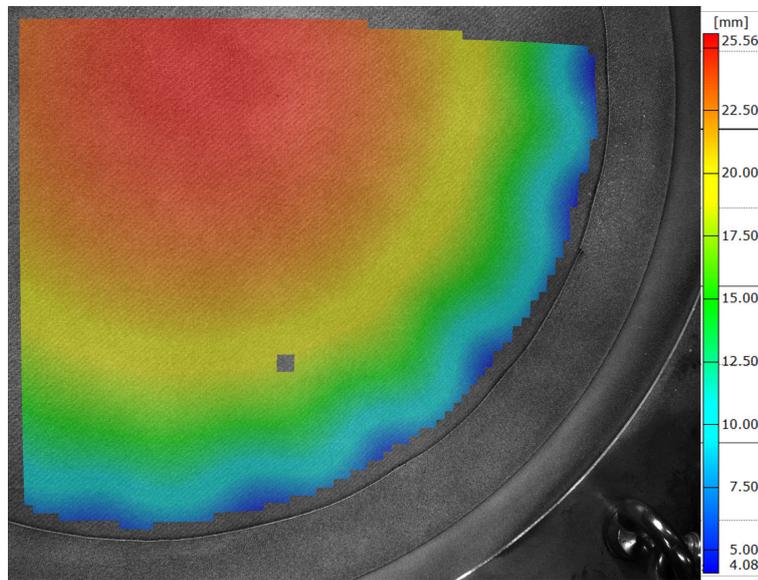


FIGURE 3.57. – Déflexion de la membrane quasi-isotrope non-serrée à pression maximale  $P = 0,34$  bar

### 3. Membranes circulaires – 3.4. Membranes libres de glisser

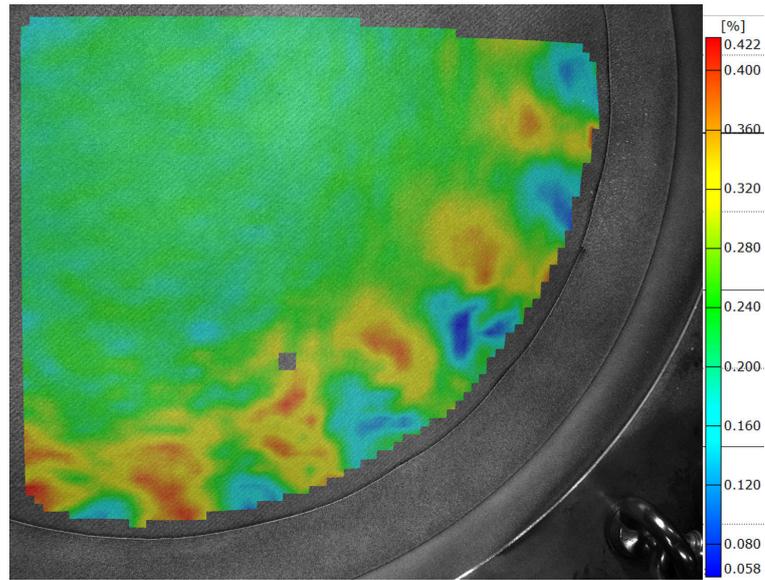


FIGURE 3.58. – Déformation maximale principale de la membrane quasi-isotrope non-serrée à pression maximale  $P = 0,34$  bar

#### 3.4.1.3. Essai sur membrane orthotrope

Le même essai est réalisé mais cette fois-ci sur une membrane orthotrope  $[0]_4$  fabriquée à partir du même matériau M34N/42%/202T2/G-68. Cet essai sur un stratifié différent permet de voir si la rupture est différente par rapport à la membrane quasi-isotrope et si la rupture se produit toujours selon la bissectrice entre deux directions de fibres. Les propriétés mécaniques des plis sont présentées dans les tableaux 3.5 et 3.6.

Propriétés à $0^\circ$ des plis du M34N/42%/202T2/G-68					
$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{1\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}$ (GPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\varepsilon_r$ (%)	$\nu$
22.5	20.3	18.3	385	2.2	0.1

TABLEAU 3.5. – Propriétés à  $0^\circ$  des plis du M34N/42%/202T2/G-68

Propriétés à $90^\circ$ des plis du M34N/42%/202T2/G-68					
$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{1\%}}$ (GPa)	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}$ (GPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\varepsilon_r$ (%)	$\nu$
19.3	18.5	16.7	365	2.2	0.1

TABLEAU 3.6. – Propriétés à  $90^\circ$  des plis du M34N/42%/202T2/G-68

L'essai a été mené jusqu'à la rupture de la membrane à la pression 0,37 bar, soit 21,4 fois moins que la membrane serrée (section 3.2.4). Le mode de rupture

3. Membranes circulaires – 3.4. Membranes libres de glisser

est similaire à celui qui a été observé pour la membrane quasi-isotrope comme présenté sur les figures 3.59 et 3.60. La direction  $0^\circ$  est représentée par les deux traits blancs au bord de la membrane. On peut voir que la rupture est localisée à  $45^\circ$ , ce qui correspond à la bissectrice entre deux directions de fibres tout comme précédemment sur la membrane quasi-isotrope.

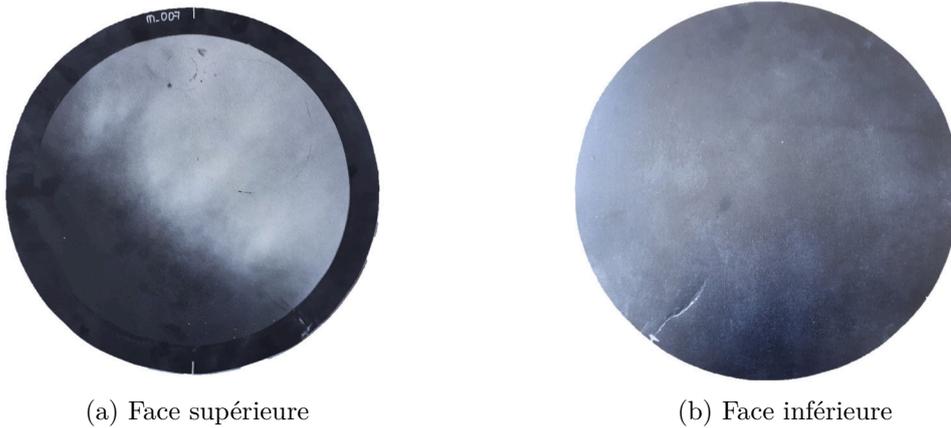


FIGURE 3.59. – Membrane circulaire orthotrope non-serrée après rupture



FIGURE 3.60. – Zone de rupture de la membrane orthotrope non-serrée

### 3. Membranes circulaires – 3.4. Membranes libres de glisser

Comme dans le cas précédent, des ondulations sont observées au bord de la membrane comme on peut le voir sur la figure 3.61 et sur la figure 3.62 représentant respectivement la déflexion et la déformation majeure à la pression maximale. L'ondulation du bord de la membrane et le faible niveau de déformation laisse penser que le bord de la membrane a flambé.

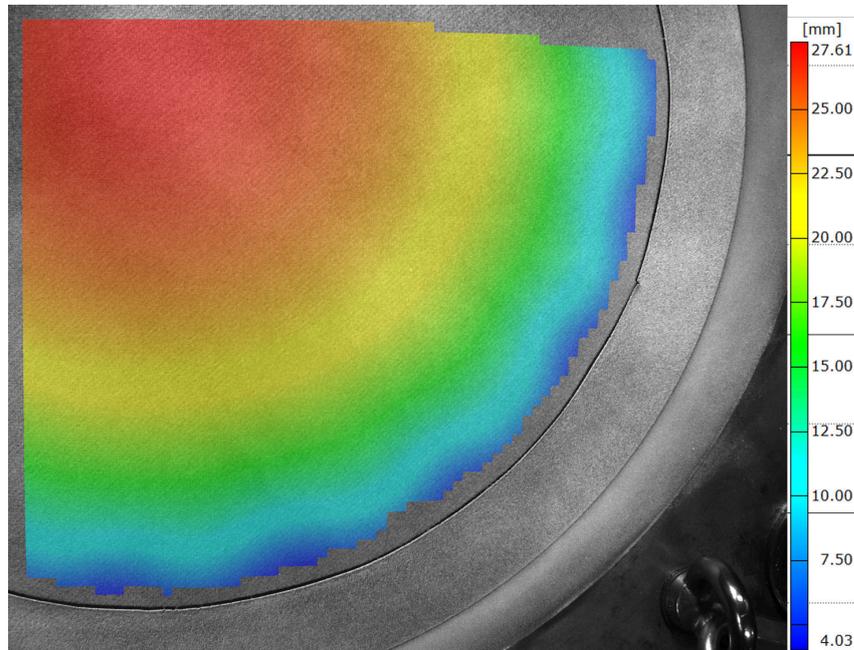


FIGURE 3.61. – Déflexion de la membrane orthotrope non-serrée à la fin de l'essai à  $P = 0,37$  bar

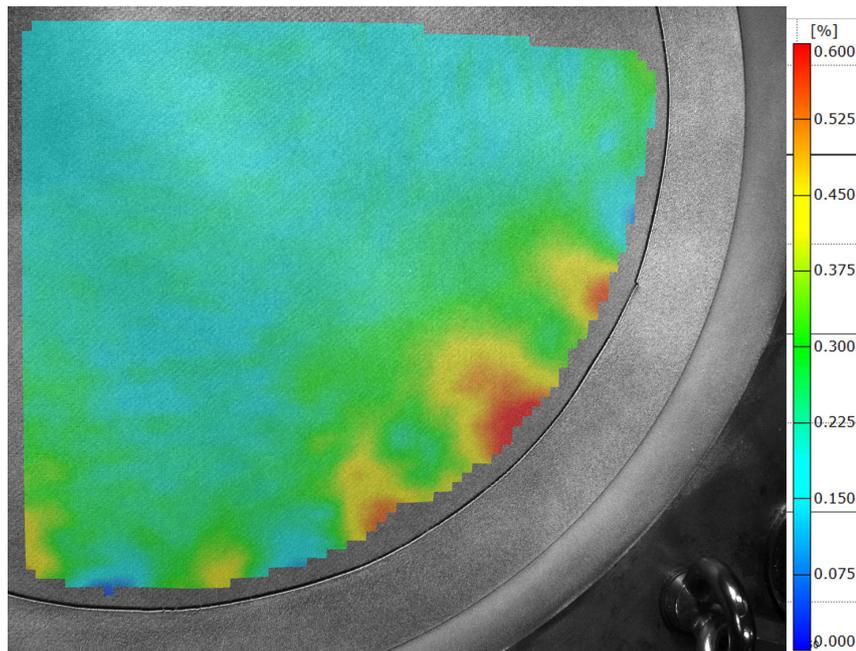


FIGURE 3.62. – Déformation maximale principale de la membrane orthotrope non-serrée à la fin de l'essai à  $P = 0,37$  bar

### 3.4.2. Conclusion

Les essais réalisés sur des membranes non-fixées ont permis de montrer l'importance de la fixation du bord de la membrane. En effet, la pression tenue par la membrane est plus de 20 fois inférieure avec cette solution par rapport à la solution avec la membrane serrée. Le même type de rupture a été observé dans le cas de la membrane quasi-isotrope et de la membrane orthotrope. Cette rupture est due à une compression circonférentielle qui engendre un flambement du bord des membranes. Cette compression est due au déplacement de la membrane dans la direction radiale. Ces essais montrent donc l'importance de bloquer ce déplacement.



## 4. Membranes carrées

Dans ce quatrième chapitre, les travaux réalisés sur des membranes de forme carrée se rapprochant de la configuration des cloisons présentes sur les flotteurs de BW Ideol sont présentés.

Dans un premier temps, une approche simplifiée décrit la réponse d'une membrane carrée sous pression. Le modèle analytique avec les solutions aux équations de Föppl - von Kármán [39] permet d'établir les zones les plus sollicitées et les directions des contraintes et déformations maximales présentes au sein d'une membrane carrée sous pression. Une modélisation par éléments finis est également faite afin d'analyser la réponse d'une membrane carrée modélisée avec des éléments de membrane pour déterminer quelle réponse il est possible d'obtenir expérimentalement en diminuant au maximum la flexion présente au bord de la membrane.

Ensuite, les essais réalisés sur les membranes carrées sont présentés en commençant par un essai réalisé sans liaison flexible. Afin de diminuer la courbure présente au bord de la membrane causant sa rupture, une liaison flexible optimale est dimensionnée pour une membrane quasi-istrope. Celle-ci permet d'augmenter considérablement la tenue de la membrane tout en contrôlant le gain de masse de la structure. La réponse de la membrane se rapprochant du cas de la membrane idéale analysée précédemment.

Afin d'augmenter encore la tenue de la membrane et en observant que les sollicitations de la membrane sont orientées principalement selon les directions normales aux bords, une membrane orthotrope est testée en plaçant les fibres selon ces deux directions. La tenue de la membrane est encore accrue grâce à ce changement sans augmenter le nombre de pli et donc en conservant une masse constante.

Enfin, des essais sont réalisés afin d'évaluer la tenue de membranes avec entaille. Il est observé que la pression à rupture est considérablement plus faible en comparaison à la tenue des membranes sans entaille. Il est enfin montré que l'utilisation d'un critère non-local permet de prédire de manière précise la rupture de la membrane alors qu'un critère considérant la valeur maximale obtenue (en contrainte ou en déformation) conduirait au surdimensionnement de la structure.

### Sommaire

4.1	Approche simplifiée d'une membrane carrée sous pression . . . . .	105
4.1.1	Solutions analytiques . . . . .	105
4.1.2	Modélisation par éléments finis d'une membrane carrée sous pression idéale . . . . .	107

## 4. Membranes carrées –

4.2	Conception d'une liaison flexible optimale . . . . .	110
4.2.1	Essai réalisé sur membrane quasi-isotrope sans liaison flexible	110
4.2.1.1	Membrane composite testée . . . . .	110
4.2.1.2	Instrumentation . . . . .	110
4.2.1.3	Résultats expérimentaux . . . . .	111
4.2.2	Conception de la liaison flexible optimale . . . . .	114
4.2.2.1	Objectifs . . . . .	114
4.2.2.2	Géométrie . . . . .	114
4.2.2.3	Matériau utilisé pour la conception et fabrication de la liaison flexible carrée . . . . .	114
4.2.2.4	Description de la modélisation par éléments finis utilisée	114
4.2.2.5	Maximisation de la pression spécifique . . . . .	118
4.2.2.6	Tenue de la liaison flexible . . . . .	119
4.2.2.7	Liaison flexible carrée optimale . . . . .	119
4.2.3	Essai réalisé sur membrane quasi-isotrope avec liaison flexible	120
4.2.3.1	Objectif et configuration de l'essai . . . . .	120
4.2.3.2	Résultat expérimental . . . . .	120
4.2.3.3	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques	123
4.2.3.4	Comparaison avec modèle analytique . . . . .	126
4.2.3.5	Conclusion . . . . .	127
4.3	Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope . . . . .	129
4.3.1	Objectif . . . . .	129
4.3.2	Configuration de l'essai . . . . .	130
4.3.3	Comparaison de l'impact de l'orientation des fibres par calcul par éléments finis simplifié . . . . .	130
4.3.4	Résultat expérimental . . . . .	132
4.3.5	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques . . . . .	135
4.3.6	Conclusion . . . . .	140
4.4	Membranes avec concentration de contraintes . . . . .	141
4.4.1	Objectif et contexte . . . . .	141
4.4.2	Essai réalisé sur membrane circulaire entaillée . . . . .	141
4.4.3	Essai réalisé sur membrane carrée entaillée . . . . .	143
4.4.4	Utilisation d'un critère non-local prédisant la tenue des mem- branes . . . . .	145
4.4.4.1	Modélisation par éléments finis et application du cri- tère non-local à la membrane circulaire . . . . .	145
4.4.4.2	Modélisation par éléments finis et application du cri- tère non-local à la membrane carrée . . . . .	147
4.4.5	Conclusion . . . . .	148

## 4.1. Approche simplifiée d’une membrane carrée sous pression

### 4.1.1. Solutions analytiques

Les solutions aux équations de Föppl - von Kármán présentées dans la section 1.2.3 constituent un outil simple pour analyser une membrane carrée sous pression en grande déflexion. Elles permettent d’évaluer la déflexion et les contraintes au sein de la membrane. Ces contraintes peuvent être évaluées au centre de la membrane et à son bord dans la direction normale et tangentielle au bord. Elles constituent donc un outil simple et rapide pour comparer la répartition des contraintes (ou déformations) au sein de la membrane carrée et celles-ci peuvent être comparées au cas de la membrane circulaire. La comparaison des contraintes permet également de déterminer le critère dimensionnant, c’est-à-dire la zone de la membrane qui sera la plus sollicitée et donc susceptible de rompre en premier. Pour rappel, si on considère une membrane carrée dans le repère  $Oxy$  comme défini sur la figure 4.1, les contraintes valent [39] :

$$\sigma_{xi} = \alpha_i \left[ E \left( \frac{PL}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{yi} = \beta_i \left[ E \left( \frac{PL}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.2)$$

Avec :

- $\alpha_i$  et  $\beta_i$  des coefficients dépendant de la zone de la membrane considérée :
  - $\alpha_2 = 0,1324$  et  $\beta_2 = 0,3200$  en  $x = \frac{L}{2}, y = 0$  ;
  - $\alpha_3 = 0,3200$  et  $\beta_3 = 0,1324$  en  $x = 0, y = \frac{L}{2}$  ;
  - $\alpha_4 = 0,2682$  et  $\beta_4 = 0,2682$  en  $x = \frac{L}{2}, y = \frac{L}{2}$ .
- $E$  le module de Young ;
- $P$  la pression appliquée ;
- $L$  la longueur de la membrane ;
- $h$  l’épaisseur de la membrane.

4. Membranes carrées – 4.1. Approche simplifiée d’une membrane carrée sous pression

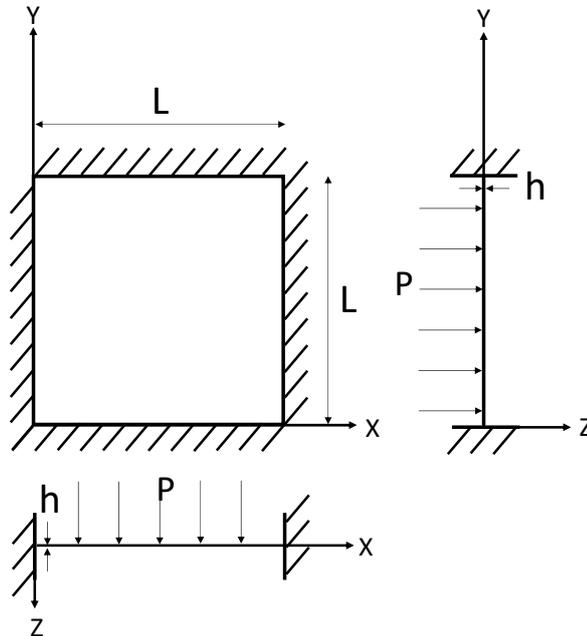


FIGURE 4.1. – Membrane carrée sous pression latérale

Si on se place en  $x = 0$ ,  $y = \frac{L}{2}$ , alors  $\alpha_3 = 0,3200$  et  $\beta_3 = 0,1324$ . Le rapport entre la contrainte tangentielle et normale vaut alors  $\beta_3/\alpha_3 = 0,1324/0,3200 = 0,41$ . En  $x = \frac{L}{2}$ ,  $y = \frac{L}{2}$ , les coefficients  $\alpha_4$  et  $\beta_4$  permettent de calculer la contrainte au centre. Celle-ci peut alors être comparée à la contrainte normale au bord. Le rapport entre la contrainte au centre et la contrainte normale au bord vaut donc  $\alpha_4/\alpha_3 = 0,2682/0,3200 = 0,84$ . Cela signifie donc que la contrainte maximale au sein d’une membrane carrée correspond à la contrainte normale au bord. Pour rappel, la contrainte maximale au sein d’une membrane circulaire se trouve au centre et est orientée selon la direction méridienne.

### 4.1.2. Modélisation par éléments finis d'une membrane carrée sous pression idéale

La répartition des contraintes au sein d'une membrane carrée sous pression en grande déflexion est vérifiée avec une modélisation par éléments finis. La taille de cette membrane correspond aux dimensions du montage d'essai : le masque en carbone présenté dans la section 2.2 permet de tester des membranes carrées de 363 mm de côté. Comme pour la membrane circulaire idéale présentée dans le chapitre 3, cette membrane est considérée comme étant idéale car elle est modélisée avec des éléments membranes et ceux-ci ne représentent que le feuillet moyen de la structure, aucune variation de contrainte dans l'épaisseur ne peut ainsi exister, aucune flexion ne peut donc être présente et le comportement de membrane est idéal. Le matériau modélisé correspond au matériau utilisé pour effectuer les essais sur les membranes carrées qui seront présentés dans le présent chapitre. Un module de Young de 14,25 GPa et un coefficient de Poisson de 0,3 sont utilisés. Ces propriétés sont issues d'essais de traction simple réalisés sur le stratifié servant à fabriquer les membranes testées. La membrane pouvant subir une grande déflexion, la non-linéarité géométrique est prise en compte dans la modélisation. Comme illustré sur la figure 4.2, les déplacements du bord de la membrane sont bloqués et une pression uniforme de 0,6 MPa est appliquée permettant d'atteindre une déformation maximale de 2% qui est la limite à rupture en traction du matériau considéré. Des éléments membranes avec 4 noeuds sont utilisés pour mailler la pièce.

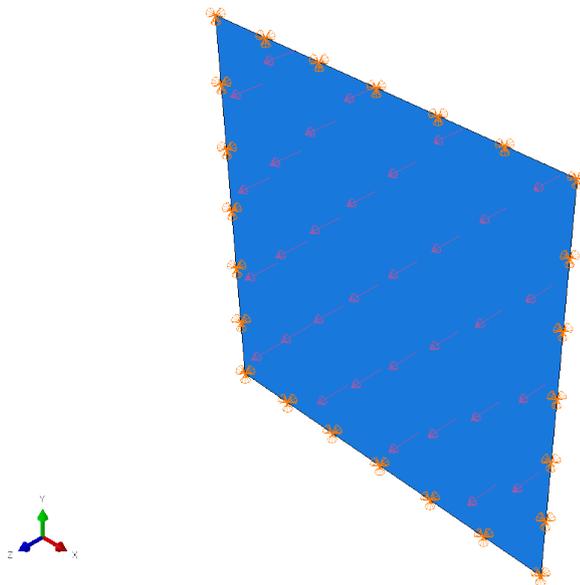


FIGURE 4.2. – Modélisation par éléments finis d'une membrane carrée idéale

#### 4. Membranes carrées – 4.1. Approche simplifiée d'une membrane carrée sous pression

Comme le montre la figure 4.3, les contraintes maximales se trouvent au centre du bord de la membrane. Au bord, la contrainte maximale vaut 306,5 MPa dans la direction normale au bord comme le montre la figure 4.4. Au centre, elle vaut 261,6 MPa au centre et représente 85% de la contrainte au bord (très proche des 84% donnés par le modèle analytique dans la section 4.1.1). Contrairement à la membrane circulaire présentée dans la section 3.1, les déformations ne sont pas constantes sur toute la surface de la membrane ; celles-ci sont maximales au bord de la membrane et la déformation au centre ne représente que 67% de la déformation au bord (figure 4.5). Les déformations n'étant pas constantes dans le cas d'une membrane idéale, il ne sera donc pas possible d'atteindre une homogénéité des déformations dans le cas réel comme pour les membranes circulaires étudiées dans le chapitre précédent.

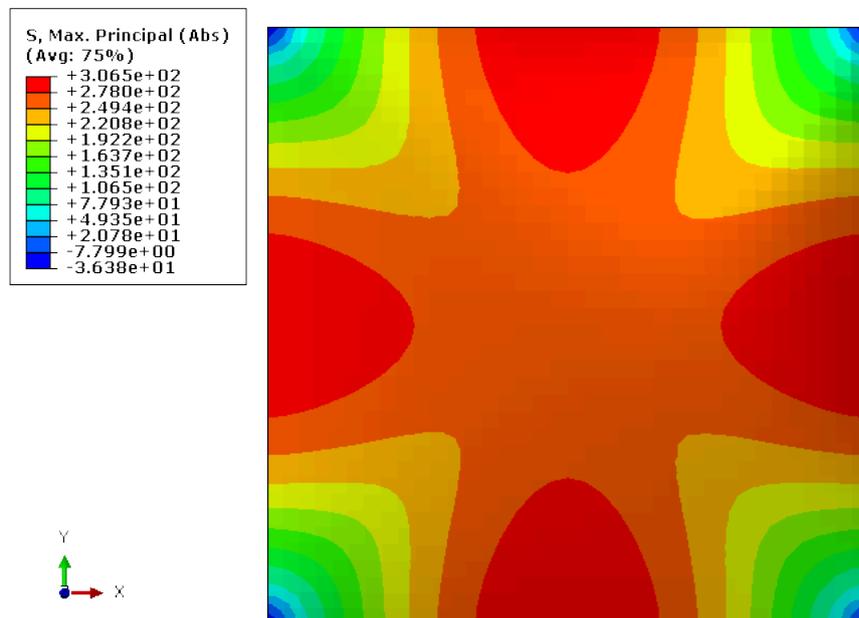


FIGURE 4.3. – Contraintes maximales principales d'une membrane carrée idéale

4. Membranes carrées – 4.1. Approche simplifiée d'une membrane carrée sous pression

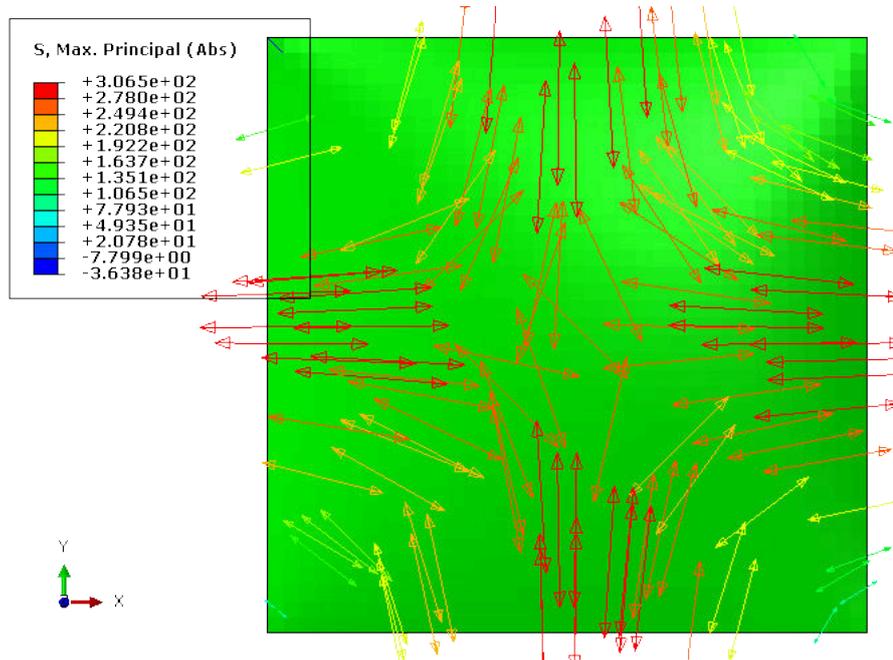


FIGURE 4.4. – Direction des contraintes maximales principales d'une membrane carrée idéale

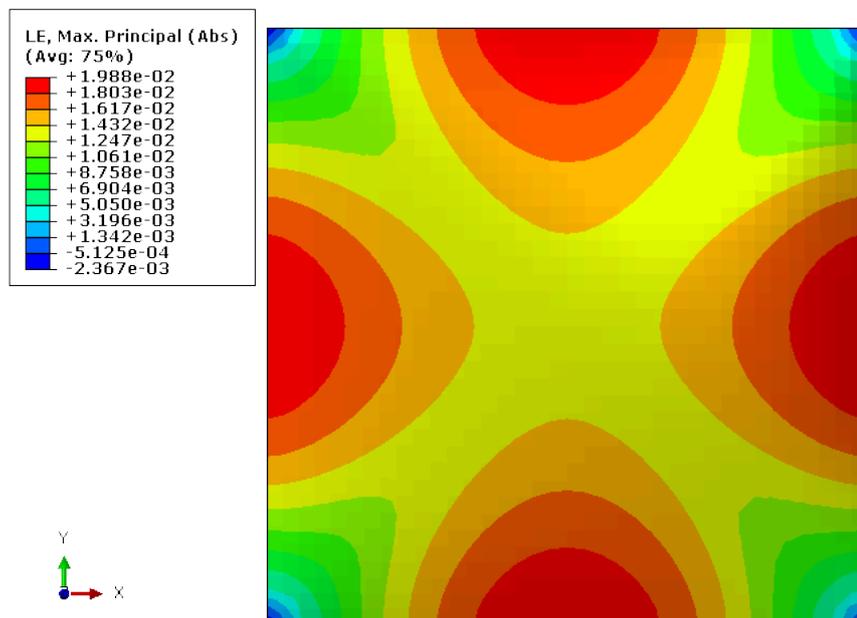


FIGURE 4.5. – Déformations maximales principales d'une membrane carrée idéale

## 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

De la même manière que pour les membranes circulaires étudiées précédemment, l'objectif de cette partie est de démontrer l'intérêt d'utiliser une liaison flexible pour optimiser la tenue de la membrane carrée, c'est à dire pour maximiser la pression qu'elle est capable de supporter tout en minimisant sa masse. Pour cela, des essais sont réalisés sur deux membranes identiques : sans liaison flexible et avec une liaison flexible optimisée.

### 4.2.1. Essai réalisé sur membrane quasi-isotrope sans liaison flexible

#### 4.2.1.1. Membrane composite testée

Un premier essai est réalisé sans liaison flexible sur une membrane carrée quasi-isotrope dont la séquence de drapage est  $[0/45]_s$  avec un préimprégné verre/époxy tissé équilibré sergé 2x2 Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37% dont les propriétés mécaniques sont résumées dans les tableaux 4.1 et 4.2 (mesurées de la même manière que pour le matériau utilisé pour fabriquer les membranes circulaires dans le chapitre 3). Ce matériau a été choisi car le matériau utilisé pour les membranes circulaires n'était plus disponible et qu'il permet de fabriquer des membranes peu épaisses. La cuisson est faite sous vide en étuve pendant trois heures à 120 ° C. Après cuisson, la membrane a une épaisseur de 0,9 mm, ce qui donne un rapport épaisseur sur longueur de 1/403.

$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}(GPa)$	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}(GPa)$	$\sigma_r(MPa)$	$\varepsilon_r(\%)$	$\nu$
18,4	14.1	278	2.0	0.27

TABLEAU 4.1. – Propriétés à 0 ° du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37%  $[0/45]_s$

$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}(GPa)$	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}(GPa)$	$\sigma_r(MPa)$	$\varepsilon_r(\%)$	$\nu$
18.9	14.4	275	1.9	0.32

TABLEAU 4.2. – Propriétés à 22,5 ° du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37%  $[0/45]_s$

#### 4.2.1.2. Instrumentation

La mesure des déplacements et déformations est faite par 3D-DIC avec deux caméras et une jauge de déformation. La jauge de déformation est utilisée afin d'ajouter une mesure au bord de la membrane. Cette jauge est placée comme indiquée sur la figure 4.6 à 10 mm du bord du masque. La pression appliquée est

#### 4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

mesurée par un manomètre branché sur le système d'acquisition de données qui enregistre les déformations, la pression et le temps de l'essai. L'échantillonnage est fait toutes les 2 secondes.

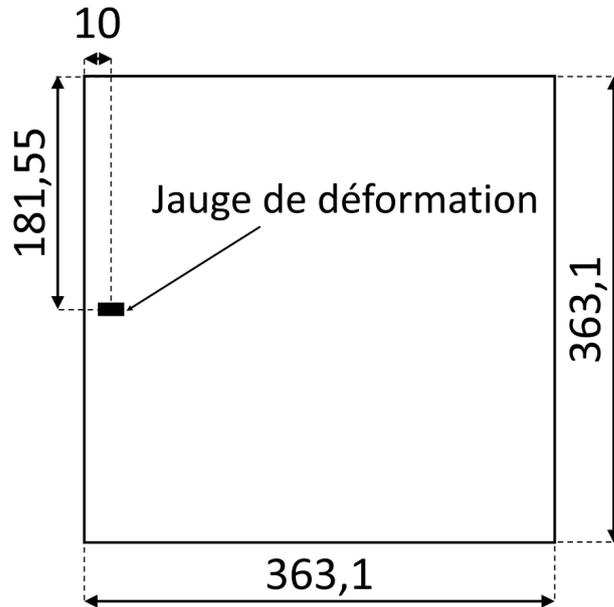


FIGURE 4.6. – Localisation de la jauge de déformation sur la membrane carrée testée sans liaison flexible

##### 4.2.1.3. Résultats expérimentaux

L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane à une pression de 2,25 bar. La figure 4.7 montre que la rupture est apparue au bord de la membrane.

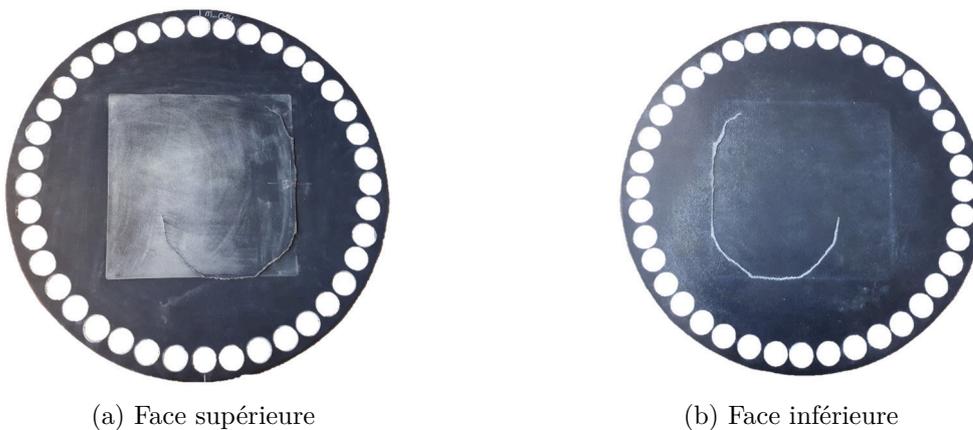


FIGURE 4.7. – Zone de rupture de la membrane carrée testée sans liaison flexible

#### 4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

La coordonnée hors plan juste avant la rupture est représentée sur la figure 4.8. Une déflexion maximale de 21,96 mm est donc atteinte au cours de l'essai.

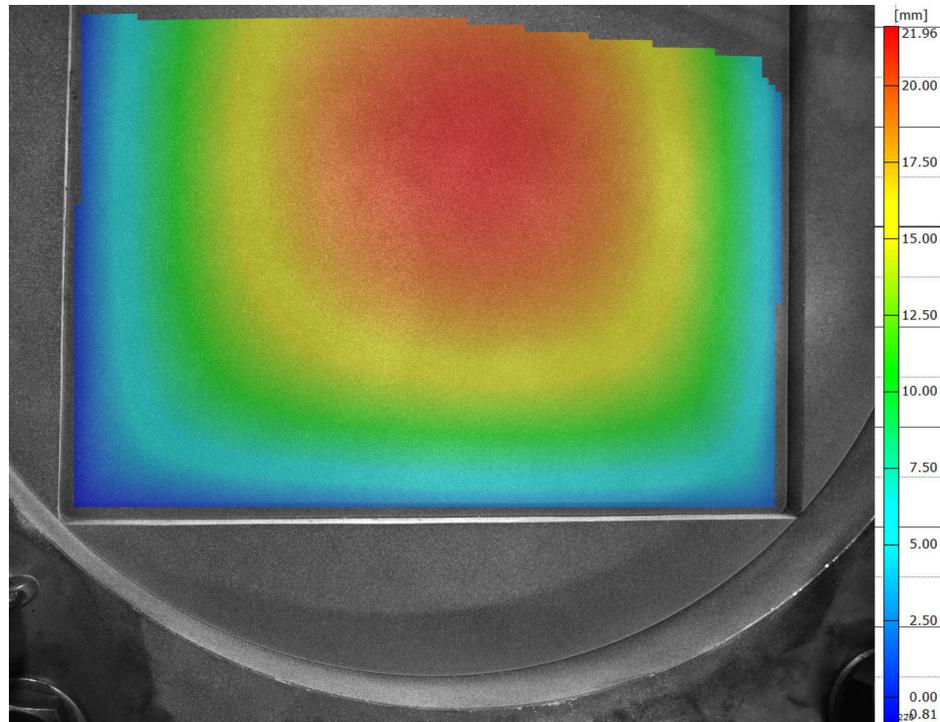


FIGURE 4.8. – Coordonnée Z de la membrane carrée testée sans liaison flexible juste avant sa rupture

La déformation maximale principale juste avant la rupture est représentée sur la figure 4.9. On observe que la déformation au centre de la membrane est d'environ 0,5%. La déformation au bord mesurée avec la 3D-DIC vaut environ 1% et la jauge a mesuré une déformation maximale de 0,94%.

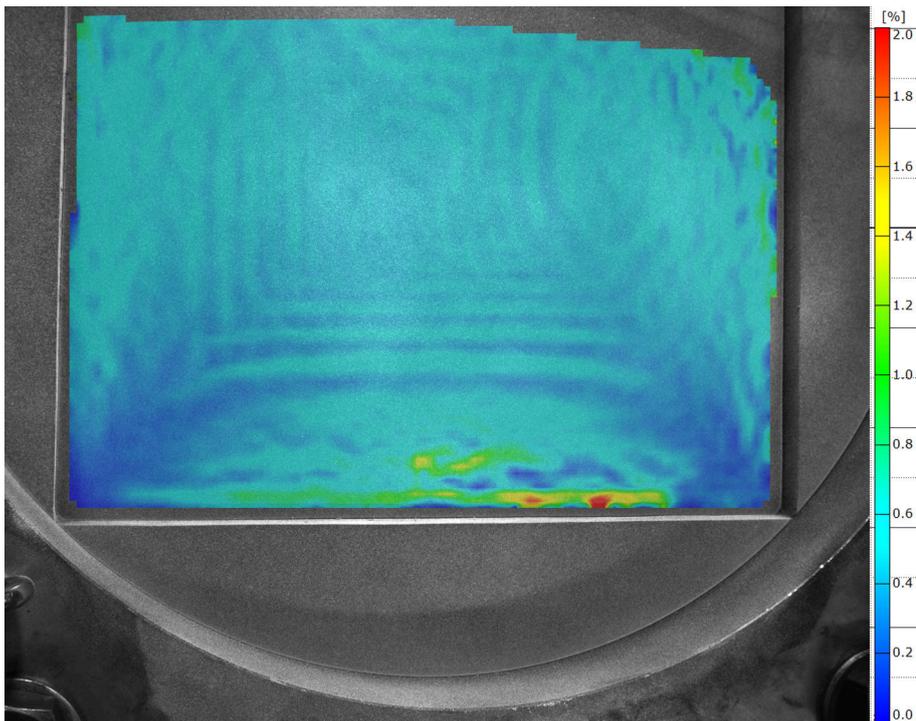


FIGURE 4.9. – Déformation maximale principale de la membrane carrée testée sans liaison flexible juste avant sa rupture

Ce résultat est similaire au résultat de la membrane circulaire testée sans liaison flexible : la rupture a eu lieu au bord de la membrane alors que le centre était encore peu sollicité. En effet, la déformation au centre vaut 0,5% au moment de la rupture alors que dans le cas de la membrane carrée idéale analysée dans la section 4.1.2, celle-ci vaut 1,3%.

## 4.2.2. Conception de la liaison flexible optimale

### 4.2.2.1. Objectifs

Afin d’augmenter la tenue de la membrane et d’éviter une rupture prématurée au bord, une liaison flexible est conçue afin de diminuer la courbure et donc le niveau de déformation au bord de la membrane. Comme pour la membrane circulaire, l’objectif est de diminuer la courbure au bord, d’éviter la concentration de déformation sur cette même zone et d’augmenter la tenue de la membrane. Dans cette section, la tenue de la membrane est maximisée tout en minimisant la masse de l’ensemble membrane/liaison flexible en utilisant le critère de pression spécifique. Afin de réutiliser la liaison flexible pour d’autres essais, une marge doit être prise afin de ne pas l’endommager.

### 4.2.2.2. Géométrie

Comme la liaison flexible circulaire, la liaison flexible carrée est fabriquée manuellement comme présenté sur la figure 3.31. Sa géométrie doit donc être aisément usinable manuellement. Sa forme est triangulaire comme dans le cas circulaire. Le dessin du montage avec la liaison flexible est présenté sur la figure 4.10 et 4.11.

### 4.2.2.3. Matériau utilisé pour la conception et fabrication de la liaison flexible carrée

Le même matériau que pour la fabrication de la membrane carrée testée sans liaison flexible est utilisé pour la conception de la liaison flexible : le préimprégné verre/époxy tissé équilibré sergé 2x2 Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37%.

### 4.2.2.4. Description de la modélisation par éléments finis utilisée

La modélisation par éléments finis utilisée est la modélisation présentée dans la section 2.2.4 : des éléments coques volumiques à 8 noeuds avec intégration réduite (éléments SC8R d’Abaqus) sont utilisés. Comme pour la conception de la liaison flexible circulaire, un comportement linéaire élastique est utilisé. Le module de Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  utilisés correspondent à la moyenne entre les propriétés à  $0^\circ$  et à  $22,5^\circ$  données dans les tableaux 4.1 et 4.2 :  $E = 14,25\text{GPa}$  ;  $\nu = 0,3$ . La non-linéarité est prise en compte dans le calcul. Par rapport à la modélisation axisymétrique, des simplifications sont faites : les brides ne sont pas modélisées et le serrage non plus afin de limiter le temps de calcul pour faire tourner de nombreux calculs pour optimiser la géométrie de la liaison flexible. Les conditions aux limites sont présentées sur la figure 4.12 : un quart du montage est modélisé, des symétries sont donc appliquées selon les axes X et Y sur les zones indiquées ; la partie du masque qui est normalement en contact avec la bride plate est encastree ; comme présenté sur la figure 4.13 représentant le bord de la modélisation, les surfaces des pièces en contact qui sont sous la bride plate ont une interaction qui ne permet pas de déplacement relatif entre les pièce (pas de

4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

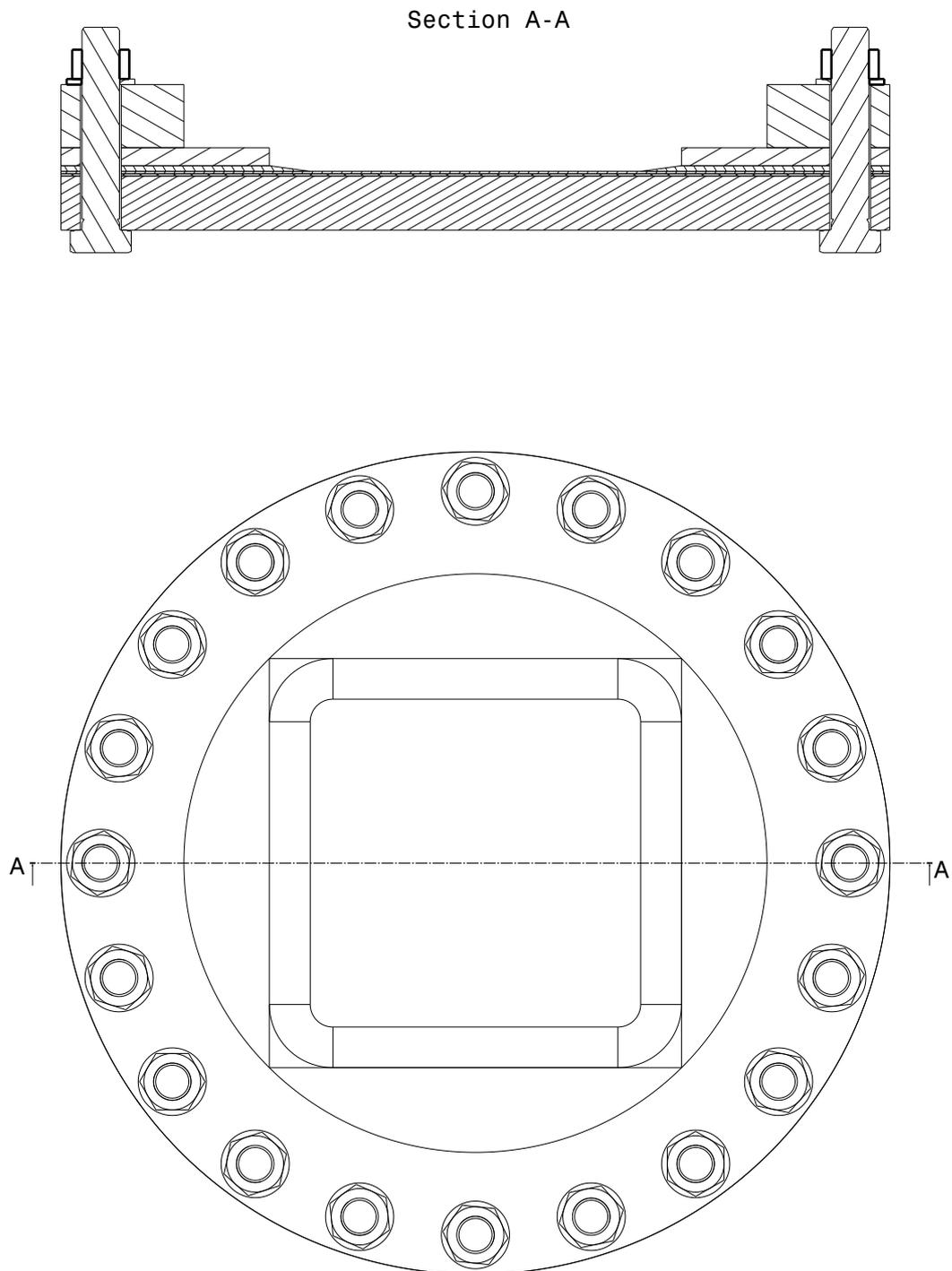


FIGURE 4.10. – Dessin du montage d'essai carré avec la liaison flexible

4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

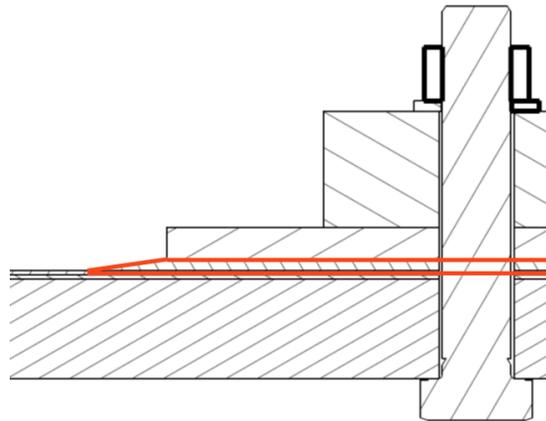


FIGURE 4.11. – Zoom sur la liaison flexible carrée

glissement possible) et les surfaces des pièces en contact se trouvant au-delà de la bride plate ont une interaction qui permet le glissement des pièces les unes par rapport aux autres, ce choix est fait afin de remplacer le serrage; une pression uniforme est appliquée sur la surface de la membrane présentée sur la figure 4.14.

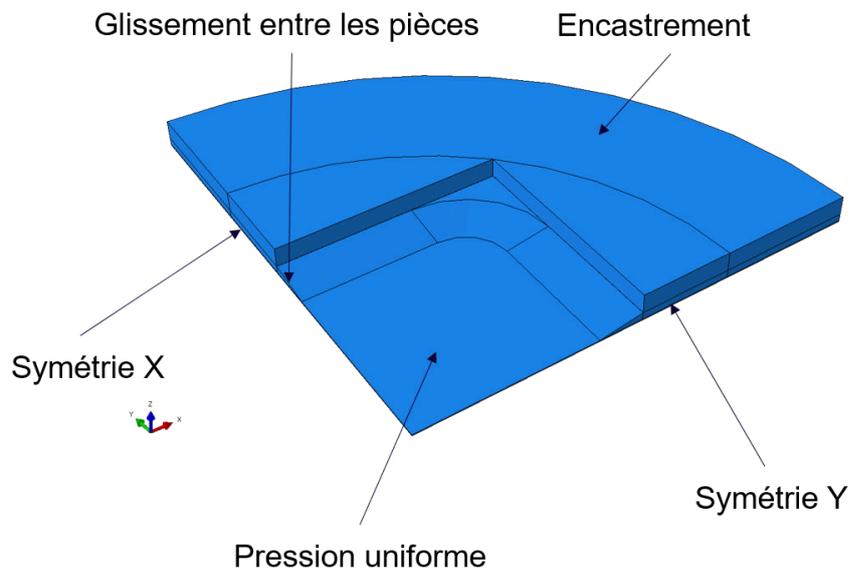


FIGURE 4.12. – Conditions aux limites pour la modélisation par éléments finis utilisée pour l'optimisation de la liaison flexible carrée

4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

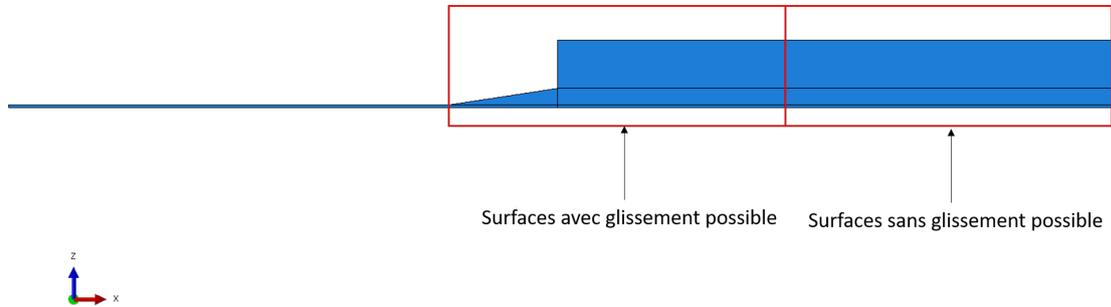


FIGURE 4.13. – Zones de contact sur la modélisation par éléments finis utilisée pour l'optimisation de la liaison flexible carrée

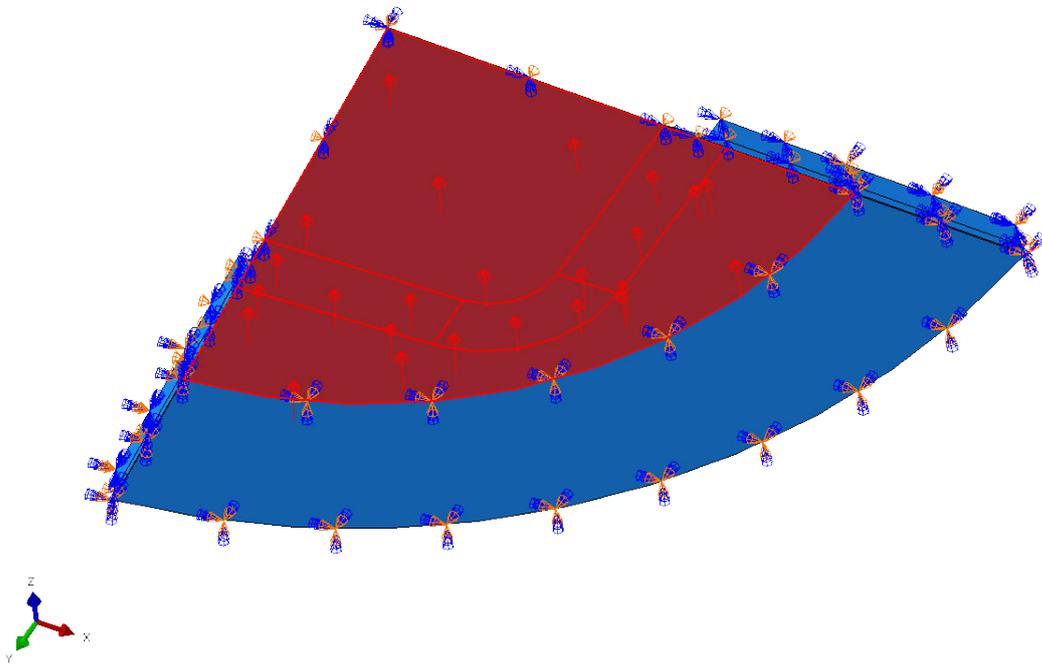


FIGURE 4.14. – Surface d'application de la pression pour l'optimisation de la liaison flexible carrée

#### 4.2.2.5. Maximisation de la pression spécifique

Comme expliqué pour la liaison flexible circulaire, le critère de pression spécifique permet de maximiser la pression à rupture tout en minimisant la masse de l'ensemble membrane - liaison flexible. Pour rappel, la pression spécifique est définie comme le rapport entre la pression maximale permettant d'atteindre la déformation à rupture dans la membrane ou la liaison flexible et la masse de la membrane et de la liaison flexible. La déformation à rupture considérée vaut 2,3% pour prendre en compte la meilleure tenue qui avait été observée pour la membrane circulaire présentée dans la section 3.2.3.4. Le critère de 2,3% correspond à 115% de la limite à rupture du matériau présenté dans le tableau 4.1 qui vaut 2,0% comme c'était le cas pour la liaison circulaire (critère de 2,6% pour une limite à rupture de 2,3%). L'étude paramétrique se fait sur la longueur  $L$  et l'épaisseur  $h$  de la liaison flexible. La pression permettant d'atteindre la rupture de la membrane ou de la liaison est relevé pour plusieurs géométries. Les résultats sont présentés sur la figure 4.15. La pression spécifique maximale est obtenue pour une épaisseur de 4,3 mm et une longueur comprise entre 33 mm et 36 mm.

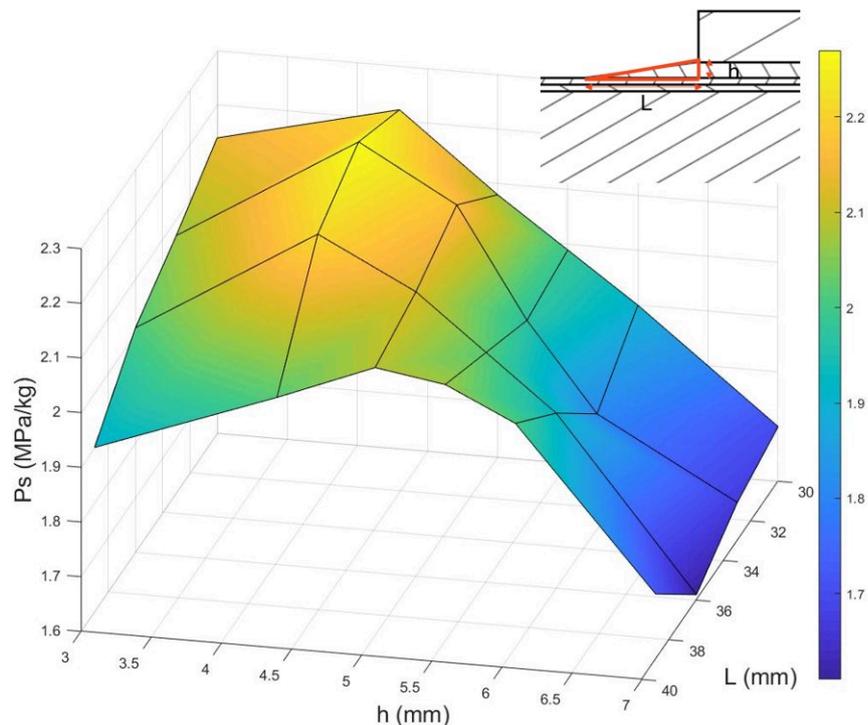


FIGURE 4.15. – Maximisation de la pression spécifique pour la conception de la liaison flexible carrée

#### 4.2.2.6. Tenue de la liaison flexible

Afin d’utiliser la liaison flexible pour plusieurs essais, celle-ci ne doit pas être endommagée au cours de l’essai. Le choix de sa géométrie doit donc assurer cela. La figure 4.16 représentant la déformation dans la liaison  $\varepsilon_l$  normalisé avec le critère de rupture  $\varepsilon_r = 2,3\%$  montre qu’au plus la liaison flexible est courte et épaisse, au plus sa tenue est bonne, ce qui est intuitif. Pour  $h = 4,3\text{mm}$  et  $33\text{mm} < L < 36\text{mm}$  qui correspond à la pression spécifique optimale,  $\varepsilon_l/\varepsilon_r > 1$  et donc le critère de rupture est dépassé. La géométrie retenue doit assurer que  $\varepsilon_l/\varepsilon_r < 1$ .

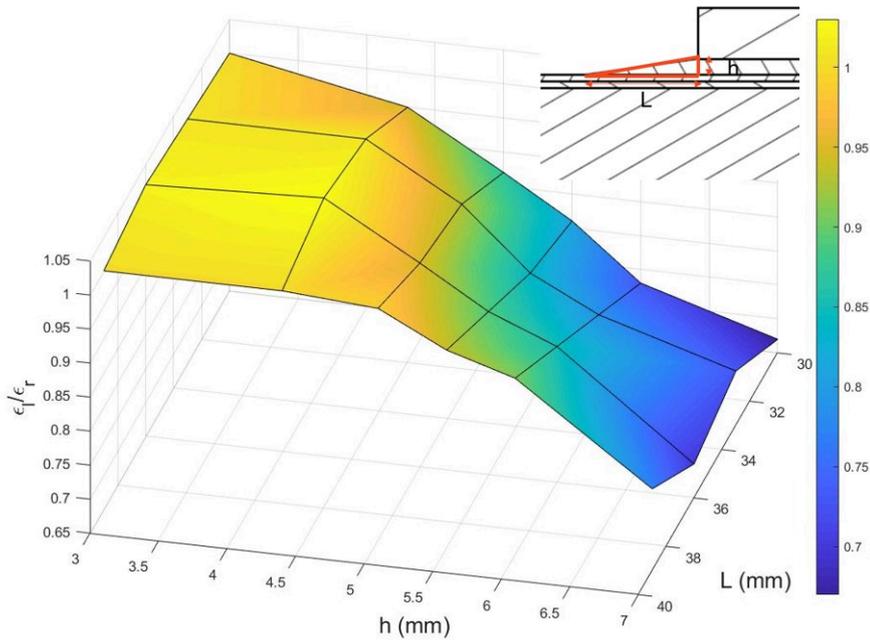


FIGURE 4.16. – Déformation dans la liaison flexible pour la conception de la liaison flexible carrée

#### 4.2.2.7. Liaison flexible carrée optimale

Afin d’assurer la tenue de la liaison flexible pour pouvoir la réutiliser, un compromis entre le critère de pression spécifique et la tenue de la liaison flexible est retenu et une liaison flexible de 36 mm de longueur et 5,5 mm d’épaisseur est retenue. Dans ce cas là,  $P_s = 2,02\text{MPa/kg}$  et  $\varepsilon_l/\varepsilon_r = 0,89$ .

### 4.2.3. Essai réalisé sur membrane quasi-isotrope avec liaison flexible

#### 4.2.3.1. Objectif et configuration de l'essai

Cet essai a pour but de démontrer l'intérêt d'ajouter une liaison flexible pour augmenter la tenue de la membrane. Les pressions spécifiques seront comparées afin de déterminer quelle configuration permet de maximiser la pression à rupture tout en minimisant la masse de la structure.

Pour pouvoir comparer les résultats de l'essai avec liaison flexible avec le résultat de l'essai sans liaison flexible, la membrane composite testée est identique à celle testée sans liaison flexible. Ses caractéristiques sont présentées dans la section 4.2.1.1.

Pour obtenir la géométrie retenue, un stratifié  $[0/22.5/45/67.5]_{3s}$  est utilisé et le matériau est le même que celui utilisé pour la fabrication de la membrane. Après cuisson, la liaison flexible a une épaisseur de 5,2 mm. L'usinage est fait selon la même méthode que pour la liaison flexible circulaire.

La mesure est faite avec les mêmes systèmes de mesure que sans liaison flexible sauf la jauge de déformation qui se situe à 10 mm du bord de la liaison flexible alors qu'elle était dans le cas précédent placée à 10 mm du bord du masque.

#### 4.2.3.2. Résultat expérimental

L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane à une pression de 10,45 bar, soit une augmentation de 364% par rapport à la membrane testée sans liaison flexible. En terme de pression spécifique, le gain est de 133%, cela montre l'intérêt d'utiliser la liaison flexible.

La figure 4.17 montre la membrane après sa rupture et la figure 4.18 montre la zone de rupture. Il est difficile de déterminer de manière exacte la zone d'initiation de la rupture. On peut imaginer qu'elle est partie du bord de la membrane proche de la jauge de déformation (où il n'y a pas de mouchetis car un scotch maintenait les fils reliés à la jauge) et s'est propagée dans plusieurs directions et également vers le centre. On observe une symétrie dans la rupture (par rapport à une ligne horizontale sur les photos). Le bord de la membrane correspond à la zone où se trouve le maximum de contraintes et déformations comme cela sera montré dans la comparaison avec la modélisation numérique dans la section 4.2.3.3. Il n'y a pas de différence significative par rapport à la zone de rupture observée sur la membrane testée sans la liaison flexible.

4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

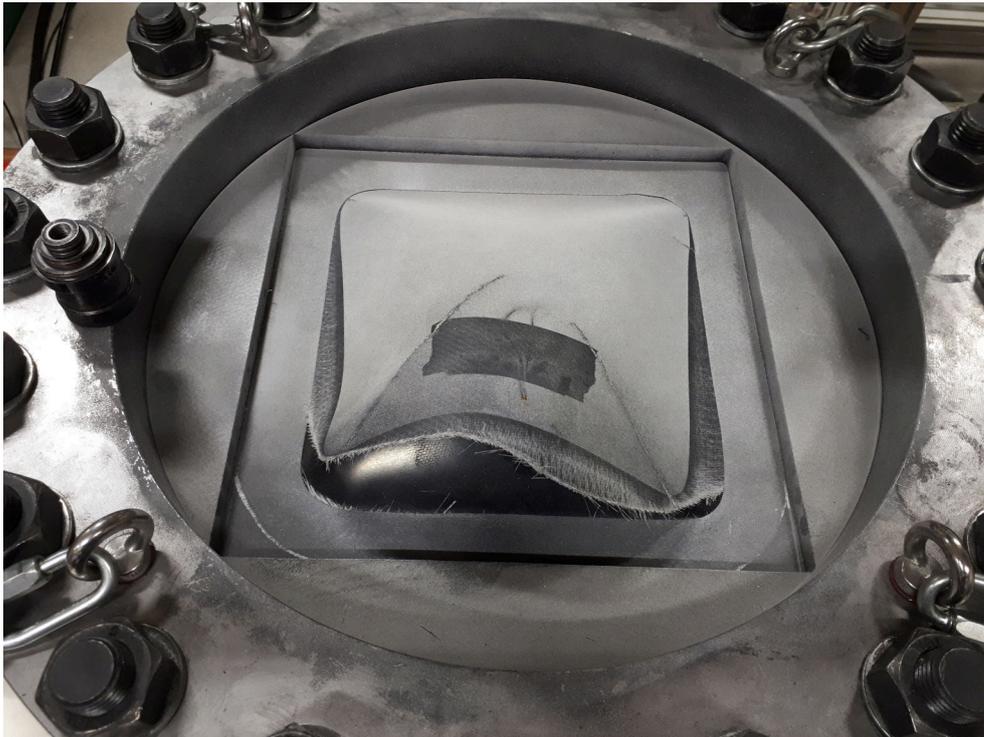


FIGURE 4.17. – Membrane carrée quasi-isotrope testée avec la liaison flexible après l'essai

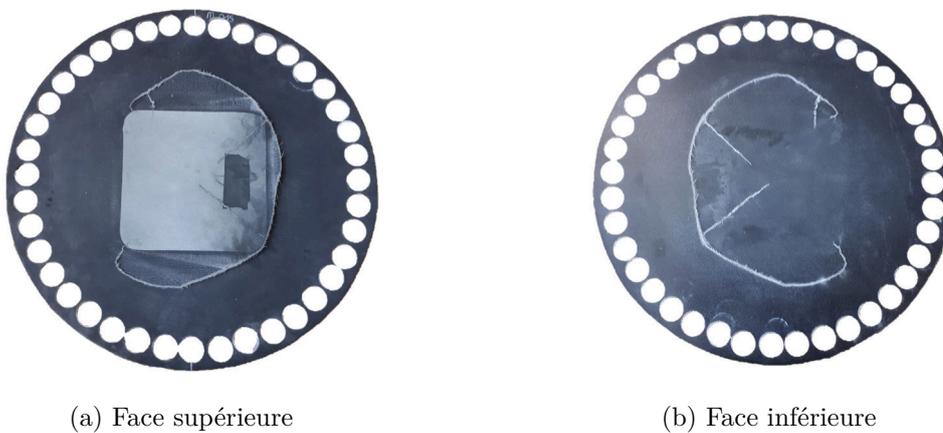


FIGURE 4.18. – Zone de rupture de la membrane carrée quasi-isotrope testée avec la liaison flexible après rupture

A la fin de l'essai, la déflexion est de 38,9 mm (figure 4.19) et la déformation maximale mesurée par la mesure de champ est d'environ 2% (figure 4.20), ce qui correspond à la limite à rupture du matériau mais la déformation maximale atteinte au cours de l'essai n'est pas présente sur la zone de mesure des caméras comme il sera montré dans la section 4.2.3.3.

4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

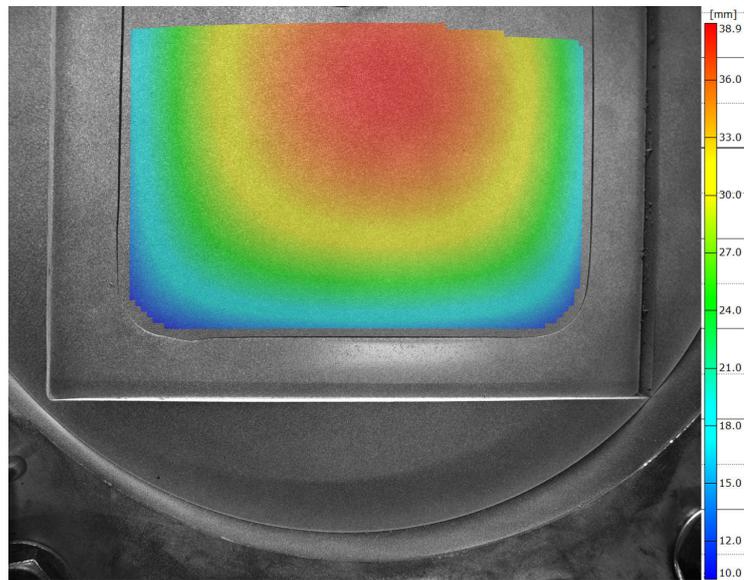


FIGURE 4.19. – Coordonnée hors plan expérimentale de la membrane carrée testée avec la liaison flexible à la fin de l'essai à 10,45 bar

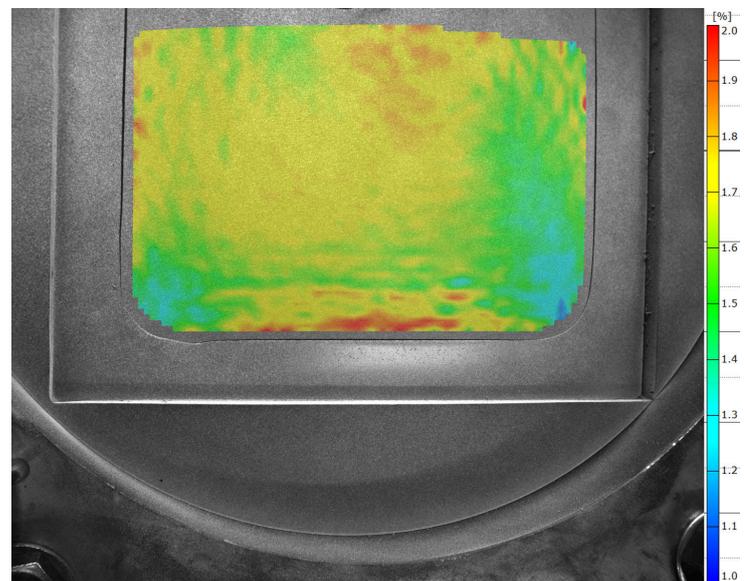


FIGURE 4.20. – Déformation maximale principale expérimentale de la membrane testée avec la liaison flexible juste avant sa rupture à 10,45 bar

#### 4.2.3.3. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

Des sections à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$  comme définies par les points sur la figure 4.21 sont utilisées pour analyser les résultats expérimentaux et les comparer aux résultats numériques obtenus avec la modélisation numérique par éléments finis présentés dans la section 4.2.2.4. La comparaison de la cordonnée hors plan expérimentale et numérique montre que la modélisation par éléments finis simule bien la réponse de la membrane composite même si un écart de 7,7% est présent. La figure 4.23 compare les déformations maximales principales expérimentales et numériques. Les déformations expérimentales et numériques sont très proches, notamment sur la zone centrale. Le résultat mesuré par la jauge de déformation est très proche du résultat numérique. Les résultats numériques sont moins proches des résultats de la mesure de champ sur les sections à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  au bord de la membrane. La condition au bord est probablement à l’origine de l’écart constaté entre les résultats expérimentaux et numériques. La figure 4.24 montre que le masque n’est pas à plat au début de l’essai. Il y a plus d’1 mm d’écart entre les deux extrema. Cela signifie que le serrage des brides entraîne une légère flexion du masque. Cela n’est pas pris en compte dans la modélisation par éléments finis. A pression à rupture, la modélisation numérique donne une déformation maximale de 2,357% au bord de la face inférieure de la membrane composite comme le montre la figure 4.25. Cette valeur est plus importante que la limite à rupture du matériau qui est de 2% et même supérieur au critère de 2,3% qui avait été utilisé pour dimensionner la liaison flexible. La figure 4.26 montre la déformation maximale à pression à rupture dans la liaison flexible. Il y a une déformation maximale de 2.2%. Ces écarts à la fois dans la membrane et dans le renfort entre les valeurs maximales constatées et la limite à rupture du matériau valide le fait d’utiliser un critère de rupture supérieur à la limite à rupture du matériau mesurée avec des essais de traction simple.

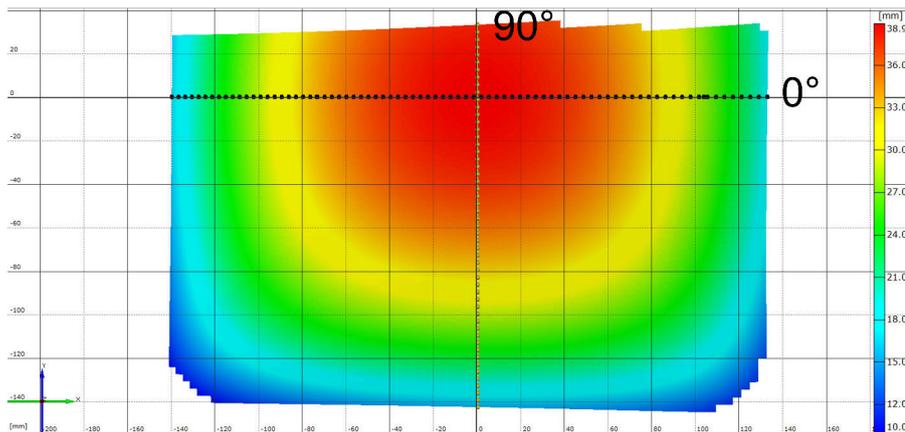


FIGURE 4.21. – Définition des sections à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$  sur la membrane testée avec la liaison flexible

4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

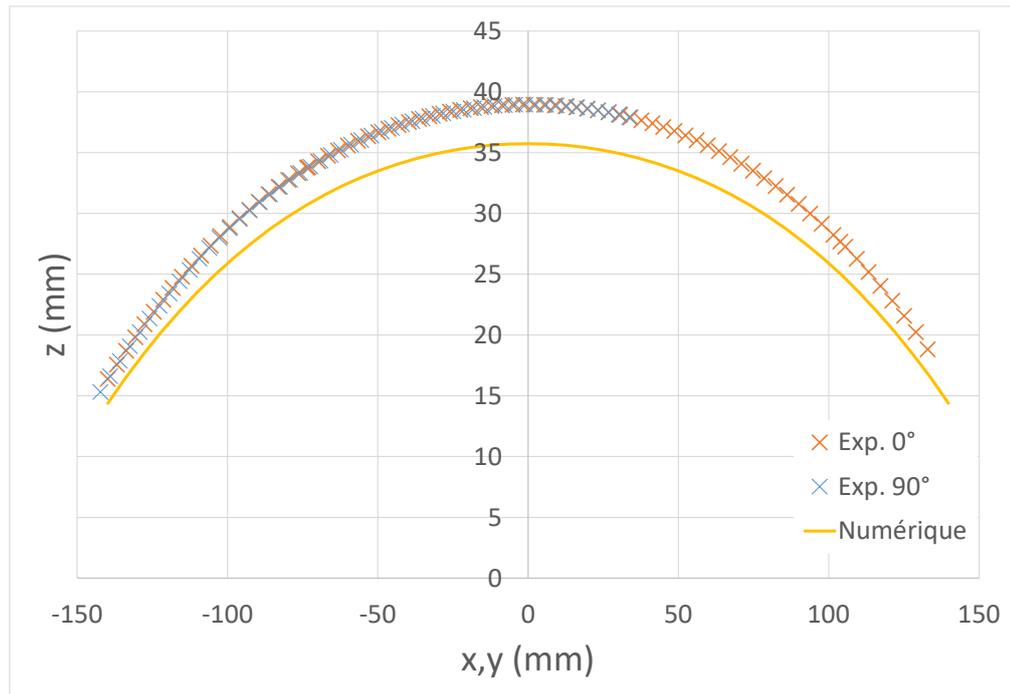


FIGURE 4.22. – Comparaison des coordonnées  $z$  expérimentales et numériques de la membrane carrée testée avec la liaison flexible

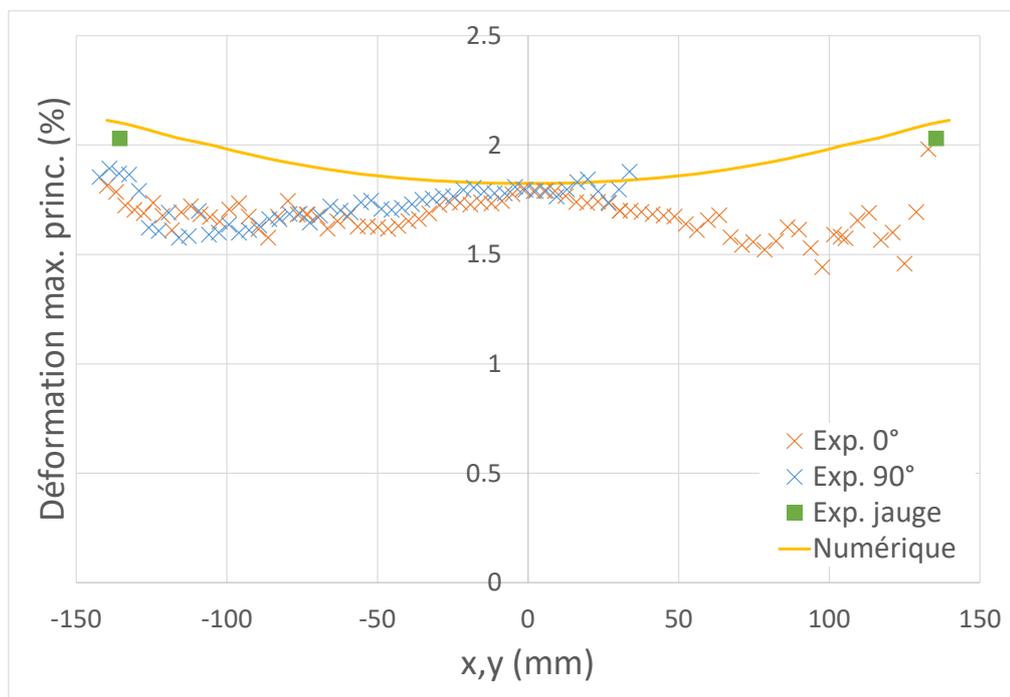


FIGURE 4.23. – Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques de la membrane carrée testée avec la liaison flexible

4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

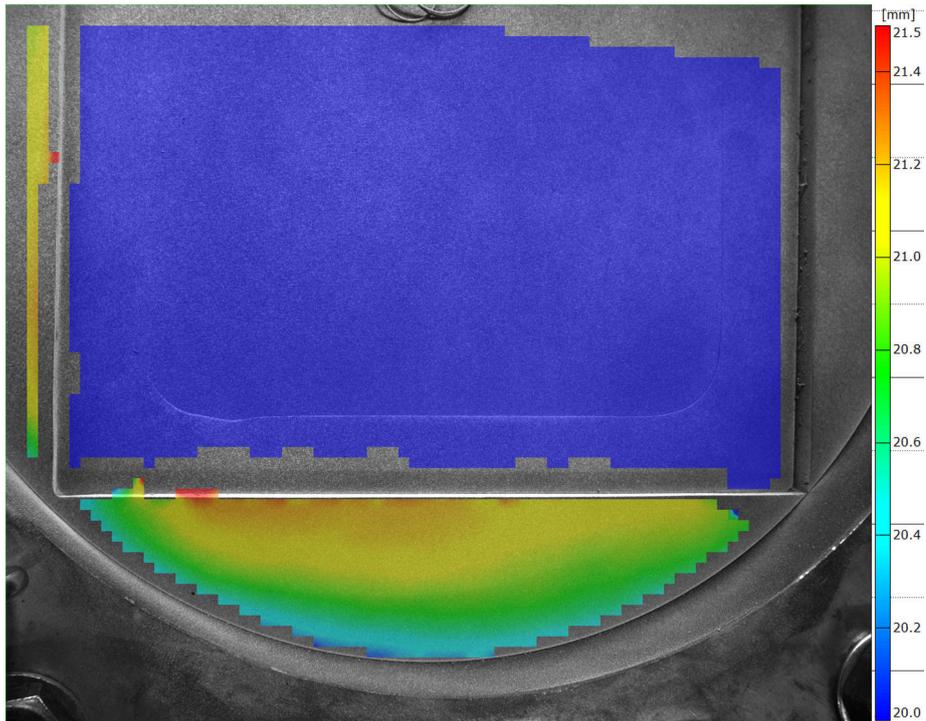


FIGURE 4.24. – Coordonnée z du masque avant l'essai avec la membrane carrée testée avec la liaison flexible

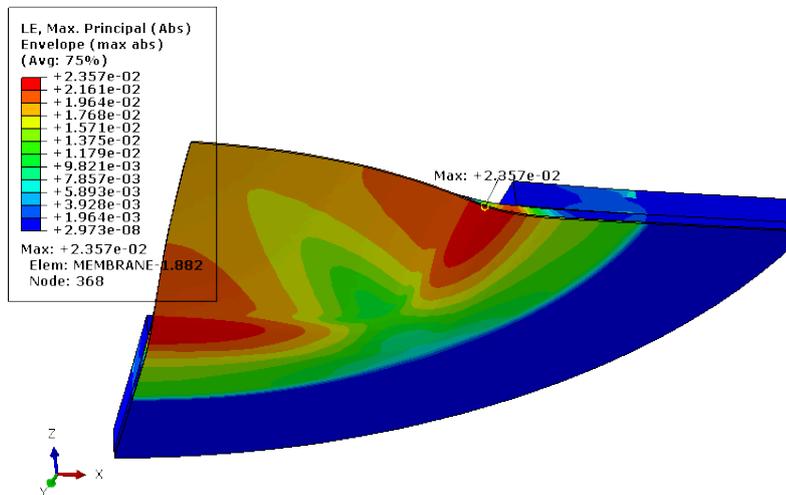


FIGURE 4.25. – Déformation maximale numérique de la membrane carrée testée avec la liaison flexible à pression à rupture

#### 4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

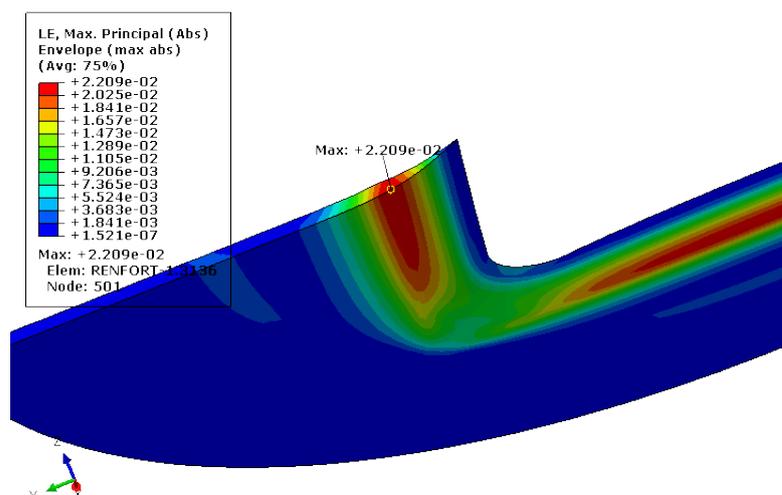


FIGURE 4.26. – Déformation maximale numérique de la liaison flexible carrée à pression à rupture

#### 4.2.3.4. Comparaison avec modèle analytique

Afin de comparer les résultats obtenus avec les différentes approches, les résultats expérimentaux, numériques et analytiques sont comparés. La comparaison est faite au bord de la membrane à l'emplacement de la jauge. Le résultat numérique est pris sur un élément de la modélisation numérique correspondant à la zone considérée. Le modèle analytique avec les solutions de Seide [39] est utilisé pour obtenir le résultat analytique. Ses résultats sont valables pour une membrane carrée dont les bords sont fixés dans la direction normale au bord mais libres de bouger dans la direction tangentielle au bord. Dans notre cas, les bords sont fixés dans la direction normale et également dans la direction tangentielle. La figure 4.27 compare les résultats expérimentaux, numériques et analytiques. On peut voir que la tendance est la même, la déformation n'évolue pas linéairement en fonction de la pression mais plutôt comme la pression à la puissance  $2/3$  comme analytiquement, mais le modèle analytique sous-estime la déformation de la membrane. On pourrait donc se servir du modèle analytique comme outil pour faire des similitudes d'échelles en prédisant comment évolue une variable par rapport à une autre mais pas pour prédire précisément les contraintes et déformations des membranes composites.

#### 4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

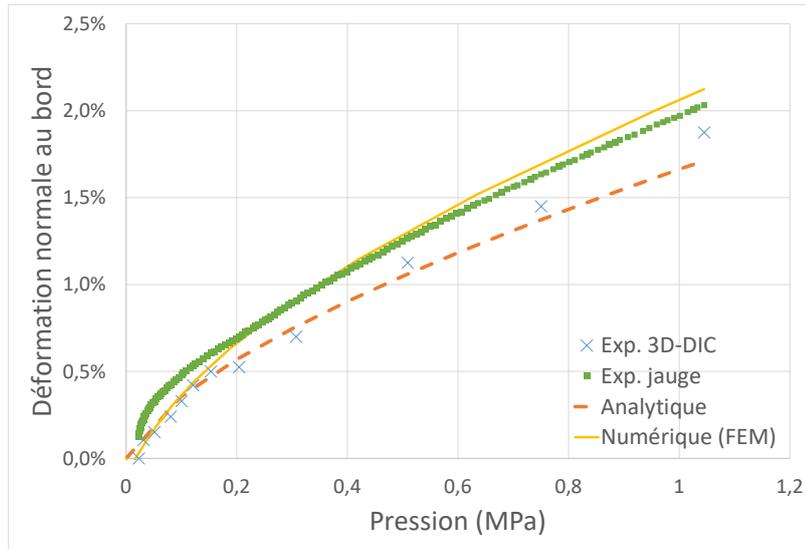


FIGURE 4.27. – Comparaison des résultats expérimentaux, numériques et analytiques de la membrane carrée avec liaison flexible

#### 4.2.3.5. Conclusion

L'utilisation de la liaison flexible permet d'augmenter significativement la tenue de la membrane composite. Celle-ci permet d'augmenter de 364% la pression à rupture et de 133% la pression spécifique (figure 4.28).

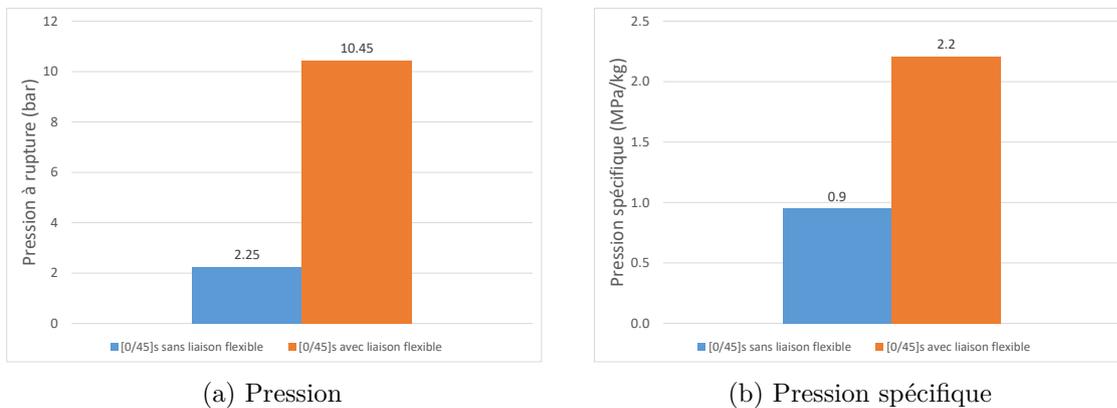


FIGURE 4.28. – Augmentation de la pression et pression spécifique grâce à l'utilisation de la liaison flexible

La déformation au centre de la membrane par rapport à la déformation au bord de celle-ci a été considérablement augmentée grâce à l'utilisation de la liaison flexible pour se rapprocher de la valeur obtenue pour la membrane idéale (figure 4.29). Bien que la tenue de la membrane ait été considérablement accrue grâce à l'utilisation de la liaison flexible, la section suivante montre que ce résultat peut

#### 4. Membranes carrées – 4.2. Conception d'une liaison flexible optimale

encore être amélioré en orientant les fibres de manière à correspondre aux directions de la sollicitation de la membrane carrée.

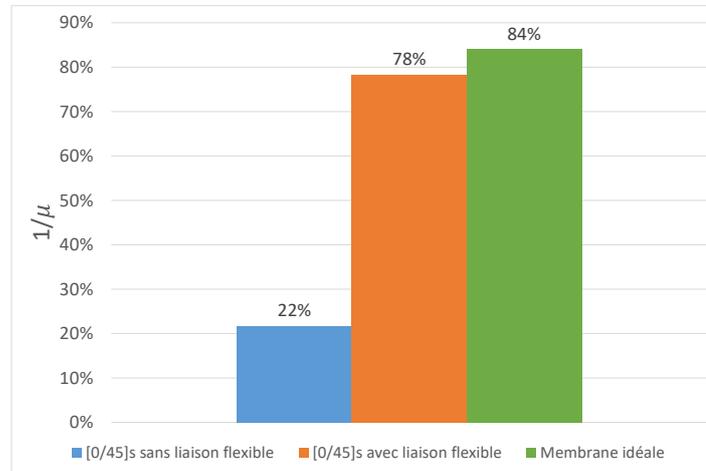


FIGURE 4.29. – Augmentation de la déformation au centre par rapport à la déformation au bord avec l'utilisation de la liaison flexible

## 4.3. Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope

### 4.3.1. Objectif

Si les essais réalisés sur des membranes carrées quasi-isotropes ont permis de montrer qu'utiliser une liaison flexible permet d'augmenter significativement la pression spécifique, les directions des déformations et contraintes maximales principales présentées dans la section 4.1.2 laissent imaginer une possibilité d'amélioration supplémentaire de la tenue de la membrane. En effet, orienter les fibres selon ces directions devraient permettre d'atteindre cet objectif. Pour rappel, les contraintes maximales principales sont orientées selon des directions orthogonales aux bords de la membrane comme représenté sur la figure 4.30. L'objectif est de vérifier expérimentalement qu'utiliser ces orientations de fibres permet effectivement d'améliorer la tenue de la membrane. Cela est fait en comparant le résultat de l'essai réalisé sur la membrane quasi-isotrope avec la liaison flexible et le résultat de l'essai réalisé sur la membrane dont les fibres sont orientées selon les directions des contraintes maximales principales avec la liaison flexible.

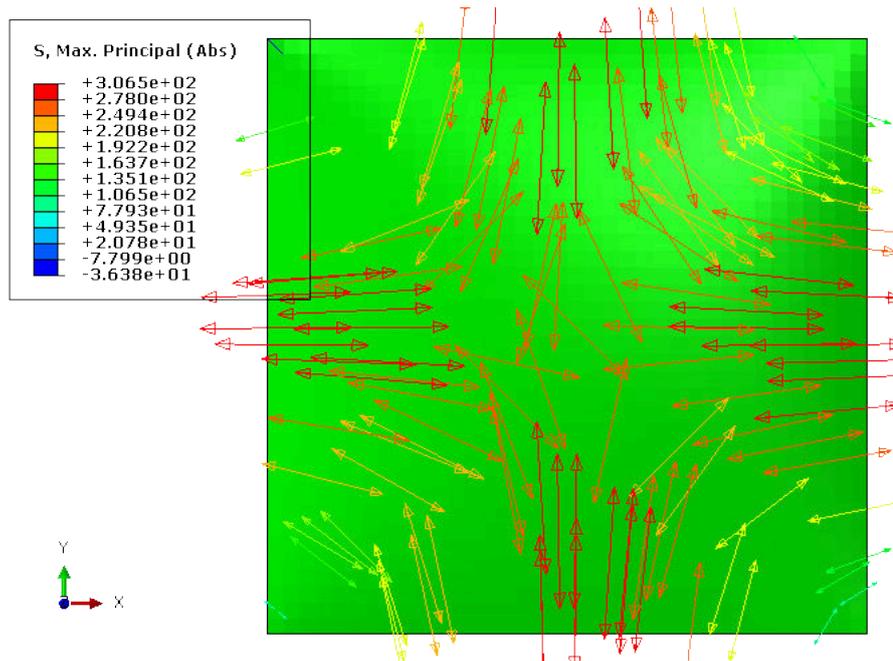


FIGURE 4.30. – Direction des contraintes maximales principales d'une membrane carrée idéale

### 4.3.2. Configuration de l'essai

Afin d'orienter les fibres selon les directions des contraintes maximales principales, un stratifié orthotrope  $[0]_4$  est utilisé, la direction à  $0^\circ$  correspondant à une direction parallèle au bord de la membrane. La figure 4.31 compare l'orientation des fibres sur les deux membranes comparées.

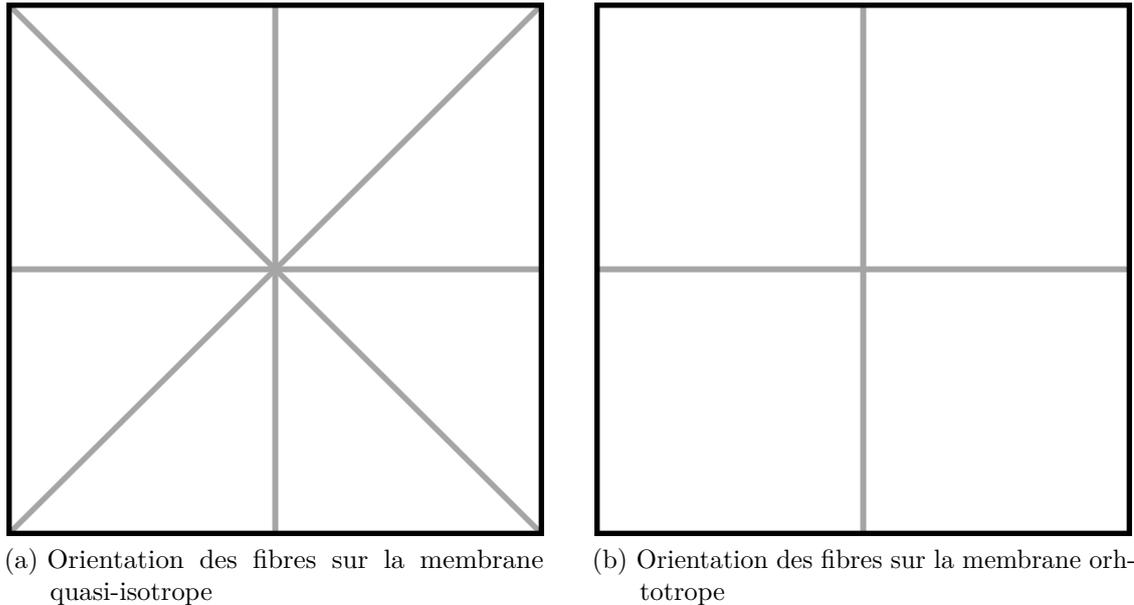


FIGURE 4.31. – Comparaison des orientations des fibres sur les membranes carrées quasi-isotrope et orthotrope

A part l'orientation des fibres, les deux essais sont réalisés de manière identique. La même liaison flexible est utilisée. Le même système de mesure est utilisé.

### 4.3.3. Comparaison de l'impact de l'orientation des fibres par calcul par éléments finis simplifié

Afin d'évaluer cette solution, un calcul par éléments finis est fait afin d'estimer la différence de déformation entre une membrane carrée quasi-isotrope  $[0/45]_s$  et une membrane carrée orthotrope  $[0]_4$ . Des membranes carrées de 363 mm de côtés sont modélisées avec des éléments de coques avec quatre noeud avec une intégration réduite. Les déplacements au bord sont bloqués et une pression uniforme de 0,8 MPa est appliquée sur la surface des membranes comme représenté sur la figure 4.32. Les plis sont modélisés avec les propriétés jusqu'à  $\epsilon_r$  du matériau mesurées par des essais de traction simple présentées dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5. La figure 4.33 montre qu'à la pression de 0,8 MPa la déformation maximale principale vaut 2,6% dans la membrane quasi-isotrope alors qu'elle vaut 2,1% dans la membrane orthotrope. Cela indique que cette dernière devrait offrir une meilleure tenue.

4. Membranes carrées – 4.3. Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope

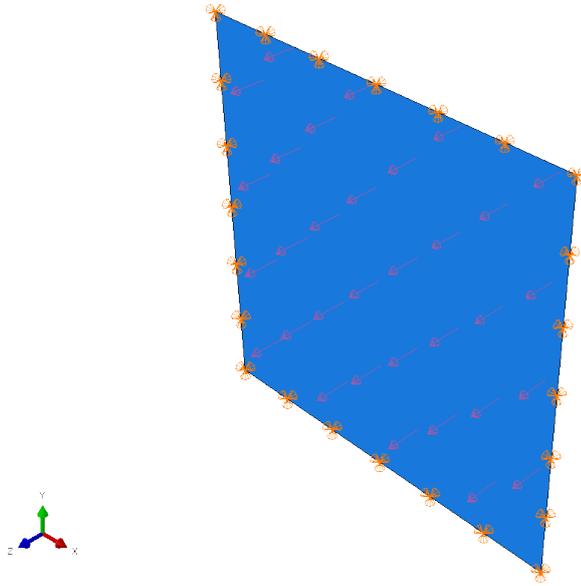


FIGURE 4.32. – Modélisation par éléments finis d'une membrane carrée idéale

$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}(GPa)$	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}(GPa)$	$\sigma_r(MPa)$	$\varepsilon_r(\%)$	$\nu$
22,2	20,2	390	1,9	0,02

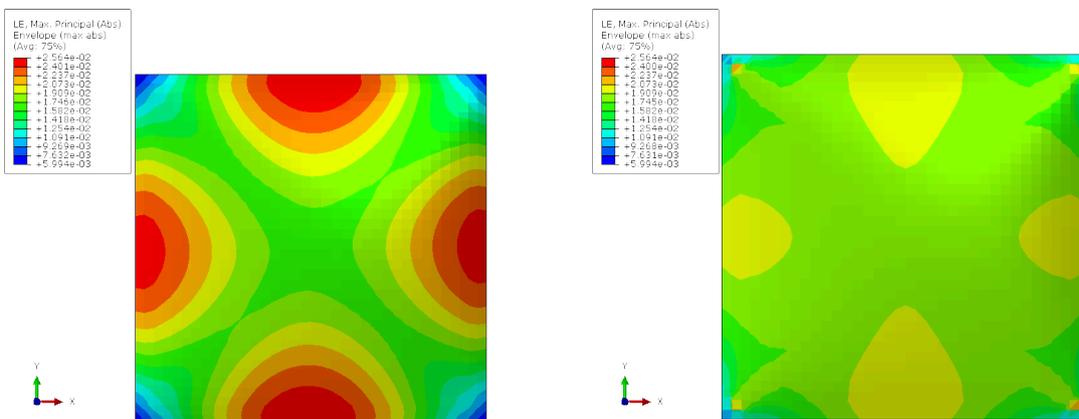
TABLEAU 4.3. – Propriétés à  $0^\circ$  du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37%  $[0]_4$

$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}(GPa)$	$E_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}(GPa)$	$\sigma_r(MPa)$	$\varepsilon_r(\%)$	$\nu$
19,5	18,0	304	1,8	0,06

TABLEAU 4.4. – Propriétés à  $90^\circ$  du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37%  $[0]_4$

$G_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_{0.5\%}}(GPa)$	$G_{\varepsilon_{0\%}-\varepsilon_r}(GPa)$
4,4	0,8

TABLEAU 4.5. – Module de cisaillement du Sigrapreg G W280-TW2/2-E323/37%



(a) Membrane quasi-isotrope

(b) Membrane orthotrope

FIGURE 4.33. – Comparaison des déformations maximales principales des membranes carrées quasi-isotrope et orthotrope

#### 4.3.4. Résultat expérimental

L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane à la pression de 11,74 bar, soit une augmentation de 12% par rapport à la pression atteinte par la membrane quasi-isotrope.

La figure 4.34 montre la membrane après sa rupture et la figure 4.35 montre la zone de rupture. La rupture est apparue au bord de la membrane et s'est propagée selon les directions  $0^\circ$  et  $90^\circ$  correspondant aux directions des fibres.

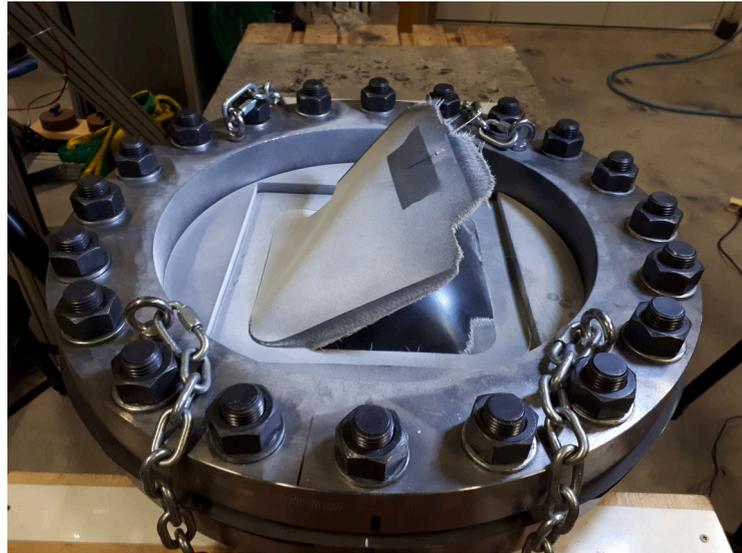
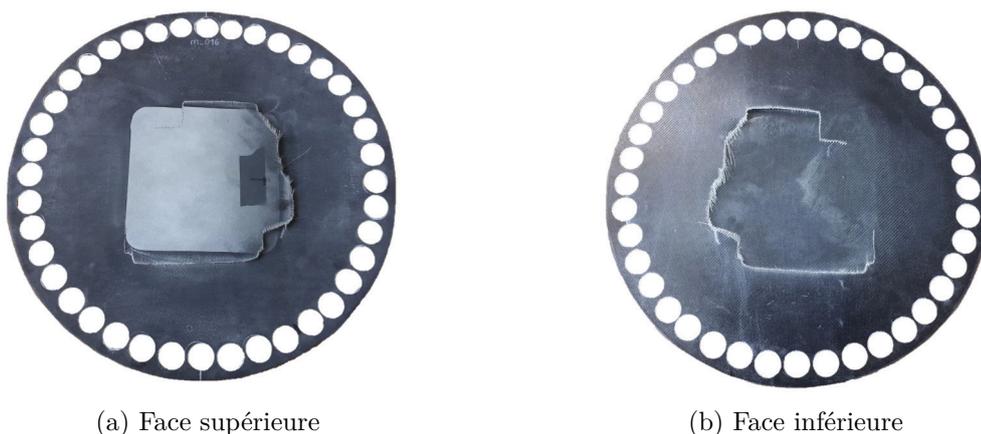


FIGURE 4.34. – Membrane carrée orthotrope testée avec la liaison flexible après l'essai



(a) Face supérieure

(b) Face inférieure

FIGURE 4.35. – Zone de rupture de la membrane carrée orthotrope testée avec la liaison flexible après rupture

#### 4. Membranes carrées – 4.3. Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope

La déformation normale au bord de la membrane mesurée par la jauge de déformation en fonction de la pression est présentée sur la figure 4.36. La pression à rupture de 11,74 bar est atteinte pour une déformation mesurée au niveau de la jauge de 1,81%. La déformation de la membrane quasi-isotrope en fonction de la pression appliquée est tracée pour comparaison. On observe que pour une pression donnée, la déformation de la membrane quasi-isotrope est supérieure à la déformation de la membrane orthotrope.

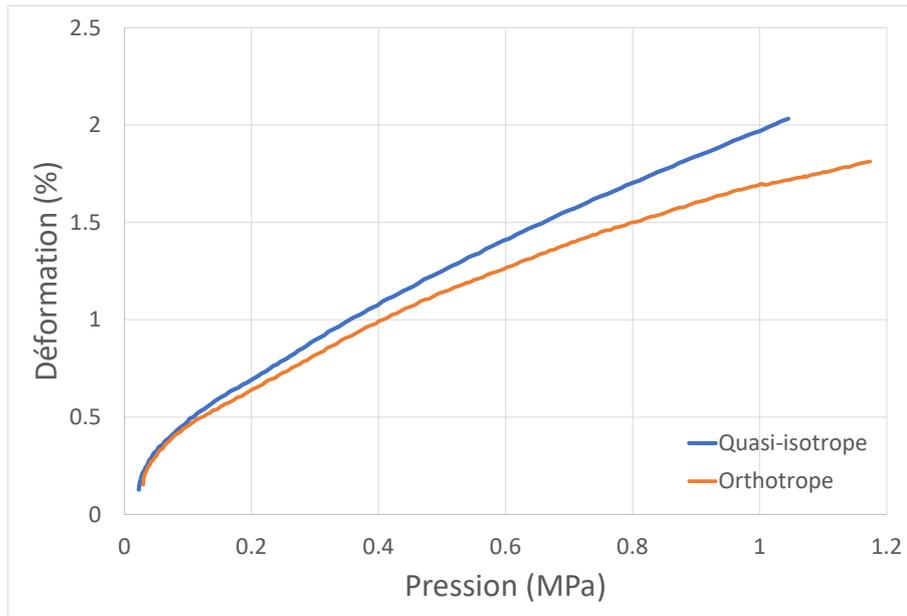


FIGURE 4.36. – Déformation en fonction de la pression mesurée par la jauge de déformation au bord de la membrane carrée orthotrope

A la fin de l'essai, la déflexion est de 44,3 mm comme le montre la figure 4.37. La figure 4.38 montre la déformation maximale principale mesurée juste avant la rupture de la membrane orthotrope à 11,74 bar. Sur la zone centrale de la membrane, le niveau de déformation est d'environ 2%, ce qui correspond à la limite à rupture en traction du matériau. La déformation est d'environ 3% dans un angle selon la direction à 45° correspondant à une direction correspondant à la bissectrice entre deux directions de fibres. On peut observer sur les figures 4.37 et 4.38 que le côté bas de la liaison flexible est fissuré. Cette fissure est apparue à un niveau de pression de 10,58 bar. Cela signifie que la liaison flexible était sous-dimensionnée pour la membrane orthotrope. En effet, celle-ci a été dimensionnée pour la membrane quasi-isotrope et a été réutilisée pour tester la membrane orthotrope. On peut alors imaginer que le gain de pression aurait été plus grand avec une liaison flexible optimisée pour la membrane orthotrope. On peut également observer sur le côté gauche que la membrane a beaucoup glissé par rapport à la liaison flexible (la partie de la membrane sans mouchetis est complètement noire).

4. Membranes carrées – 4.3. Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope

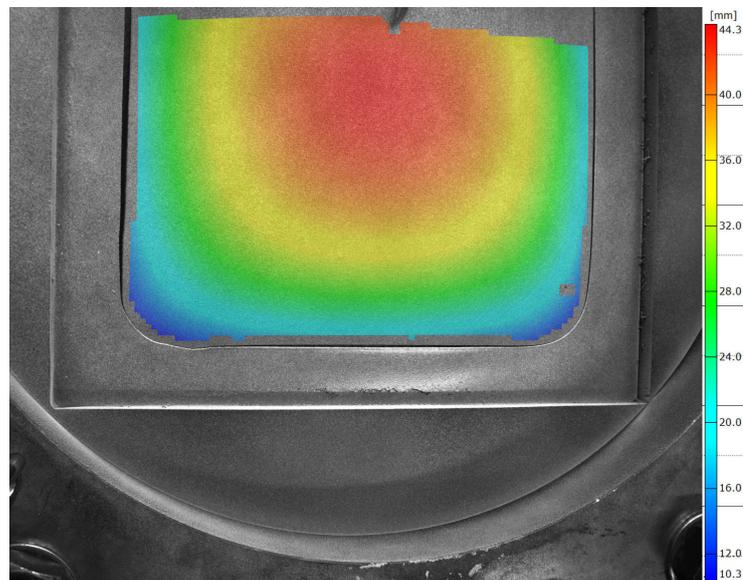


FIGURE 4.37. – Coordonnée z de la membrane carrée orthotrope à la fin de l'essai à une pression de 11,74 bar

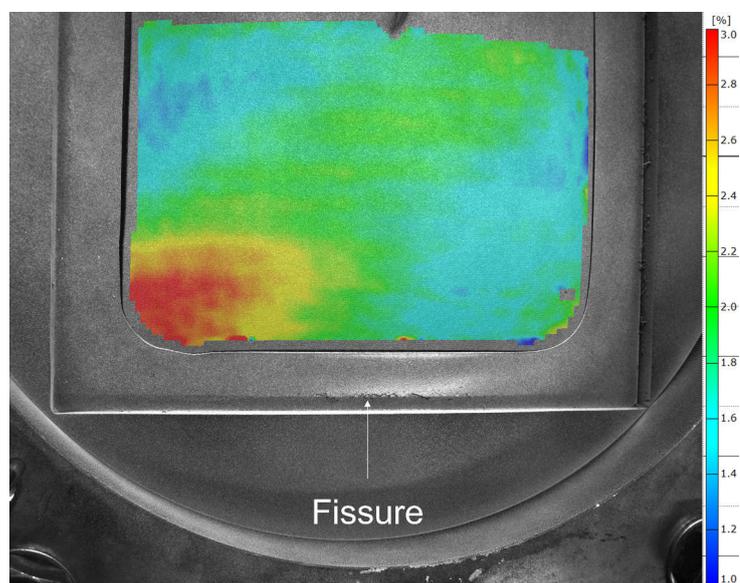


FIGURE 4.38. – Déformation maximale principale expérimentale de la membrane carrée orthotrope juste avant sa rupture à une pression de 11,74 bar

### 4.3.5. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

La modélisation numérique présentée dans la section 4.2.2.4 est utilisée en modélisant les plis comme présenté dans la section 4.3.3. Des sections sont créées à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  mais aussi des sections à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  comme montré sur la figure 4.39.

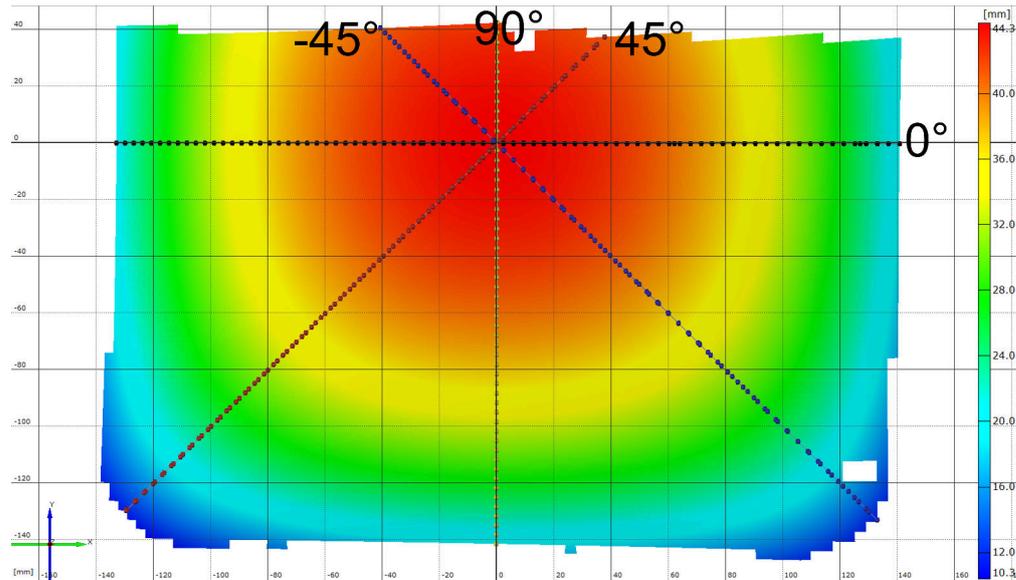


FIGURE 4.39. – Définition des sections à  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  sur la membrane carrée orthotrope

La comparaison des coordonnées Z expérimentales et numériques sur les sections à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  est présentée sur la figure 4.40 et sur les sections à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  sur la figure 4.41.

La comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  est présentée sur la figure 4.42 et sur les sections à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  sur la figure 4.43.

On peut observer qu'il y a un écart important entre les résultats expérimentaux et numériques. Comme dit précédemment, il a été observé que la liaison flexible est fissurée avant la rupture de la membrane. Cet écart s'explique par le fait que la rupture de la liaison flexible n'est pas représentée dans la modélisation numérique. Les résultats sont comparés à une pression intermédiaire de 6 bar afin de déterminer si ceux-ci sont proches avant la rupture de la liaison flexible. Les figures 4.44 et 4.45 montrent que les déflexions expérimentales et numériques sont beaucoup plus proches que précédemment. Alors qu'à pression à rupture de 11,74 bar l'écart relatif entre les déflexions expérimentales et numériques était de 17%, il n'est plus que de 7% à la pression de 6 bar. Les figures 4.46 et 4.47 montrent que les déformations expérimentales et numériques sont proches.

4. Membranes carrées – 4.3. Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope

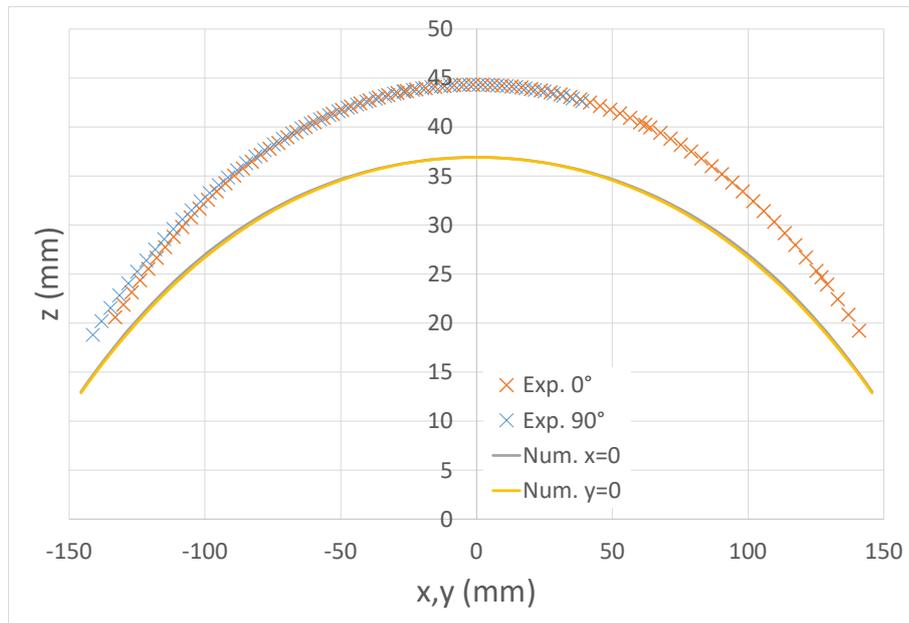


FIGURE 4.40. – Comparaison des coordonnées  $z$  expérimentales et numériques sur les sections à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  de la membrane carrée orthotrope à une pression de 11,74 bar

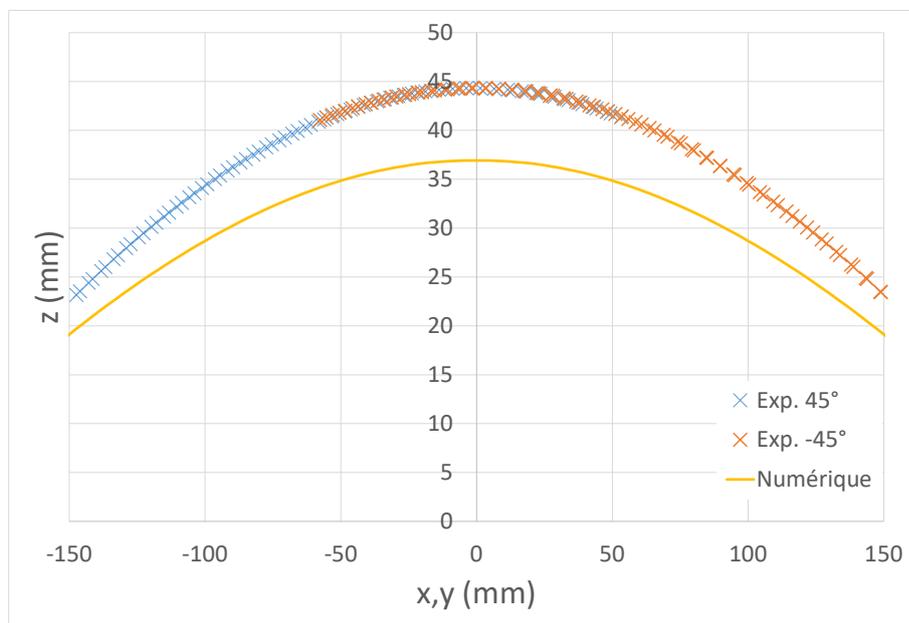


FIGURE 4.41. – Comparaison des coordonnées  $z$  expérimentales et numériques sur les sections à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  de la membrane carrée orthotrope à une pression de 11,74 bar

4. Membranes carrées – 4.3. Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope

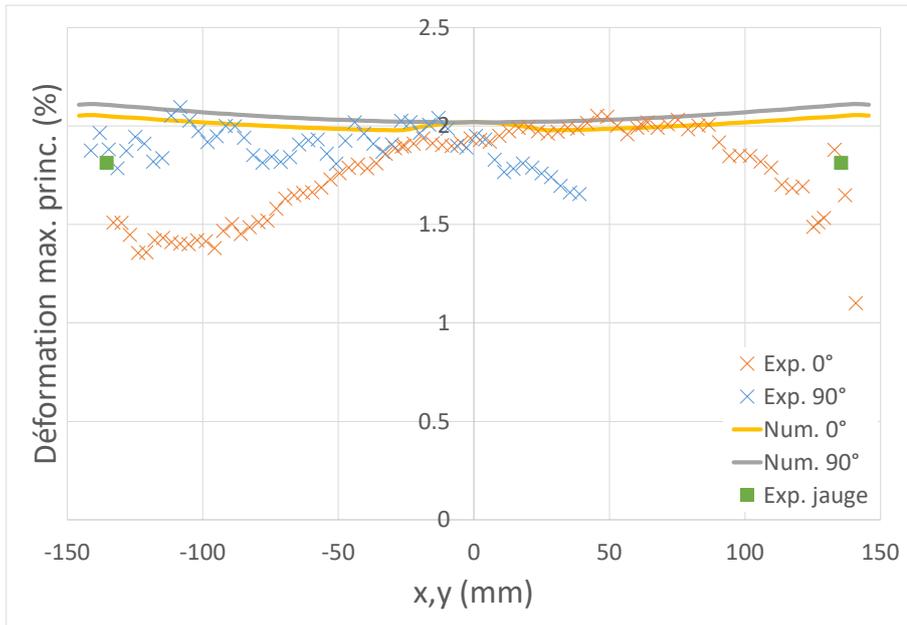


FIGURE 4.42. – Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à 0° et 90° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 11,74 bar

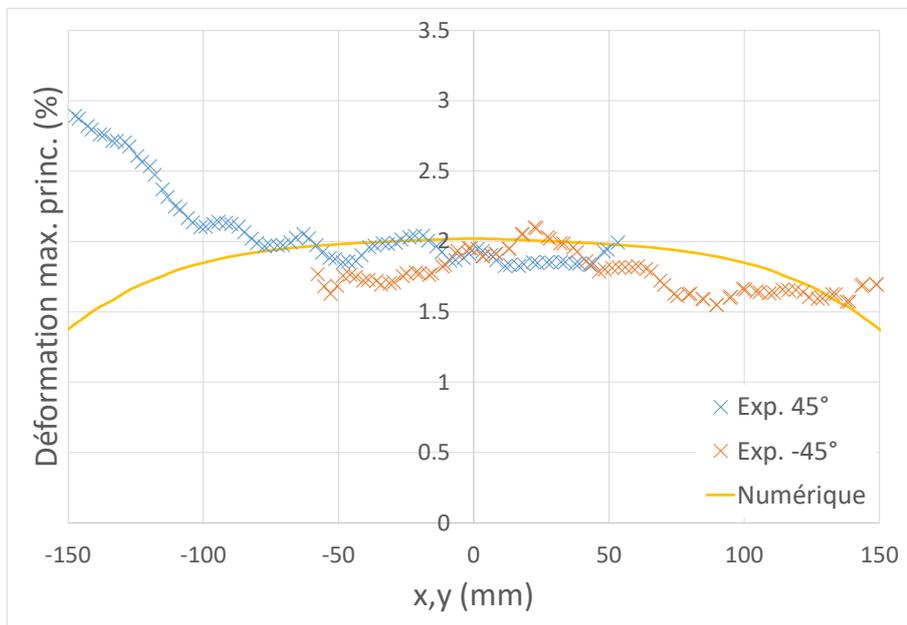


FIGURE 4.43. – Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à 45° et -45° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 11,74 bar

4. Membranes carrées – 4.3. Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope

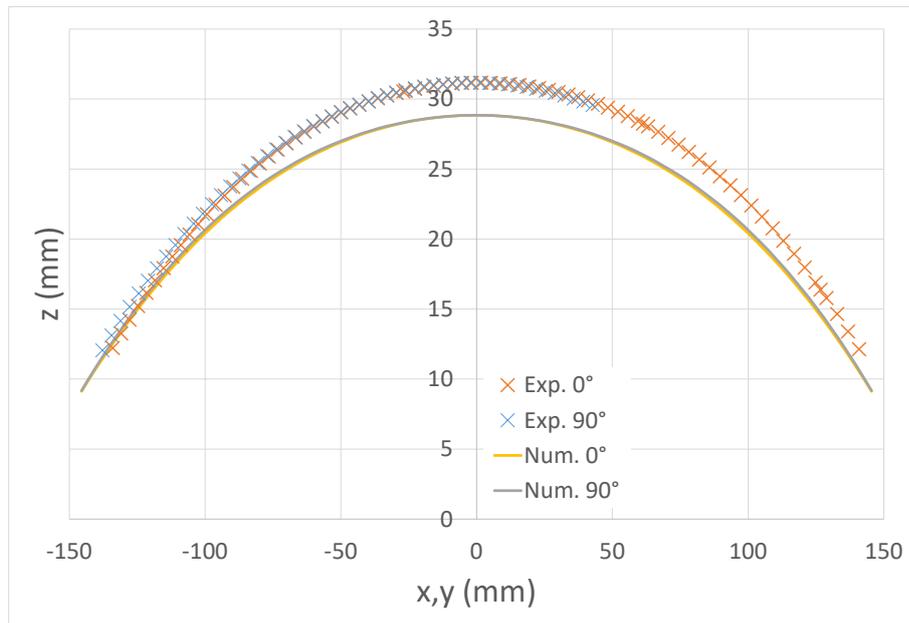


FIGURE 4.44. – Comparaison des coordonnées  $z$  expérimentales et numériques sur les sections à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  de la membrane carrée orthotrope à une pression de 6 bar

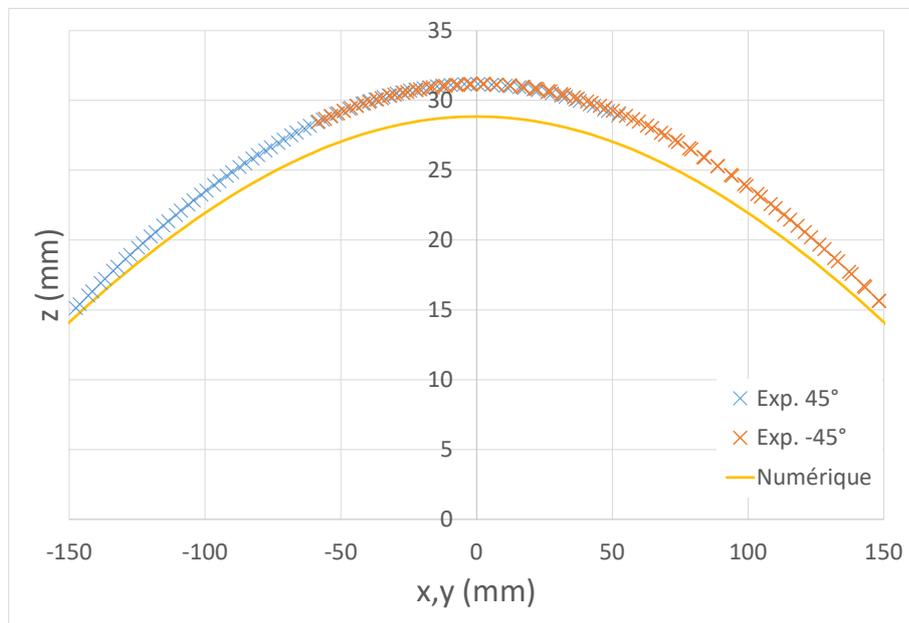


FIGURE 4.45. – Comparaison des coordonnées  $z$  expérimentales et numériques sur les sections à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  de la membrane carrée orthotrope à une pression de 6 bar

4. Membranes carrées – 4.3. Influence du stratifié : comparaison quasi-isotrope/orthotrope

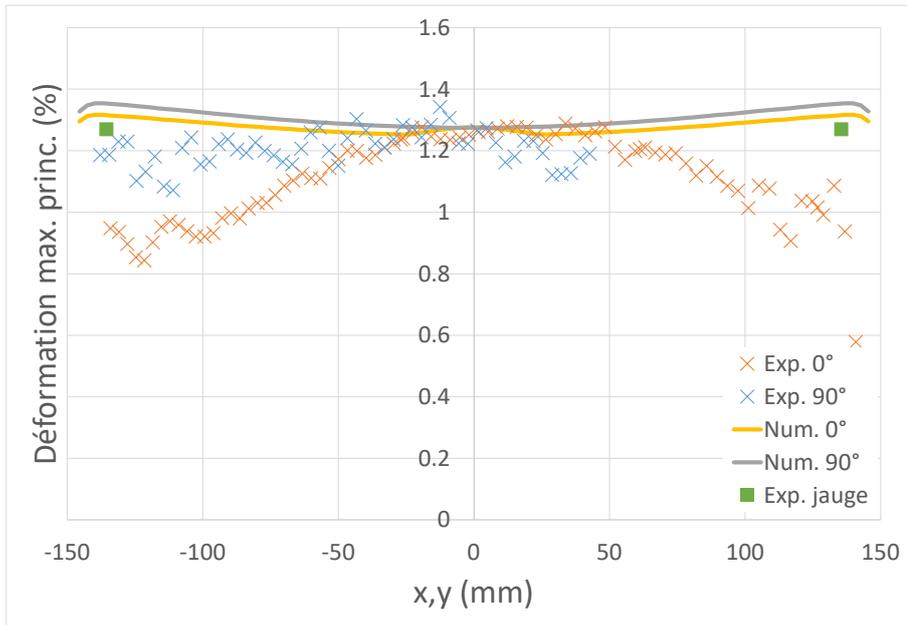


FIGURE 4.46. – Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à 0° et 90° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 6 bar

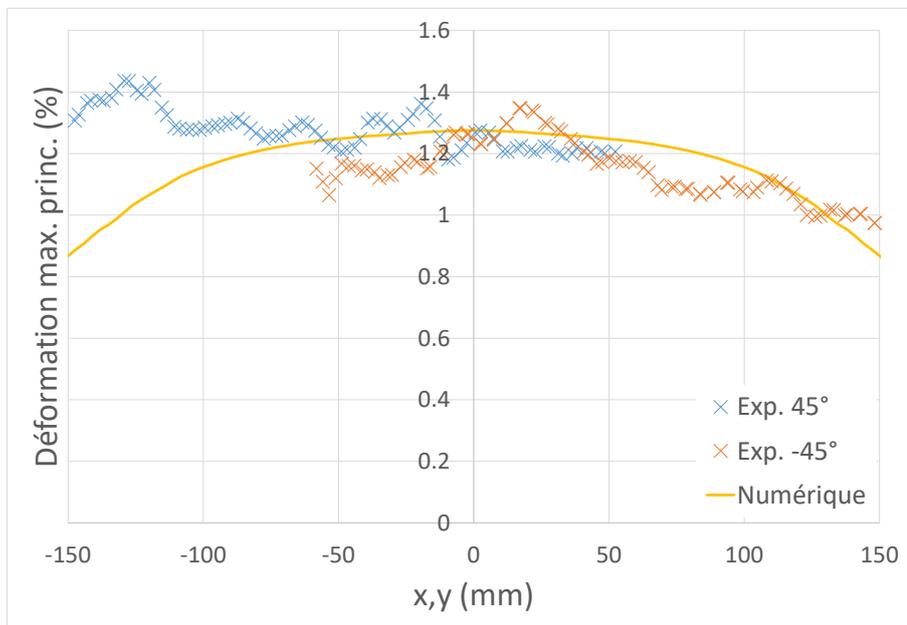


FIGURE 4.47. – Comparaison des déformations maximales principales expérimentales et numériques sur les sections à 45° et -45° de la membrane carrée orthotrope à une pression de 6 bar

### 4.3.6. Conclusion

L'utilisation d'une liaison flexible dont la géométrie est optimisée a permis d'augmenter de 364% la pression à rupture de la membrane et de 133% la pression spécifique. Optimiser l'orientation des fibres en fabricant une membrane orthotrope plutôt que quasi-isotrope a permis un gain supplémentaire en terme de pression à rupture. Celle-ci a été augmentée de 12% à masse constante car la liaison flexible utilisée est la même et la membrane est constituée du même nombre de plis, la pression spécifique est donc également augmentée de 12%. La figure 4.48 résume les pressions à rupture et les pressions spécifiques atteintes lors des trois essais. Lors de l'essai de la membrane orthotrope, la rupture de celle-ci a eu lieu alors que la liaison flexible était déjà endommagée, une fissure était visible grâce à la mesure de champ à une pression de 11,58 bar. La liaison flexible avait été dimensionnée pour la membrane quasi-isotrope mais n'était alors pas optimale pour la membrane orthotrope. Cela laisse ainsi imaginer qu'une pression supérieure aurait pu être atteinte en utilisant une liaison flexible optimale dimensionnée pour la membrane orthotrope.

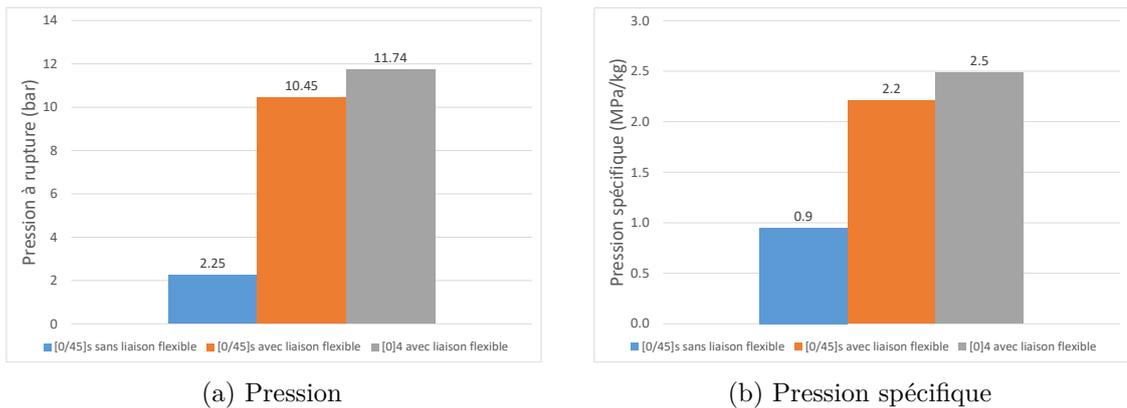


FIGURE 4.48. – Augmentation de la pression et pression spécifique grâce à l'utilisation de la liaison flexible et de l'orientation des fibres

## 4.4. Membranes avec concentration de contraintes

### 4.4.1. Objectif et contexte

Des essais sont réalisés afin de déterminer la tenue de membranes avec entaille. Ces entailles sont faites afin de créer une concentration de contrainte qui pourrait être présente par exemple sur une cloison endommagée accidentellement et qui réduirait fortement la tenue de la structure comme cela peut également être montré sur éprouvettes trouées [64, 65]. La pression à rupture des membranes entaillées est comparée à la pression à rupture des membranes sans entaille. Enfin, il est montré que l'utilisation d'un critère non-local permet de mieux prédire la tenue des membranes entaillées en comparaison avec un critère local.

### 4.4.2. Essai réalisé sur membrane circulaire entaillée

La membrane circulaire testée a été fabriquée à partir du tissé équilibré serge 2x2 de verre/époxy M34N/42%/202T2/G-68 avec une séquence de drapage  $[0/45]_s$  et avec la liaison flexible optimisée présentée dans le chapitre 3. Une entaille de 40 mm de longueur et de 1,7 mm de largeur est réalisée au centre de la membrane pour créer une concentration de contrainte. Deux caméras sont utilisées afin de réaliser une mesure de champ et une corrélation d'images numériques. La résolution des images est de 0,12 mm par pixel.

L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane à une pression maximale de 0,39 bar alors que sans entaille la rupture de la membrane a lieu à 7,93 bar. En présence de l'entaille, la pression à rupture est divisé par 20. La figure 4.49 montre la membrane après rupture. Une fissure propagée à partir des deux extrémités de l'entaille est observée. Par observation sur les images prises par les caméras, on peut voir que cette fissure est apparue à une pression de 0,325 bar.

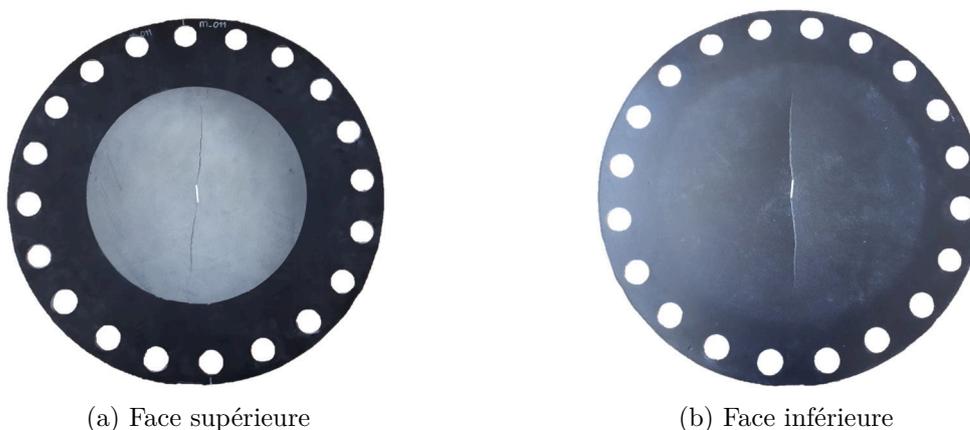


FIGURE 4.49. – Membrane circulaire avec entaille après rupture

#### 4. Membranes carrées – 4.4. Membranes avec concentration de contraintes

La mesure de champ ne permet pas d'analyser précisément la valeur locale de la déformation au bord de l'entaille comme le montre la figure 4.50 où la déformation maximale principale est représentée à une pression de 0,31 bar, soit juste avant l'apparition de la fissure. La résolution ne permet pas d'avoir des facettes d'analyse jusqu'au bord de l'entaille. Sur cette image, des facettes de 12 pixels (soit 1,44 mm) avec un pas entre facettes de 6 pixels sont utilisées. Utiliser des facettes plus petites entraîne une dégradation de la corrélation d'images sans pour autant améliorer l'analyse des déformations.

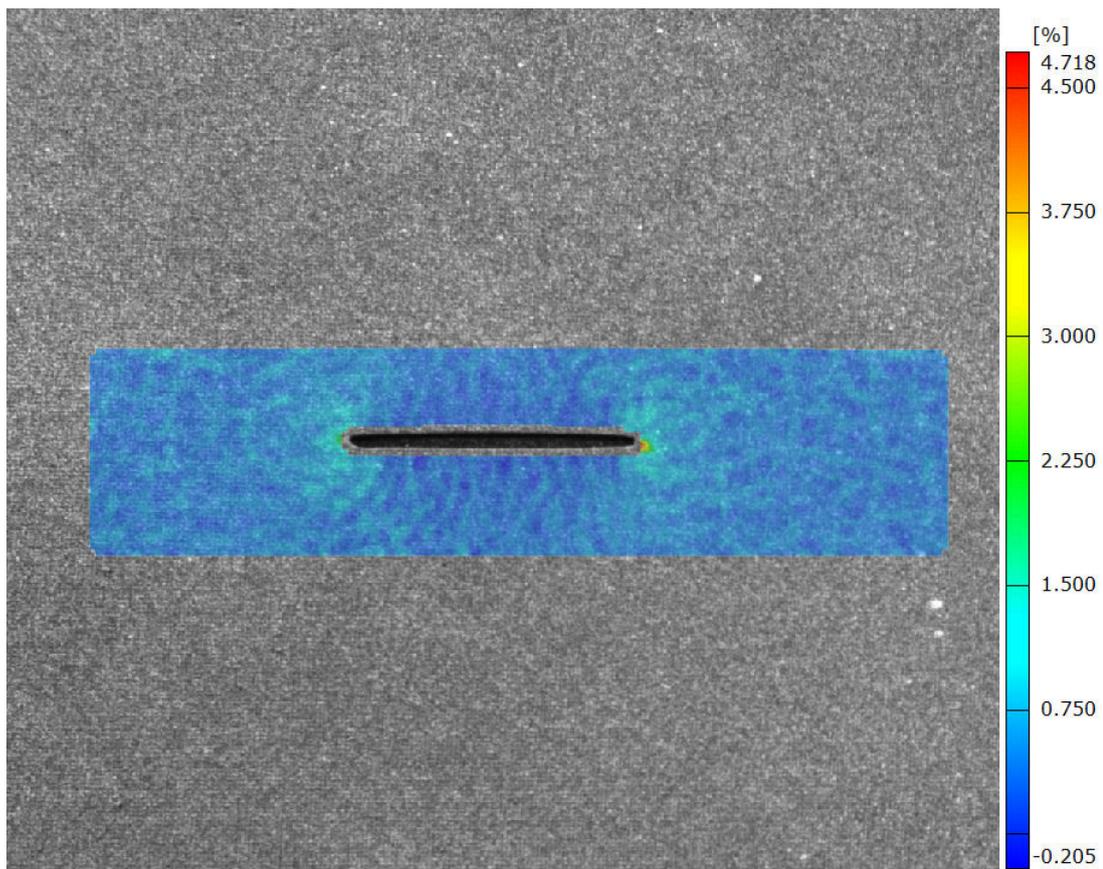


FIGURE 4.50. – Déformation maximale principale de la membrane circulaire entaillée juste avant l'apparition de la fissure ( $P=0,31$  bar)

### 4.4.3. Essai réalisé sur membrane carrée entaillée

La membrane carrée testée a été fabriquée à partir du tissé équilibré serge 2x2 de verre/époxy M34N/42%/202T2/G-68 avec une séquence de drapage  $[0/45]_s$  et avec la liaison flexible optimisée présentée dans le présent chapitre. Une entaille de 39 mm de longueur et de 1,5 mm de largeur est réalisée au centre de la membrane pour créer une concentration de contraintes. Deux caméras sont utilisées afin de réaliser une mesure de champ et une corrélation d'images numériques. Dans le cas précédent, une résolution de 0,12 mm avait été utilisée et la valeur locale de la déformation était impossible à mesurer. Afin d'améliorer cette analyse, les objectifs des caméras ont été changés et la résolution utilisée pour cet essai est de 0,04 mm par pixel.

L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane à une pression maximale de 0,53 bar alors que la membrane carrée quasi-isotrope était capable de tenir jusqu'à une pression de 10,45 bar. Là encore, la pression à rupture avec l'entaille est divisé par 20. La figure 4.51 montre la membrane après rupture. Une fissure propagée à partir des deux extrémités de l'entaille est observée. Cette fissure est apparue à une pression de 0,43 bar.

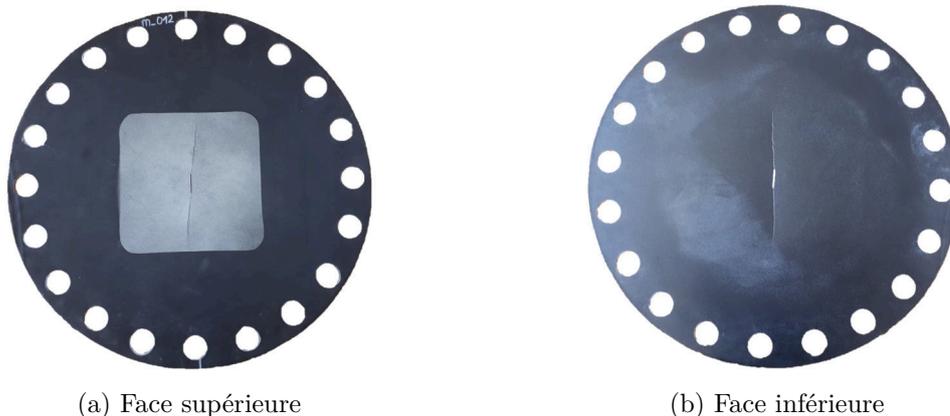


FIGURE 4.51. – Membrane carrée avec entaille après rupture

La corrélation d'images permet de localiser la déformation un peu plus près de l'entaille en comparaison avec l'essai précédent pour lequel la résolution des caméras était différente mais sans pour autant permettre une analyse quantitative. La figure 4.52 représente la déformation maximale principale juste avant l'apparition de la fissure. On peut voir qu'il y a une valeur maximale d'environ 10% bien supérieure à la valeur locale trouvée avec la modélisation numérique à la pression correspondant à l'apparition de la fissure.

4. Membranes carrées – 4.4. Membranes avec concentration de contraintes

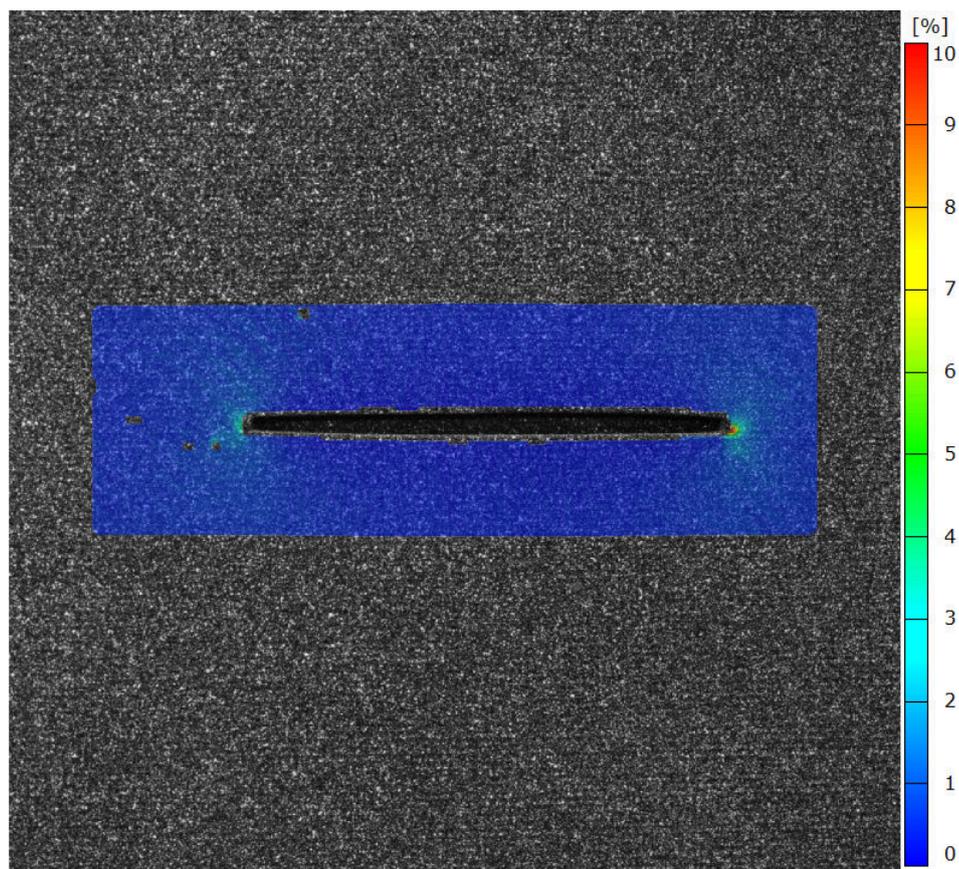


FIGURE 4.52. – Déformation maximale principale de la membrane carrée entaillée juste avant l'apparition de la fissure ( $P=0,40$  bar)

#### 4.4.4. Utilisation d'un critère non-local prédisant la tenue des membranes

Afin de dimensionner les liaisons flexibles présentées dans ces travaux, un critère de rupture local a été utilisé sur les membranes étudiées car celles-ci ne connaissent pas de fort gradient de contraintes. Dans le cas de membranes avec concentration de contrainte comme en présence d'une entaille, utiliser le critère de rupture adapté permettrait d'être capable de mieux prédire la tenue de la structure. Il a été établi qu'un critère local ne fonctionne pas lorsque le champ de contrainte n'est pas uniforme [64, 66] et qu'un critère non-local qui consiste à moyennner les contraintes (ou déformations) sur un Volume Caractéristique de Rupture (VCR) permet de mieux prédire la rupture de structures avec concentration de contraintes [67]. Le VCR dépend de la mésostructure du matériau. Le VCR n'a pas été identifié pour le matériau utilisé mais son diamètre a été fixé à 0,5 mm pour correspondre à un diamètre typique pour les fibres de verre [60]. Des modélisations numériques par éléments finis sont faites afin de comparer l'efficacité d'un critère non-local face à un critère local. Habituellement, le critère non-local consiste à moyennner les contraintes. Par souci de simplicité, le critère non-local utilisé ici consiste à moyennner les déformations sur un volume correspondant à un cylindre dont la hauteur vaut l'épaisseur de la membrane et le diamètre vaut 0,5 mm :

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int \varepsilon_{ij} dV \quad (4.3)$$

avec :

- $V$  le volume considéré;
- $\varepsilon_{ij}$  les déformations dans chaque élément.

Une approche classique utilisant un critère local consisterait à faire en sorte que la valeur maximale de déformation  $\varepsilon_{ij}$  ne dépasse pas la limite à rupture du matériau  $\varepsilon_r$ . Il faudrait ainsi vérifier  $\varepsilon_{ij} < \varepsilon_r$ . L'approche utilisant le critère non-local consiste quant à elle à faire en sorte que la moyenne des déformations dans le VCR  $\bar{\varepsilon}_{ij}$  ne dépasse pas la limite à rupture du matériau  $\varepsilon_r$  et la relation  $\bar{\varepsilon}_{ij} < \varepsilon_r$  doit être vérifiée.

##### 4.4.4.1. Modélisation par éléments finis et application du critère non-local à la membrane circulaire

La même modélisation que celle utilisée pour la membrane circulaire idéale dans la section 3.1 est utilisée mais cette fois-ci avec des éléments coques à quatre noeuds avec intégration réduite. A la pression de 0,325 bar correspondant à l'apparition de la fissure, la déformation maximale principale vaut 4,0% (figure 4.53), soit 74% de plus que la limite à rupture du matériau  $\varepsilon_r = 2,3\%$ . Le critère non-local appliqué sur le VCR représenté sur la figure 4.53 vaut  $\bar{\varepsilon} = 2,5\%$ , soit seulement 8,7% de plus que la limite à rupture du matériau. Si un critère local avait été utilisé pour prédire la rupture de la membrane, la déformation maximale valant la limite à rupture du matériau aurait été atteinte à une pression de 0,14 bar, soit seulement 44%

#### 4. Membranes carrées – 4.4. Membranes avec concentration de contraintes

de la pression réellement atteinte pour produire la rupture de la membrane. En utilisant le critère non-local, celui-ci vaut la limite à rupture du matériau à une pression de 0,28 bar, soit 88% de la pression réellement atteinte à l'apparition de la fissure. Le critère non-local permet donc une prédiction de la rupture beaucoup plus fiable que le critère local qui consisterait à utiliser la valeur maximale observée. La comparaison des prédictions avec le résultat expérimental est représenté sur la figure 4.54.

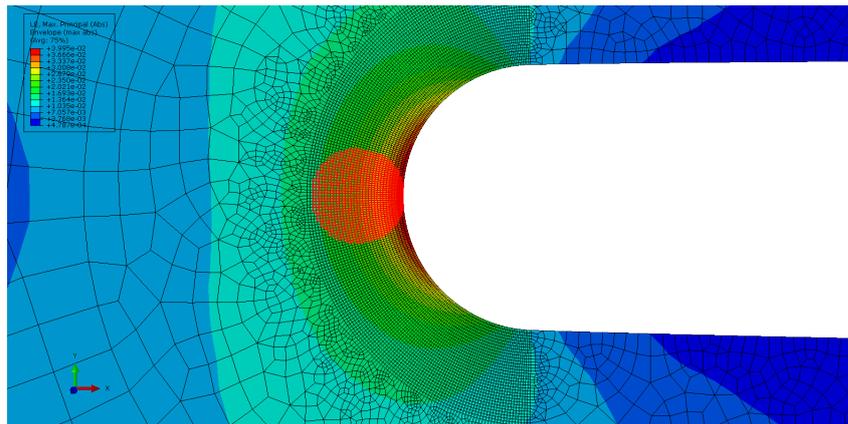


FIGURE 4.53. – VCR d'application du critère non-local sur la membrane circulaire entaillée

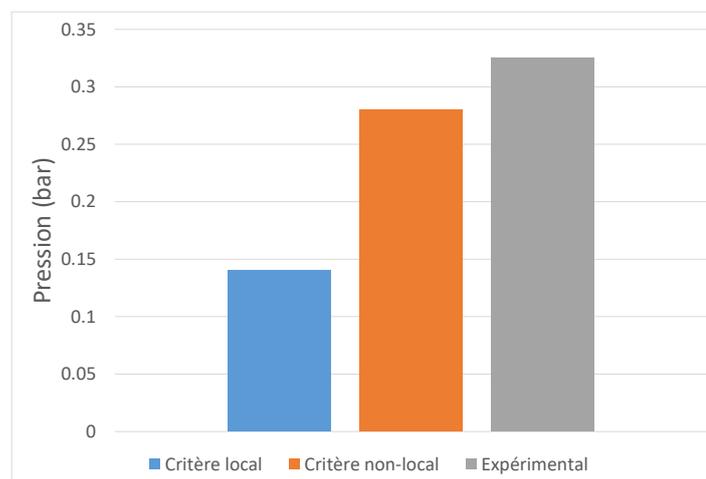


FIGURE 4.54. – Comparaison du critère local et du critère non-local pour la prédiction de la pression de rupture avec la pression atteinte expérimentalement avec la membrane circulaire avec entaille

#### 4.4.4.2. Modélisation par éléments finis et application du critère non-local à la membrane carrée

La même modélisation que celle utilisée pour la membrane carrée idéale dans la section 4.1.2 est utilisée mais cette fois-ci avec des éléments coques à quatre noeuds avec intégration réduite. A la pression de 0,43 bar qui correspond à la pression pour laquelle la fissure commence à apparaître, la déformation maximale principale vaut 5,0% (figure 4.55), soit 117% de plus que la limite à rupture du matériau  $\varepsilon_r = 2,3\%$ . Si on applique le critère non-local sur le VCR (figure 4.55), on a  $\bar{\varepsilon} = 2,5\%$ , correspondant à 8,7% de plus que  $\varepsilon_r$ . Si un critère local avait été utilisé pour prédire la rupture de la membrane, la déformation maximale valant la limite à rupture du matériau aurait été atteinte comme pour la membrane circulaire à une pression de 0,14 bar, soit 33% de la pression réellement nécessaire pour voir apparaître la fissure de la membrane. En utilisant le critère non-local, la rupture serait prédite à une pression de 0,35 bar, soit 81% de la pression réellement atteinte à l'apparition de la fissure. Là encore, cela montre que le critère non-local prédit beaucoup mieux la rupture de la membrane. Sur la figure 4.56 sont représentés les prédictions et le résultat expérimental.

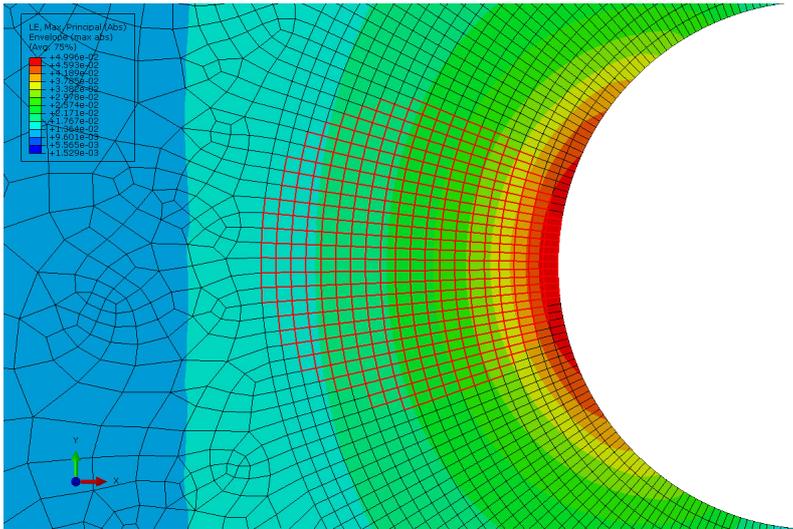


FIGURE 4.55. – VCR d’application du critère non-local sur la membrane carrée entaillée

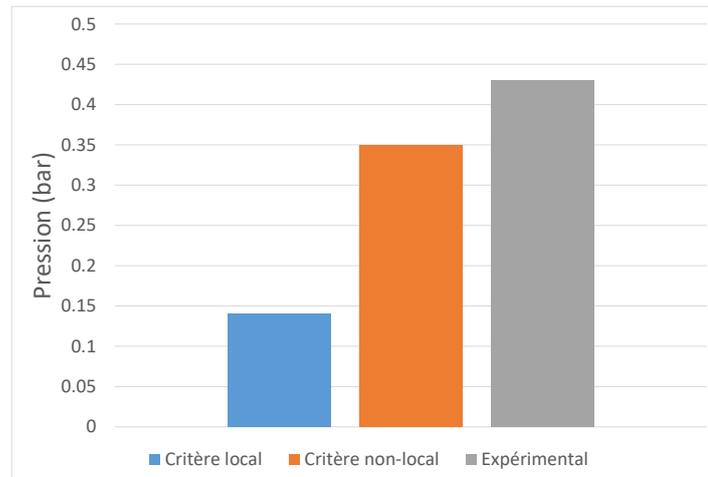


FIGURE 4.56. – Comparaison du critère local et du critère non-local pour la prédiction de la pression de rupture avec la pression atteinte expérimentalement avec la membrane carrée avec entaille

#### 4.4.5. Conclusion

Les essais de gonflement réalisés sur les membranes avec concentration de contraintes ont permis d'évaluer la tenue de membranes avec entaille. A la fois avec la membrane circulaire et avec la membrane carrée, la pression à rupture a été divisée par 20 en présence de l'entaille. Il a ensuite été comparé l'utilisation d'un critère local et l'utilisation d'un critère non-local sur un VCR avec la modélisation par éléments finis. Il a été observé qu'utiliser un critère local conduirait à une mauvaise prédiction de la rupture de la membrane alors qu'un critère non-local permet de la prédire de manière beaucoup plus précise. L'utilisation d'un critère local entraînerait un surdimensionnement de la structure conçue alors que le critère non-local permet un dimensionnement plus optimal.

## 5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle

*Dans ce dernier chapitre, les résultats obtenus sur les membranes carrées à échelle réduite sont extrapolés afin de déterminer l'épaisseur de la cloison à échelle réelle. Pour cela, le modèle analytique est utilisé comme première approche pour déterminer l'épaisseur nécessaire dans le cas de l'application d'une pression uniforme.*

*La liaison flexible est ensuite dimensionnée avec le critère de pression spécifique développé précédemment pour trouver la géométrie optimale des liaisons flexibles circulaires et carrées des chapitres 3 et 4.*

*Des méthodes de fabrication de la membrane et de la liaison flexible sont ensuite présentées. L'objectif est de proposer des méthodes de fabrication adaptables à l'échelle des cloisons des flotteurs de BW Ideol. La membrane peut être fabriquée à partir d'unidirectionnel préimprégné mis bout à bout et alterné à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  pour correspondre au stratifié orthotrope optimal présenté dans le chapitre 4 et pour transmettre les efforts entre les différents plis. La liaison flexible, quant à elle, peut être fabriquée en décalant les plis de telle sorte à obtenir l'épaisseur décroissante désirée.*

*Un nouveau montage d'essai est conçu afin de réaliser des essais dans une configuration permettant de tester les solutions de fabrication proposées pour l'échelle réelle. Celui-ci est également conçu car il permet d'être adaptable pour tester des membranes de différentes dimensions. Les essais ont permis de montrer que le fait d'utiliser une liaison flexible composée de quatre pièces distinctes a un impact important sur le résultat car la rupture se produit désormais dans l'angle de la membrane à cause d'un décalage produisant un cisaillement de la membrane alors que la rupture se produisait auparavant au centre des bords de la membrane. Ils ont aussi permis de montrer que la fixation est d'une importance primordiale car lorsque celle-ci est mal maîtrisée, la membrane peut glisser et un flambement se produit dans les angles de la membrane. Un collage de la membrane sur les liaisons flexibles est alors utilisé en ajout du serrage.*

### Sommaire

5.1	Conception de la cloison à échelle réelle . . . . .	151
5.1.1	Objectifs . . . . .	151
5.1.2	Dimensionnement de la membrane . . . . .	152
5.1.3	Dimensionnement de la liaison flexible à l'échelle réelle . . . . .	154

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle –

5.1.4	Calcul de la réponse de la cloison à échelle réelle sous chargement hydrostatique . . . . .	158
5.1.5	Procédés de fabrication adaptables à l'échelle réelle . . . . .	161
5.1.5.1	Méthode de fabrication de la liaison flexible adaptée à l'échelle réelle . . . . .	161
5.1.5.2	Méthode de fabrication de la membrane adaptée à l'échelle réelle . . . . .	162
5.1.6	Conclusion . . . . .	163
5.2	Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application . . . . .	164
5.2.1	Objectifs . . . . .	164
5.2.2	Conception du montage d'essai . . . . .	164
5.2.3	Essais réalisés . . . . .	167
5.2.3.1	Essai sur membrane orthotrope boulonnée . . . . .	167
5.2.3.2	Essai sur membrane quasi-isotrope boulonnée . . . . .	168
5.2.3.3	Essai sur membrane quasi-isotrope boulonnée et collée aux liaisons flexibles . . . . .	171
5.2.3.4	Conclusion . . . . .	174

## 5.1. Conception de la cloison à échelle réelle

### 5.1.1. Objectifs

Les chapitres précédents ont permis d'étudier le comportement d'une membrane circulaire ou carrée sous pression fixée à son bord. Les zones de rupture et de contraintes et déformations maximales ont été identifiées. Les essais réalisés sur les membranes carrées ont permis de déterminer la tenue de celles-ci à la pression appliquée notamment avec l'utilisation d'une liaison flexible et d'un stratifié orthotrope qui permettent de maximiser la pression spécifique. Il a été observé que les déformations et contraintes maximales se trouvent au bord de la membrane dans la direction normale au bord comme illustré sur les figures 5.1 et 5.2 (analyse issue de la section 4.1.2).

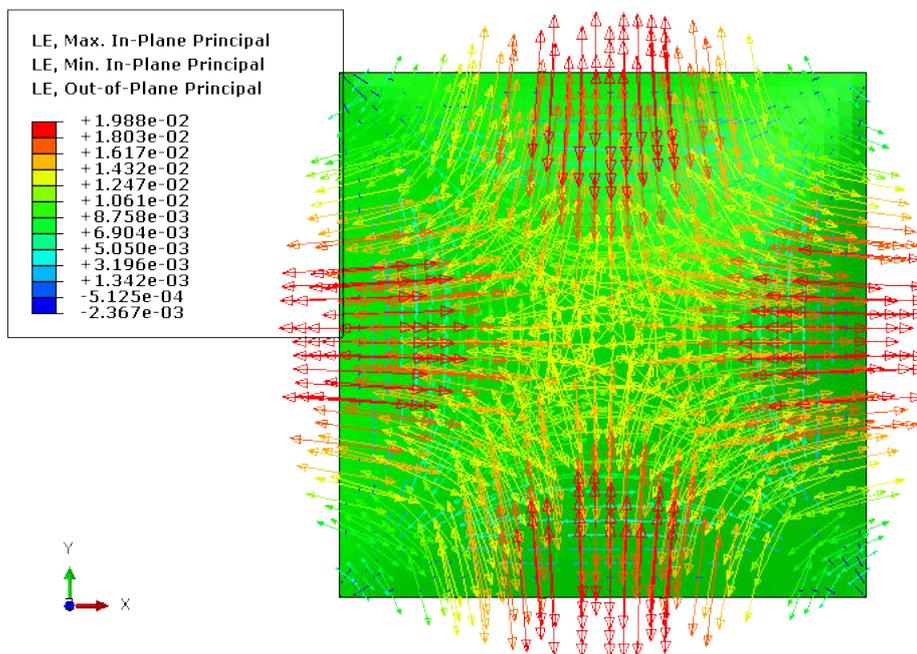


FIGURE 5.1. – Directions des déformations maximales principales d'une membrane carrée idéale

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.1. Conception de la cloison à échelle réelle

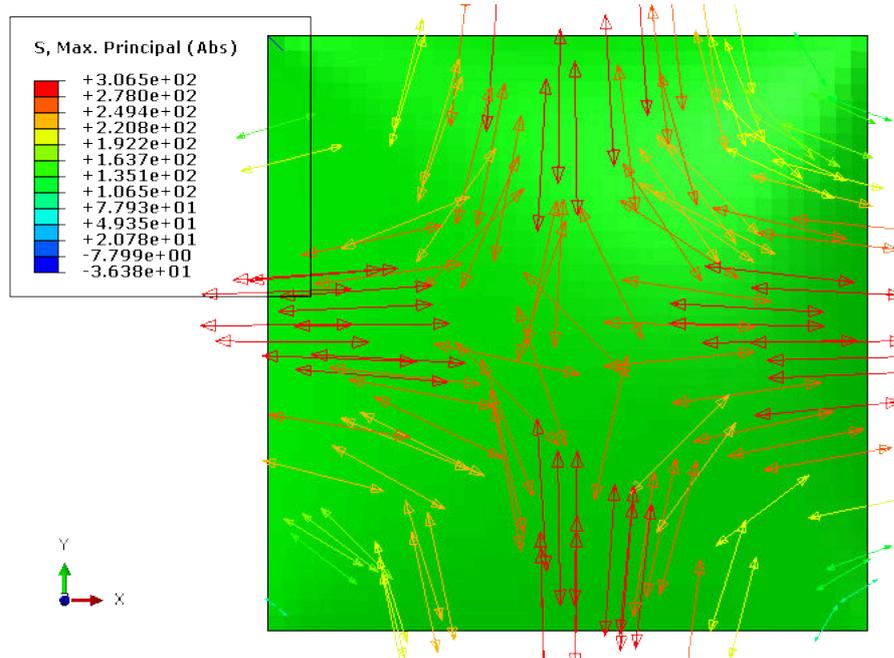


FIGURE 5.2. – Direction des contraintes maximales principales d'une membrane carrée idéale

### 5.1.2. Dimensionnement de la membrane

Les solutions aux équations de Föppl - von Kármán présentées dans la section 1.2.3 permettent d'exprimer la contrainte normale au centre du bord correspondant à la zone où est localisée la valeur maximale de déformation. En considérant donc que cette contrainte est notre critère dimensionnant, son expression permet de réaliser une similitude entre l'échelle réduite correspondant aux essais réalisés en laboratoire et l'échelle réelle correspondant à la cloison du flotteur de BW Ideol. Il est à noter que cette similitude est une estimation car la pression appliquée sur la cloison est une pression hydrostatique qui dépend donc de la hauteur d'eau au dessus du point considéré. En considérant la pression maximale pouvant être appliquée sur la cloison (au pied de celle-ci où la hauteur d'eau est maximale) de 0,172 MPa (comme expliqué dans la section 1.1.4), on peut estimer l'épaisseur d'une cloison de taille réelle (10 m de côté) ayant une tenue semblable à la membrane carrée orthotrope présentée dans le chapitre précédent avec laquelle les meilleurs résultats en terme de pression spécifique ont été trouvés. En considérant la membrane carrée de la figure 5.3, la contrainte normale au centre du bord s'exprime :

$$\sigma = \alpha_3 \left[ E \left( \frac{PL}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.1)$$

Si la résistance des membranes est la même aux deux échelles considérées (notées avec l'indice 1 pour la petite échelle et l'indice 2 pour l'échelle réelle), on a :

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.1. Conception de la cloison à échelle réelle

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad (5.2)$$

$$\alpha_3 \left[ E_1 \left( \frac{P_1 L_1}{h_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} = \alpha_3 \left[ E_2 \left( \frac{P_2 L_2}{h_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.3)$$

En considérant que les matériaux sont identiques pour les deux échelles,  $E_1 = E_2$  et donc :

$$\frac{P_1 L_1}{h_1} = \frac{P_2 L_2}{h_2} \quad (5.4)$$

L'épaisseur de la cloison réelle vaudrait alors :

$$h_2 = \frac{h_1 P_2 L_2}{P_1 L_1} = \frac{0,9 \times 1,72 \times 10000}{11,74 \times 363} = 3,6 \text{ mm} \quad (5.5)$$

Cela signifie qu'une cloison de 3,6 mm d'épaisseur romprait en étant soumise à une pression uniforme de service de 0,172 MPa. Cela représente un rapport épaisseur sur longueur de 1/2778, ce qui est une valeur très faible et qui permet de vérifier les hypothèses de membrane. Cette dimension permet de réaliser un prédimensionnement de la liaison flexible et d'obtenir un ordre d'idée de la masse de la solution de membrane composite comme cloison des flotteurs de BW Ideol.

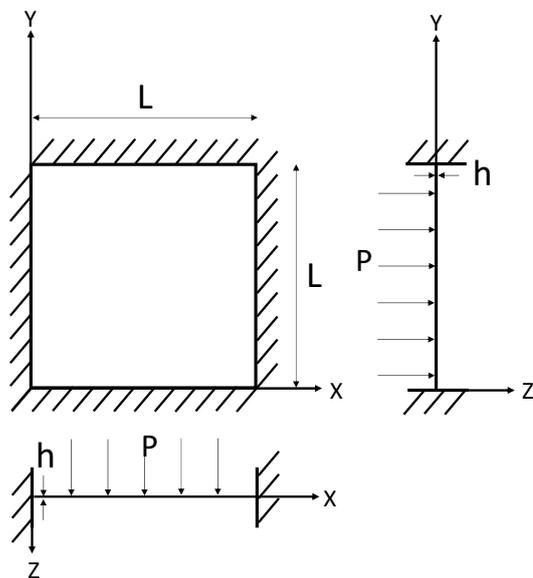


FIGURE 5.3. – Membrane carrée sous pression latérale

### 5.1.3. Dimensionnement de la liaison flexible à l'échelle réelle

La géométrie de la liaison flexible est déterminée avec l'utilisation de la pression spécifique comme dans les cas des liaisons flexibles circulaires et carrées à échelle réduite. Le même matériau que celui considéré pour la liaison flexible de la membrane carrée présentée dans le chapitre 4 est considéré et la même démarche d'optimisation est adoptée. Les plis sont modélisés avec les propriétés jusqu'à  $\varepsilon_r$  du matériau mesurées par des essais de traction simple présentées dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5. Contrairement à la liaison flexible optimisée dans le chapitre 4, la liaison flexible optimisée pour la cloison à échelle réelle est composée de quatre pièces correspondant aux quatre côtés de la cloison. Ce choix est fait car, dans les dimensions réelles de cloisons de 10 m de côté, il serait plus facile de transporter la liaison flexible en quatre pièces plutôt qu'en une seule. La modélisation par éléments finis et les conditions aux limites appliquées sont présentées sur la figure 5.4.

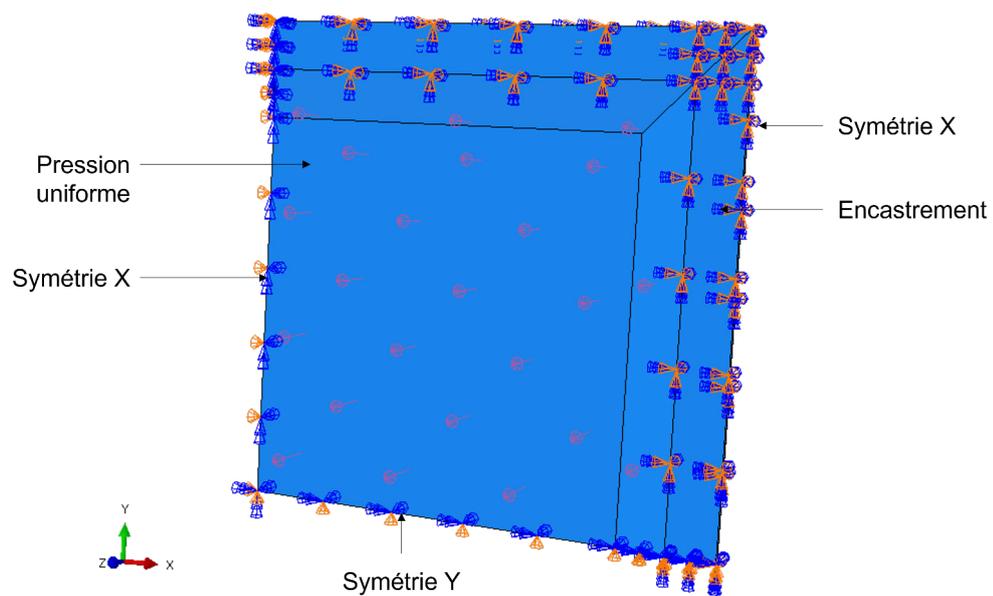


FIGURE 5.4. – Conditions aux limites pour le dimensionnement de la liaison flexible de la cloison à échelle réelle

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.1. Conception de la cloison à échelle réelle

La pression spécifique en fonction de l'épaisseur et de la longueur de la liaison flexible est tracée sur la figure 5.5. On peut voir que la liaison flexible optimale a une longueur comprise entre 200 mm et 500 mm et une épaisseur comprise entre 15 mm et 50 mm.

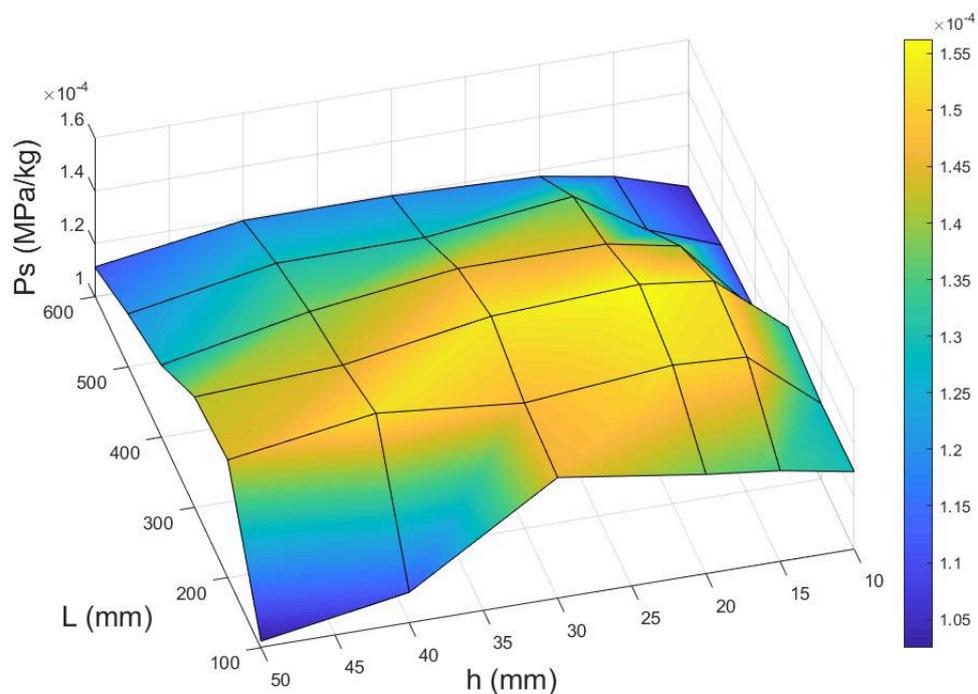


FIGURE 5.5. – Pression spécifique en fonction des dimensions de la liaison flexible de la cloison à échelle réelle

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.1. Conception de la cloison à échelle réelle

La figure 5.6 montre la pression à rupture pour chaque dimension de la liaison flexible. Pour une liaison flexible de 50 mm d'épaisseur et 500 mm de longueur, la pression à rupture vaut 0,172 MPa et pour une liaison flexible de 50 mm d'épaisseur et 600 mm de longueur, la pression à rupture vaut 0,177 MPa. Ces liaisons flexibles permettent donc d'atteindre la pression de service de 0,172 MPa.

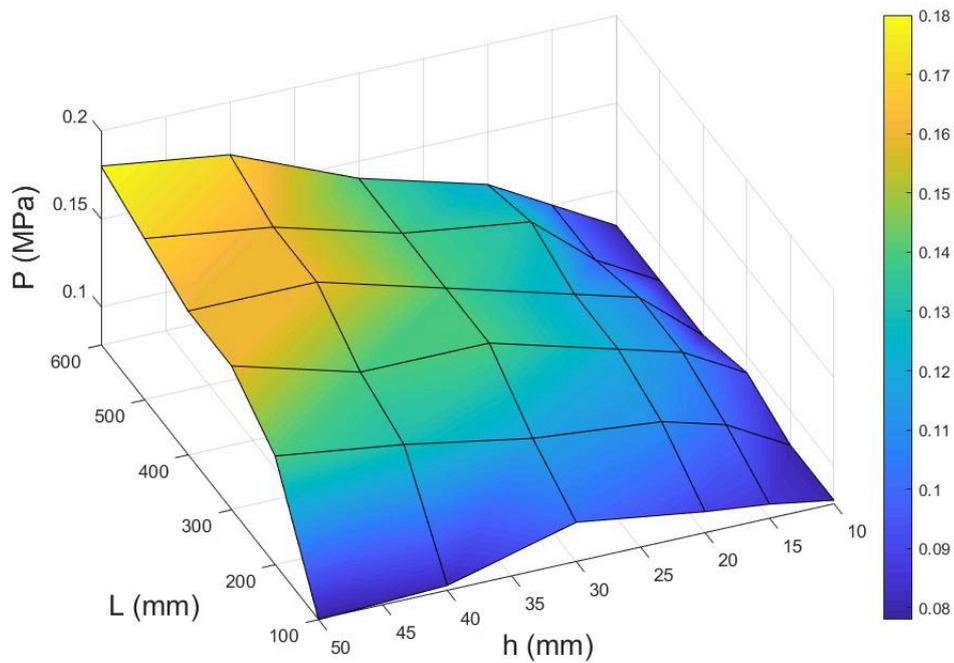


FIGURE 5.6. – Pression à rupture en fonction des dimensions de la liaison flexible de la cloison à échelle réelle

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.1. Conception de la cloison à échelle réelle

Un critère important est la tenue de la liaison flexible. La figure 5.7 montre la déformation atteinte dans la liaison  $\epsilon_l$  divisée par la déformation à rupture du matériau  $\epsilon_r$ . Pour la liaison flexible de 50 mm d'épaisseur et 500 mm de longueur, ce rapport vaut 82% et pour la liaison flexible de 50 mm d'épaisseur et 600 mm de longueur, il vaut 86%. Cela signifie que les liaisons résisterait à la pression uniforme appliquée.

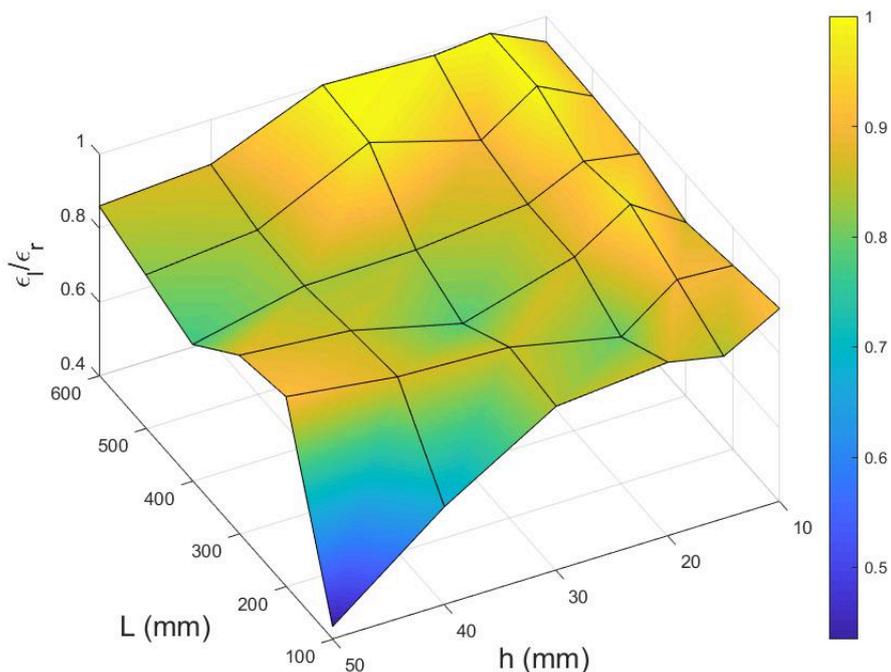


FIGURE 5.7. – Déformation de la liaison flexible à pression à rupture en fonction des dimensions de la liaison flexible de la cloison à échelle réelle

Ce dimensionnement montre que des liaisons flexibles de 50 mm d'épaisseur avec une longueur comprise entre 500 mm et 600 mm permettraient à la membrane de résister à la pression uniforme de 0,172 MPa.

#### 5.1.4. Calcul de la réponse de la cloison à échelle réelle sous chargement hydrostatique

Si, pour des raisons de simplicité, la liaison flexible a été dimensionnée en considérant une pression uniforme de 0,172 MPa correspondant à la pression maximale présente en pied de cloison, un calcul est fait avec la liaison flexible optimisée de 500 mm de longueur et 50 mm afin d'évaluer la réponse de la cloison au chargement réel. Pour cela, la même modélisation que celle utilisée pour l'optimisation de la géométrie de la liaison flexible est utilisée mais toute la hauteur de la cloison est modélisée afin de pouvoir appliquer une pression hydrostatique sur toute la hauteur.

La figure 5.8 montre que le chargement entraîne une déflexion de la membrane de 606,4 mm.

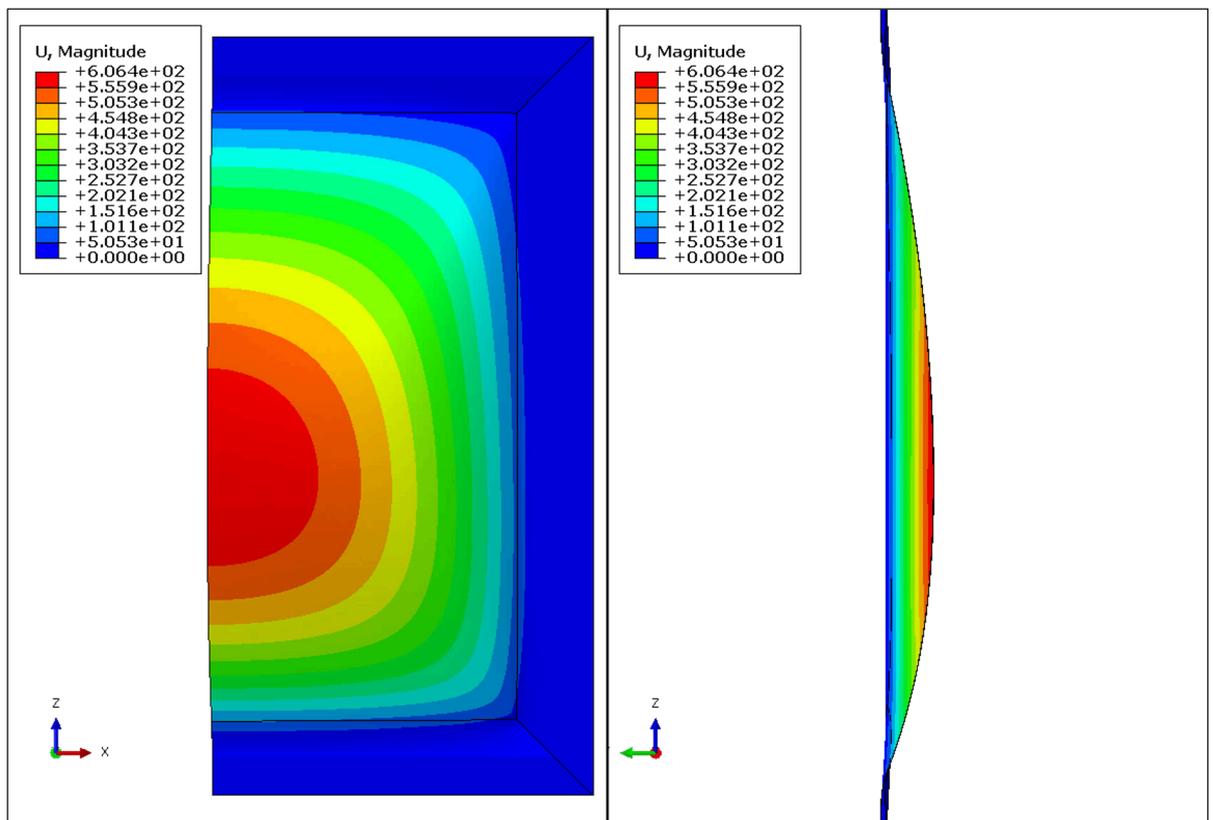


FIGURE 5.8. – Déflexion de la cloison sous chargement hydrostatique

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.1. Conception de la cloison à échelle réelle

La figure 5.9 montre que sous chargement hydrostatique la cloison connaît une déformation maximale de 1,7% alors que cette déformation vaut 2,3% dans le cas d'une pression uniforme.

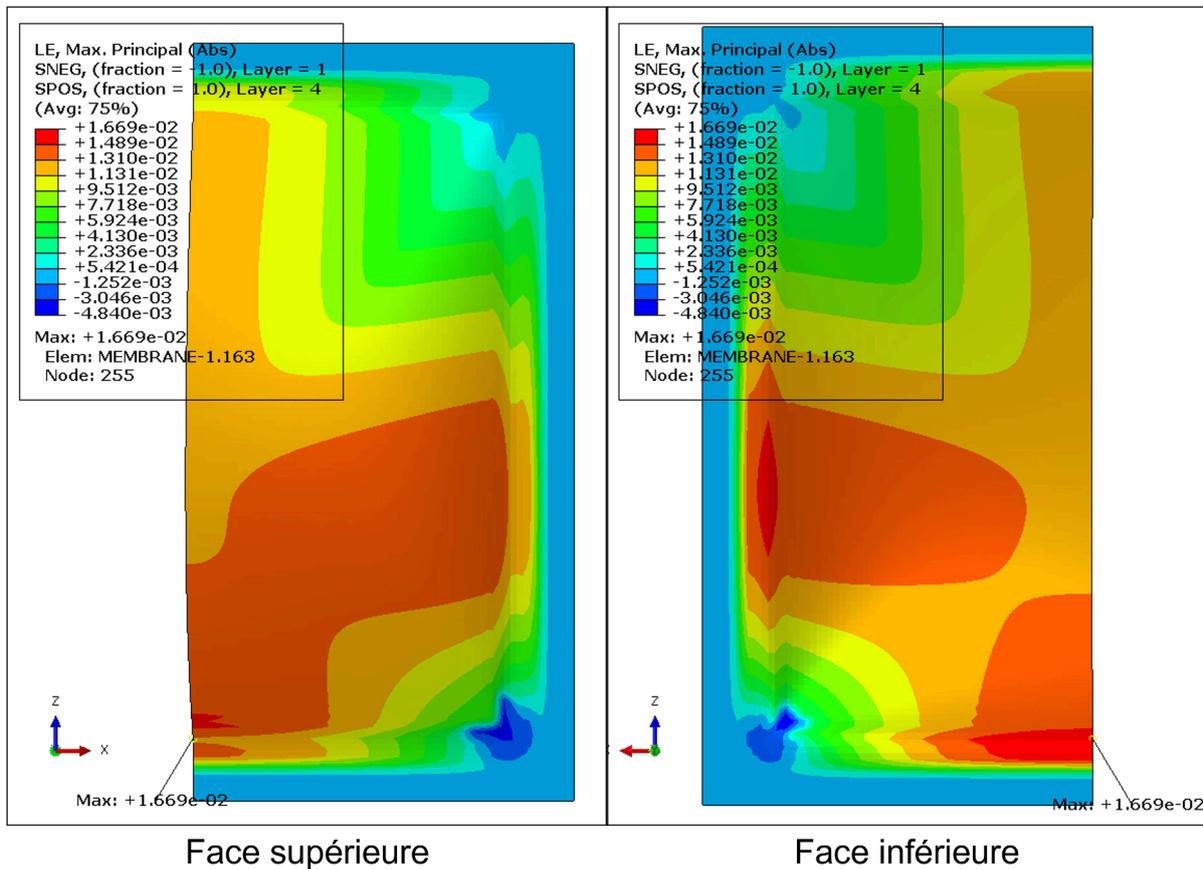


FIGURE 5.9. – Déformation de la cloison sous chargement hydrostatique

## 5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.1. Conception de la cloison à échelle réelle

La figure 5.10 montre que sous chargement hydrostatatique la liaison flexible a une déformation maximale de 1,4% alors qu'elle était de 1,9% sous la pression uniforme de 0,172 MPa.

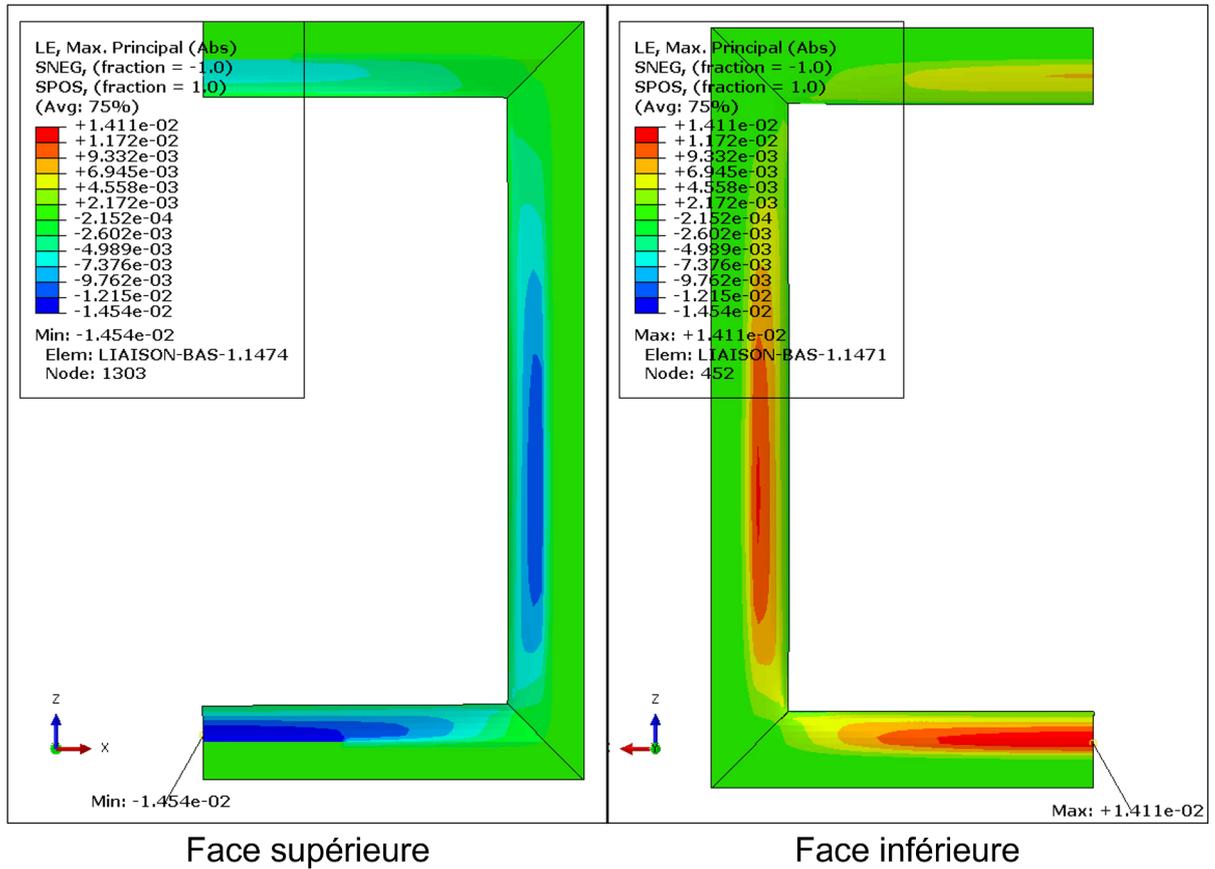


FIGURE 5.10. – Déformation de la liaison flexible sous chargement hydrostatatique

Ces résultats montrent que le calcul fait avec la pression uniforme était conservatif et constitue une bonne première approche pour dimensionner la cloison et la liaison flexible et qu'une membrane de 3,6 mm d'épaisseur avec la liaison flexible optimisée est capable de résister à la pression de service d'une cloison de flotteur de BW Ideol.

### 5.1.5. Procédés de fabrication adaptables à l'échelle réelle

Les essais réalisés en laboratoire ont été faits avec des pièces fabriquées avec des méthodes qui peuvent être ajustées afin d'être adaptées à l'échelle réelle. Ces méthodes portent à la fois sur la fabrication de la liaison flexible mais également celle de la membrane.

#### 5.1.5.1. Méthode de fabrication de la liaison flexible adaptée à l'échelle réelle

Comme présenté dans le chapitre 3 sur la figure 3.31, la fabrication de la liaison flexible a été faite en usinant manuellement une plaque dont l'épaisseur correspond à l'épaisseur maximale de la liaison flexible. L'épaisseur décroissante et la longueur sont obtenues par meulage. Ce procédé de fabrication bien adapté aux essais en laboratoire devient trop contraignant à l'échelle réelle. En effet, cette manière de fabriquer la liaison flexible est coûteux en temps et en matériau puisque la partie centrale de la plaque est supprimée. Un autre inconvénient est que l'obtention de l'épaisseur décroissante est délicate car elle est faite manuellement par meulage. Afin de simplifier la méthode de fabrication pour que celle-ci soit adaptée à l'échelle réelle, la liaison flexible est composée de quatre pièces distinctes comme expliqué dans la section 5.1.3. Comme dans le cas des liaisons flexibles à échelle réduite, la fabrication est faite à partir d'un préimprégné. Le positionnement des plis de préimprégné est fait avec un décalage permettant d'obtenir l'épaisseur décroissante désirée comme présenté sur la figure 5.11. Cela permet de supprimer l'étape de meulage et de réduire les chutes de matière.

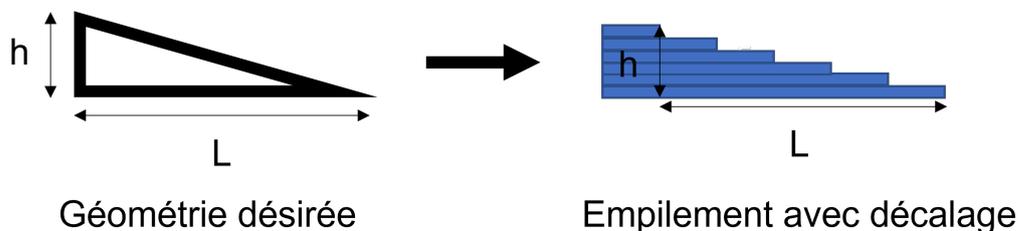


FIGURE 5.11. – Méthode de fabrication par décalage des plis de préimprégné pour l'obtention de l'épaisseur décroissante de la liaison flexible

### 5.1.5.2. Méthode de fabrication de la membrane adaptée à l'échelle réelle

La membrane qui sert de cloison pour les flotteurs de BW Ideol peut être fabriquée à partir d'un préimprégné comme celles testées en laboratoire. Les rouleaux de préimprégné ont communément une largeur qui va jusqu'à environ 1,5 m, ce qui est insuffisant pour couvrir la largeur d'une cloison de 10 m de côté. Une méthode pour fabriquer la cloison entière peut être d'assembler les plis bout à bout. Les essais sur membranes carrées à échelle réduite ont montré que la membrane orthotrope permet d'obtenir la plus grande pression à rupture. Dans le cas de l'échelle réduite, un tissu équilibré avait été utilisé avec donc 50% des fibres à  $0^\circ$  et 50% des fibres à  $90^\circ$ . Pour que cette solution soit adaptée à la méthode de drapage bout à bout, un préimprégné unidirectionnel (UD) peut être utilisé. Une première couche est donc constituée de plusieurs plis à  $0^\circ$  mis bout à bout dans la direction des fibres afin d'assurer la continuité des fibres et une deuxième couche est composée de plis à  $90^\circ$  mis bout à bout de la même manière et permettent d'avoir l'orientation des fibres nécessaire mais également de transmettre les efforts entre les différents plis à  $0^\circ$ . Cette méthode est illustrée sur le schéma sur la figure 5.12 où trois plis à  $0^\circ$  sont positionnés bout à bout avant d'être recouverts par deux plis à  $90^\circ$ . Ce procédé est répété plusieurs fois afin d'obtenir l'épaisseur désirée.

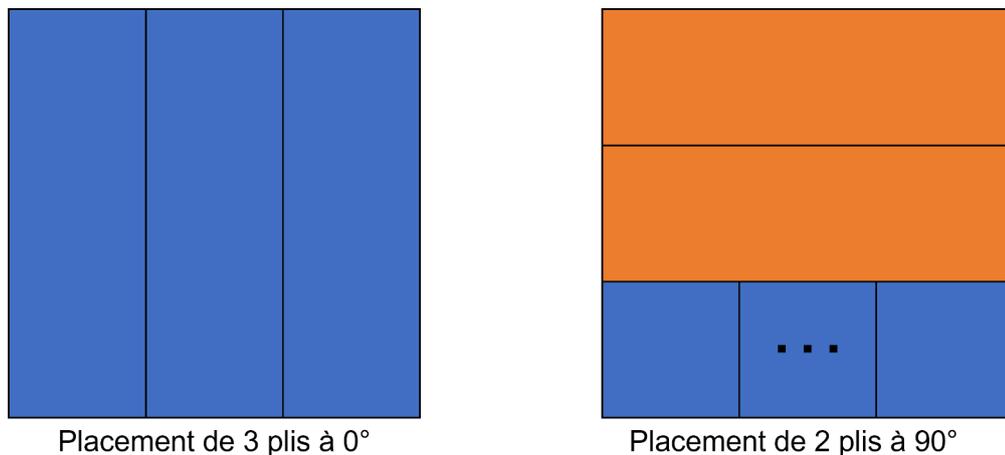


FIGURE 5.12. – Méthode de fabrication par bout à bout d'UD pour la fabrication des cloisons à échelle réelle

### 5.1.6. Conclusion

Afin d'extrapoler les résultats obtenus sur des membranes à échelle réduite vers des membranes correspondant à l'échelle réelle des cloisons des flotteurs de BW Ideol, le modèle analytique a été utilisé afin de déterminer l'épaisseur d'une cloison ayant la même tenue que la membrane orthotrope présentée dans le chapitre 4. Bien que cette méthode soit possible pour une pression uniforme alors que la pression réellement appliquée est hydrostatique, cette méthode permet de prédimensionner la liaison flexible. Il a été ainsi trouvé qu'une membrane de 3,6 mm d'épaisseur est capable de supporter une pression de 1,72 MPa avec une liaison flexible de 50 mm d'épaisseur et une longueur comprise entre 500 mm et 600 mm. Un calcul est ensuite fait avec une pression hydrostatique correspondant au chargement réel de la cloison pour vérifier qu'une membrane de 3,6 mm d'épaisseur avec une liaison flexible de 500 mm de longueur et 50 mm d'épaisseur permet de résister au chargement réel. Il est montré que la déformation maximale atteinte dans la membrane et dans la liaison flexible est bien inférieure à la déformation à rupture du matériau et donc que le dimensionnement de la cloison permet de résister à la pression de service. Afin d'utiliser des méthodes de fabrication adaptables à l'échelle réelle et pour diminuer le temps et le coût de fabrication et de transport, il a été proposé d'utiliser une liaison flexible constituée de quatre pièces distinctes. Dans le même objectif, il est proposé de fabriquer la liaison flexible en décalant des plis de préimprégné pour obtenir l'épaisseur décroissante désirée alors que la pièce était auparavant usinée. Enfin, la membrane peut être fabriquée à partir de préimprégné UD mis bout à bout en alternant des couches à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$  pour assurer la continuité des fibres et pour transmettre les efforts entre les différents plis, ce qui permet de fabriquer des cloisons de 10 m de côté avec des rouleaux de préimprégné d'une largeur plus faible. Afin de tester la liaison flexible composée de quatre pièces distinctes, la fabrication de la liaison flexible par décalage de plis et le bout à bout avec des plis d'UD, des essais ont été fait en utilisant ces méthodes et sont présentés dans la section suivante.

## 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application

### 5.2.1. Objectifs

Les essais sur membranes circulaires présentés dans le chapitre 3 ont montré la réponse d'une membrane sous pression dans le cas simple d'une géométrie, d'un chargement et de conditions aux limites axisymétriques. Ils ont permis de montrer que l'ajout d'une liaison flexible permet d'augmenter significativement la tenue de la membrane tout en maîtrisant l'ajout de masse de la structure. Les essais sur membranes carrées présentés dans le chapitre 4 ont permis d'étudier la réponse d'une membrane dont la forme correspond à celle des cloisons. Les cloisons de compartimentage des flotteurs de BW Ideol étant de forme carrée ou rectangulaire, ces résultats permettent de valider la solution de membrane composite et l'utilisation d'une liaison flexible pour optimiser la tenue de la membrane ainsi que l'utilisation d'un stratifié orthotrope qui résiste à une pression plus grande qu'un stratifié quasi-isotrope. Afin de se rapprocher encore davantage des cloisons de BW Ideol, des essais ont été réalisés avec un nouveau montage d'essai permettant de se rapprocher de la configuration de l'application et d'utiliser quatre pièces constituant la liaison flexible et d'employer les méthodes de fabrication présentées dans la section précédente.

### 5.2.2. Conception du montage d'essai

Contrairement au premier montage d'essai utilisé pour les essais présentés dans les chapitres 3 et 4 qui était circulaire et adaptable pour tester des membranes carrées, le montage conçu ici a une forme carrée. Une table rainurée (figure 5.13) a été utilisée pour la fixation de la membrane testée.



FIGURE 5.13. – Table rainurée utilisée pour le bridage du montage d'essai carré

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application

Le fonctionnement global du montage est similaire au montage précédent mais se distingue par le fait que de l'eau est utilisée pour la mise sous pression de la membrane par souci de simplicité d'approvisionnement et d'évacuation à la fin de l'essai. Le montage (figure 5.14 et 5.15) se compose :

- D'une plaque en acier de 12 mm d'épaisseur servant de fond au montage et au raccordement de l'arrivée d'eau et de la mesure de pression ;
- D'une membrane en EPDM assurant l'étanchéité du montage notamment au moment de la rupture de la membrane composite ;
- De la membrane composite testée ;
- De quatre liaisons flexibles distinctes ;
- De quatre plats en acier permettant la répartition de l'effort de serrage sur les liaisons flexibles et une condition aux limites contrôlée (flexion négligeable) ;
- De 12 brides, 12 cales et 12 boulons en T (M16 classe 12.9) assurant le serrage de la membrane composite.

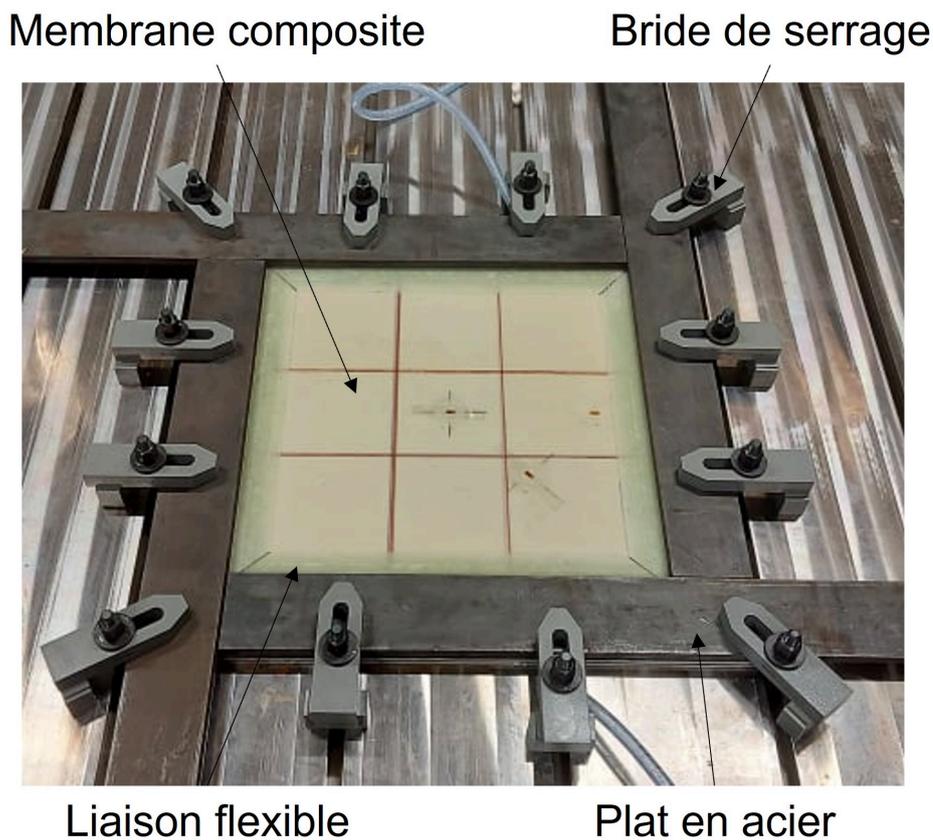


FIGURE 5.14. – Photographie du montage d'essai carré

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application

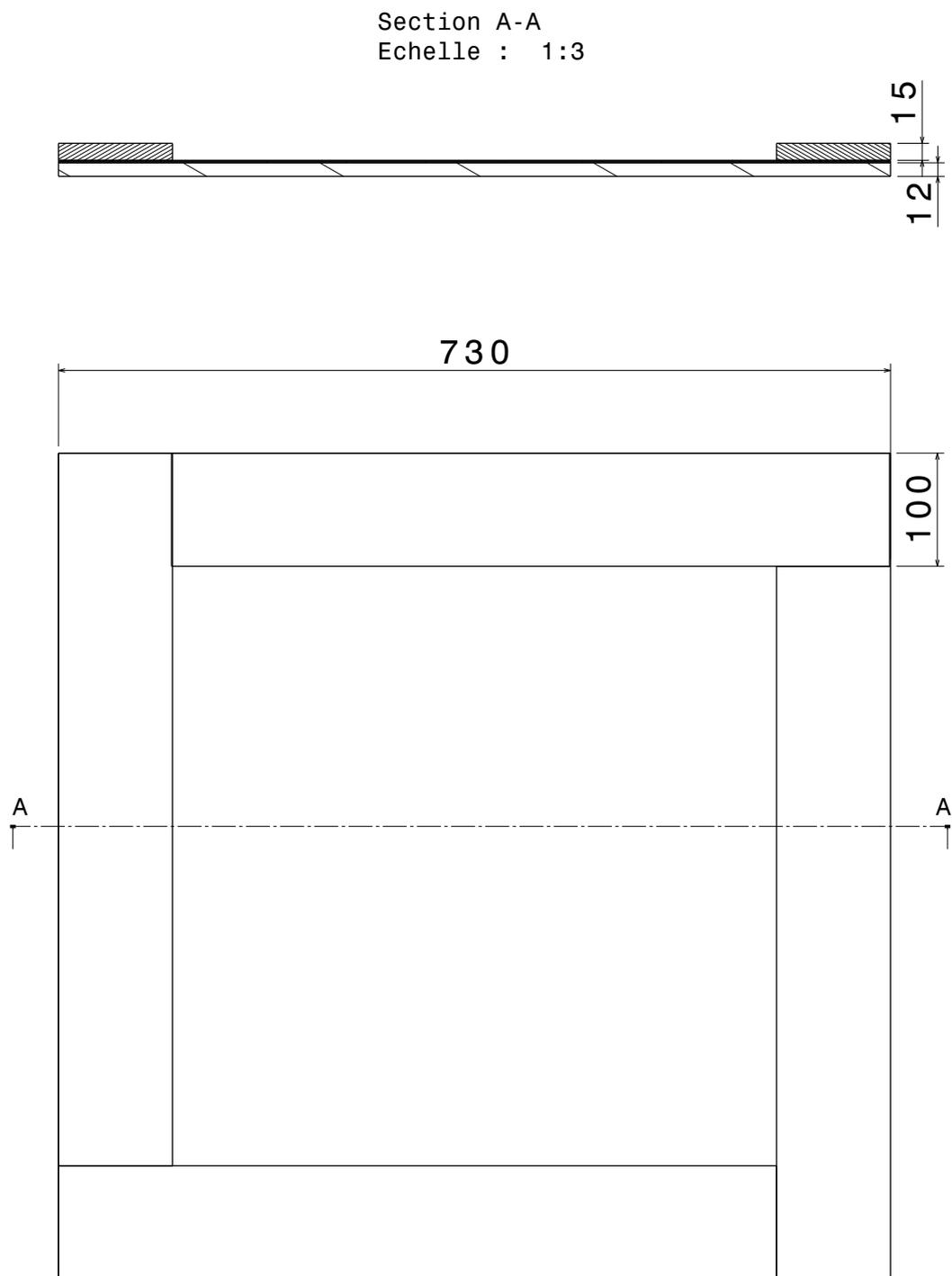


FIGURE 5.15. – Dessin du montage d'essai carré

### 5.2.3. Essais réalisés

#### 5.2.3.1. Essai sur membrane orthotrope boulonnée

**Configuration de l'essai** Dans l'optique d'utiliser la méthode du bout à bout présenté dans la section 5.1.5, un préimprégné de verre/époxy unidirectionnel est utilisé (SGL SIGRAPREG U150-0/NF-E701/40%). Un stratifié orthotrope  $[0/90]_{2s}$  est utilisé car le stratifié orthotrope a permis d'obtenir une pression à rupture plus grande que le stratifié quasi-isotrope dans le chapitre 4. Une liaison flexible est conçue de la même manière que dans les cas précédent en utilisant le critère de pression spécifique. Tout comme précédemment, il a une forme triangulaire mais a cette fois-ci une longueur de 42 mm et une épaisseur de 6,4 mm. Il est fabriqué à partir d'un UD de verre préimprégné de résine époxy (Hexcel M9.6) de fort grammage surfacique ( $1200 \text{ g/m}^2$ ) afin d'obtenir une épaisseur importante avec un nombre limité de plis. La séquence de drapage utilisée pour sa fabrication est  $[0/90/45/-45]_s$  pour obtenir un comportement quasi-isotrope. La déformation est mesurée par des jauges de déformation collées sur les zones présentées sur la figure 5.16 et la pression est mesurée par un manomètre.

**Résultat** L'essai a été réalisé jusqu'à une pression de 2,8 bar pour une déformation au centre maximale de 0,5% alors que la modélisation par éléments finis ayant servi à dimensionner la liaison flexible prévoyait une rupture à une pression de 7,3 bar avec une zone de concentration des déformations au centre des bords de la membrane. L'essai a été arrêté à cause d'une fuite d'eau alors que la pression continuait d'augmenter mais la membrane a tout de même été endommagée. Contrairement à la membrane orthotrope présentée dans le chapitre 4 pour laquelle une fissure était apparue au centre du bord de la membrane, la rupture est ici apparue dans l'angle de la membrane comme on peut le voir sur la figure 5.16 et sur un zoom sur la zone de rupture sur la figure 5.17.

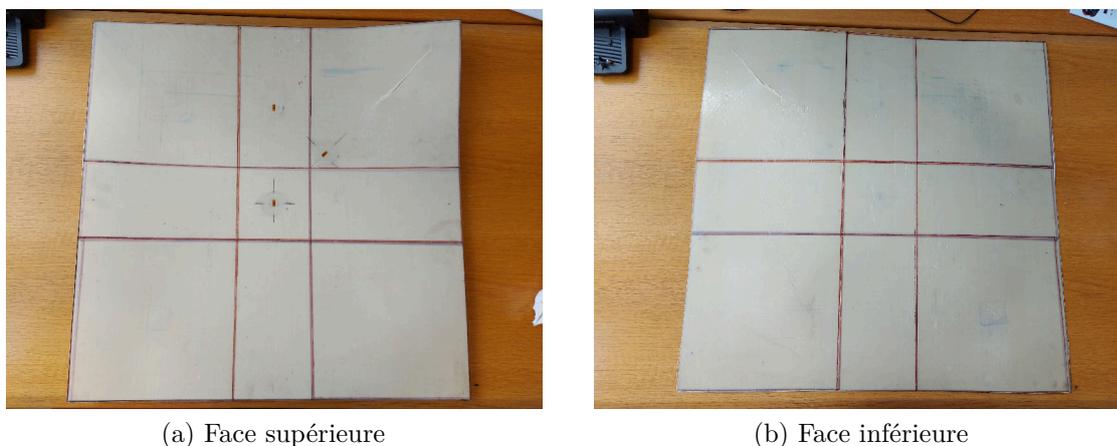


FIGURE 5.16. – Membrane carrée orthotrope boulonnée après rupture

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application



FIGURE 5.17. – Zone de rupture de la membrane carrée orthotrope boulonnée à la fin de l'essai

La rupture est apparue dans l'angle de la membrane sous l'intersection des deux liaisons flexibles. Il semblerait que la rupture soit liée à la faible tenue en traction/compression à  $45^\circ$ . Si le stratifié orthotrope était le plus performant dans le cas de l'utilisation d'une liaison flexible unique, ce nouveau résultat montre que les directions à  $+45^\circ$  et  $-45^\circ$  doivent être renforcées.

### 5.2.3.2. Essai sur membrane quasi-isotrope boulonnée

**Configuration de l'essai** Afin d'améliorer la tenue de la membrane, un stratifié quasi-isotrope est utilisé afin de renforcer les directions correspondant aux diagonales de la membrane pour augmenter la résistance à  $45^\circ$ . La membrane est fabriquée sous forme de stratifié avec la séquence de drapage  $[45/-45/90/0]_s$ , la direction  $0^\circ$  correspondant à une direction normale au bord de la membrane. Cet ordre d'empilement est fait car les directions  $0^\circ$  et  $90^\circ$  sont les directions de sollicitation principale d'une membrane carrée comme cela a été montré dans le chapitre précédent et les plis à  $45^\circ$  et  $-45^\circ$  sont situés sur les peaux extérieures pour limiter la flexion dans cette direction dans les angles de la membrane. L'essai est réalisé avec le même système de mesure que lors de l'essai précédent mais, cette fois-ci, un marquage du bord de la membrane est fait afin d'évaluer le glissement de celle-ci par rapport aux liaisons flexibles.

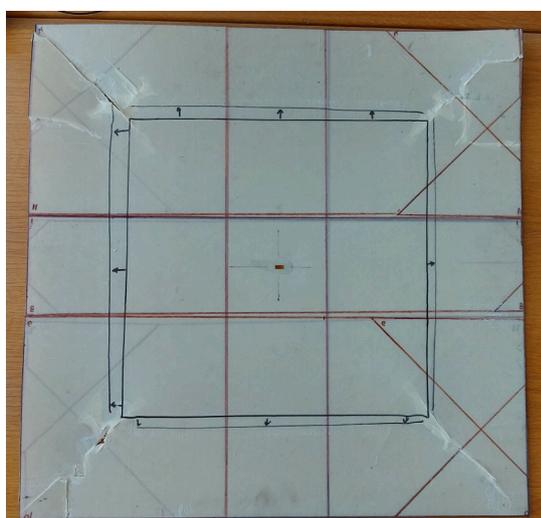
**Résultat** L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane à une pression de 4,4 bar, soit une augmentation de 57% par rapport à la membrane orthotrope. La déformation mesurée à cette pression vaut 0,8%. La figure 5.18 montre la membrane gonflée à la fin de l'essai.

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application



FIGURE 5.18. – Membrane carrée quasi-isotrope boulonnée après rupture

Sur la figure 5.19, on peut voir que la membrane a rompu à ses quatre coins.



(a) Face supérieure



(b) Face inférieure

FIGURE 5.19. – Zones de rupture de la membrane carrée quasi-isotrope boulonnée

Cette rupture dans les coins de la membrane est due à un glissement de la membrane qui a entraîné une compression des coins produisant un flambement menant à la rupture. En effet, on peut voir sur la face supérieure de la membrane

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application

les deux traits noirs correspondant aux positions initiale et finale du bord de la membrane. Celui-ci vaut entre 14 et 27 mm selon la zone considérée. La figure 5.20 montre un coin de la membrane où le flambement s'est produit. Lors de l'essai sur la membrane orthotrope, le marquage des bords de la membrane n'avait pas été fait et le glissement n'avait pas pu être identifié. Ce nouvel essai permet de montrer que la membrane glisse et que ce glissement crée un flambement au bord de la membrane. Cela signifie que le serrage n'était pas suffisant pour fixer la membrane. Afin d'améliorer ce résultat et éviter le glissement de la membrane composite, une autre solution d'assemblage a été testée, celle-ci est présentée dans la section suivante.



FIGURE 5.20. – Zone de rupture de la membrane carrée quasi-isotrope boulonnée après rupture

### 5.2.3.3. Essai sur membrane quasi-isotrope boulonnée et collée aux liaisons flexibles

**Configuration de l'essai** Dans le but d'éviter le glissement de la membrane composite, la fixation de celle-ci est ici faite avec le boulonnage utilisé précédemment et également un collage de la membrane sur les liaisons flexibles. Le collage est fait sur la surface se trouvant sous les plats en acier entre la membrane et les liaisons flexible comme représenté sur la figure 5.21.

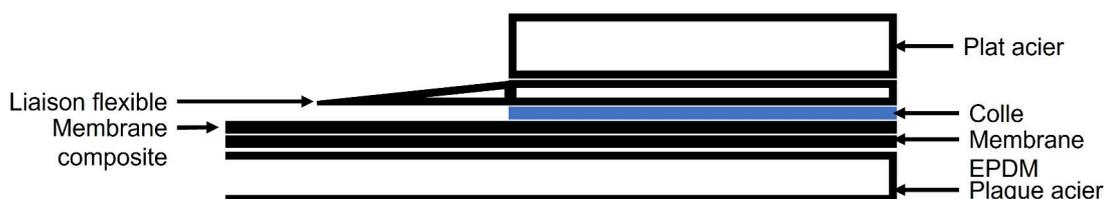


FIGURE 5.21. – Zone de collage entre la membrane composite et la liaison flexible

La colle utilisée est un adhésif structural époxy pour collage mince Sicomin ISOBOND SR 7100 / SD 7106. Une épaisseur de 0,2 mm est appliquée. La même membrane composite est testée avec les mêmes liaisons flexibles que dans l'essai précédent réalisé sans collage.

**Résultat** L'essai a été réalisé jusqu'à la rupture de la membrane composite à une pression de 6,75 bar, soit une augmentation de 53% par rapport à l'essai précédent. La jauge a mesuré une déformation de 1,3%, soit une augmentation de 63% mais la modélisation numérique ayant permis de dimensionner la liaison flexible prévoyait une déformation de 1,9%, ce qui signifie que le résultat pourrait être encore amélioré. Aucun glissement de la membrane n'a été observé. Le collage a donc permis de fixer correctement la membrane. La figure 5.22 montre la membrane à la fin de l'essai. On peut voir que la membrane n'a pas glissé.

La figure 5.23 montre la membrane avec les liaisons collées après l'essai. On peut voir que la membrane est endommagée à ses quatre coins (qu'on peut mieux distinguer sur le zoom sur une zone de rupture sur la figure 5.24). Contrairement à la membrane précédente, cette rupture n'est pas liée à un flambement car la membrane n'a pas glissé. Un décalage entre les liaisons flexibles a été observé comme cela peut être visible sur la figure 5.25. On peut alors imaginer que ce décalage a provoqué un cisaillement de la membrane entraînant sa rupture. Bien que les liaisons flexibles utilisées sont identiques, on peut imaginer un léger déséquilibre lié à leur fabrication et à leur assemblage sur le montage d'essai.

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application

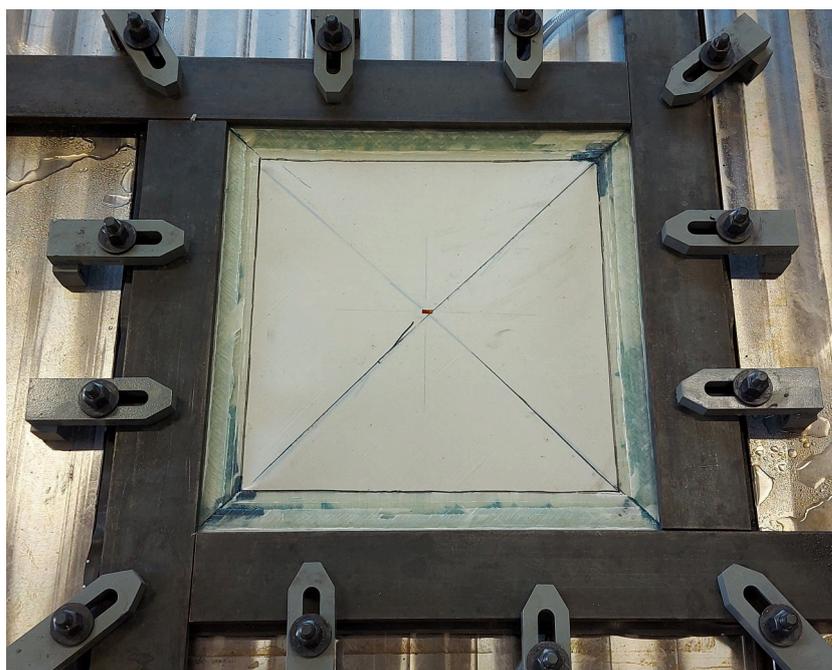
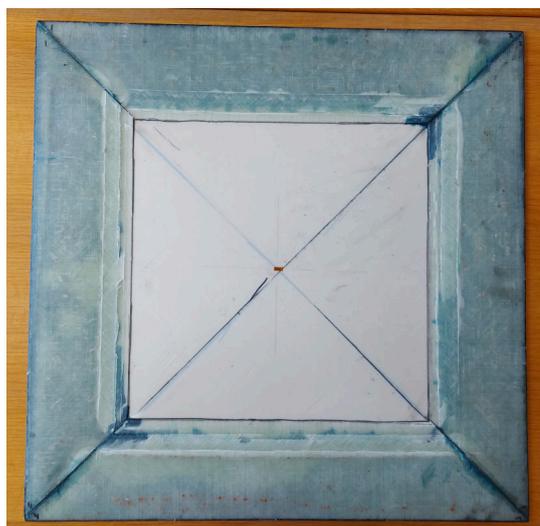
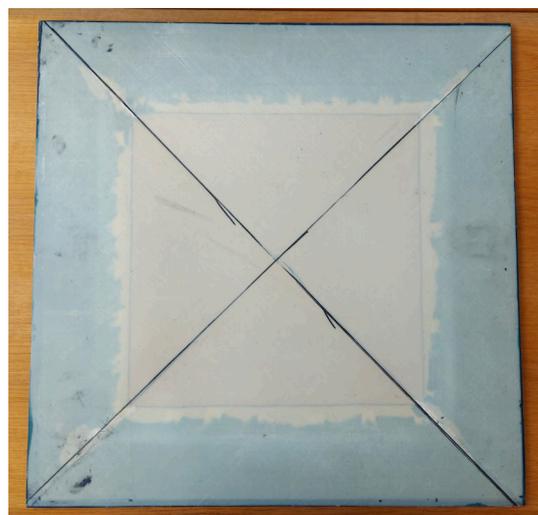


FIGURE 5.22. – Membrane carrée boulonnée et collée à la fin de l'essai



(a) Face supérieure



(b) Face inférieure

FIGURE 5.23. – Membrane carrée boulonnée et collée après rupture

5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application



FIGURE 5.24. – Zone de rupture de la membrane carrée boulonnée et collée



FIGURE 5.25. – Décalage entre deux liaisons flexibles lors de l'essai de la membrane carrée boulonnée et collée

#### 5.2.3.4. Conclusion

Les essais réalisés avec le nouveau montage d'essai ont permis de tester des configurations plus réalistes en vue de l'application de la solution de membrane composite pour la conception des cloisons de compartimentage des flotteurs de BW Ideol. Alors qu'auparavant la tenue de la membrane était maximisée grâce à l'utilisation d'une liaison flexible constituée d'une seule pièce, les nouveaux essais réalisés l'ont été avec l'utilisation d'une liaison flexible composée de quatre pièces distinctes, ce qui est davantage envisageable pour la fabrication, le transport et l'assemblage dans le cas des cloisons. D'autre part, un matériau unidirectionnel a été utilisé alors qu'auparavant des tissés étaient utilisés pour fabriquer les membranes. Comme cela a été montré dans la section 5.1.5, cela permet de fabriquer les cloisons avec des préimprégnés. La liaison flexible a également été faite avec une méthode de fabrication permettant de réduire le temps, le coût et la complexité de la fabrication. Ces nouveaux essais réalisés ont également montré les limites des configurations testées. Le premier essai sur membrane orthotrope a conduit à un résultat bien en-deçà du résultat attendu avec la modélisation par éléments finis. Alors qu'une pression de rupture de 7,3 bar était prévu, une pression de seulement 2,8 bar a été atteinte. En l'absence de marquage du bord de la membrane, le glissement de celle-ci n'a été constatée qu'au cours de l'essai suivant réalisé sur la membrane quasi-isotrope qui avait été choisie afin de renforcer les directions à 45° où la rupture avait eu lieu sur la membrane orthotrope. L'essai réalisé sur la membrane quasi-isotrope et le marquage de son bord a permis de montrer que le boulonnage utilisé n'a pas permis de fixer correctement cette dernière et un glissement de celle-ci s'est produit, entraînant un flambement de ses coins menant à sa rupture. L'essai suivant réalisé avec une membrane boulonnée mais également collée a permis de résoudre le problème de glissement et une pression supérieure a été atteinte. La rupture est tout de même apparue dans les angles de la membrane alors qu'il avait été montré dans le chapitre 4 que la zone critique était le centre des bords de la membrane. La déformation atteinte au centre vaut 1,3% alors que la modélisation par éléments finis prévoit 1,9%. Cette rupture est causée par le décalage qui se produit entre les différentes liaisons flexibles. Cela constitue donc un axe à améliorer afin d'éviter la rupture dans les angles de la membrane et retrouver le cas où la zone de rupture se trouve au centre des bords de la membrane qui est effectivement prévu par la modélisation par éléments finis. On peut imaginer augmenter l'épaisseur sur cette zone en augmentant le nombre de plis lors de la stratification. Le nouveau montage d'essai est adaptable et pourra servir dans des travaux futurs à tester des membranes plus grandes (jusqu'à 1280 mm contre 530 mm comme présenté dans ce chapitre) et évaluer si un effet d'échelle peut être présent quant à la résistance de la membrane.

# Conclusion et perspectives

Les travaux réalisés au cours de cette thèse de Doctorat ont permis d'étudier une solution originale pour le cloisonnage des flotteurs de BW Ideol. Alors que les cloisons actuelles sont fabriquées en béton armé ou en acier, une solution de type membrane en matériau composite a été étudiée pour remplacer les cloisons en béton armé. Alors qu'une plaque en flexion connaît un gradient de contrainte dans son épaisseur, passant de la traction sur une peau à la compression sur la peau opposée et avec donc son feuillet moyen non-sollicité, une membrane ne présente pas de gradient de contrainte dans son épaisseur : son intégralité est en traction et toute la matière est sollicitée, ce qui constitue une solution plus optimale bien que la membrane ne participe pas à la tenue structurale du flotteur : elle ne résiste qu'à la pression appliquée par un compartiment rempli d'eau en situation accidentelle.

Afin de valider expérimentalement la solution de membrane composite, un montage d'essais a été conçu afin de réaliser des essais de gonflement qui se rapprochent, de part le chargement et les conditions aux limites, de la sollicitation des cloisons des flotteurs de BW Ideol. Le montage d'essais consiste à mettre sous pression une membrane dont le bord est fixé. Les cloisons de BW Ideol ayant une taille de l'ordre de 10 mètres de côté, les essais sont effectués à une échelle réduite pour être réalisables en laboratoire. La taille du montage d'essais a permis de réaliser des essais avec un rapport épaisseur sur longueur de la structure testée inférieure à  $1/245$  qui permet de vérifier les hypothèses d'une membrane.

Les premiers essais réalisés sur des membranes circulaires ont permis de montrer qu'il est nécessaire d'ajouter une liaison flexible afin de maximiser la tenue de la membrane. En effet, sans l'utilisation de cette pièce, la membrane connaît une rupture prématurée due à la flexion au niveau de sa fixation. La liaison flexible permet alors de diminuer la courbure au bord de la membrane et ainsi d'éviter une concentration de déformation sur cette zone. Sa géométrie a été optimisée afin de maximiser la pression spécifique qui prend en compte la pression à rupture mais également la masse de l'ensemble membrane - liaison flexible. Les résultats expérimentaux ont montré que l'utilisation de la liaison flexible optimale mène à une augmentation de 89% de la pression spécifique sur les membranes circulaires.

Des essais sont ensuite réalisés en effectuant une mesure de champ en utilisant la corrélation d'images numériques en trois dimensions. Cela permet d'obtenir le champ complet de déplacements et de déformations alors qu'auparavant les déformations étaient mesurées sur des zones ponctuelles par des jauges de déformation.

## *5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application*

A partir des coordonnées de la membrane dans son état déformé, les courbures principales de la membrane peuvent être calculées et, à partir de celles-ci et de l'équation d'équilibre d'une membrane sous pression, les contraintes principales peuvent être directement calculées sans avoir besoin de connaître le comportement du matériau utilisé. Les essais réalisés ont permis de montrer que cette mesure permet effectivement de connaître les contraintes au sein de la membrane. Cet essai pourrait donc constituer une méthode permettant d'étudier le comportement mécanique d'un matériau composite sous chargement biaxial.

Afin de démontrer l'importance de la fixation du bord de la membrane, des essais ont été réalisés avec des membranes non-fixées. Il a été montré que les membranes non-fixées glissent, ce qui provoque une compression circonférentielle du bord de la membrane entraînant un flambement menant à la rupture de la membrane. Dans cette configuration, la pression à rupture a été divisée par 20 par rapport à la membrane fixée. Cela montre que la fixation du bord de la membrane est d'une importance capitale.

Afin de se rapprocher de la configuration des cloisons de BW Ideol, le montage d'essais a été adapté pour tester des membranes de forme carrée. Cela a été fait en ajoutant un masque en carbone permettant de masquer la forme circulaire de la membrane. De manière similaire aux membranes circulaires, il a été montré l'intérêt d'utiliser une liaison flexible pour maximiser la tenue de la membrane tout en maîtrisant la masse de la structure. La pression à rupture a été multipliée par 4,6 et la pression spécifique a été multipliée par 2,4 grâce à l'utilisation de la liaison flexible. Ces premiers essais ont été effectués sur des membranes quasi-isotropes. En constatant que les contraintes maximales principales sont orientées selon des directions orthogonales aux bords de la membrane, une membrane orthotrope est testée en orientant les fibres selon ces directions. Cela a permis d'augmenter de 12% la pression à rupture (et également la pression spécifique car la masse est identique). La liaison flexible utilisée pour les deux essais ayant été dimensionnée pour la membrane quasi-isotrope, celle-ci a rompu avant la membrane lors de l'essai sur la membrane orthotrope. Cela laisse penser qu'une liaison flexible conçue pour la membrane orthotrope aurait permis d'obtenir un gain de pression encore plus important. Ce résultat permet néanmoins de valider la solution de membrane orthotrope avec liaison flexible.

Des membranes avec entaille sont ensuite testées pour évaluer la tenue des membranes en présence d'une concentration de contrainte. Il a été observé expérimentalement que la pression à rupture d'une membrane avec entaille est 20 fois plus petite que la pression à rupture de la même membrane sans entaille. Il a également été montré que l'utilisation d'un critère non-local consistant à moyenniser les déformations sur un volume caractéristique de rupture permet de prédire correctement la tenue de la membrane entaillée alors que ce n'est pas le cas avec l'utilisation d'un critère local de type valeur maximale.

## 5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application

Enfin, les résultats obtenus à échelle réduite sont extrapolés vers l'échelle réelle des cloisons de BW Ideol. Il est montré qu'une cloison de 3,6 mm d'épaisseur dans les dimensions des cloisons permet d'obtenir la même tenue que la membrane carrée orthotrope. Afin de déterminer les dimensions de la liaison flexible à échelle réelle, une optimisation de sa géométrie est faite avec l'utilisation du critère de pression spécifique. Il est montré qu'une liaison flexible de 500 mm de longueur et 50 mm d'épaisseur permet d'optimiser la tenue de la membrane et de tenir une pression uniforme de 0,172 MPa. Si la pression uniforme avait été utilisée pour simplifier les calculs et être capable de tester de nombreuses dimensions rapidement, un calcul est ensuite fait avec une pression hydrostatique qui correspond au chargement réel de la cloison. Il est montré que la déformation maximale dans la membrane et dans la liaison flexible est bien inférieure à la limite à rupture du matériau, ce qui confirme qu'une membrane de 3,6 mm d'épaisseur associée à une liaison flexible de 500 mm de longueur et 50 mm d'épaisseur permet de résister à la pression de service. Cette solution constitue donc une solution très légère face aux cloisons existantes en béton armé de plusieurs dizaines de millimètres d'épaisseur.

Des méthodes de fabrications plus adaptées à l'échelle réelle sont proposées, ce qui pourra se traduire dans un cadre industriel par une réduction du temps et du coût de fabrication mais également par une facilitation du transport et de l'assemblage des pièces sur le flotteur. Il est proposé de fabriquer les cloisons en assemblant bout à bout des plis de préimprégné unidirectionnel et d'alterner les plis à 0° et 90° afin d'avoir les orientations de la membrane orthotrope et d'assurer le transfert des efforts entre les plis d'une même orientation. La liaison flexible, quant à elle, peut être fabriquée en décalant les plis lors de l'empilement permettant d'obtenir l'épaisseur décroissante désirée. Il est également proposé d'avoir une liaison flexible composée de quatre pièces distinctes alors qu'à l'échelle réduite elle était constituée d'une pièce unique. Là encore, on peut imaginer que pour les cloisons cela permettrait de faciliter la fabrication, le transport et l'assemblage.

Pour tester les méthodes de fabrication, un nouveau montage d'essai est conçu et des essais sont réalisés sur des membranes et des liaisons flexibles fabriquées selon ces méthodes. Les premiers essais ont vu la membrane glisser, traduisant le fait que le serrage n'était pas suffisant. Comme pour les membranes non-fixées testées précédemment, le glissement a entraîné un flambement des coins de la membrane causant leur rupture. Pour résoudre ce problème, le serrage a été complété par le collage de la membrane sur la liaison flexible pour éviter son glissement. Si la pression à rupture a été considérablement augmentée, la rupture a également eu lieu dans les coins de la membrane. La cause peut être un décalage de deux parties de la liaison flexible qui crée un cisaillement hors plan de la membrane. La rupture est donc différente par rapport aux premiers essais réalisés sur les membranes carrées où la rupture apparaissait au centre des bords de la membrane où la modélisation par éléments finis prédit effectivement la valeur maximale de contrainte et de

*5. Application à la conception d'une cloison à échelle réelle – 5.2. Essais à échelle réduite se rapprochant de la configuration de l'application*

déformation. Ces essais ont néanmoins permis de tester les nouvelles méthodes de fabrication et d'obtenir des résultats essentiels afin de pouvoir les appliquer à l'échelle réelle.

Afin de compléter ces travaux, les essais avec le nouveau montage d'essai pourraient être poursuivis avec l'objectif d'éviter la rupture dans les coins de la membrane. Pour cela, une solution pourrait être d'augmenter le nombre de plis du stratifié et donc l'épaisseur de la membrane sur les zones où la rupture a lieu. Cela permettrait d'augmenter la résistance de cette zone pour éviter la rupture due au cisaillement de la membrane causé par le décalage de deux parties de la liaison flexible. Une autre solution pourrait être de lier les pièces constituant la liaison flexible pour éviter leur décalage. D'un point de vue industriel, il semble plus facile d'augmenter le nombre de plis sur les zones où l'épaisseur doit être augmentée.

Ces travaux pourraient également être complétés par des essais à une échelle intermédiaire entre l'échelle réduite et l'échelle réelle. Cela permettrait d'évaluer si un effet d'échelle est présent quant à la résistance de la structure.

Enfin, si ces travaux ont permis de valider la solution de membrane composite pour le cloisonnage des flotteurs de BW Ideol en montrant qu'une cloison de quelques millimètres est capable de résister à la pression de service, il reste à inscrire cette solution dans une démarche industrielle en appliquant les standards et normes du domaine de l'éolien flottant.

# Bibliographie

- [1] CYCLECO. *Analyse Du Cycle de Vie de La Production d'électricité d'origine Éolienne En France*. Rapport final. ADEME, 2015 (cf. p. 7).
- [2] Thomas CHOISNET, Mathieu FAVRÉ, Maria LYUBIMOVA et Etienne ROGIER. « A Robust Concrete Floating Wind Turbine Foundation for Worldwide Applications ». In : *Grand Renewable Energy*. Tokyo, Japan, 2014 (cf. p. 7).
- [3] Felice RUBINO, Antonio NISTICÒ, Fausto TUCCI et Pierpaolo CARLONE. « Marine Application of Fiber Reinforced Composites : A Review ». In : *Journal of Marine Science and Engineering* 8.1 (6 jan. 2020), p. 26. ISSN : 2077-1312. DOI : [10.3390/jmse8010026](https://doi.org/10.3390/jmse8010026). URL : <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/1/26> (visité le 15/10/2020) (cf. p. 8).
- [4] A.P MOURITZ, E GELLERT, P BURCHILL et K CHALLIS. « Review of Advanced Composite Structures for Naval Ships and Submarines ». In : *Composite Structures* 53.1 (juill. 2001), p. 21-42. ISSN : 02638223. DOI : [10.1016/S0263-8223\(00\)00175-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00175-6). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822300001756> (visité le 28/10/2020) (cf. p. 8).
- [5] D.W. CHALMERS. « The Potential for the Use of Composite Materials in Marine Structures ». In : *Marine Structures* 7.2-5 (jan. 1994), p. 441-456. ISSN : 09518339. DOI : [10.1016/0951-8339\(94\)90034-5](https://doi.org/10.1016/0951-8339(94)90034-5). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0951833994900345> (visité le 28/10/2020) (cf. p. 8).
- [6] Y LEMIERE. « L'évolution des matériaux composites dans la construction des sous-marins ». In : *La construction navale en composites*. Paris : IFREMER, 7-9 déc. 1992, p. 10 (cf. p. 8).
- [7] Jean-François CARON et Olivier BAVEREL. « Composites et construction, propositions et réalisations" modélisation et étude expérimentale" ». In : (jan. 2010) (cf. p. 9).
- [8] Sylvain CHATAIGNER, Jean-François CARON, Karim BENZARTI, Marc QUIERTANT et Christophe AUBAGNAC. « Characterization of FRP-to-Concrete Bonded Interface : Description of the Single Lap Shear Test ». In : *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 13.9 (oct. 2009), p. 1073-1082. ISSN : 1964-8189, 2116-7214. DOI : [10.1080/19648189.2009.9693174](https://doi.org/10.1080/19648189.2009.9693174). URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2009.9693174> (visité le 03/08/2021) (cf. p. 9).

- [9] Patrice HAMELIN. *Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites*. Ref : TIP100WEB - "Plastiques et composites". 10 avr. 2002. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/applications-des-composites-42140210/renforcement-des-ouvrages-d-art-par-materiaux-composites-am5615/> (visité le 19/03/2021) (cf. p. 9).
- [10] Thierry CHAUSSADENT et Jean-Luc CLÉMENT. *Renforcement des ouvrages en béton par collage de composites : bilan de deux opérations de recherche du LCPC*. Paris : Laboratoire central des ponts et chaussées, 2006. ISBN : 978-2-7208-2453-1 (cf. p. 9).
- [11] Anne HALLONET, Laurent MICHEL et Emmanuel FERRIER. « Comportement mécanique d'un polymère époxy renforcé par fibres de lin longues stratifié au contact pour le renforcement externe de structures en béton armé. » In : (2015), p. 9 (cf. p. 9).
- [12] Moetaz EL-HAWARY, Husain AL-KHAIAT et Sami FEREIG. « Performance of Epoxy-Repaired Concrete in a Marine Environment ». In : *Cement and Concrete Research* 30.2 (fév. 2000), p. 259-266. ISSN : 00088846. DOI : [10.1016/S0008-8846\(99\)00242-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00242-2). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884699002422> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 9).
- [13] M LONG, C DJELAL, S KESTELOOT et B BIGOURDAN. « DURABILITY OF CFRP-CONCRETE BONDING IN A MARINE ENVIRONMENT ». In : (2012), p. 8 (cf. p. 9).
- [14] Association Française de GÉNIE CIVIL. *Réparation et Renforcement Des Structures En Béton Au Moyen Des Matériaux Composites*. 2011 (cf. p. 9).
- [15] *Système de Renforcement FRP | S&P France*. URL : <https://www.sp-reinforcement.fr/fr-FR/systemes/systeme-de-renforcement-frp> (visité le 19/03/2021) (cf. p. 9).
- [16] *DNV-OS-J103 : Design of Floating Wind Turbine Structures*. 2013 (cf. p. 10).
- [17] B. SZELINSKI, H. LANGE, C. RÖTTGER et al. « Development of an Innovative Sandwich Common Bulkhead for Cryogenic Upper Stage Propellant Tank ». In : *Acta Astronautica* 81.1 (déc. 2012), p. 200-213. ISSN : 00945765. DOI : [10.1016/j.actaastro.2012.06.025](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.06.025). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0094576512002639> (visité le 14/01/2021) (cf. p. 12).
- [18] Sang-Hoon SHIN et Dae-Eun KO. « A Study on Minimum Weight Design of Vertical Corrugated Bulkheads for Chemical Tankers ». In : *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 10.2 (mars 2018), p. 180-187. ISSN : 20926782. DOI : [10.1016/j.ijnaoe.2017.06.005](https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.06.005). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2092678216306963> (visité le 14/01/2021) (cf. p. 12).

- [19] Indonesia Marine EQUIPMENT. *Watertight Bulkheads Construction, Collision Bulkhead*. Indonesia Marine Equipment. 15 mai 2020. URL : <https://inameq.com/hull-and-outfitting/collision-bulkhead-construction/> (visité le 29/03/2021) (cf. p. 12).
- [20] S SREYAS KRISHNAN, R ANISH et K E GIRISH. « Stress Analysis of a Rear Pressure Bulkhead of the Fuselage Structure and Fatigue Life Estimation ». In : *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 2.2 (2013), p. 170-177 (cf. p. 12).
- [21] Bruno CASTANIE, Christophe BOUVET et Malo GINOT. « Review of Composite Sandwich Structure in Aeronautic Applications ». In : *Composites Part C : Open Access* 1 (août 2020), p. 100004. ISSN : 26666820. DOI : [10.1016/j.jcomc.2020.100004](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666682020300049> (visité le 17/06/2021) (cf. p. 13).
- [22] Jean-Marie BERTHELOT. « Mécanique des Matériaux et Structures Composites ». In : (), p. 667 (cf. p. 13).
- [23] S VENKATESH, M G KUTTY, B VARUGHESE et al. « Design, Development and Certification of Composite Rear Pressure Bulkhead for a Light Transport Aircraft ». In : *International Conference on Composite Materials* 1 (2011), p. 6 (cf. p. 13).
- [24] F. DAGHIA, E. BARANGER, D.-T. TRAN et P. PICHON. « A Hierarchy of Models for the Design of Composite Pressure Vessels ». In : *Composite Structures* 235 (mars 2020), p. 111809. ISSN : 02638223. DOI : [10.1016/j.compstruct.2019.111809](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111809). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822319345799> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 14).
- [25] Chaoming HE, Rong YU, Haoran SUN et Zilong CHEN. « Lightweight Multilayer Composite Structure for Hydrogen Storage Tank ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 41.35 (sept. 2016), p. 15812-15816. ISSN : 03603199. DOI : [10.1016/j.ijhydene.2016.04.184](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.184). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319916310771> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 14).
- [26] N. PERRY, J.C. WAHL, C. BOIS, A. PILATO et A. BERNARD. « Thick Composite Design for Hydrogen Vessels : A Contribution to Composite Design Method ». In : *CIRP Annals* 62.1 (2013), p. 139-142. ISSN : 00078506. DOI : [10.1016/j.cirp.2013.03.108](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.108). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850613001091> (visité le 03/08/2021) (cf. p. 14).
- [27] V.V. VASILIEV, A.A. KRIKANOV et A.F. RAZIN. « New Generation of Filament-Wound Composite Pressure Vessels for Commercial Applications ». In : *Composite Structures* 62.3-4 (jan. 2003), p. 449-459. ISSN : 02638223. DOI : [10.1016/j.compstruct.2003.09.019](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.09.019). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822303002575> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 14).

- [28] Aurélie PILATO, Nicolas PERRY, J.C. WAHL et C. BOIS. « Modèle de calcul analytique sur des réservoirs composite multicouche épais soumis à une pression interne et à des contraintes thermiques résiduelles ». In : (2009), p. 9 (cf. p. 14).
- [29] P.M. WILD et G.W. VICKERS. « Analysis of Filament-Wound Cylindrical Shells under Combined Centrifugal, Pressure and Axial Loading ». In : *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* 28.1 (jan. 1997), p. 47-55. ISSN : 1359835X. DOI : [10.1016/S1359-835X\(96\)00093-0](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00093-0). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X96000930> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 14).
- [30] Shah ALAM, Gregory R. YANDEK, Richard C. LEE et Joseph M. MABRY. « Design and Development of a Filament Wound Composite Overwrapped Pressure Vessel ». In : *Composites Part C : Open Access* 2 (oct. 2020), p. 100045. ISSN : 26666820. DOI : [10.1016/j.jcomc.2020.100045](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100045). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666682020300451> (visité le 17/06/2021) (cf. p. 14).
- [31] E. ÖZASLAN, B.B. INCECIK, A. YETGIN et al. « Experimental and Numerical Investigation of the Cylinder-Dome Transition Region of a Pressure Vessel ». In : *Composites Part C : Open Access* 4 (mars 2021), p. 100119. ISSN : 26666820. DOI : [10.1016/j.jcomc.2021.100119](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100119). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666682021000141> (visité le 17/06/2021) (cf. p. 14).
- [32] J. D. HUMPHREY. « Computer Methods in Membrane Biomechanics ». In : *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 1.3 (jan. 1998), p. 171-210. ISSN : 1025-5842, 1476-8259. DOI : [10.1080/01495739808936701](https://doi.org/10.1080/01495739808936701). URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01495739808936701> (visité le 04/02/2020) (cf. p. 14, 195).
- [33] Rudolph SZILARD. *Theories and Applications of Plate Analysis*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 9 jan. 2004. ISBN : 978-0-470-17287-2 978-0-471-42989-0. DOI : [10.1002/9780470172872](https://doi.org/10.1002/9780470172872). URL : <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470172872> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 14, 15, 23, 25).
- [34] Gregoire ALLAIRE, Eric BONNETIER, Gilles FRANCFORT et Francois JOUVE. « Shape Optimization by the Homogenization Method ». In : (1997), p. 42 (cf. p. 15).
- [35] G. ALLAIRE, F. JOUVE et H. MAILLOT. « Topology Optimization for Minimum Stress Design with the Homogenization Method ». In : *Structural and Multidisciplinary Optimization* 28.2-3 (sept. 2004). ISSN : 1615-147X, 1615-1488. DOI : [10.1007/s00158-004-0442-8](https://doi.org/10.1007/s00158-004-0442-8). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00158-004-0442-8> (visité le 26/05/2021) (cf. p. 15).

- [36] Ji-Hong ZHU, Wei-Hong ZHANG et Liang XIA. « Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design ». In : *Archives of Computational Methods in Engineering* 23.4 (déc. 2016), p. 595-622. ISSN : 1134-3060, 1886-1784. DOI : [10.1007/s11831-015-9151-2](https://doi.org/10.1007/s11831-015-9151-2). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s11831-015-9151-2> (visité le 26/05/2021) (cf. p. 15).
- [37] Samuel LEVY. *Bending of Rectangular Plates with Large Deflections.Pdf*. 737. Washington, DC, United States : National Advisory Committee for Aeronautics, 1942 (cf. p. 16).
- [38] Samuel LEVY. *Square Plate with Clamped Edges under Normal Pressure Producing Large Deflections.Pdf*. 740. Washington, DC, United States, 1942 (cf. p. 16).
- [39] Paul SEIDE. « Large Deflections of Rectangular Membranes under Uniform Pressure ». In : *International Journal of Non-Linear Mechanics* 12.6 (jan. 1977), p. 397-406. ISSN : 00207462. DOI : [10.1016/0020-7462\(77\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0020-7462(77)90040-3). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020746277900403> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 17, 103, 105, 126).
- [40] *ISO 16808 Metallic Materials - Sheet and Strip - Determination of Biaxial Stress-Strain Curve by Means of Bulge Test with Optical Measuring Systems*. 2014 (cf. p. 19).
- [41] M. NEUBERT et A. SOMMER. *Rectangular Shell Plating under Uniformly Distributed Hydrostatic Pressure*. Technical Memorandums 965. National Advisory Committee for Aeronautics, 1940, p. 12 (cf. p. 19).
- [42] Walter RAMBERG, Albert E MCPHERSON et Samuel LEVY. *Normal-Pressure Tests of Rectangular Plates*. NACA-TN-849. 1942 (cf. p. 19).
- [43] Albert E MCPHERSON, Walter RAMBERG et Samuel LEVY. *Normal-Pressure Tests of Circular Plates with Clamped Edges*. NACA-TN-848. 1942 (cf. p. 19).
- [44] H. HENCKY. « Die Berechnung Dünner Rechteckiger Platten Mit Verschwindender Biegungsteifigkeit ». In : *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* 1.2 (1921), p. 81-89. ISSN : 1521-4001. DOI : [10.1002/zamm.19210010201](https://doi.org/10.1002/zamm.19210010201). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/zamm.19210010201> (visité le 01/04/2021) (cf. p. 19).
- [45] August FÖPPL. *Drang und zwang : eine höhere festigkeitslehre für ingenieure*. R. Oldenbourg, 1924. 412 p. Google Books : [fu5KAAAAMAAJ](https://books.google.com/books?id=fu5KAAAAMAAJ) (cf. p. 19).
- [46] V. GROLLEAU, H. LOUCHE, V. DELOBELLE et al. « Assessment of Tension–Compression Asymmetry of NiTi Using Circular Bulge Testing of Thin Plates ». In : *Scripta Materialia* 65.4 (août 2011), p. 347-350. ISSN : 13596462. DOI : [10.1016/j.scriptamat.2011.05.003](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2011.05.003). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359646211002648> (visité le 25/02/2020) (cf. p. 19).

- [47] Milad JANBAKSHI, Faramarz DJAVANROODI et Mohammad RIAHI. « Utilization of Bulge and Uniaxial Tensile Tests for Determination of Flow Stress Curves of Selected Anisotropic Alloys ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L : Journal of Materials : Design and Applications* 227.1 (jan. 2013), p. 38-51. ISSN : 1464-4207, 2041-3076. DOI : [10.1177/1464420712451963](https://doi.org/10.1177/1464420712451963). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1464420712451963> (visité le 25/02/2020) (cf. p. 19).
- [48] Lucian LĂZĂRESCU, Ioan NICODIM, Ioan CIOBANU, Dan Sorin COMȘA et Dorel BANABIC. « Determination of Material Parameters of Sheet Metals Using the Hydraulic Bulge Test ». In : *Acta Metallurgica Slovaca* 19.1 (6 mars 2013). ISSN : 1338-1156, 1335-1532. DOI : [10.12776/ams.v19i1.81](https://doi.org/10.12776/ams.v19i1.81). URL : <http://www.qip-journal.eu/index.php/ams/article/view/81> (visité le 25/02/2020) (cf. p. 19).
- [49] Mohamed KHLIF, Moufida MHADHBI et Chedly BRADAI. « Development of Bulge Test for Aluminum Sheet Metal ». In : *Design and Modeling of Mechanical Systems - II*. Sous la dir. de Mnaouar CHOUCANE, Tahar FAKHFAKH, Hachmi Ben DALY, Nizar AIFAOUI et Fakher CHAARI. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham : Springer International Publishing, 2015, p. 331-338. ISBN : 978-3-319-17526-3 978-3-319-17527-0. DOI : [10.1007/978-3-319-17527-0\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17527-0_33). URL : [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-17527-0\\_33](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-17527-0_33) (visité le 23/10/2020) (cf. p. 19).
- [50] G. MACHADO, D. FAVIER et 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* 52.7 (sept. 2012), p. 865-880. ISSN : 0014-4851, 1741-2765. DOI : [10.1007/s11340-011-9571-3](https://doi.org/10.1007/s11340-011-9571-3). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s11340-011-9571-3> (visité le 18/04/2019) (cf. p. 19, 86, 92).
- [51] Jun-Yuan SHENG, Li-Yuan ZHANG, Bo LI, Gang-Feng WANG et Xi-Qiao FENG. « Bulge Test Method for Measuring the Hyperelastic Parameters of Soft Membranes ». In : *Acta Mechanica* 228.12 (déc. 2017), p. 4187-4197. ISSN : 0001-5970, 1619-6937. DOI : [10.1007/s00707-017-1945-x](https://doi.org/10.1007/s00707-017-1945-x). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00707-017-1945-x> (visité le 31/03/2020) (cf. p. 19).
- [52] Aaron ABOSHIO, Sarah GREEN et Jianqiao YE. « Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Neoprene Coated Nylon Woven Reinforced Composites ». In : *Composite Structures* 120 (fév. 2015), p. 386-393. ISSN : 02638223. DOI : [10.1016/j.compstruct.2014.10.015](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.10.015). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822314005339> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 19).
- [53] A. SMITS, C. RAMAULT, A. MAKRIS et al. « A Review of Biaxial Test Methods for Composites ». In : *Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures*. Sous la dir. d'E. E. GDOUTOS. Dordrecht : Springer

- Netherlands, 2007, p. 933-934. ISBN : 978-1-4020-6239-1. DOI : [10.1007/978-1-4020-6239-1\\_464](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6239-1_464) (cf. p. 19).
- [54] Y. THOLLON et C. HOCHARD. « A General Damage Model for Woven Fabric Composite Laminates up to First Failure ». In : *Mechanics of Materials* 41.7 (juill. 2009), p. 820-827. ISSN : 01676636. DOI : [10.1016/j.mechmat.2009.02.009](https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.02.009). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167663609000684> (visité le 14/06/2021) (cf. p. 24).
- [55] Ch. HOCHARD et Y. THOLLON. « A Generalized Damage Model for Woven Ply Laminates under Static and Fatigue Loading Conditions ». In : *International Journal of Fatigue* 32.1 (jan. 2010), p. 158-165. ISSN : 01421123. DOI : [10.1016/j.ijfatigue.2009.02.016](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.02.016). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112309000619> (visité le 14/06/2021) (cf. p. 24).
- [56] Jean-Charles CRAVEUR. *Modélisation par éléments finis : cours et exercices corrigés*. Paris : Dunod, 2008. ISBN : 978-2-10-052126-5 (cf. p. 35).
- [57] MOLYKOTE. *Solutions de Lubrification Pour Assemblages Vissés*. URL : <https://samaro.fr/img/doc/80-3927-02-molykote-threaded-connections.pdf> (visité le 02/06/2021) (cf. p. 37).
- [58] Robert M. JONES. « Apparent Flexural Modulus and Strength of Multimodulus Materials ». In : *Journal of Composite Materials* 10.4 (oct. 1976), p. 342-354. ISSN : 0021-9983, 1530-793X. DOI : [10.1177/002199837601000407](https://doi.org/10.1177/002199837601000407). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/002199837601000407> (visité le 16/07/2021) (cf. p. 56).
- [59] Ya-Jung LEE et Cheng-Hsien CHUNG. « Study on the Mechanical Properties of Marine FRP Laminates ». In : *Journal of Composite Materials* 37.11 (juin 2003), p. 967-983. ISSN : 0021-9983, 1530-793X. DOI : [10.1177/0021998303037011002](https://doi.org/10.1177/0021998303037011002). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998303037011002> (visité le 16/07/2021) (cf. p. 56).
- [60] Aldo COCCHI. « Analysis of compressive behaviour in fibre direction of laminated composite structures in presence of matrix degradation and stress concentrations ». Aix-Marseille Université, 2020 (cf. p. 56, 145).
- [61] *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Berlin : Springer, 2008. 1097 p. ISBN : 978-0-387-26883-5 (cf. p. 86).
- [62] Hélène HORSIN-MOLINARO, François HILD et Stéphane ROUX. *Présentation Générale de La Correlation Dimages Numeriques*. 2015 (cf. p. 86).
- [63] Damien GARCIA. « Robust Smoothing of Gridded Data in One and Higher Dimensions with Missing Values ». In : *Computational Statistics & Data Analysis* 54.4 (avr. 2010), p. 1167-1178. ISSN : 01679473. DOI : [10.1016/j.csda.2009.09.020](https://doi.org/10.1016/j.csda.2009.09.020). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167947309003491> (visité le 21/05/2021) (cf. p. 92).

- [64] J.M. WHITNEY et R.J. NUISMER. « Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations ». In : *Journal of Composite Materials* 8.3 (juill. 1974), p. 253-265. ISSN : 0021-9983, 1530-793X. DOI : [10.1177/002199837400800303](https://doi.org/10.1177/002199837400800303). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/002199837400800303> (visité le 08/07/2019) (cf. p. 141, 145).
- [65] Joël SERRA, Christophe BOUVET, Bruno CASTANIÉ et Caroline PETIOT. « Scaling Effect in Notched Composites : The Discrete Ply Model Approach ». In : *Composite Structures* 148 (juill. 2016), p. 127-143. ISSN : 02638223. DOI : [10.1016/j.compstruct.2016.03.062](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.062). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822316302264> (visité le 03/08/2021) (cf. p. 141).
- [66] Stéphanie MIOT, Christian HOCHARD et Noël LAHELLEC. « Rupture de Structures Stratifiées Avec Concentrations de Contraintes : Apport Du Volume Caractéristique de Rupture = Failure of Laminated Structures with Stress Concentrations : Use of the Fracture Characteristic Volume ». In : *JNC 16*. Sous la dir. de Philippe OLIVIER et Jacques LAMON. Toulouse, France : AMAC, juin 2009, 7 p. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00383859> (visité le 04/07/2019) (cf. p. 145).
- [67] Christian HOCHARD, Noël LAHELLEC et Cyril BORDREUIL. « A Ply Scale Non-Local Fibre Rupture Criterion for CFRP Woven Ply Laminated Structures ». In : *Composite Structures* 80.3 (2007), p. 321-326. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00106920> (visité le 04/07/2019) (cf. p. 145).
- [68] G. GIULIANO. « Mathematical Modelling of Superplastic Metal Sheet Forming Processes ». In : *Superplastic Forming of Advanced Metallic Materials*. Elsevier, 2011, p. 115-135. ISBN : 978-1-84569-753-2. DOI : [10.1533/9780857092779.2.115](https://doi.org/10.1533/9780857092779.2.115). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845697532500066> (visité le 23/10/2020) (cf. p. 188-190).

# ANNEXES

## A. Equilibre d'une membrane sous pression

Cette annexe démontre l'équation d'équilibre d'une membrane circulaire sous pression. Celle-ci est inspirée de la démonstration de Giuliano [68] dont les figures sont issues.

Considérons une membrane circulaire d'épaisseur  $s$  dont le bord est fixé subissant une pression uniforme. Représentons la membrane déformée comme une surface de révolution caractérisée par des cercles méridiens et circon-férentiels (figure .1) :

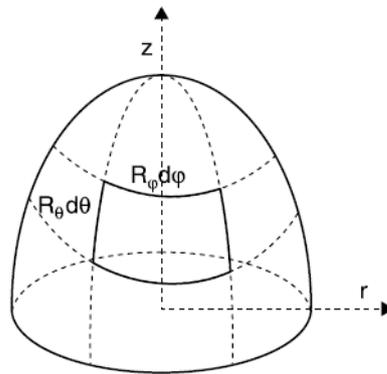


FIGURE .1. – Membrane déformée caractérisée par des cercles méridiens et circon-férentiels [68]

L'élément de volume dont les longueurs d'arcs valent  $R_\theta d\theta$  et  $R_\phi d\phi$  peut être représenté comme (figure .2) :

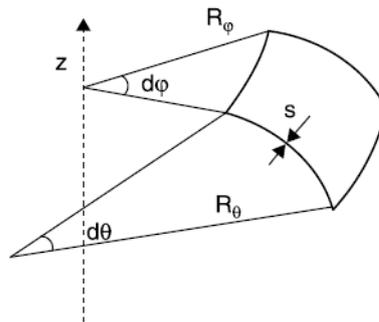


FIGURE .2. – Élément de volume dont les longueurs d'arcs valent  $R_\theta d\theta$  et  $R_\phi d\phi$  [68]

Examinons les forces agissant sur l'élément de volume (figure .3) :

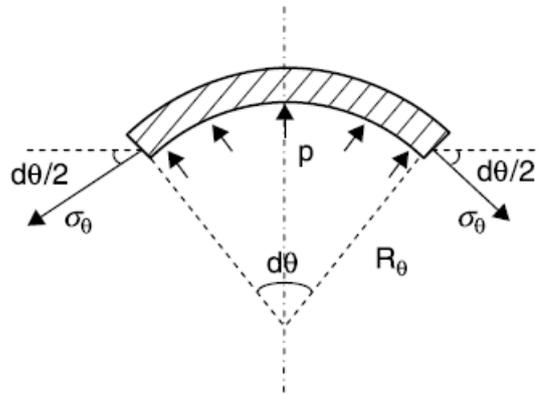


FIGURE .3. – Forces méridiennes sur l'élément de volume [68]

La force  $F_\theta$  issue de la contrainte  $\sigma_\theta$  peut être décomposée en une composante verticale  $F_{\theta v}$  et une composante horizontale  $F_{\theta h}$ . On voit que par axisymétrie les composantes horizontales s'annulent. Les composantes verticales s'additionnent. On peut écrire :

$$\sin \frac{d\theta}{2} = \frac{F_{\theta v}}{F_\theta} \quad (.1)$$

$$F_{\theta v} = F_\theta \sin \frac{d\theta}{2} \quad (.2)$$

$$F_{\theta v} = \sigma_\theta S_\theta \sin \frac{d\theta}{2} \quad (.3)$$

Avec  $S_\theta = sR_\theta d\varphi$  la surface sur laquelle s'applique la force  $F_\theta$ .

Pour  $\frac{d\theta}{2}$  petit, on a  $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{d\theta}{2}$ . On a alors :

$$F_{\theta v} = \sigma_\theta s R_\theta d\varphi \frac{d\theta}{2} \quad (.4)$$

De manière similaire, on a :

$$F_{\varphi v} = \sigma_\varphi s R_\theta d\theta \frac{d\varphi}{2} \quad (.5)$$

La force résultante de la pression appliquée peut également se décomposer en une composante verticale et horizontale sur chaque élément de volume. Les composantes horizontales s'annulent par axisymétrie. On peut écrire la composante verticale :

$$F_{Pv} = PS \quad (.6)$$

$$F_{Pv} = PR_{\theta}d\theta R_{\varphi}d\varphi \quad (.7)$$

L'équilibre sur l'élément de volume s'écrit alors :

$$2F_{\theta v} + 2F_{\varphi v} = F_{Pv} \quad (.8)$$

$$2\sigma_{\theta}sR_{\varphi}d\varphi\frac{d\theta}{2} + 2\sigma_{\varphi}sR_{\theta}d\theta\frac{d\varphi}{2} = PR_{\theta}d\theta R_{\varphi}d\varphi \quad (.9)$$

$$\frac{\sigma_{\theta}}{R_{\theta}} + \frac{\sigma_{\varphi}}{R_{\varphi}} = \frac{P}{s} \quad (.10)$$

Considérons la contrainte méridienne agissant sur la membrane (figure .4) :

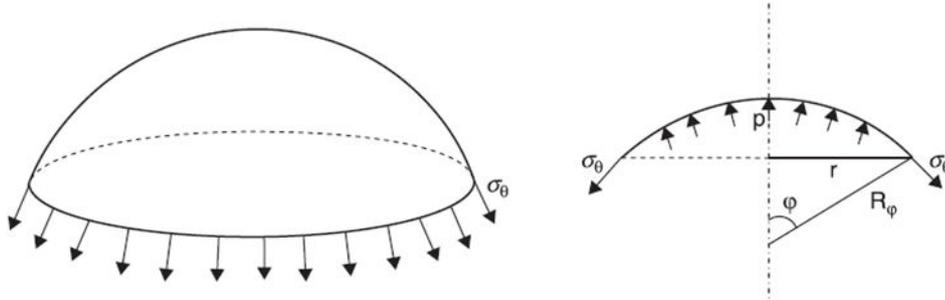


FIGURE .4. – Contrainte méridienne agissant sur la membrane [68]

On peut écrire la force verticale :

$$F_{\theta v} = \sigma_{\theta v}S = \sigma_{\theta} \sin \varphi 2\pi r s \quad (.11)$$

La force résultante de la pression appliquée sur la surface vaut :

$$F_{Pv} = P\pi r^2 \quad (.12)$$

L'équilibre s'écrit enfin :

$$F_{\theta v} = F_{Pv} \quad (.13)$$

$$\sigma_{\theta} \sin \varphi 2\pi r s = P\pi r^2 \quad (.14)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr}{2s \sin \phi} \quad (.15)$$

En remarquant que  $\sin \phi = \frac{r}{R_{\phi}}$ . La contrainte méridienne s'écrit alors :

$$\sigma_{\theta} = \frac{PR_{\phi}}{2s} \quad (.16)$$

En substituant l'expression de la contrainte méridienne dans la relation d'équilibre, on exprime la contrainte circonférentielle :

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\theta} \left( 2 - \frac{R_{\phi}}{R_{\theta}} \right) \quad (.17)$$



## B. Influence de la taille des facettes sur le calcul des contraintes à partir de la mesure des courbures principales sur des sections de la membrane

La corrélation d'images numériques en trois dimensions est faite avec plusieurs tailles de facettes et plusieurs pas entre facettes. Il est constaté que diminuer la taille et le pas des facettes entraîne une dispersion des contraintes entre les facettes comme le montre les figures .5 et .6. Ces résultats sont comparés avec le résultat de la modélisation numérique axisymétrique. Une explication peut être que les courbures sont calculées à partir de dérivées secondes des coordonnées de la membrane déformée. Prendre un pas plus petit augmente l'impact de l'erreur de mesure sur le calcul des courbures.

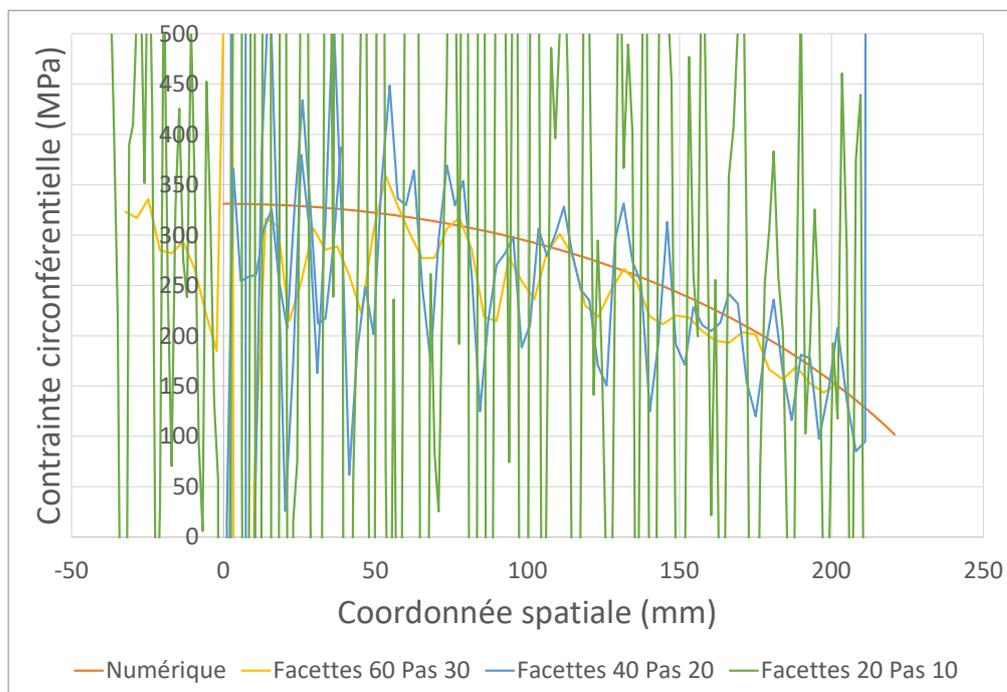


FIGURE .5. – Impact de la taille des facettes sur la contrainte circonférentielle

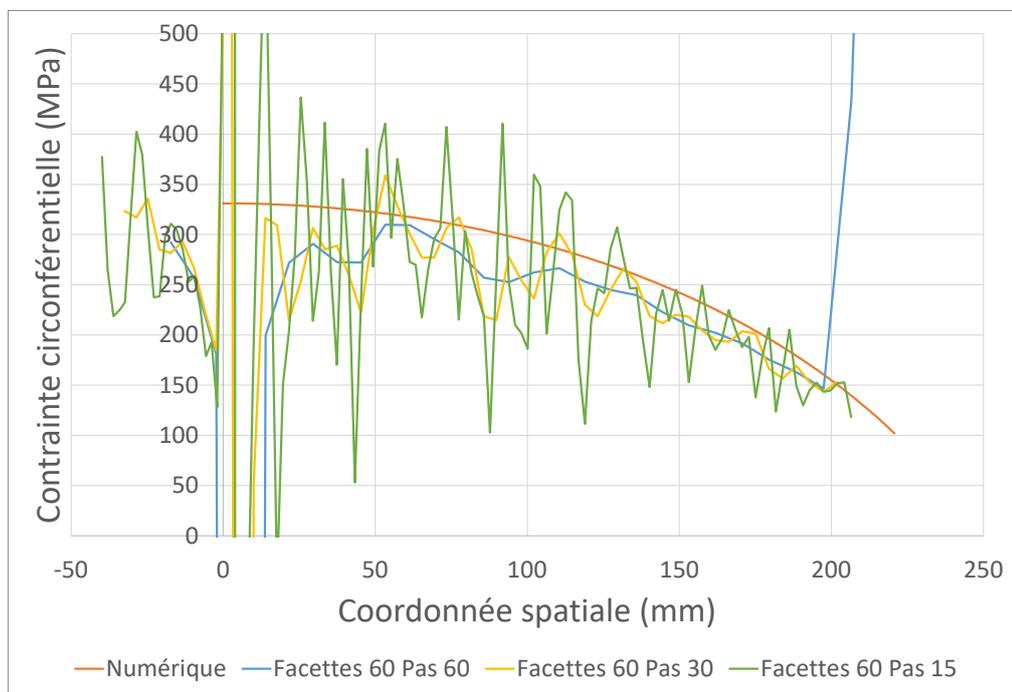


FIGURE .6. – Impact du pas entre les facettes sur la contrainte circonférentielle

## C. Méthode de calcul des courbures sur sections

Cette méthode est utilisée dans la section 3.3 pour calculer les courbures sur les sections définies comme présenté dans la même section. Cette méthode est inspirée de la méthode utilisée par Humphrey [32]. Considérons la surface axisymétrique selon  $z$  comme présentée sur la figure .7.

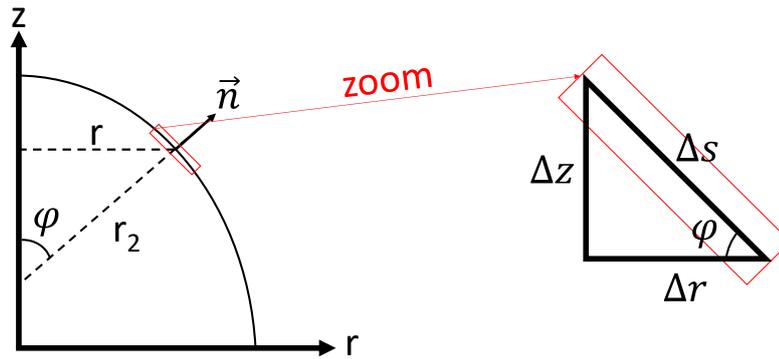


FIGURE .7. – Surface axisymétrique d'une membrane déformée

Par définition, la première courbure vaut :

$$\kappa_1 = \frac{\Delta\varphi}{\Delta s} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r} \frac{\Delta r}{\Delta s} = \cos(\varphi) \frac{\Delta\varphi}{\Delta r} \quad (.18)$$

et la seconde courbure vaut :

$$\kappa_2 = \frac{1}{r_2} = \frac{\sin(\varphi)}{r} \quad (.19)$$

Pour exprimer  $\varphi$ , on a :

$$\tan(\varphi) = \frac{\Delta z}{\Delta r} \quad (.20)$$

et donc :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\Delta z}{\Delta r}\right) \quad (.21)$$

Il suffit donc de connaître les coordonnées  $z$  et  $r$  pour calculer les courbures principales de la membrane.



## D. Calcul des contraintes principales sur une section de la membrane circulaire

Sont ici présentés les contraintes calculées à partir des coordonnées mesurées sur une section de la membrane circulaire dont les résultats sont présentés dans le chapitre 3.

La contrainte méridienne est représentée sur la figure .8. On peut voir que les résultats expérimentaux et numériques sont proches mais qu'à l'approche de  $r = 0$ , le calcul des contraintes s'éloigne des valeurs numériques.

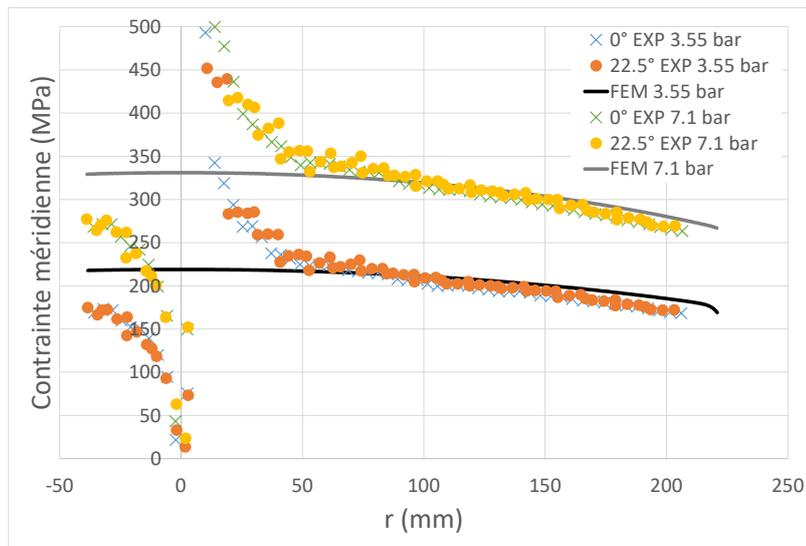


FIGURE .8. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte méridienne de la membrane circulaire avec mesure de champ

La contrainte circonférentielle a été représentée sur deux figures différentes (.9 et .10) correspondant aux deux niveaux de pression considérés pour améliorer la lisibilité car les résultats sont très dispersés notamment sur la direction à 22.5°. On observe que les résultats expérimentaux se situent autour des résultats numériques mais la dispersion des résultats empêche de les analyser correctement.

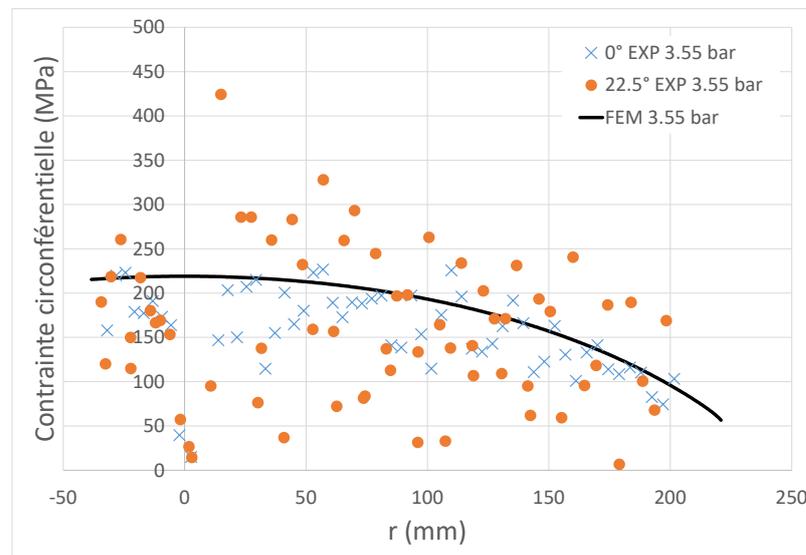


FIGURE .9. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle de la membrane circulaire avec mesure de champ à 3,55 bar

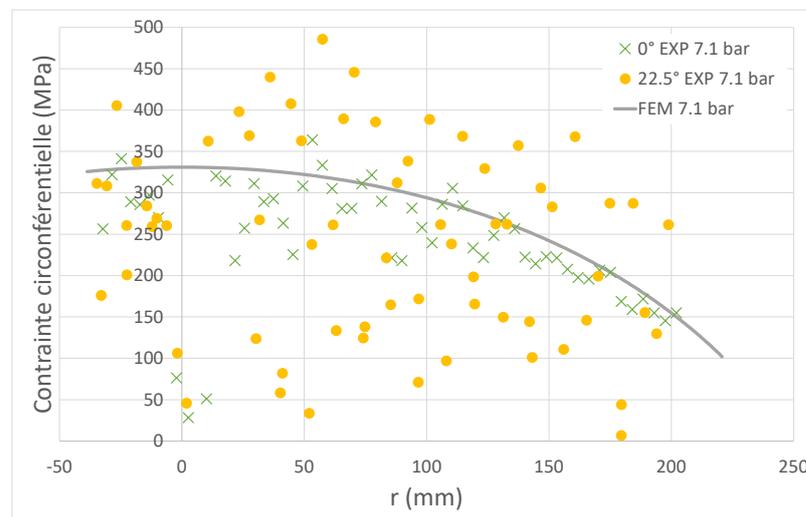


FIGURE .10. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle de la membrane circulaire avec mesure de champ à 7,1 bar

## E. Influence de la taille des facettes sur le calcul des contraintes à partir de la mesure des courbures principales sur toute la surface de la membrane avec lissage

De manière similaire à l'analyse faite dans l'annexe B, les résultats varient en fonction de la taille des facettes considérée. La figure .11 montre le résultat avec des facettes de 40 pixels et un pas entre facettes de 20 pixels.

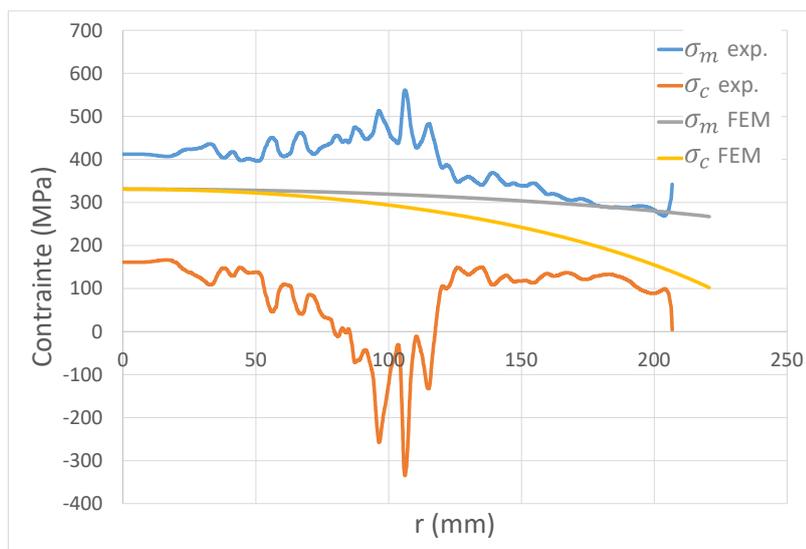


FIGURE .11. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circumférentielle calculée à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux et une taille de facettes de 40 pixels et un pas de 20 pixels

La figure .12 montre le résultat avec des facettes de 80 pixels et un pas entre facettes de 40 pixels. Les résultats expérimentaux se rapprochent des résultats numériques. Cela montre qu'augmenter la taille des facettes améliore le résultat. La figure .13 et la figure .14 montrent les résultats avec des facettes plus grandes. Dans le dernier cas, les contraintes méridiennes et expérimentales sont quasiment égales (comme cela doit être le cas) mais la valeur de la contrainte méridienne s'éloigne de la valeur numérique. Augmenter la taille des facettes moyenne le résultat sur une plus grande zone et le résultat est comme "aplati". Le tableau .1 résume les résultats en calculant l'écart relatif des résultats expérimentaux avec les résultats numériques (Abaqus).

Bibliographie – E. Influence de la taille des facettes sur le calcul des contraintes à partir de la mesure des courbures principales sur toute la surface de la membrane avec lissage

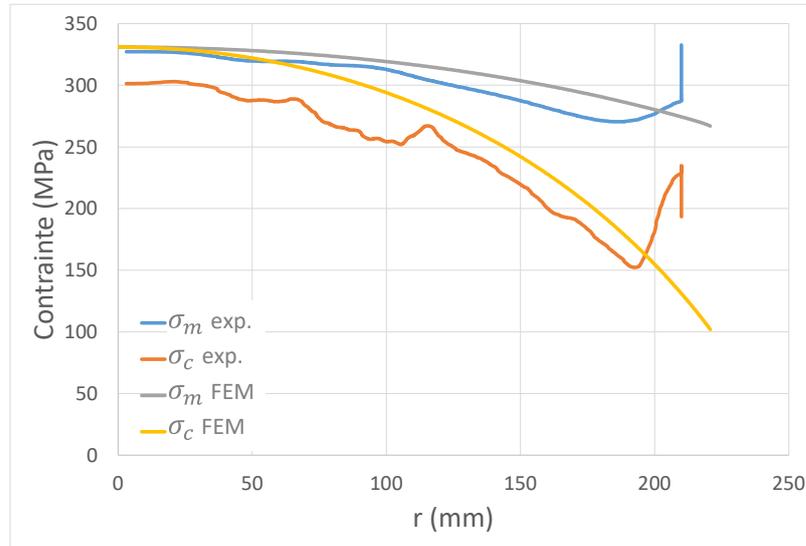


FIGURE .12. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle calculée à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux et une taille de facettes de 80 pixels et un pas de 40 pixels

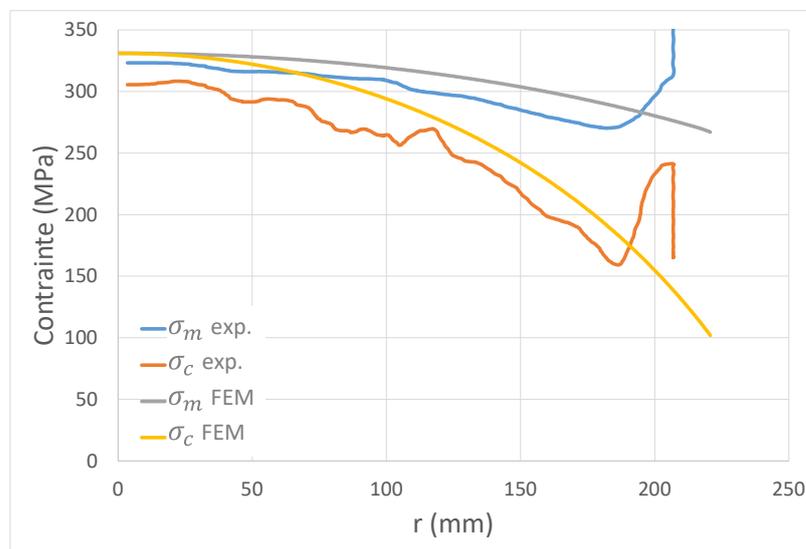


FIGURE .13. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle calculée à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux et une taille de facettes de 100 pixels et un pas de 50 pixels

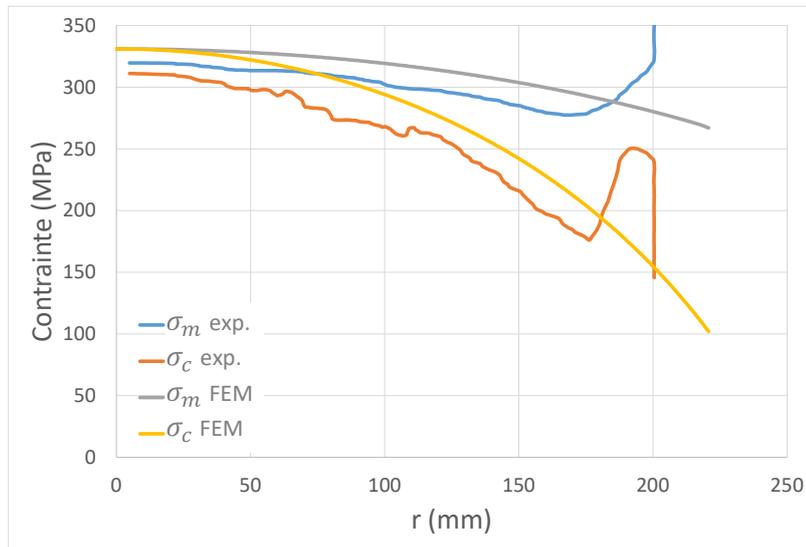


FIGURE .14. – Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de la contrainte circonférentielle calculée à partir des courbures à 7,1 bar avec un lissage des résultats expérimentaux et une taille de facettes de 150 pixels et un pas de 75 pixels

	$\sigma_m$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	Ecart relatif $\sigma_m$	Ecart relatif $\sigma_c$
Abaqus	331	331		
F40P20	412	161	24%	-51%
F60P30	343	279	4%	-16%
F80P40	327	301	-1%	-9%
F100P50	323	305	-2%	-8%
F150P75	320	311	-3%	-6%

TABLEAU .1. – Ecart entre contraintes expérimentales et numériques en fonction des tailles et pas de facettes

