

Titre: Étude de faisabilité de l'insertion d'une membrane élastomère à renfort textile dans l'aspirateur d'une centrale hydroélectrique
Title: [Étude de faisabilité de l'insertion d'une membrane élastomère à renfort textile dans l'aspirateur d'une centrale hydroélectrique](#)

Auteur: Rolland Delorme
Author: [Rolland Delorme](#)

Date: 2014

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Delorme, R. (2014). Étude de faisabilité de l'insertion d'une membrane élastomère à renfort textile dans l'aspirateur d'une centrale hydroélectrique
Citation: [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/1472/>

Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1472/>
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/1472/>

Directeurs de recherche: Martin Lévesque, & Edu Ruiz
Advisors: [Martin Lévesque](#), [Edu Ruiz](#)

Programme: Génie mécanique
Program: [Génie mécanique](#)

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DE FAISABILITÉ DE L'INSERTION D'UNE MEMBRANE ÉLASTOMÈRE À
RENFORT TEXTILE DANS L'ASPIRATEUR D'UNE CENTRALE
HYDROÉLECTRIQUE

ROLLAND DELORME
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
AOÛT 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DE FAISABILITÉ DE L'INSERTION D'UNE MEMBRANE ÉLASTOMÈRE À
RENFORT TEXTILE DANS L'ASPIRATEUR D'UNE CENTRALE
HYDROÉLECTRIQUE

présenté par : DELORME Rolland

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. VADEAN Aurelian, Doct., président

M. LÉVESQUE Martin, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. RUIZ Éduardo Antonio Julian, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. TROCHU François, Ph.D., membre

DÉDICACE

À ma famille, mon père, ma mère et mes sœurs.
À tous ceux qui comptent pour moi...

« *L'innovation est cette incroyable intersection
entre l'imagination d'une personne et
la réalité dans laquelle elle vit.* »

Ron Johnson

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier mes directeurs de recherche qui ont supervisé ma maîtrise : Martin Lévesque et Edu Ruiz. Leurs conseils, leurs aiguillages et leur proximité m'ont permis de réaliser ce projet. Pour différents aspects, je les considère personnellement comme des modèles à suivre. Je salue Edith Roland Fotsing pour sa disponibilité, son aide et son soutien moral pendant ces deux années. Je n'oublie pas non plus Frédéric Gosselin ainsi que les professeurs, les associés de recherche et les techniciens qui m'ont épaulé.

Mes remerciements vont aussi au CREFARRE, notamment aux partenaires industriels Alstom et Hydro-Québec représentés par Michel Sabourin, Stéphane Roy, Sébastien Baulieu et Hélène Gauthier. Leur support permet à cet ambitieux projet d'avancer. Je suis reconnaissant envers ERFT Composites qui m'a fait découvrir le monde de la fabrication des composites.

Je veux exprimer ma gratitude à Aurelian Vadean et François Trochu, respectivement président et membre du jury, pour avoir évalué mon travail.

J'ai été heureux de travailler et surtout de passer de bons moments avec mes collègues et amis du LM², du CCHP ou d'ailleurs. Je pense en particulier à :

- Audrey Favre qui a facilité mon intégration dès mon arrivée ;
- Amine El Mourid, Elias Ghossein, Thibaut Crochon, Thibaud Chatel et Ilyass Tabiai du LM² avec qui j'ai partagé des conversations passionnantes autour de bons repas ;
- Vincent Loiselle, Cédric Pupin, Joffrey Renaud, Christophe Ravey et tous les autres étudiants du CCHP lors des pauses dîner qui, malgré leur humour douteux, faisaient émerger des suggestions toujours utiles ;
- Marina Selezneva qui a bien voulu m'accueillir à McGill et m'aider pour les essais de corrélation.

Je remercie Arts et Métiers ParisTech et l'École Polytechnique Montréal qui ont permis cette double formation au Québec, enjolivée de voyages et de rencontres inoubliables.

Pour finir, j'embrasse mes amis de voyages Alexandre Pelletingas et Thomas Davril, ma « blonde » et ma famille pour leur présence, leur affection et leur soutien.

RÉSUMÉ

La production électrique du Québec, estimée à 200 TWh, provient à 96 % de centrales hydroélectriques qui sont au cœur des enjeux écologiques et économiques de la province. Plusieurs recherches ont porté sur l'optimisation du profil hydrodynamique des turbines en vue d'en maximiser le rendement énergétique. Toutefois, peu d'études se sont concentrées sur l'aspirateur des barrages, le conduit par lequel l'eau est acheminée en sortie de turbine. Des études numériques menées par Alstom Power & Transport Canada inc. ont démontré que la modulation du profil de l'aspirateur peut augmenter la performance de la centrale hydroélectrique.

L'objectif de cette étude était d'évaluer la faisabilité de cette modification de profil, dans des barrages existants, à l'aide d'une membrane composite gonflable. La première partie de l'étude consistait à réaliser un montage permettant de tester le gonflement de membranes planes en composite silicone/fibres de verre. Les membranes gonflées ont été numérisées à l'aide d'un outillage optique permettant d'avoir une représentation tridimensionnelle de leur déformée. La seconde partie de l'étude visait à construire des modèles par éléments finis reproduisant les mêmes expériences et éventuellement applicables à la conception de membranes plus complexes.

Les résultats de cette étude ont confirmé la faisabilité technique de la conception et la fabrication d'une telle membrane pour l'application visée. Le déploiement à grande échelle nécessitera toutefois la fabrication de membranes 3D ainsi que des ancrages associés.

Mots clés : composite en caoutchouc renforcé, composite élastomère renforcé, renfort textile, modélisation par éléments finis, comportement mécanique

ABSTRACT

The generation of electrical energy in Quebec, estimated to 200 TWh, comes from hydroelectric generating stations for 96 % which are at the heart of provincial ecological and economic challenges. An important amount of research has been devoted to improving the hydrodynamic profile of hydraulic turbines to maximize their energy efficiency. However, few studies have focused on the draft tube in hydroelectric power plants, which is the duct where water flows out after crossing the turbine. Recent calculations performed by Alstom Power & Transport Canada Inc. revealed that the shape modulation of the draft tube could increase the hydroelectric generating station performance.

The goal of this research was to assess the feasibility of this shape modification in existing draft tubes with inflatable composite membranes. The study consisted first of building an experimental setup to test the inflation of flat membranes made up of a fiberglass-reinforced rubber composite. The inflated membranes were digitized with an optical equipment enabling 3D representations of their deflections. The second part of the study aimed at building finite element models reproducing the same experiments and enabling the design of more complicated membranes.

The study confirmed the technical feasibility of designing and manufacturing such a membrane for the targeted application. However the large-scale roll-out will require to manufacture 3D membranes with the proper anchoring system.

Keywords : reinforced rubber composite, reinforced elastomer composite, textile reinforcement, finite element modeling, mechanical behavior

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES ANNEXES	xiii
LISTE DES SIGLES ET DES SYMBOLES	xiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Centrale hydroélectrique	3
2.1.1 Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique	3
2.1.2 Rôle de l'aspirateur	3
2.1.3 Une membrane pour moduler la forme de l'aspirateur	5
2.2 Composites élastomères à renforts textiles	7
2.2.1 Généralités sur les mélanges d'élastomères	7
2.2.2 Composites caoutchouc-textile	8
2.3 Détermination du comportement mécanique des membranes	11
2.3.1 Plaques épaisses, plaques minces et membranes	11
2.3.2 Exemple de calcul de la flèche et non-linéarité géométrique	12
2.3.3 Détermination expérimentale des propriétés mécaniques	14
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	18
3.1 Analyse de la revue de littérature	18
3.2 Objectif général et méthodologie	18

CHAPITRE 4 RÉALISATION DU DÉMONSTRATEUR	20
4.1 Architecture des membranes	20
4.2 Conception du montage d'essai	21
4.3 Assemblage du démonstrateur	24
4.4 Système de mise sous pression	24
CHAPITRE 5 ESSAIS ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	26
5.1 Essais de gonflement des membranes	26
5.1.1 Matériels utilisés et procédure expérimentale	26
5.1.2 Numérisation de la membrane d'épaisseur constante	28
5.1.3 Numérisation de la membrane d'épaisseur variable	28
5.2 Obtention des propriétés mécaniques de la membrane	32
5.2.1 Découpe des éprouvettes et machine de traction	32
5.2.2 Essais de traction par corrélation d'images numériques	33
5.2.3 Essais de relaxation	38
CHAPITRE 6 MODÉLISATION	43
6.1 Propriétés élastiques du matériau	43
6.2 Modèles par éléments finis de la membrane d'épaisseur constante	43
6.3 Modèle analytique	44
6.4 Analyse des résultats simulés et analytiques	48
6.5 Modélisation de la membrane 3D insérable dans un barrage	53
6.5.1 Contexte	53
6.5.2 Choix d'architecture : une membrane quasi isotrope	53
6.5.3 Géométrie, maillage, conditions aux rives et chargement	54
6.5.4 Analyse des résultats	54
CHAPITRE 7 CONCLUSION	56
7.1 Synthèse des travaux	56
7.2 Travaux futurs et recommandations	57
RÉFÉRENCES	58
ANNEXES	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Cahier des charges de la membrane en fonctionnement normal	6
Tableau 2.2	Désignation des élastomères pour la fabrication des membranes [1, 2, 3]	7
Tableau 2.3	Propriétés de différents élastomères [2, 4]	9
Tableau 2.4	Propriétés de différentes fibres de renforcement [5, 6]	10
Tableau 2.5	Comparaison des résultats analytiques et numériques des flèches	14
Tableau 4.1	Contraintes de conception du montage d'essai	20
Tableau 4.2	Propriétés de la matrice [7]	21
Tableau 4.3	Propriétés du tissu	23
Tableau 5.1	Résultats des essais de gonflement pour la membrane d'épaisseur constante	29
Tableau 5.2	Résultats des essais de gonflement pour la membrane d'épaisseur variable	30
Tableau 5.3	Propriétés élastiques de la membrane mesurées par CIN	36
Tableau 6.1	Propriétés élastiques de la membrane utilisées pour les modèles	45
Tableau 6.2	Nombre d'éléments en fonction de la pression appliquée	45
Tableau C.1	Caractéristiques des boulons 9/16" – 12 UNC	70
Tableau C.2	Paramètres de calcul pour k_b , k_m et λ_b	71
Tableau D.1	Propriétés de la membrane – Référence	73
Tableau D.2	Propriétés de la membrane – Sensibilité : $E_3 = 4,148$ MPa	74
Tableau D.3	Propriétés de la membrane – Sensibilité : $E_3 = 414,8$ MPa	74
Tableau D.4	Propriétés de la membrane – Sensibilité : $\nu_{13} = \nu_{23} = 0,01$	75
Tableau D.5	Propriétés de la membrane – Sensibilité : $\nu_{13} = \nu_{23} = 0,49$	75
Tableau D.6	Propriétés de la membrane – Sensibilité : $G_{13} = G_{23} = 0,765$ MPa	76
Tableau D.7	Propriétés de la membrane – Sensibilité : $G_{13} = G_{23} = 76,5$ MPa	76

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Éléments d'une centrale hydroélectrique – (a) Exemple d'une centrale réelle – (b) Groupe turbine-alternateur typique – (c) Architecture d'un aspirateur typique	4
Figure 2.2	Membrane gonflable insérée dans un aspirateur de barrage – (a) Vue en perspective – (b) Vue de côté	5
Figure 2.3	Principe de la CIN [8] : faire correspondre un point de l'image du matériau sans chargement, au même point de l'image du matériau sollicité	16
Figure 2.4	Schéma de coupe d'une membrane soumise à une pression uniforme [9]	16
Figure 2.5	Géométrie de l'éprouvette droite munies de talons [10]	17
Figure 4.1	Architecture des membrane du démonstrateur – (a) Empilement des couches de la membrane d'épaisseur constante – (b) Dimensions de la membrane d'épaisseur constante – (c) Dimensions de la membrane d'épaisseur variable	22
Figure 4.2	Montage d'essai constitué d'un plateau de support sur lequel reposent une membrane et les barres de fixation maintenues par des boulons. Des orifices d'entrée et de sortie d'eau pour gonfler la membrane sont présents sous le plateau.	23
Figure 4.3	Assemblage du démonstrateur – (a) Perçage des trous de passage des vis – (b) Joints d'étanchéité sur le plateau – (c) Démonstrateur assemblé	25
Figure 4.4	Pot sous pression utilisé pour gonfler la membrane	25
Figure 5.1	Utilisation du scanneur 3D – (a) Scanneur REVscan de CREAFORM – (b) Démonstrateur avec les pastilles de repérage – (c) Numérisation d'une membrane	27
Figure 5.2	Résultat de la numérisation importé dans CATIA V5 – Démonstrateur	28
Figure 5.3	Résultats de la numérisation importés dans CATIA V5 – Membrane d'épaisseur constante soumise à des pressions de : (a) 0,26 bar, (b) 0,72 bar et (c) 0,86 bar	29
Figure 5.4	Mise en évidence du phénomène de glissement – (a) Glissement le long d'une barre de fixation – (b) Ondulations après le dégonflement de la membrane	29
Figure 5.5	Résultat de la numérisation importé dans CATIA V5 – Position de la flèche maximale sur la membrane d'épaisseur variable soumise à 0,66 bar	30

Figure 5.6	Comparaison des flèches maximales des deux membranes en fonction de la pression appliquée	31
Figure 5.7	Membrane d'épaisseur constante après la découpe des échantillons	32
Figure 5.8	Géométrie et dimensions de l'éprouvette et des talons [10]	34
Figure 5.9	Matériel utilisé pour les essais de traction – (a) MTS Insight – (b) Éprouvette dans les mors	34
Figure 5.10	Matériel utilisé pour la CIN – (a) Caméra avec son objectif – (b) Un échantillon et son mouchetis	35
Figure 5.11	CIN : un exemple d'interprétation graphique – Contrainte longitudinale moyenne $\sigma_l = 31,57$ MPa – Déformation longitudinale moyenne $\varepsilon_l = 2,006\%$ – Écart-type $\varsigma = 0,035\%$	35
Figure 5.12	Schéma explicatif du comportement initial non linéaire : les couches de silicone collées aux talons s'étirent avant que les renforts tissés du centre ne soient tendus.	37
Figure 5.13	Définition des axes sur les éprouvettes renforcées à $0/90^\circ$ (a) et à $\pm 45^\circ$ (b)	37
Figure 5.14	Courbes contrainte-déformation longitudinale de trois membranes renforcées à $0/90^\circ$	39
Figure 5.15	Courbes déformation transervale-longitudinale de trois membranes renforcées à $0/90^\circ$	40
Figure 5.16	Courbes contrainte-angle de cisaillement de deux membranes renforcées à $\pm 45^\circ$	41
Figure 5.17	Courbe contrainte-temps d'une membrane renforcée à $0/90^\circ$ sous une déformation de 2,7 %	42
Figure 6.1	Modèle pour la membrane d'épaisseur constante simplement appuyée . .	45
Figure 6.2	Modèle pour la membrane d'épaisseur constante retenue par les vis . .	46
Figure 6.3	Modèle pour la membrane d'épaisseur constante retenue par les vis et en déformation plane sous les barres de fixation	46
Figure 6.4	Maillage à 3135 éléments de la géométrie de la membrane d'épaisseur constante	47
Figure 6.5	Flèche maximale en fonction du nombre d'éléments pour la membrane retenue par les vis et en déformation plane, soumise à une pression de 0,86 bar (12,5 psi)	47
Figure 6.6	Flèche maximale de la membrane d'épaisseur constante en fonction de la pression appliquée	50
Figure 6.7	Modèle pour la membrane d'épaisseur variable simplement appuyée . .	51

Figure 6.8	Flèche maximale de la membrane d'épaisseur variable en fonction de la pression appliquée	52
Figure 6.9	Géométrie initiale et maillage de la membrane 3D sous pression	55
Figure 6.10	Champ de déplacement aux nœuds de la membrane 3D sous pression . .	55
Figure A.1	Plateau de support	62
Figure A.2	Barre de fixation A1	63
Figure A.3	Barre de fixation B1	64
Figure A.4	Barre de fixation B2	65
Figure A.5	Barre de fixation B2	66
Figure B.1	Déformée du plateau de support et des barres de fixation – La flèche maximale de 1,05 mm est localisée au centre du plateau soumis à 4,6 bar. Elle est assez faible pour ne pas perturber la mesure de la flèche de la membrane gonflée.	68
Figure B.2	Rotation dans le plateau de support et les barres de fixation – La rotation maximale de 0,34° est localisée au niveau des barres de fixation. Elle est assez faible pour éviter la rupture en flexion des boulons qui seront installés.	68

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Dessins techniques du montage d'essai	62
Annexe B	Analyse par éléments finis du plateau de support et barres de fixation	67
Annexe C	Dimensionnement de l'assemblage boulonné	69
Annexe D	Étude de sensibilité des propriétés hors plan de la membrane	73

LISTE DES SIGLES ET DES SYMBOLES

Liste des sigles

CREFARRE	Consortium de Recherche en Fabrication et Réparation des Roues d'Eau
ETS	École de Technologie Supérieure
EPM	École Polytechnique de Montréal
CTFA	Centre des Technologies de Fabrication en Aérospatiale
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
ASTM	American Society for Testing and Materials
TPE	Élastomères thermoplastiques
RFL	Résorcine-Formol-Latex
CIN	Corrélation d'images numériques
FP	Fonctions principales
FC	Fonctions de contraintes
ERFT	Engineering Research and Flow Technology
UNC	Filetage américain unifié standard (<i>Unified National Coarse</i>)
TPI	Filets par pouce (<i>Thread Per Inch</i>)
CR	Conditions aux rives

Liste des symboles

χ	Coefficient de récupération
T_v	Température de transition vitreuse (°C)
\emptyset	Diamètre (m)
E	Module de Young (Pa)
σ_{max}	Résistance à la traction (Pa)
ε_r	Déformation à la rupture (Pa)
T_{max}	Température maximale d'utilisation (°C)
h	Épaisseur (m)
a	Dimension caractéristique (longueur, largeur, diamètre) (m)
w_{max}	Flèche maximale (m)
D	Rigidité en flexion d'une plaque (N.m)
ν	Coefficient de Poisson
p	Pression (Pa)

l	Largeur (m)
L	Longueur (m)
E_l, E_{tr}	Module d'élasticité longitudinal ou transversal (Pa)
$\varepsilon_l, \varepsilon_{tr}$	Déformation longitudinale ou transversale (%)
σ_l, σ_{tr}	Contrainte longitudinale ou transversale (Pa)
E_1, E_2	Module d'élasticité suivant la direction des fibres (Pa)
E_3	Module d'élasticité normal à la direction des fibres (Pa)
ν_{12}	Coefficient de Poisson par rapport à la direction des fibres (Pa)
γ_{12}	Angle de cisaillement par rapport à la direction des fibres
τ_{12}	Contrainte de cisaillement par rapport à la direction des fibres (Pa)
G_{12}, G_{23}, G_{13}	Module de cisaillement par rapport à la direction des fibres (Pa)
U_x, U_y, U_z	Déplacements suivant x, y ou z (m)
ς	Écart-type
δF	Effort résiduel (N ou N.m)
F_e	Effort externe (N ou N.m)
F_i	Effort interne (N ou N.m)
h_{moy}	Épaisseur moyenne (m)
n, q	Nombre de plis
m	Nombre de groupes à q plis ayant la même orientation
d_n	Diamètre nominale (m)
P	Pas de vis (m)
d_t	Diamètre du trou de passage (m)
d_2	Diamètre sur flancs (m)
d_3	Diamètre du noyau de la vis (m)
d_s	Diamètre résistant (m)
A_s	Section résistante (m^2)
$R_{e,t}$	Limite d'élasticité en traction (Pa)
$R_{m,t}$	Résistance à la traction (Pa)
f	Coefficient moyen de frottement
s	Rayon limite externe de la zone de contact pièce/écrou (m)
ρ_m	Rayon moyen de la zone de contact pièce/écrou (m)
n_b	Nombre de boulons
k_b	Raideur des boulons (N.m^{-1})
k_m	Raideur des membrures (N.m^{-1})
λ_b	Proportion des efforts extérieures repris par les boulons
L_{fix}	Épaisseur totale des barres de fixation (m)

L_{me}	Épaisseur de la membrane (m)
E_{acier}	Module d'élasticité des fixations et boulons en acier (Pa)
E_{me}	Module d'élasticité de la membrane (Pa)
F_r	Force résultante par boulon (N)
p_c	Pression de contact (Pa)
$R_{e,c}$	Limite d'élasticité en compression (Pa)
$R_{m,c}$	Résistance à la rupture en compression (Pa)
F_c	Force de contact autour d'un boulon (N)
S_c	Surface de contact autour d'un boulon (m ²)
F_b	Force de tension par boulon (N)
Q_s	Effort de serrage (N)
σ_t	Contrainte de tension (Pa)
τ	Contrainte de torsion (Pa)
C_s	Couple de serrage (N.m)
σ_e	Contrainte équivalente (Pa)

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Problématique générale

La production électrique du Québec, estimée à 200 TWh, provient à 96 % de centrales hydroélectriques [11] qui sont au cœur des enjeux écologiques et économiques de la province. D'une part, l'hydroélectricité est une énergie propre et renouvelable. D'autre part, avec leur rendement énergétique supérieur aux systèmes de transformation de matières fossiles et leur durée de vie de 50 à 60 ans, l'efficacité énergétique des centrales hydroélectriques contribue à générer d'importantes redevances à la province de Québec. Avec un entretien régulier, le fonctionnement des équipements peut être prolongé, ce qui augmente le retour sur investissement initial. Néanmoins, au fil du temps, la maintenance devient insuffisante et deux choix sont possibles : construire de nouvelles centrales ou remettre en état et moderniser d'anciennes installations. Suivant les situations, comme pour la centrale du Rocher-de-Grand-Mère qui remplace la centrale de Grand-Mère, le choix d'une nouvelle centrale était plus judicieux. Dans d'autres cas, il est plus avantageux de réaliser des travaux de réfection, comme pour la centrale de Beauharnois [12].

En cas de réhabilitation, le but principal est d'améliorer le retour sur investissement sans travaux majeurs sur le bâti, ni d'interruptions trop longues du fonctionnement de la centrale. C'est pour ces raisons que les réfections portent souvent sur les machines comme les roues ou les directrices. L'exemple de la centrale de la Chute-à-la-Savane au Québec est révélateur : le remplacement des roues et des directrices a permis un gain de rendement de 6 % et de puissance de 15 %. Néanmoins, malgré la difficulté et les coûts des travaux, il existe des situations où l'aspirateur doit être modifié. C'est le cas d'une centrale lettonienne située sur la rivière de Daugava. La réhabilitation des roues couplée à la modification de l'aspirateur a conduit à une augmentation de la puissance de la centrale de 25 % [13].

Alstom Power & Transport Canada inc. a émis l'idée de réaliser la modification de l'aspirateur à l'aide d'une membrane gonflable [14]. Cette technologie permettrait une modification ne nécessitant que des équipements légers, par opposition à devoir couler du béton, en plus d'avoir deux points de fonctionnement (position gonflée ou dégonflée). La faisabilité d'une telle structure doit donc être évaluée avant d'en lancer la production.

Contexte du mémoire

Le projet a été réalisé dans le cadre du Consortium de Recherche en Fabrication et Réparation des Roues d'Eau (CREFARRE) [15]. Ce consortium est composé des industriels Hydro-Québec et Alstom Power & Transport Canada inc. ainsi que de l'École de Technologie Supérieure (ETS), de l'École Polytechnique de Montréal (EPM) et du Centre des Technologies de Fabrication en Aérospatiale (CTFA). Il a pour but d'apporter des solutions novatrices et de relever des nouveaux défis dans le domaine de l'hydroélectricité en confiant notamment des projets à des étudiants de 2^{ème} ou 3^{ème} cycles. Ce mémoire fait suite à celui d'A. Favre [10] qui a analysé les membranes existant sur le marché et potentiellement applicables à cette situation précise. Les résultats ont montré que des membranes silicone/fibres de verre possèdent les propriétés mécaniques et la durabilité nécessaires pour opérer en milieux aqueux sur de longues périodes. Le matériau retenu pour cette étude est donc celui identifié par A. Favre.

Objectif de recherche

L'objectif de la maîtrise a été d'évaluer certains aspects de la faisabilité de modification de l'aspirateur d'une centrale hydroélectrique à l'aide d'une membrane composite gonflable. Un démonstrateur à petite échelle, pour des membranes planes, a tout d'abord été réalisé. Le but était de confirmer la possibilité d'un gonflement, sécuritaire, à l'eau de membranes silicone renforcées d'un tissu de fibres de verre. Ensuite, des essais mécaniques ont été effectués sur des échantillons de membrane afin d'en extraire les propriétés mécaniques. Celles-ci ont été employées dans des modèles par éléments finis servant à reproduire les essais de gonflement. Finalement, ces modèles ont été utilisés pour confirmer la faisabilité d'une membrane grandeur nature pour une application réelle.

Plan du mémoire

Ce mémoire est divisé en sept parties. Au chapitre 2, la revue de littérature porte sur les différents aspects abordés dans ce projet : le fonctionnement des centrales hydroélectriques, les composites élastomères à renforts textiles et les diverses techniques de caractérisation des membranes. Le chapitre 3 définit les objectifs et la méthodologie suivie pour y répondre. Les chapitres 4 et 5 abordent respectivement la réalisation du démonstrateur et des membranes ainsi que les essais effectués. Les modèles numériques associés à ces essais et le dimensionnement d'une membrane 3D insérable dans un aspirateur de barrage sont présentés au chapitre 6. Le chapitre 7 conclut le mémoire et donne des recommandations pour la suite du projet.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Centrale hydroélectrique

2.1.1 Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

Le principe de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique [16] (figure 2.1) est de transformer l'énergie mécanique (potentielle et cinétique) de l'eau en énergie électrique grâce au groupe turbine-alternateur. L'eau située dans le bief d'amont (réservoir) est conduite dans la centrale vers la turbine (figure 2.1a). La bâche spirale donne à l'eau la bonne orientation par rapport aux aubes des roues. De plus, grâce aux directrices, le débit est correctement réparti et modulé. L'eau parvient à la turbine et la pression ainsi exercée l'entraîne en rotation. L'énergie mécanique alors produite est transformée par l'alternateur (figure 2.1b). En sortant du groupe turbine-alternateur, l'eau retrouve le canal de fuite en passant par l'aspirateur (figure 2.1c) qui récupère l'énergie résiduelle.

2.1.2 Rôle de l'aspirateur

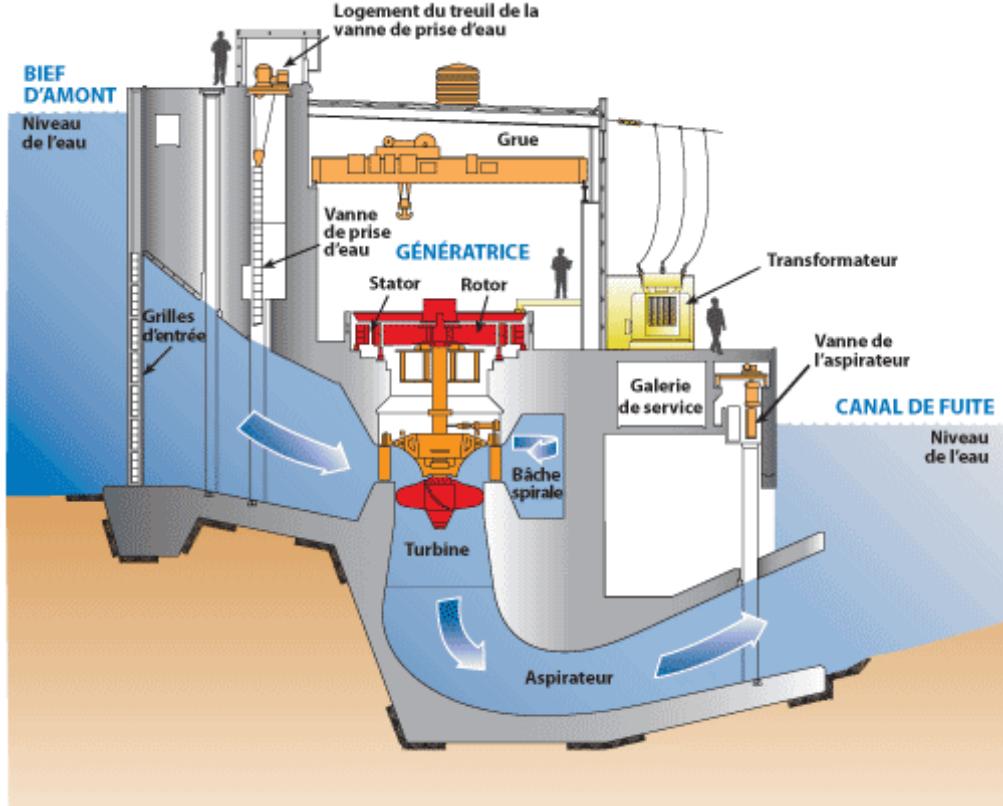
Le rôle de l'aspirateur est de regagner une partie de l'énergie restante, non transformée en électricité après son passage dans le groupe turbine-alternateur. Elle se décompose en :

- énergie cinétique : l'eau a une certaine vitesse d'écoulement après les turbines ;
- énergie potentielle : le canal de fuite et la turbine ont des niveaux différents.

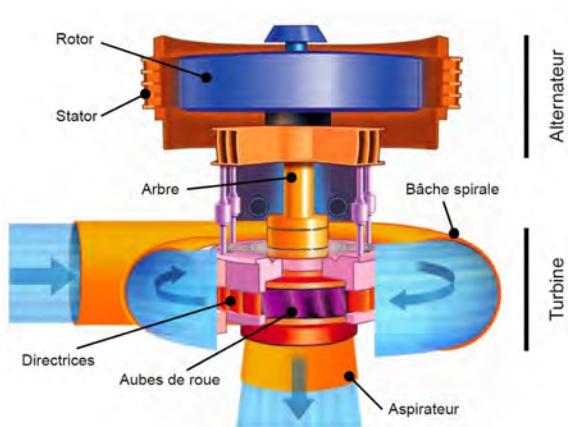
La forme évasée progressive de l'aspirateur joue un rôle important dans la récupération de l'énergie résiduelle. À débit constant, la section de sortie de l'aspirateur, qui est plus grande que celle d'entrée, permet d'abaisser la vitesse de sortie. Une partie de l'énergie est donc récupérée grâce à un transfert de pression dynamique en pression hydrostatique. La progressivité de la forme diminue quant à elle les pertes de charge.

Deux grandeurs existent pour évaluer la performance d'un aspirateur : le coefficient de récupération χ [20, 21] et le coefficient de pertes CEI¹ [19, 22] qui évalue la perte d'énergie attribuable à la non-uniformité de l'écoulement entre l'entrée et la sortie.

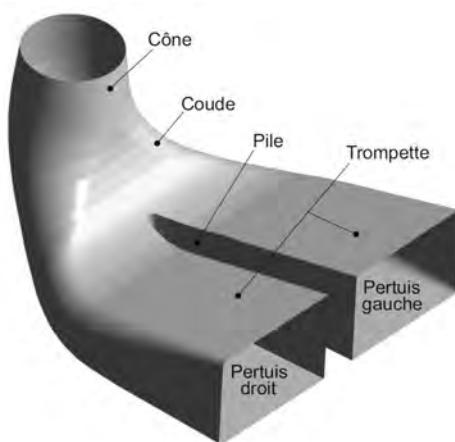
1. Commission Électrotechnique Internationale (CEI)



(a) Exemple d'une centrale réelle : la centrale de Long Spruce [17]. L'eau située dans le bief d'amont est conduite vers la turbine, l'entraînant en rotation, avant de s'écouler dans l'aspirateur pour rejoindre le canal de fuite.



(b) Groupe turbine-alternateur typique [18]



(c) Architecture d'un aspirateur typique [19]

Figure 2.1 Éléments d'une centrale hydroélectrique – (a) Exemple d'une centrale réelle – (b) Groupe turbine-alternateur typique – (c) Architecture d'un aspirateur typique

2.1.3 Une membrane pour moduler la forme de l'aspirateur

Alstom Power & Transport Canada inc. a montré numériquement que l'installation d'une membrane pour moduler la forme de l'aspirateur (figure 2.2) en fonction du point de fonctionnement de la turbine diminue les pertes CEI de l'ordre de 1 % [14]. Le tableau 2.1 dresse le cahier des charges de la membrane en fonctionnement normal avec ses fonctions principales (FP) et ses fonctions de contraintes (FC). La liste des travaux déjà menés ou à mener dans le futur et qui permettront de définir des paramètres de conception pertinents est aussi présentée.

La membrane en silicone renforcée de fibres de verre retenue suite aux travaux de A. Favre [10] répond à la fonction de contrainte FC1. Certains paramètres clés ayant permis cette sélection sont abordés dans la section suivante.

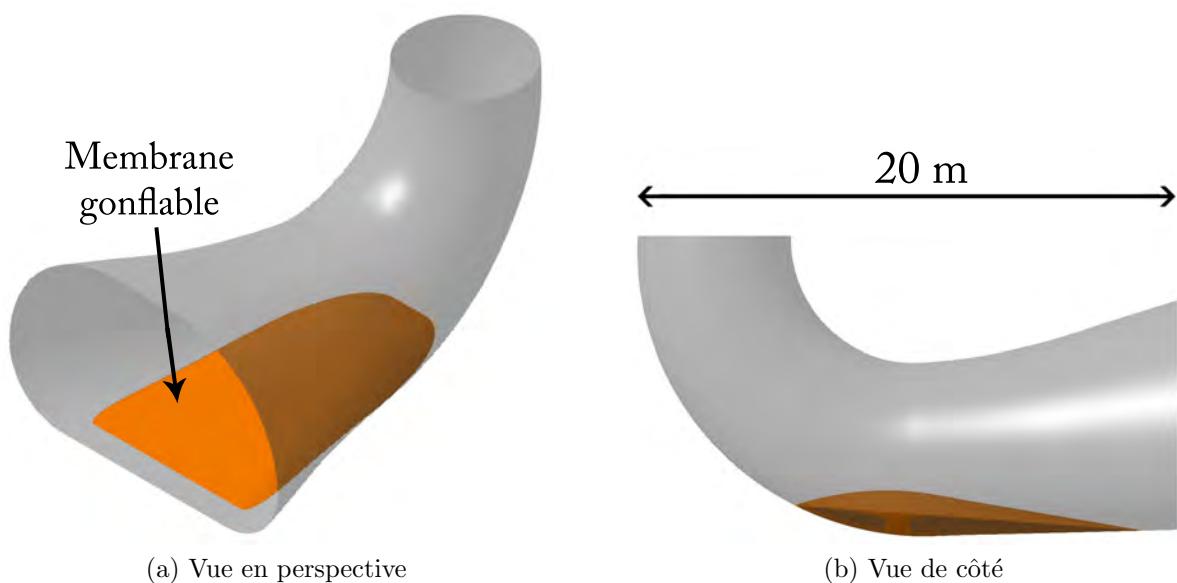


Figure 2.2 Membrane gonflable insérée dans un aspirateur de barrage – (a) Vue en perspective – (b) Vue de côté

Tableau 2.1 Cahier des charges de la membrane en fonctionnement normal

N°	Fonctions	Travaux déjà menés ou à mener
	<i>Fonction principale</i>	
FP1	Adapter la géométrie de l'aspirateur au point de fonctionnement de la turbine	<ul style="list-style-type: none"> • Géométrie optimale définie par les ingénieurs d'Alstom Power & Transport Canada inc.
	<i>Fonctions de contrainte</i>	
FC1	La membrane doit être utilisable en milieu aqueux	<ul style="list-style-type: none"> • Membrane en silicone/fibres de verre choisie par A. Favre [10]
FC2	La membrane doit être flexible pour s'adapter à différents points de fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidités de la membrane à définir • Membrane 3D gonflable/dégonflage à concevoir
FC3	La membrane doit être stable en position gonflée (éviter les vibrations)	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidités de la membrane à définir • Interaction fluide/structure à étudier • Durée de vie en fatigue à étudier
FC4	La membrane doit avoir un encombrement minimal en position rétractée (éviter les plis)	<ul style="list-style-type: none"> • Système d'ancrage à concevoir • Membrane 3D gonflable/dégonflage à concevoir
FC5	La membrane doit s'adapter au bâti de l'aspirateur	<ul style="list-style-type: none"> • Système d'ancrage à concevoir • Système de mise sous pression à concevoir
FC6	La membrane doit pouvoir être installée et entretenue facilement	<ul style="list-style-type: none"> • Temps d'interruption de la centrale à définir par Hydro-Québec

2.2 Composites élastomères à renforts textiles

2.2.1 Généralités sur les mélanges d'élastomères

Nomenclature

Les élastomères naturels et synthétiques servent à la fabrication des caoutchoucs. La désignation ASTM² ainsi que la nomenclature chimique des principaux élastomères utilisés dans la fabrication des membranes [3] sont données dans le tableau 2.2.

Élastomères de base

Il existe plusieurs catégories d'élastomères [1, 4, 23, 24] :

- les élastomères d'usage général comme le caoutchouc naturel (NR), le caoutchouc styrène-butadiène (SBR) et le caoutchouc éthylène-propylène-diène-monomère(EPDM) sont abordables mais ne résistent pas aux huiles. Ils sont utilisés entre autres pour les pneumatiques et l'amortissement des vibrations ;
- les élastomères de spécialité comme l'hypalon (CSM) et le néoprène (CR) présentent des propriétés spécifiques : bonne résistance aux solvants et autres liquides agressifs, bonne tenue en fatigue, etc. De manière générale, ils sont utilisés en dessous de 150 °C. L'EPDM peut aussi être classé dans cette catégorie pour son excellente résistance aux intempéries (utilisation pour les joints de bâtiments ou voitures) ;
- les élastomères à haute performance comme les caoutchoucs silicones se caractérisent par une bonne tenue à des températures élevées, couplée à quelques propriétés particu-

2. American Society for Testing and Materials (ASTM)

Tableau 2.2 Désignation des élastomères pour la fabrication des membranes [1, 2, 3]

Désignation ASTM	Nom commun	Nomenclature chimique
NR	Caoutchouc naturel	<i>cis</i> -Polyisoprene
SBR	SBR	Poly (butadiene-styrene)
EPDM	Caoutchouc EPDM	Poly (ethylene-propylene-diene)
CSM	Hypalon	Chloro-sulfonyl-polyethylene
CR	Neoprene	Poly chloroprene
MQ	Caoutchouc silicone	Poly (dimethylsiloxane)
VMQ	Caoutchouc silicone	Poly (methylphenyl-siloxane)
PMQ	Caoutchouc silicone	Poly (oxydimethyl silylene)
PVMQ	Caoutchouc silicone	Poly (polyoxymethylphenyl silylene)

lières. Les silicones ont par exemple de larges plages d'utilisation en températures (de -60 °C à +250 °C). D'autres résistent aux hydrocarbures ou produits chimiques.

L'ensemble des propriétés évoquées plus haut est synthétisé dans le tableau 2.3.

Un groupe hybride peut être défini : les Élastomères Thermoplastiques (TPE). Avec leur comportement similaire à celui des caoutchoucs vulcanisés à basse température, les TPE sont mis en forme à haute température comme les plastiques en raison de leur architecture chimique. C'est le cas du mélange mécanique d'un polymère thermoplastique comme le propylène et d'un élastomère tel que l'EPDM, le NR ou le SBR.

Autres ingrédients

Les propriétés d'un mélange d'élastomères sont étroitement liées aux additifs [25] ajoutés. Ces adjuvants sont séparés en différentes familles : [23] :

- les charges comme le noir de carbone, les silices de précipitation, les kaolins ou les silicates. Elles confèrent les caractéristiques mécaniques au mélange ;
- les plastifiants comme les esters, les huiles paraffiniques, naphténiques ou aromatiques. Ils favorisent l'intégration des charges ;
- les agents de protection qui sont des antioxydants chimiques (phénol, amine) ou des cires ;
- les produits spécifiques comme les ignifugeants ou les produits d'adhérisation. Ils servent à des applications précises. Le cas des produits d'adhérisation pour les composites élastomère-textile est abordé plus loin.

2.2.2 Composites caoutchouc-textile

L'assemblage d'élastomères avec des renforts textiles permet d'obtenir des propriétés mécaniques anisotropes pour, par exemple, diminuer les déformations de pièces sous contraintes tout en préservant l'épaisseur, augmenter la résistance à la compression ou encore conserver la flexibilité du matériau. Néanmoins, selon les exigences requises, le choix du renfort textile est distinct. De plus, en fonction du couple élastomère-textile retenu, et du type d'utilisation de la pièce (statique ou dynamique), les techniques de fabrication et les procédés d'adhérisation peuvent varier.

Tableau 2.3 Propriétés de différents élastomères [2, 4]

Désignation ASTM	NR	SBR	EPDM	CSM	CR	MQ VMQ PMQ PVMQ
Résistance à la traction (MPa)	31	24	17	27	27	10
Élongation max (%)	650	600	600	500	600	900
Déform. réman. en compression	A	B	B-A	C-B	B	B-A
Fluage	A	B	C-B	C	B	C-A
Résilience	Hte.	Moy.	Moy.	Bas.	Hte.	Ht.-Bas.
Résistance à l'abrasion	A	A	B	A	A	B
Résistance au déchirement	A	C	C	B	B	C-B
Tenue à la chaleur à 100°C	C-B	B	B-A	B-A	B	A
T_v (°C)	-73	-62	-65	-17	-43	-127/-86
Résistance aux intempéries	D-B	D	A	A	B	A
Résistance à l'oxydation	B	C	A	A	A	A
Résistance à l'ozone	NR-C	NR	A	A	A	A
Résistance aux solvants						
Eau	A	B-A	A	B	B	A
Cétones	B	B	B-A	B	C	B-C
Kérosène	NR	NR	NR	B	B	D-C
Benzol	NR	NR	NR	C-D	C-D	NR
Alcools	B-A	B	B-A	A	A	C-B
Huiles de graissage	NR	NR	NR	A-B	B-C	B-C

A = Excellent, B = Bon, C = Moyen, D = À utiliser avec prudence, NR = Non Recommandé

Hte. = Haute, Moy. = Moyenne, Bas. = Basse

Textiles

Les renforts textiles (tableau 2.4) sont caractérisés par leur composition et leur architecture [5, 6]. Par exemple, si l'on souhaite fabriquer une pièce dont les conditions d'utilisation sont à 250 °C et qui nécessite de bonnes propriétés mécaniques en tension, on privilégiera des renforts en fibres de verre, aramide ou carbone. Au contraire, si l'on recherche des fibres avec un allongement à la rupture élevé et des modules faibles, le nylon ou le polyester seront préférables. De même, l'architecture (mat, tissu, tricot, tressage, etc.) est sélectionnée en fonction des contraintes imposées par le cahier des charges.

Adhérisation caoutchouc-textile

L'adhésion à l'interface entre le mélange d'élastomères et le renfort textile est un paramètre clé pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées. En effet, l'interface joue des fonctions importantes comme :

- assurer la continuité physique du composite ;
- transmettre les contraintes de la matrice vers le renfort ;
- protéger l'un des deux constituants comme l'ensimage des fibres empêchant la pénétration de l'humidité.

La qualité de l'adhésion dépend de plusieurs paramètres qui peuvent s'expliquer par des modèles chimiques (formation de liaisons entre le renfort et la matrice), physiques et thermodynamiques (mouillabilité) ou mécaniques (rugosité du renfort). Dans le cas des composites caoutchouc-textile, l'exercice d'une pression pendant la vulcanisation (autoclave, moulage

Tableau 2.4 Propriétés de différentes fibres de renforcement [5, 6]

Type de fibre	\varnothing (μm)	E (GPa)	σ_{max} (MPa)	ε_r (%)	T_{max} (°C)	Densité
PA66 (nylon)	20	≤ 5	1000	20	190	1,20
PET (polyester)	15	≤ 18	1250	15	< 260	1,38
PPTA (amide/Kevlar)	12	135	3450	3	300	1,45
PBO (Zylon)	12	180-270	5800	3	280	1,55
Verre E	15	73	3400	4	250	2,54
Verre S	15	86	4500	5,3	300	2,49
Carbone de brais	10	39-830	3800	0,2-1	*	2,00

* 400°C sous air et 3000°C à l'abri de l'oxygène

sous presse, etc.) est nécessaire pour obtenir une bonne adhésion [3, 4]. D'autres techniques portent sur l'aspect chimique de l'adhésion en traitant au préalable le textile ou encore en ajoutant des adjuvants dans le mélange d'élastomères [4, 25]. Parmi les plus répandues, on peut citer :

- l'utilisation d'adhésifs à base de résorcine-formol-latex (RFL) [23, 26] ;
- les prétraitements des renforts textiles avec des agents de couplage au silane [27].

Fabrication et applications

Le tissu est traité dans un bain pour favoriser l'adhésion. Le mélange d'élastomères est transformé en bandes par des rouleaux compresseurs. Les bandes et les renforts textiles sont empilés alternativement afin d'obtenir les performances désirées. Ils sont ensuite installés dans une presse à chaud ou un autoclave. La vulcanisation commence et améliore entre autres l'élasticité et la tenue en température de la matrice. Pour les membranes de grandes dimensions, il est possible d'assembler plusieurs bandes ensemble grâce à des colles spéciales et une vulcanisation locale.

Il existe une multitude d'applications faisant appel aux composites élastomères à renforts textiles : les bateaux pneumatiques, les combinaisons de plongée, les joints de portes aéronautiques, les flexibles de freinage et autres tuyaux toileés, tressés, tricotés ou tissés, les courroies ou encore les bottes ou les chaussures de sport.

2.3 Détermination du comportement mécanique des membranes

2.3.1 Plaques épaisses, plaques minces et membranes

Une plaque est un élément structural constitué de deux plans parallèles (les faces) reliés entre eux par une surface cylindrique dont l'axe leur est perpendiculaire. Son épaisseur h est supposée constante et plus petite que les autres dimensions caractéristiques a qui définissent les faces (longueur, largeur ou diamètre). Sous certaines hypothèses [28, 29], sa déformée peut être représentée par son feillet moyen. Les plaques supportent généralement des chargements dans leurs plans et sont classées selon le rapport a/h :

- les plaques épaisses, pour $a/h \leq 8$. Ces plaques vérifient les équations générales de l'élasticité des corps solides et la théorie des plaques de Reissner-Mindlin. Ce sont des solides qui résistent aux efforts transverses grâce à leur rigidité en flexion ;

- les membranes, pour $a/h \geq 100$. Elles n'ont aucune rigidité en flexion. La résistance aux charges transverses s'explique par des forces de tension et de cisaillement présentes dans le feuillet moyen et qui sont transmises aux fixations. Elles permettent de contrebalancer les efforts transversaux : c'est l'effet membrane ;
- les plaques minces, pour $8 \leq a/h \leq 100$. Elles sont intermédiaires entre les plaques épaisses et les membranes. La prédominance de la rigidité en flexion ou de l'effet membrane dépend du rapport w_{max}/h où w_{max} est la flèche maximale de la plaque. Les plaques minces se divisent aussi en familles :
 - ◆ les plaques rigides, pour $w_{max}/h \leq 0,3$. L'effet membrane est négligeable devant les efforts de flexion. Ces plaques suivent la théorie classique des plaques encore appelée théorie des plaques de Kirchhoff (élasticité linéaire avec déformations et déplacements petits devant l'épaisseur h) ;
 - ◆ les plaques flexibles, pour $w_{max}/h \geq 0,3$. On a une combinaison entre les efforts de flexion et de membrane. Cependant, pour $w_{max}/h \geq 0,5$ l'effet membrane prédomine sur la rigidité en flexion et les plaques se comportent comme des membranes.

Les classifications précédentes dépendent aussi de différents paramètres comme le type de chargement, les conditions aux rives, etc.

2.3.2 Exemple de calcul de la flèche et non-linéarité géométrique

Considérons une plaque carrée de côté $a = 50$ mm et d'épaisseur $h = 1$ mm en aluminium. Son module d'élasticité E est de 62 GPa et son coefficient de Poisson ν de 0,25. Sa rigidité en flexion D est définie par :

$$D = \frac{E h^3}{12 (1 - \nu^2)} = 5511 \text{ N.mm} \quad (2.1)$$

La plaque est simplement appuyée, c'est-à-dire bloquée en translation sur son contour. Elle est soumise à une pression uniforme p de 1 MPa (10 bar).

En raisonnant par l'absurde, on considère que les hypothèses de petites déformations et petits déplacements sont vérifiées, et en particulier que $w_{max}/h \leq 0,2$. En appliquant la théorie classique des plaques [29, 30, 31], la flèche w_{max} de la plaque carrée se calcule ainsi :

$$w_{max} = 0,00406 \frac{p a^4}{D} = 4,60 \text{ mm} \quad (2.2)$$

Après calcul, on remarque que $w_{max}/h = 4,6$, ce qui contredit les hypothèses de linéarité de Kirchhoff. Par conséquent, comme $w_{max}/h \geq 0,5$, la plaque mince se comporte comme une membrane. Le problème est donc à géométrie non linéaire.

Timoshenko [29] a proposé une méthode analytique approchée pour calculer la flèche w_{max} qui combine la théorie classique des plaques et celle des membranes, et suppose que la pression p se divise en deux parties :

- une pression p_1 qui est équilibrée par les contraintes de flexion et les efforts tranchants ;
- une pression p_2 qui est équilibrée par l'effet membrane.

Avec les hypothèses de Kirchhoff, on obtient :

$$p_1 = 246,305 \frac{w_{max} D}{a^4} = 21,9 \frac{w_{max} E h^3}{a^4} \quad (2.3)$$

La théorie des membranes donne :

$$p_2 = 31,0 \frac{w_{max}^3 E h}{a^4} \quad (2.4)$$

En combinant les équations 2.3 et 2.4, la pression totale p est définie par :

$$p = p_1 + p_2 = \frac{w_{max}^3 E h}{a^4} \left(21,9 \frac{h^2}{w_{max}^2} + 31,0 \right) \quad (2.5)$$

La résolution de l'équation 2.5 pour la membrane aluminium décrite plus haut conduit à une flèche w_{max} de 1,32 mm. On peut montrer que lorsque les hypothèses de Kirchhoff sont vérifiées, la pression p_2 équilibrée par l'effet membrane est négligeable. L'approximation de Timoshenko est aussi valable lorsque les hypothèses de Kirchhoff sont vérifiées.

Dans le cas d'un calcul par éléments finis, sous des hypothèses de linéarité, on suppose la rigidité en flexion D constante. Numériquement, cela se traduit par une analyse linéaire dans laquelle la matrice de rigidité est conservée pendant le calcul. Or pour les membranes, la rigidité en flexion varie avec la flèche. Pour obtenir une solution acceptable, il faut utiliser un algorithme non linéaire. En réalité, le programme de calcul utilise une résolution linéaire de manière incrémentale [32]. À chaque étape, il applique une fraction du chargement, s'assure que l'équilibre est atteint puis recalcule la matrice de rigidité. Le tableau 2.5 présente les

résultats analytiques ainsi que ceux obtenus numériquement grâce au logiciel ANSYS pour les deux types de résolution. Il met en évidence que les solutions analytiques sont d'excellentes approximations des solutions convergées, pour la gamme de propriétés simulées. On constate aussi la grande importance de prendre en compte la non-linéarité de la déformation.

2.3.3 Détermination expérimentale des propriétés mécaniques

Corrélation d'images numériques (CIN)

La CIN est une méthode optique de mesure de champs [33, 34] qui consiste en une comparaison spatiale d'images numériques d'une surface à étudier dans différents états de sollicitations mécaniques. Après un traitement d'images, on peut par exemple identifier des propriétés mécaniques, des champs de déformation ou des manifestations locales comme les amorces de fissures. La CIN est utilisée pour diverses études comme celles des métaux à fort gradient de déformations, des mesures de cisaillement, pour l'observation du comportement mécanique des polymères et des composites, ou encore des grandes déformations des élastomères [8]. Elle s'applique pour des pièces de quelques millimètres à plusieurs mètres carrés.

Le principe de la CIN bidimensionnelle – une seule caméra qui filme perpendiculairement à la surface – est de retrouver une zone appartenant à une image non déformée contenant une distribution de tons de gris, appelée zone d'intérêt ou imagette, sur une image déformée (figure 2.3). Des niveaux de gris adéquats permettent de repérer facilement ces motifs. Si le matériau ne présente pas une distribution de tons de gris naturellement favorable à la CIN, un mouchetis de peinture est projeté sur la surface. Finalement, à chaque image du matériau sollicité, c'est-à-dire à un instant donné, on recherche le déplacement à appliquer à l'imagette de référence. Celui-ci est alors affecté au centre de la zone d'intérêt et en réitérant le processus à toutes les zones d'intérêt de l'image, on obtient le champ de déplacement. Les champs de déformation peuvent être calculés par la suite à l'aide d'algorithmes appropriés.

La CIN bidimensionnelle peut conduire à des résultats erronés du fait de l'utilisation d'une seule caméra. Les possibles déplacements hors plan de l'échantillon faussent la mesure

Tableau 2.5 Comparaison des résultats analytiques et numériques des flèches

Type de résolution	Flèche w_{max} analytique	Flèche w_{max} numérique	Écart relatif
Algorithme linéaire	4,60 mm	4,70 mm	2,2 %
Algorithme non linéaire	1,32 mm	1,30 mm	1,5 %

à cause des déformations optiques de l'image (dilatation ou contraction). La présence de deux appareils permet de faire une CIN tridimensionnelle et donne accès à ces déplacements hors plan. Cependant, elle nécessite une configuration précise de la position des caméras, une calibration de leur capteur et un appariement temporel [8, 35].

Test de gonflement

Plusieurs tests de gonflement sont utilisés pour obtenir quelques propriétés mécaniques de membranes. La plupart font appel à des membranes circulaires [36] dont certaines sont en composites élastomères [37, 38]. Le but de ces tests est de relier la flèche maximale à la pression appliquée, ainsi qu'aux propriétés mécaniques et aux paramètres géométriques (rayons de courbures, rapport de forme, etc.). On peut alors comparer un modèle par éléments finis aux résultats expérimentaux issus de l'essai.

Considérons le test de gonflement d'une membrane rectangulaire d'épaisseur h , de largeur l et de longueur L , bloquée en translation sur son contour (c.-à-d. simplement appuyée) et soumise à une pression uniforme p (figure 2.4). Vlassak *et al.* [9] ont défini l'énergie potentielle de la membrane en combinant les déplacements, les déformations, les équations d'équilibre, la loi de Hooke et le chargement. Dans le cas des matériaux isotropes, la minimisation de cette énergie conduit à la flèche maximale w_{max} exprimée sous la forme :

$$w_{max} = f(\nu, L/l) \left(\frac{p l^4}{E h} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

La fonction f est obtenue grâce à des essais sur différentes membranes aux propriétés et dimensions connues. On remarque que l'équation 2.6 a la même forme que celle proposée par Timoshenko (2.5).

Les calculs précédents ne prennent pas en compte les contraintes résiduelles découlant du procédé de fabrication alors qu'elles peuvent grandement influer sur les calculs de flèches en rigidifiant la membrane [39, 9, 40]. Les mêmes constats s'appliquent pour les contraintes créées par le système de fixation ou lorsqu'une membrane n'est pas parfaitement plane (ondulations).

Essais de traction sur les composites élastomères

À la connaissance de l'auteur, les essais de traction sur les élastomères et les composites à matrice polymère sont régulés par les deux normes suivantes :

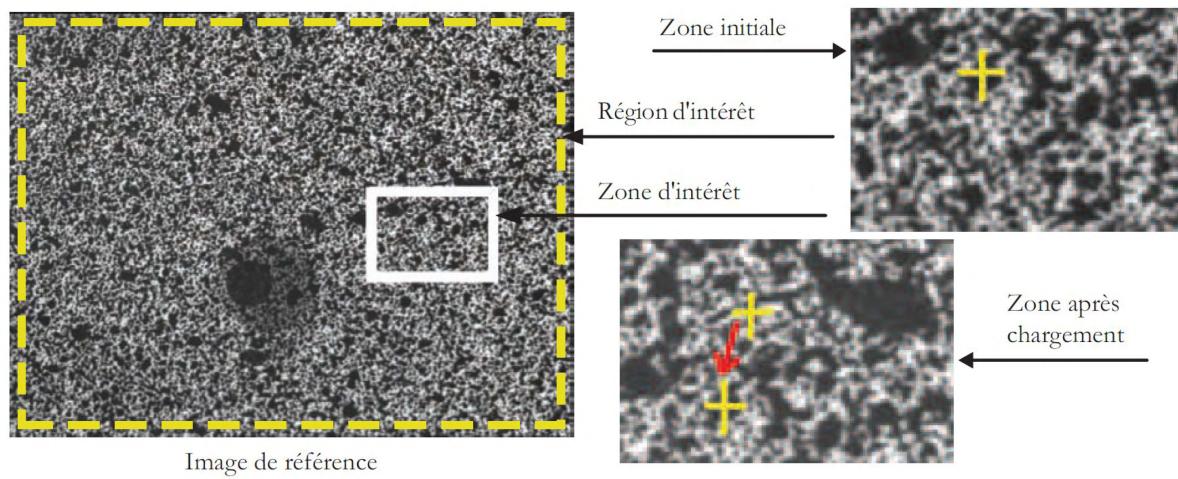


Figure 2.3 Principe de la CIN [8] : faire correspondre un point de l'image du matériau sans chargement, au même point de l'image du matériau sollicité

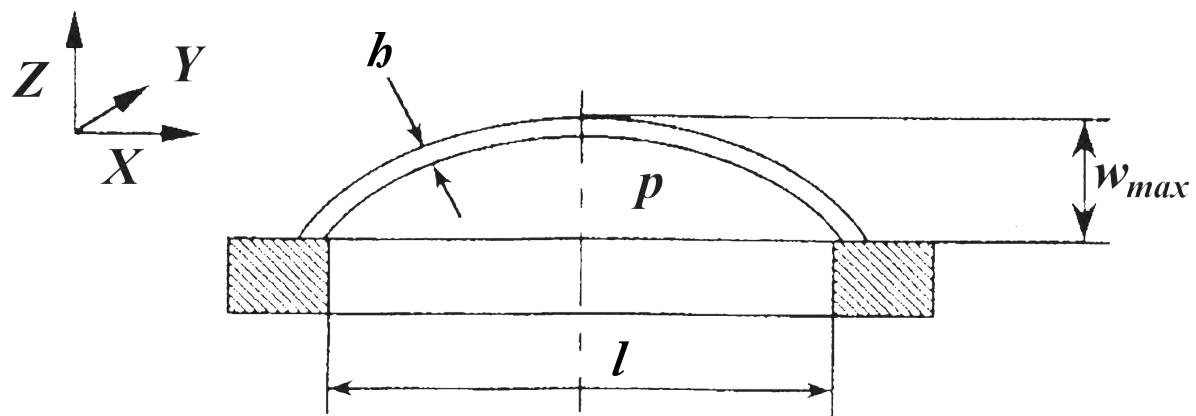


Figure 2.4 Schéma de coupe d'une membrane soumise à une pression uniforme [9]

- ASTM D412 – 06a : *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers – Tension*
- ASTM D3039/D3039M – 14 : *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*

De plus, deux autres normes existent pour mesurer le coefficient de Poisson et du module de cisaillement plan des composites à matrice polymère :

- ASTM D638 – 10 : *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*
- ASTM D3518/D3518M – 13 : *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of $\pm 45^\circ$ Laminate*

Cependant, il n'existe pas de norme spécifique pour les essais sur les composites à matrice élastomère. Pour remédier à cette situation, A. Favre [10] a proposé une méthodologie s'appuyant sur les normes ASTM D412 et D3039. Sa procédure consistait à réaliser des essais de traction à une vitesse de 50 mm/min (intermédiaire entre celles proposées par les deux normes) sur des éprouvettes droites munies de talons (norme ASTM D3039). La géométrie de l'éprouvette est présentée sur la figure 2.5. A. Favre a aussi développé une technique de collage des talons, adaptée aux composites élastomères, qui assurait une adhésion suffisante pour que les ruptures aient lieu dans la section utile des éprouvettes.

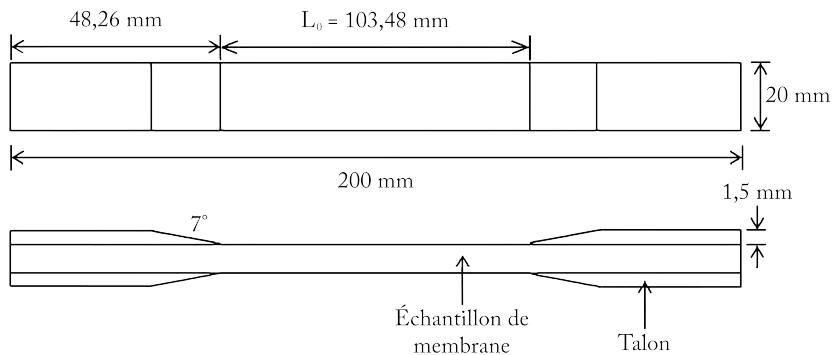


Figure 2.5 Géométrie de l'éprouvette droite munies de talons [10]

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Analyse de la revue de littérature

La revue de littérature a révélé les points suivants :

- l'aspirateur d'une centrale hydroélectrique récupère l'énergie résiduelle de l'eau après son passage dans la turbine, et l'installation d'une membrane gonflable dans l'aspirateur augmente la performance de la centrale ;
- une membrane composite en silicium renforcée de tissus en fibres de verre a été choisie pour l'application voulue afin de respecter le cahier des charges (adaptabilité, conditions d'utilisation et durée de vie) [10] ;
- les membranes ont un comportement mécanique non linéaire à cause de leur géométrie et dont il faut tenir compte dans les calculs de la déformée ;
- des essais de traction couplés à la CIN permettent d'identifier les propriétés des composites élastomères ;
- les essais de gonflement sont utilisés pour comparer les mesures de flèches aux prédictions analytiques et numériques.

3.2 Objectif général et méthodologie

L'objectif général du projet de recherche a été d'évaluer, de manière numérique et expérimentale, la faisabilité d'insertion d'une membrane gonflable silicium/fibres de verre dans un aspirateur de barrage. Pour y arriver, ce travail a été divisés en trois objectifs spécifiques :

1. Réaliser un démonstrateur

Le premier objectif consistait à concevoir un système à taille réduite permettant de gonfler à l'eau des membranes planes. Le but était de valider le concept sur des membranes dont les matériaux et l'architecture avaient été préalablement définis. Cet objectif est abordé au chapitre 4 ;

2. Caractériser des membranes silicium/fibre de verre

Le second objectif était de caractériser le comportement mécanique des membranes

silicone/fibres de verre. Les essais de gonflement des membranes réalisés sur le démonstrateur ont été numérisés puis analysés. Par la suite, des échantillons ont été découpés dans les membranes pour subir des essais de traction avec CIN et des essais de relaxation. Ces essais ont servi à obtenir les propriétés du matériau. Ces résultats sont présentés au chapitre 5 ;

3. Simuler le comportement d'une membrane

Le dernier objectif était de modéliser les essais de membranes effectués sur le démonstrateur. Les simulations numériques ont été effectuées avec ANSYS Mechanical APDL v. 13. Le modèle analytique utilisé a été adapté de l'équation 2.6 définie par Vlassak *et al.* [9]. Les résultats obtenus étant satisfaisants, les modèles ont ensuite été modifiés pour prédire le comportement d'une membrane insérable dans un aspirateur de barrage. Cette partie est traitée au chapitre 6.

CHAPITRE 4

RÉALISATION DU DÉMONSTRATEUR

4.1 Architecture des membranes

Le tableau 4.1 dresse les contraintes de conception et de fabrication du démonstrateur. La matrice utilisée pour réaliser les membranes était en silicium et se présentait sous la forme de lés non vulcanisés. Ses particularités sont résumées au tableau 4.2. Le renfort était un tissu équilibré en fibres de verre E, ce qui conférait aux membranes un comportement quadratique. Il était assez ajouré pour permettre à la matrice de passer entre les torons et ainsi assurer la continuité de la matière. Ses propriétés sont listées au tableau 4.3. Le couple matrice/renfort avait été retenu par A. Favre [10] pour sa compatibilité chimique et son inertie à l'eau.

Deux membranes ont été fabriquées pour les essais sur le démonstrateur. Elles avaient pour dimensions 711 x 864 mm (28 x 34") dont une zone sous pression de 356 x 508 mm (14 x 20"), avec un taux volumique de fibres théorique de 24 %¹. Les membranes ont été mises en forme chez Engineering Research and Flow Technology for Composites (ERFT Composites) selon des paramètres qui sont gardés confidentiels. La première membrane avait une épaisseur constante et était composée de trois empilements² successifs de « matrice/renfort/matrice » (figure 4.1a). L'épaisseur de chaque empilement était de 0,75 mm (0,03"), ce qui a conduit

1. Les membranes fabriquées dans les précédents projets ont été modifiées pour passer d'un taux volumique de fibres théorique de 3 % à 24 %.

2. Cette restriction dimensionnelle est imposée par ERFT Composites

Tableau 4.1 Contraintes de conception du montage d'essai

Coûts	
Budget	12 000 \$
Matériaux de fabrication des membranes	
Matrice	Silicium
Renfort	Tissu en fibre de verre E
Restrictions dimensionnelles	
Taille maximale des membranes	914,4 x 914,4 mm (36 x 36")
Nombre de renforts tissés maximum	3
Chargement à supporter	
Pression maximale	4,6 bar (68 psi)

à une épaisseur totale de 2,25 mm (0,09"). La figure 4.1b résume ces caractéristiques. La deuxième membrane était similaire à la précédente, mais avec une épaisseur variable jusqu'à 2,25 mm dans la zone sous pression. Sa géométrie est présentée sur la figure 4.1c. L'un des intérêts de cette membrane était de démontrer la possibilité d'en fabriquer une ayant une certaine flexibilité dans les courbures.

4.2 Conception du montage d'essai

La figure 4.2 présente le montage conçu dans ce travail pour les essais de gonflement dont les différentes parties sont présentées ci-dessous. Les dessins techniques sont en annexe A.

Plateau de support

Fabriqué en acier A36, le plateau de support de dimensions 508 x 660 mm (20 x 26") a été conçu pour accueillir l'ensemble du montage (barres de fixation, joints d'étanchéité, membrane, boulons). Son épaisseur de 19 mm (3/4") permet de supporter une pression de gonflage de 4,6 bar (68 psi) sans déformation perceptible et d'éviter aux vis de travailler en flexion. Les résultats de simulation par éléments finis ayant servi à obtenir ces constats sont présentés en annexe B.

Joints d'étanchéité

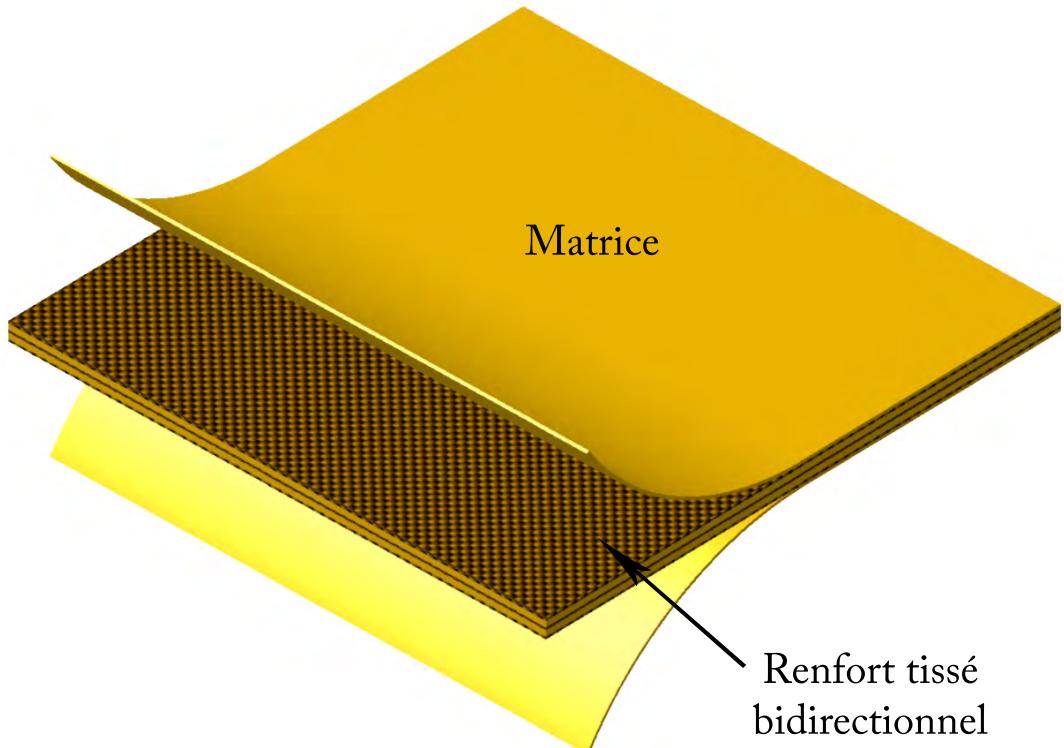
Deux joints toriques en silicone ont été utilisés pour assurer l'étanchéité du montage sous pression. La section des joints avait un diamètre exact de 7 mm (0,275") et leur longueur correspondait à celle des rainures du plateau dans lesquelles ils ont été installés.

Barres de fixation A1, A2, B1 et B2

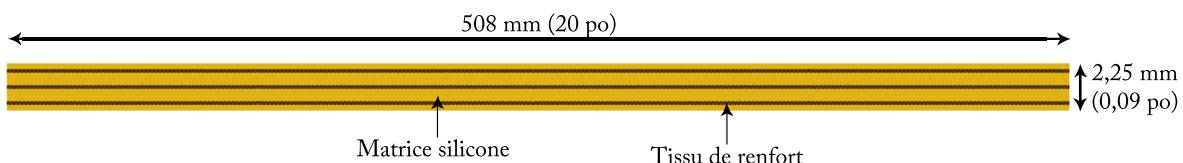
Les barres de fixation ont été découpées dans la même plaque d'acier que le plateau. Leur longueur était aussi identique à la largeur de plateau. Leur largeur de 76 mm (3") a été définie de façon à ce qu'elles soient au bord du plateau et qu'elles bloquent le contour de la

Tableau 4.2 Propriétés de la matrice [7]

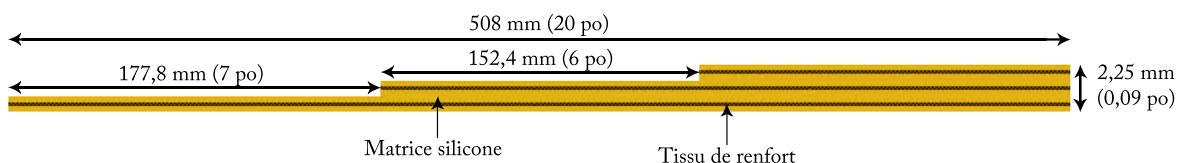
Matériau	Silicone
Module d'élasticité	1 à 50 MPa
Module de Poisson	0,48
Épaisseur après fabrication la membrane	0,285 mm



(a) Empilement des couches de la membrane d'épaisseur constante



(b) Dimensions de la membrane d'épaisseur constante dans la zone sous pression



(c) Dimensions de la membrane d'épaisseur variable dans la zone sous pression

Figure 4.1 Architecture des membranes du démonstrateur – (a) Empilement des couches de la membrane d'épaisseur constante – (b) Dimensions de la membrane d'épaisseur constante – (c) Dimensions de la membrane d'épaisseur variable

Tableau 4.3 Propriétés du tissu

Matériau	Fibres de verre E
Modules d'élasticité	73 000 MPa
Type du tissu	Armure toile (« Plain weave »)
Rapport chaîne/trame	50 %/50 %
Épaisseur compressée	0,18 mm

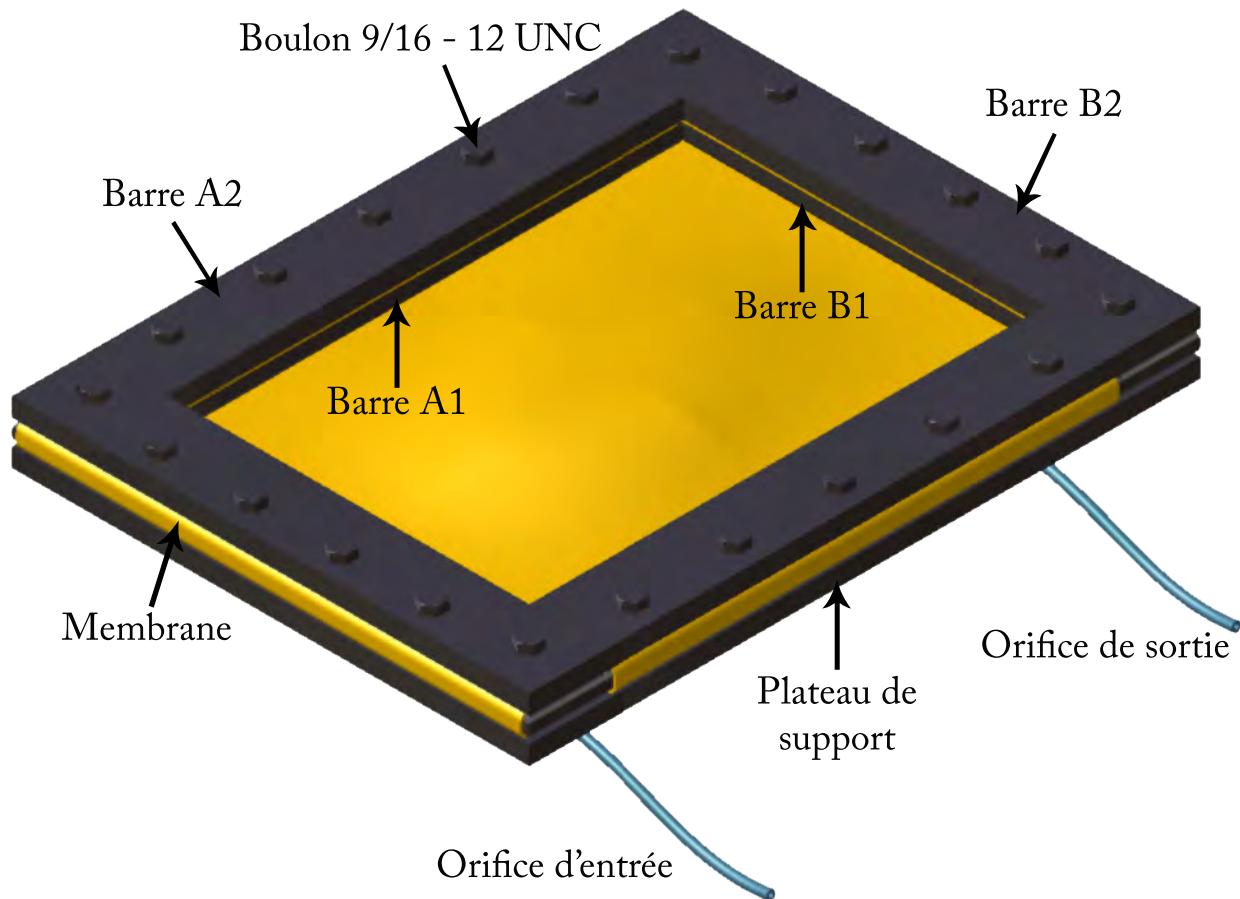


Figure 4.2 Montage d'essai constitué d'un plateau de support sur lequel reposent une membrane et les barres de fixation maintenues par des boulons. Des orifices d'entrée et de sortie d'eau pour gonfler la membrane sont présents sous le plateau.

membrane. De plus, les éléments A1 et B1 avaient des congés sur les arêtes en contact avec la membrane pour éviter de la couper.

Assemblage boulonné

Des boulons à filetage américain unifié standard (UNC) de diamètre 9/16" (14,3 mm) avec un nombre de filets par pouce (TPI) de 12 ont été choisis. Le dimensionnement de l'assemblage est présenté à l'annexe C.

4.3 Assemblage du démonstrateur

L'assemblage du démonstrateur se résume en trois étapes illustrées sur la figure 4.3 :

1. percer des trous de passage des vis dans la membrane à l'aide d'un emporte-pièce (figure 4.3a). La difficulté de cette étape résidait dans le positionnement des trous. Ces derniers avaient un diamètre de 1/2" (12,7 mm) pour des vis de 9/16" (14,3 mm). Ils se sont agrandis au moment du vissage ;
2. mettre en place les joints d'étanchéité sur le plateau de support (figure 4.3b) ;
3. joindre l'ensemble des pièces avec les boulons (figure 4.3c) serrés avec une clé dynamométrique à 36 600 N.mm. Cette valeur est inférieure au niveau d'endommagement et a été définie expérimentalement après des essais d'étanchéité à l'air.

4.4 Système de mise sous pression

Un système de mise sous pression a été utilisé pour acheminer l'eau vers l'orifice d'entrée du démonstrateur. Il était constitué d'un pot sous pression à fermeture autoclave (figure 4.4) rempli d'eau, avec une entrée d'air contrôlée par un régulateur dans la partie supérieure, et une sortie de purge reliée à l'entrée du démonstrateur dans la partie inférieure du pot. L'air pressurisé a servi à pousser l'eau vers le démonstrateur pour gonfler la membrane. La pression de gonflage a été mesurée par un manomètre installé sur l'orifice de sortie du démonstrateur.



(a) Perçage des trous de passage des vis



(b) Joints d'étanchéité sur le plateau



(c) Démonstrateur assemblé

Figure 4.3 Assemblage du démonstrateur – (a) Perçage des trous de passage des vis – (b) Joints d'étanchéité sur le plateau – (c) Démonstrateur assemblé

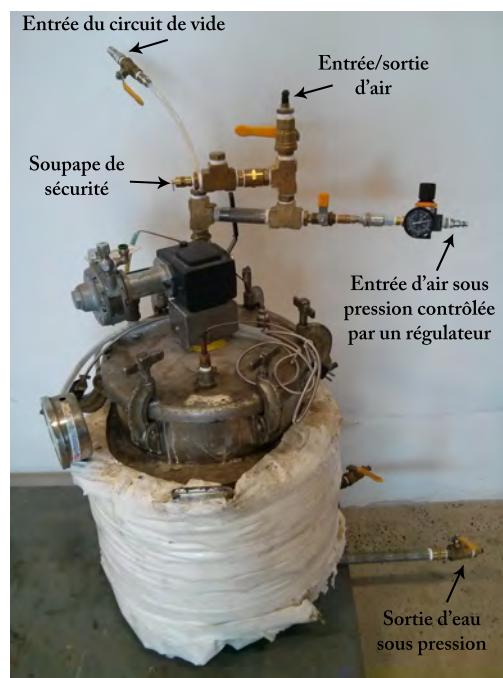


Figure 4.4 Pot sous pression utilisé pour gonfler la membrane

CHAPITRE 5

ESSAIS ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Ce chapitre présente d'une part des essais de gonflement effectués sur le démonstrateur, et d'autre part des essais de traction pour caractériser les membranes.

5.1 Essais de gonflement des membranes

5.1.1 Matériels utilisés et procédure expérimentale

Le scanner portable 3D REVscan de CREAFORM a été utilisé pour numériser la surface d'une membrane gonflée. La technologie reposait sur la triangulation de deux caméras associées pour représenter l'espace. La résolution du REVscan était de 0,100 mm avec une exactitude pouvant atteindre 0,050 mm selon la surface numérisée. Les éventuels défauts de surface (p. ex. la texture granulée de la matrice) ont été visualisés sans problèmes.

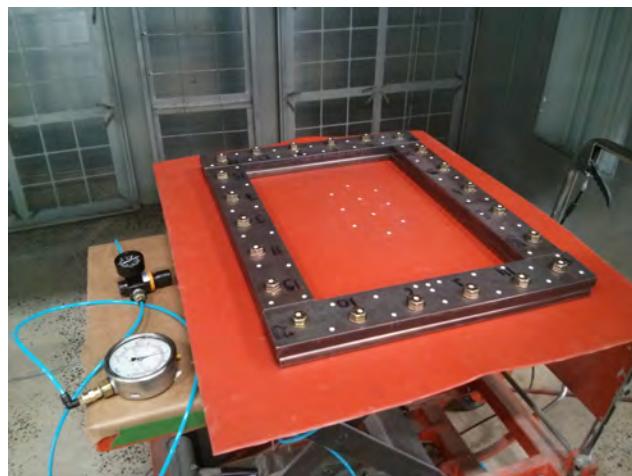
Le scanner a procédé à une auto calibration du système de triangulation à l'aide d'une cible de référence. Ensuite, des pastilles réfléchissantes fixes servant de repères spatiaux ont été placées autour et sur la surface à numériser. Finalement, le logiciel d'acquisition a réglé automatiquement la puissance des lasers en fonction de l'état de la surface (p. ex. la brillance) et de l'exposition perçue par les caméras. Les figures 5.1a et 5.1b montrent le scanner, le démonstrateur avec les pastilles de repérage ainsi que le régulateur de pression et le manomètre qui étaient reliés aux systèmes de mise sous pression.

La numérisation a commencé après l'étalonnage (figure 5.1c). Le scanner, maintenu à une distance d'environ 25 cm, était déplacé au-dessus de la zone souhaitée. Le logiciel d'acquisition affichait le résultat instantanément, ce qui permettait de visualiser les parties non numérisées. Une fois l'acquisition terminée, il a été possible de nettoyer le fichier de maillage surfacique obtenu, puis de l'exporter sous différents formats, dont le STL (reconnu par CATIA par exemple). Plusieurs acquisitions ont été effectuées sur les deux membranes en augmentant graduellement la pression, sans les dégonfler entre chaque mesure.

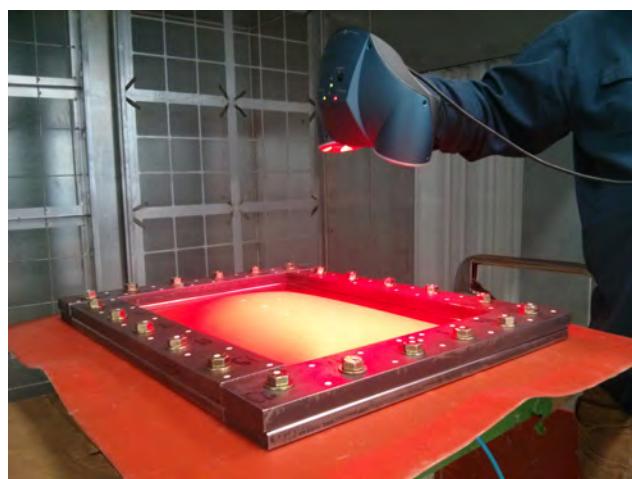
La figure 5.2 présente la numérisation du démonstrateur importée dans CATIA V5. Les différentes parties sont visibles, à l'exception des vis qui n'ont pu être numérisées en raison de leur brillance.



(a) Scanneur REVscan de CREAFORM



(b) Démonstrateur avec les pastilles de repérage



(c) Numérisation d'une membrane

Figure 5.1 Utilisation du scanner 3D – (a) Scanneur REVscan de CREAFORM – (b) Démonstrateur avec les pastilles de repérage – (c) Numérisation d'une membrane

5.1.2 Numérisation de la membrane d'épaisseur constante

Un seul essai de gonflement a été réalisé suivant la procédure décrite précédemment. Le tableau 5.1 et la figure 5.6 montrent les flèches obtenues pour trois pressions différentes, appliquées graduellement afin de minimiser les effets dynamiques du gonflement.

Toutefois, bien que toutes les précautions aient été prises pour la serrer efficacement, la membrane semblait glisser ou s'étirer sous les barres de fixation au fur et à mesure que la pression augmentait. La figure 5.4a montre la membrane soumise à 0,72 bar (10,5 psi) où l'on peut observer que le trait noir, qui était à l'origine droit le long de la barre de fixation, prend une forme incurvée vers l'intérieur du montage, et ce à cause du déplacement de la membrane sous les barres de fixation. De plus, la présence d'ondulations (figure 5.4b) après le dégonflement semble confirmer l'hypothèse de glissement (noter que la membrane était initialement plane avant le premier gonflement).

5.1.3 Numérisation de la membrane d'épaisseur variable

Un seul essai de gonflement de la membrane d'épaisseur variable a été effectué selon la même procédure avec la mesure de cinq pressions. Le phénomène de glissement était encore

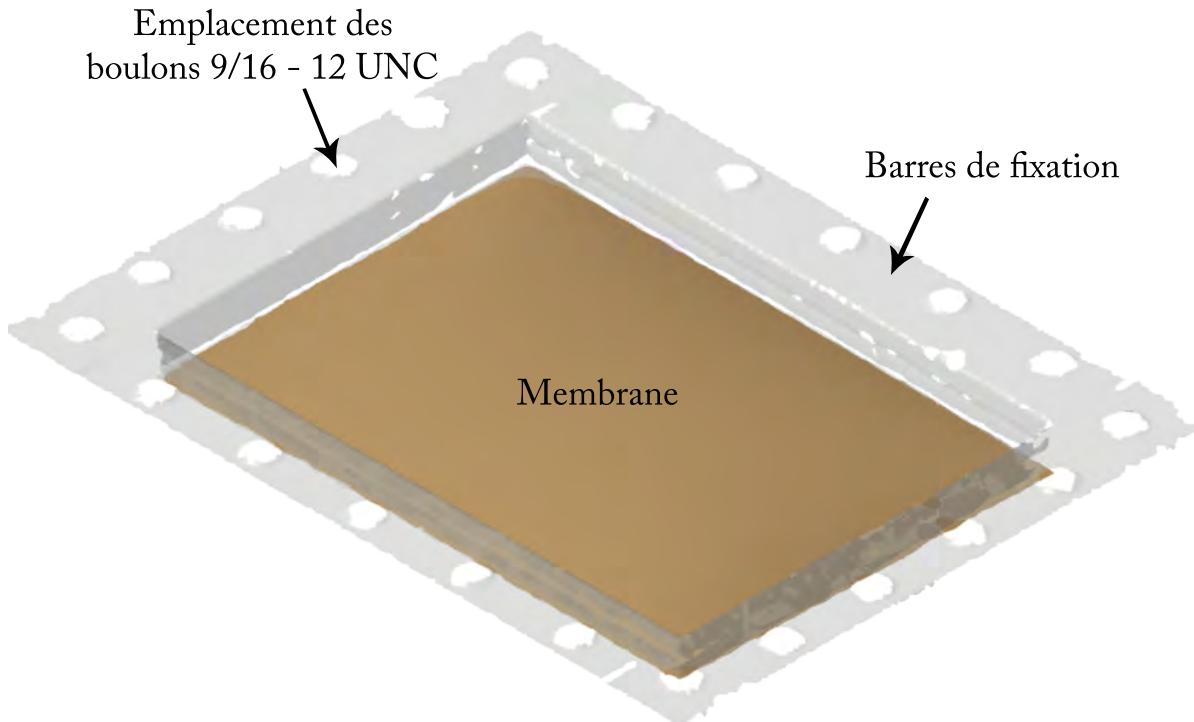


Figure 5.2 Résultat de la numérisation importé dans CATIA V5 – Démonstrateur

Tableau 5.1 Résultats des essais de gonflement pour la membrane d'épaisseur constante

Pression	Flèche w_{max}	Numérisation
0,26 bar (3,75 psi)	20,8 mm (0,82")	Figure 5.3a
0,72 bar (10,5 psi)	28,7 mm (1,13")	Figure 5.3b
0,86 bar (12,5 psi)	30,5 mm (1,20")	Figure 5.3c



(a) Membrane soumise à une pression de 0,26 bar – Flèche de 20,8 mm (0,82")

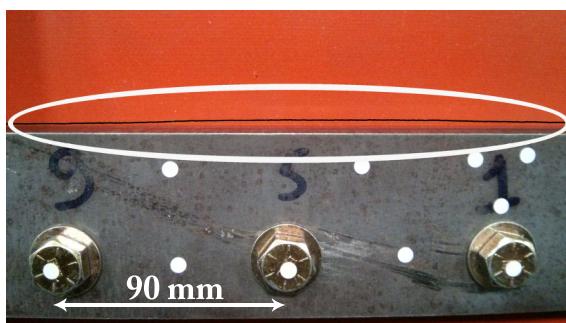


(b) Membrane soumise à une pression de 0,72 bar – Flèche de 28,7 mm (1,13")



(c) Membrane soumise à une pression de 0,86 bar – Flèche de 30,5 mm (1,20")

Figure 5.3 Résultats de la numérisation importés dans CATIA V5 – Membrane d'épaisseur constante soumise à des pressions de : (a) 0,26 bar, (b) 0,72 bar et (c) 0,86 bar



(a) Glissement le long d'une barre de fixation



(b) Ondulations après le dégonflement de la membrane

Figure 5.4 Mise en évidence du phénomène de glissement – (a) Glissement le long d'une barre de fixation – (b) Ondulations après le dégonflement de la membrane

visible, mais l'analyse des fichiers de numérisation a montré que la flèche maximale était légèrement décalée vers la partie de la membrane avec une seule couche de renfort (figure 5.5). Les résultats de ces expériences sont présentés dans le tableau 5.2 et la figure 5.6.

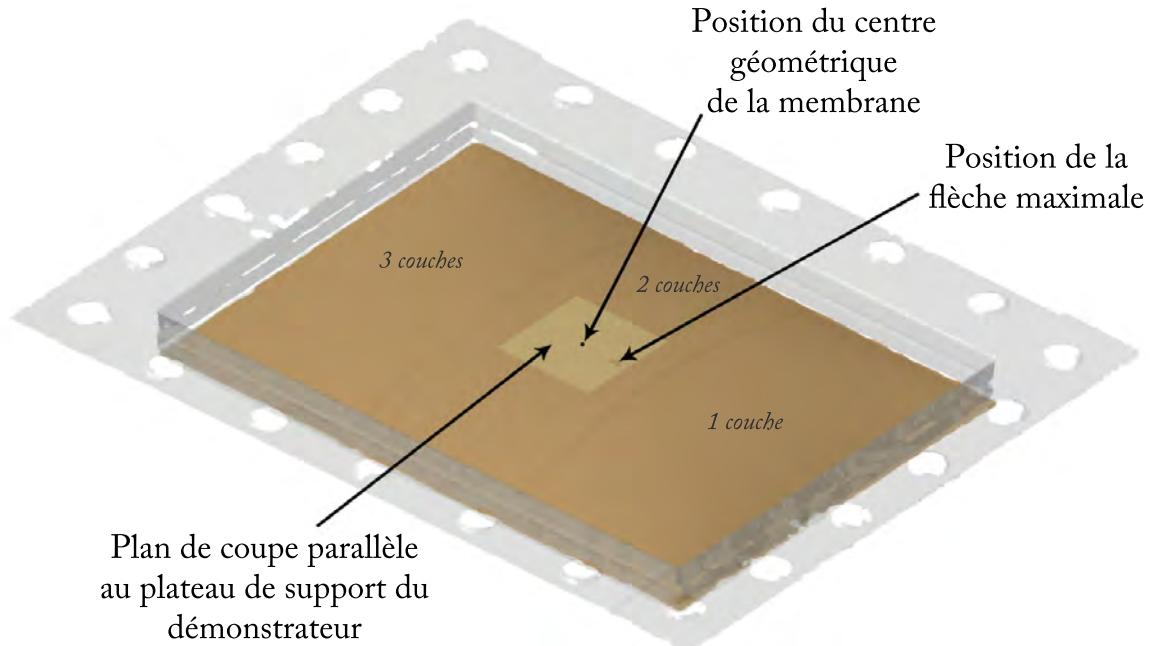


Figure 5.5 Résultat de la numérisation importé dans CATIA V5 – Position de la flèche maximale sur la membrane d'épaisseur variable soumise à 0,66 bar

Tableau 5.2 Résultats des essais de gonflement pour la membrane d'épaisseur variable

Pression	Flèche w_{max}
0,03 bar (0,5 psi)	17,7 mm (0,70")
0,14 bar (2,0 psi)	23,6 mm (0,93")
0,28 bar (4,0 psi)	26,6 mm (1,05")
0,45 bar (5,5 psi)	29,5 mm (1,16")
0,66 bar (9,5 psi)	32,8 mm (1,29")

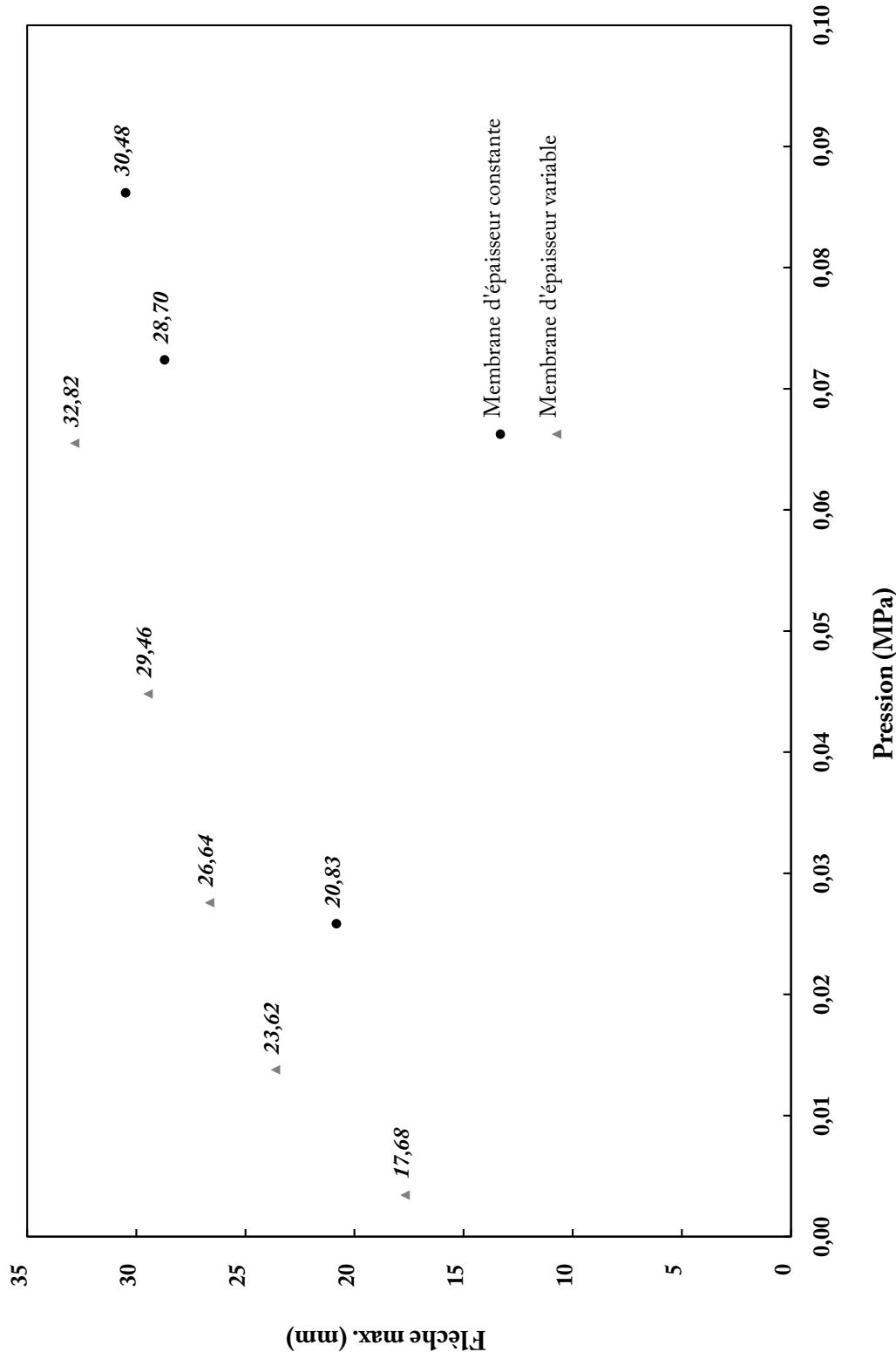


Figure 5.6 Comparaison des flèches maximales des deux membranes en fonction de la pression appliquée

5.2 Obtention des propriétés mécaniques de la membrane

5.2.1 Découpe des éprouvettes et machine de traction

Dix-huit éprouvettes de traction ont été découpées à l'aide d'un emporte-pièce à partir de la membrane d'épaisseur constante qui a été utilisée pour les essais de gonflement (figure 5.7). L'emporte-pièce permettait d'obtenir trois échantillons à la fois. La géométrie des échantillons et la procédure de collage des talons ont été définies par A. Favre [10] et s'inspirent de la norme ASTM D3039. Les éprouvettes sont réparties de la manière suivante :

- douze éprouvettes ont été découpées avec les sens chaîne/trame du tissu orientés à $0/90^\circ$: trois pour des essais de traction par CIN, deux pour des essais de relaxation et quatre pour des réglages ou des essais non validés ;
- six éprouvettes ont été découpées avec les sens chaîne/trame du tissu orientés à $\pm 45^\circ$: deux pour des essais par CIN et quatre pour des réglages ou des essais non validés.

Les dimensions des éprouvettes sont données sur la figure 5.8.

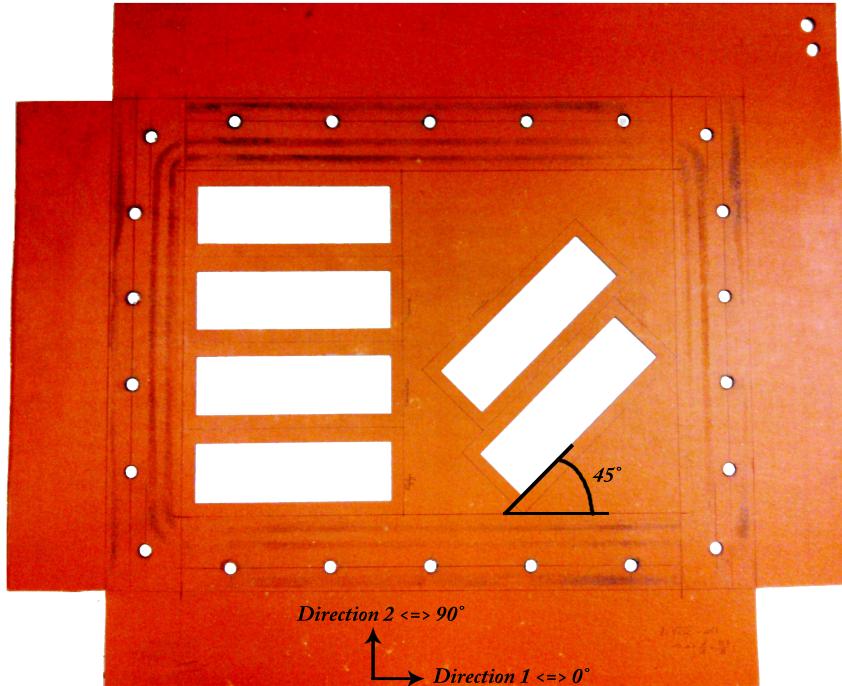


Figure 5.7 Membrane d'épaisseur constante après la découpe des échantillons

5.2.2 Essais de traction par corrélation d'images numériques

Les essais de traction par CIN ont été réalisés au laboratoire de structures et matériaux composites de l'université McGill à Montréal. La machine utilisée était une MTS Insight (figure 5.9) équipée d'une cellule de charge de 5 kN. Les essais ont été réalisés à une vitesse de 5 mm/min (comme préconisé dans les normes ASTM D412 et D3518).

Matériel et procédures

Un mouchetis (points noirs sur fond blanc) aléatoire a été appliqué sur les échantillons à l'aide d'aérosols de peinture mate KRYLON® 4290 (noir) et RUST-OLEUM® 209460 (blanc). Un stylo-feutre noir STAEDTLER Lumocolor® permanent 313-9 avec une pointe de 0,4 mm a aussi été utilisé pour densifier le nuage de points. La caméra employée pour obtenir les images numériques était une FL2G-50S5M-C fabriqué par Point Grey pouvant enregistrer jusqu'à 7,5 images par seconde avec l'objectif 672D de TAMRON. L'ensemble du système optique ainsi qu'un échantillon avec son mouchetis sont montrés sur la figure 5.10.

La caméra était reliée au logiciel VIC-2D™ System développé par Correlated Solutions inc. Le programme permettait de suivre et de calculer le champ de déplacement du mouchetis dans le plan de l'échantillon, ainsi que le champ de déformation associé (basé sur le tenseur de déformation de Green-Lagrange). La synchronisation entre les images et les mesures de force a été réalisée en réglant respectivement la fréquence d'acquisition des systèmes d'enregistrement à 5 Hz et en les démarrant simultanément lors des essais. Un exemple d'interprétation graphique est présenté sur la figure 5.11.

Essais sur les éprouvettes renforcées à 0/90°

Les données expérimentales correspondant à ces essais sont présentées sur la figure 5.14. Une zone non linéaire s'étend jusqu'à 2 % de déformation. Elle n'est pas attribuable au jeu mécanique de la machine car la CIN calculait directement les déformations réelles. On pourrait l'expliquer par le fait que la matrice silicone collée aux talons a commencé à s'étirer avant que les renforts au centre ne soient en tension (figure 5.12). Une autre hypothèse serait que les tissus n'étaient pas à 100 % plan dans le composite, ce qui a fait qu'en les étirant, ils se sont aplatis pour livrer leur pleine et totale rigidité. Une étude plus approfondie de ce phénomène devra être menée.

La déformation longitudinale ε_l à la rupture était de 3,5 % et a systématiquement eu lieu dans les mors au niveau du biseau d'un talon. La contrainte à la rupture de 100 MPa

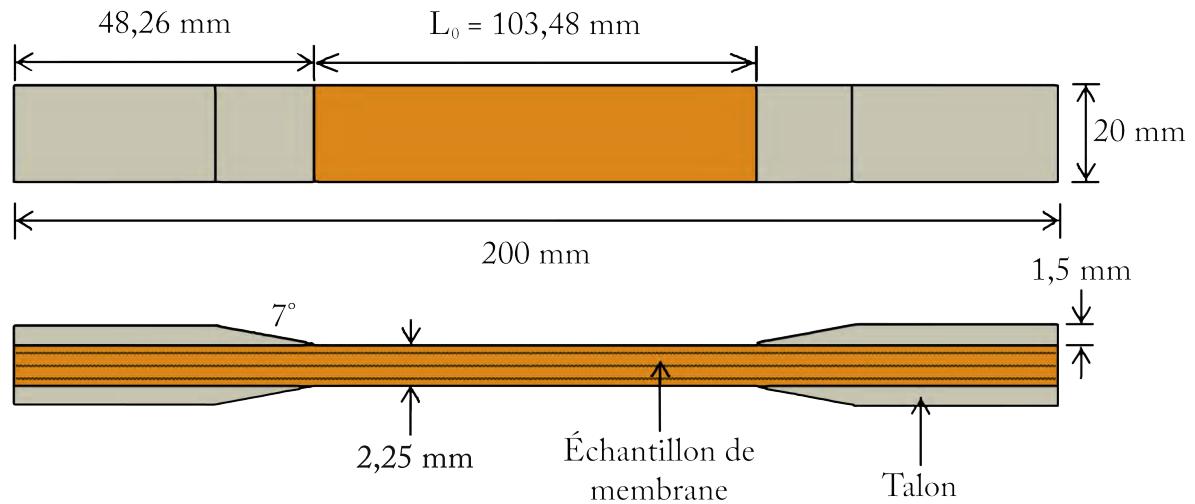


Figure 5.8 Géométrie et dimensions de l'éprouvette et des talons [10]



Figure 5.9 Matériel utilisé pour les essais de traction – (a) MTS Insight – (b) Éprouvette dans les mors

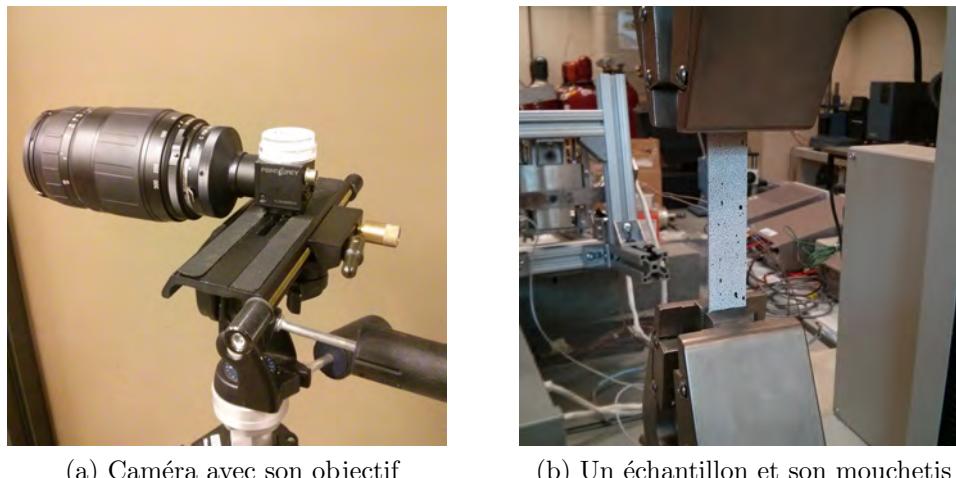


Figure 5.10 Matériel utilisé pour la CIN – (a) Caméra avec son objectif – (b) Un échantillon et son mouchetis

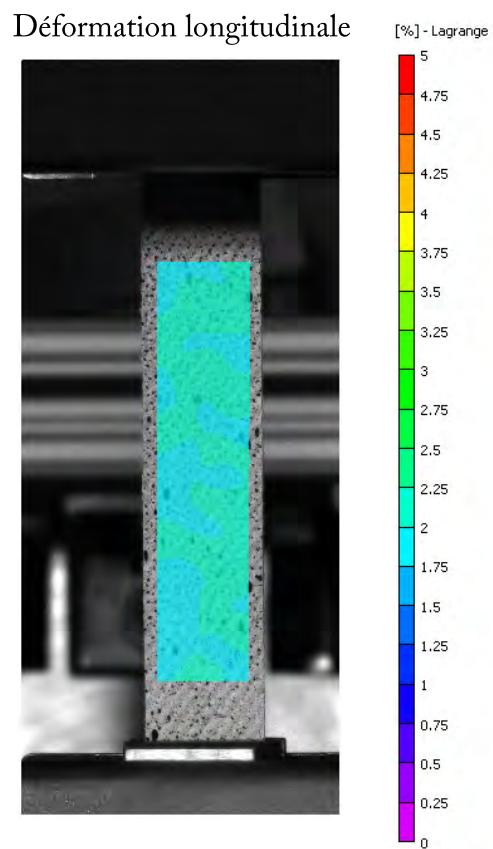


Figure 5.11 CIN : un exemple d'interprétation graphique – Contrainte longitudinale moyenne $\sigma_l = 31,57 \text{ MPa}$ – Déformation longitudinale moyenne $\varepsilon_l = 2,006\%$ – Écart-type $\varsigma = 0,035\%$

mesurée représente donc une valeur conservatrice car elle est forcément inférieure à celle qui aurait prévalu dans la section utile. Les essais associés ont permis de calculer dans la zone linéaire des modules d'élasticité moyens suivant les directions des fibres, indiquées 1 et 2 (figure 5.13a) : $E_l = E_1 = E_2 = 4880$ MPa (tableau 5.3). Le coefficient de Poisson a été calculé selon les recommandations de la norme ASTM D638 qui stipule qu'en présence d'un comportement non linéaire, le coefficient de Poisson doit être calculé entre 0,05 % et 0,25 % de déformation longitudinale. De plus, au-delà de $\varepsilon_l = 0,3$ %, la dispersion des mesures de déformation transversale ε_{tr} était trop élevée pour obtenir des résultats exploitables. La figure 5.15 trace $|\varepsilon_{tr}|$ en fonction de ε_l et permet d'obtenir le coefficient de Poisson moyen $\nu_{12} = 0,85$ (tableau 5.3).

Essais sur les éprouvettes renforcées à $\pm 45^\circ$

Le module de cisaillement plan G_{12} a été obtenu selon la norme ASTM D3518. À partir des relations de changement de bases pour les déformations et les contraintes, on calcule le module de cisaillement plan G_{12} selon l'équation 5.1 :

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{\frac{1}{2}\sigma_l}{\varepsilon_l - \varepsilon_{tr}} \quad (5.1)$$

où σ_l est la mesure de contrainte longitudinale et γ_{12} et τ_{12} sont respectivement l'angle et la contrainte de cisaillement rapport à la direction des fibres (figure 5.13b). La figure 5.16 trace τ_{12} en fonction de γ_{12} . Le module de cisaillement plan moyen est $G_{12} = 9,0$ MPa (tableau 5.3).

Tableau 5.3 Propriétés élastiques de la membrane mesurées par CIN

Propriété	Valeur moy.	Valeur min.	Valeur max.
E_1	4880 MPa	4764 MPa	5025 MPa
E_2	4880 MPa	4764 MPa	5025 MPa
ν_{12}	0,85	0,76	1,05
G_{12}	9.0 MPa	8.95 MPa	9.03 MPa

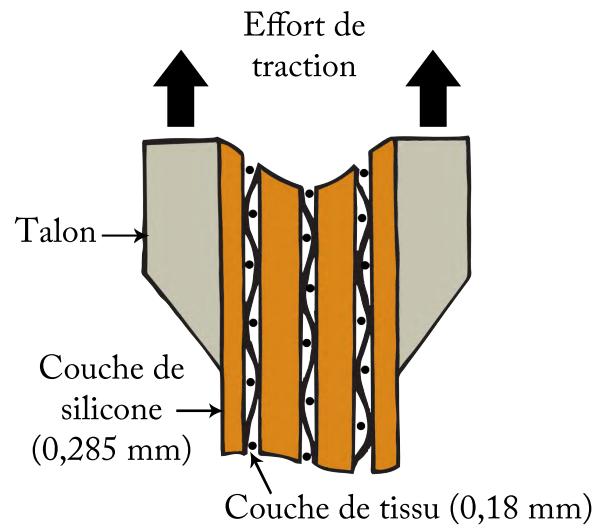


Figure 5.12 Schéma explicatif du comportement initial non linéaire : les couches de silicone collées aux talons s'étirent avant que les renforts tissés du centre ne soient tendus.

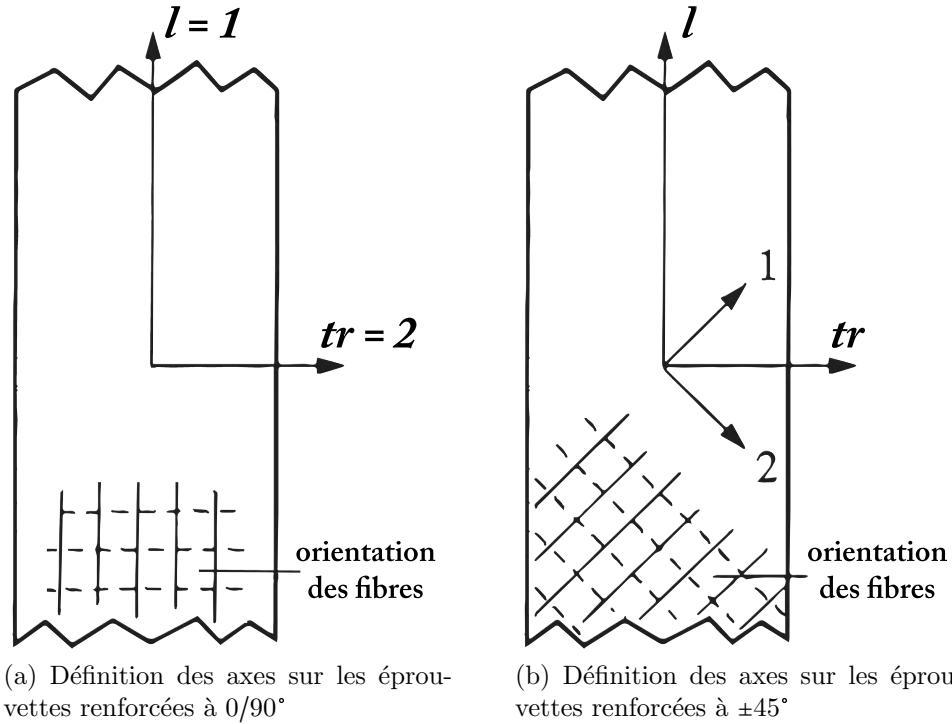


Figure 5.13 Définition des axes sur les éprouvettes renforcées à 0/90° (a) et à ±45° (b)

5.2.3 Essais de relaxation

Les essais de relaxation ont été réalisés au laboratoire mécanique multi-échelle de l'EPM. La machine utilisée était une MTS Insight équipée d'une cellule de charge de 50 kN.

Les essais consistaient à imposer un déplacement de 4 mm (approximativement 2,7 % de déformation) à une vitesse de 5 mm/min et de maintenir ce déplacement durant 30 min (1800 s). Durant cette période, l'évolution de la force a été mesurée à des intervalles de 1 s pendant les 48 premières secondes puis à des intervalles de 128 s. Les essais ont été réalisés sur deux éprouvettes. La figure 5.17 montre qu'après 5 min de relaxation, ce qui correspond approximativement à la durée des essais de gonflement, la contrainte a chuté de 15 %. Une étude plus approfondie de ce phénomène devra être menée.

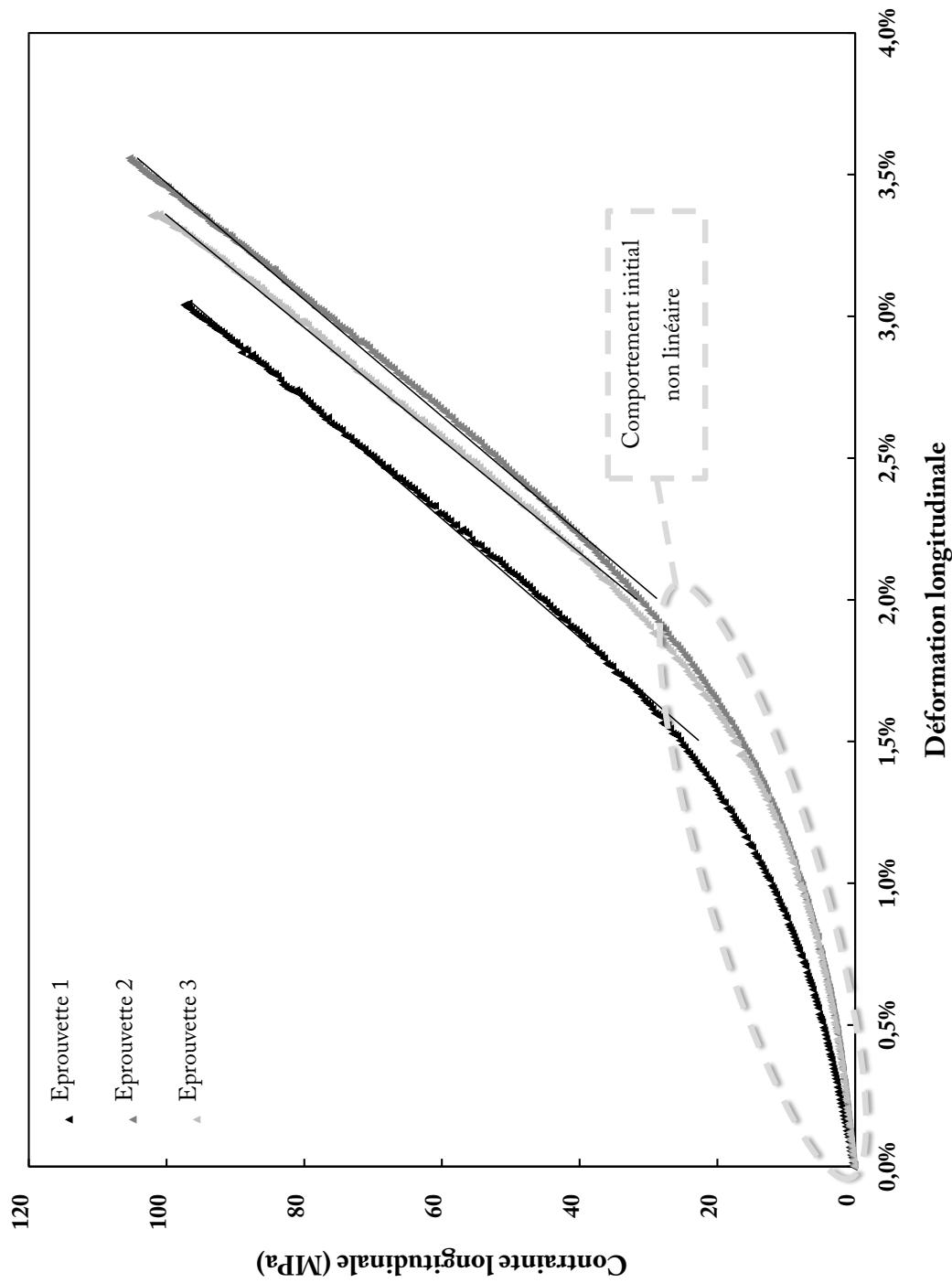


Figure 5.14 Courbes contrainte-déformation longitudinale de trois membranes renforcées à 0/90°

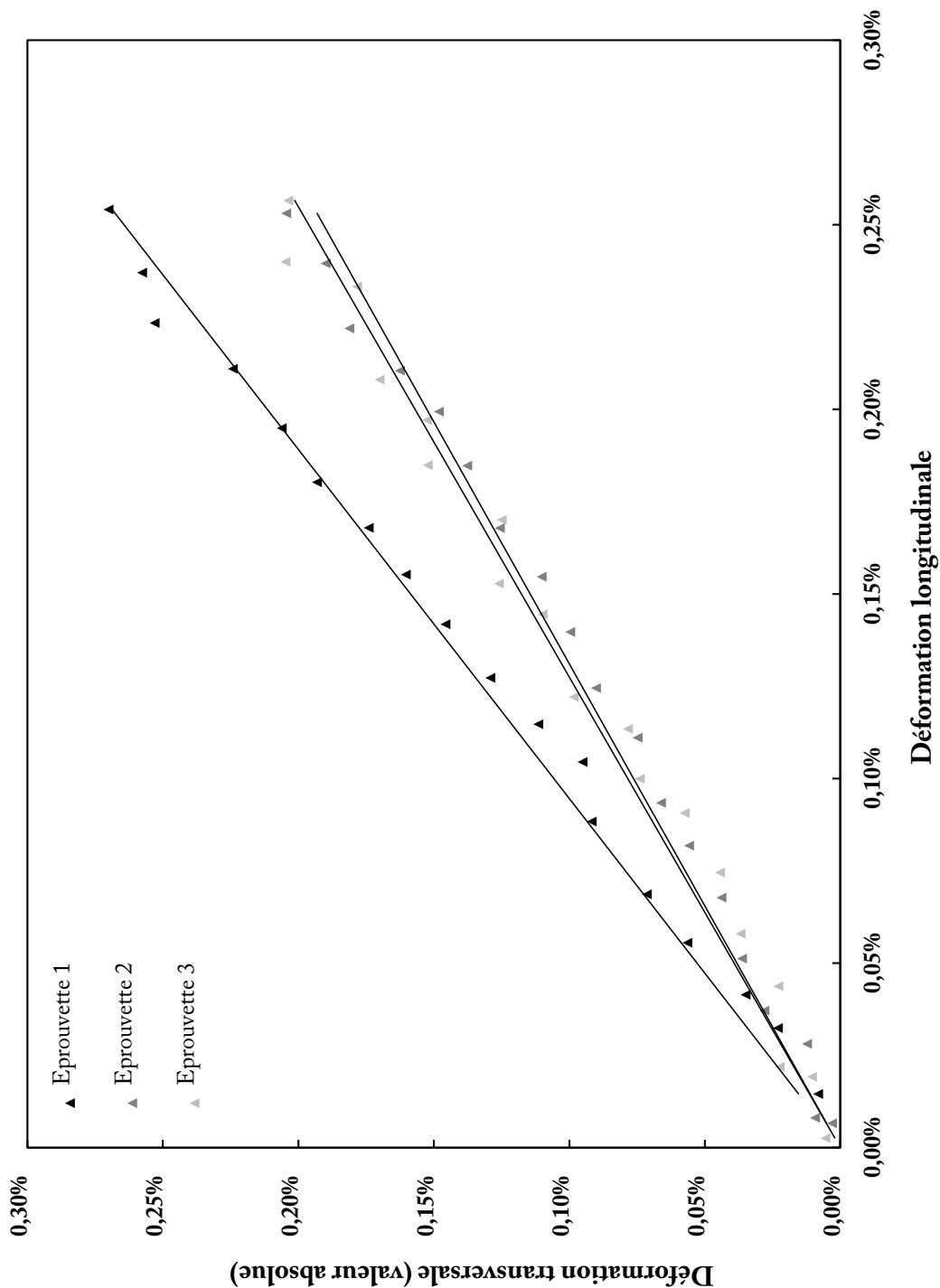


Figure 5.15 Courbes déformation transervale-longitudinale de trois membranes renforcées à 0/90°

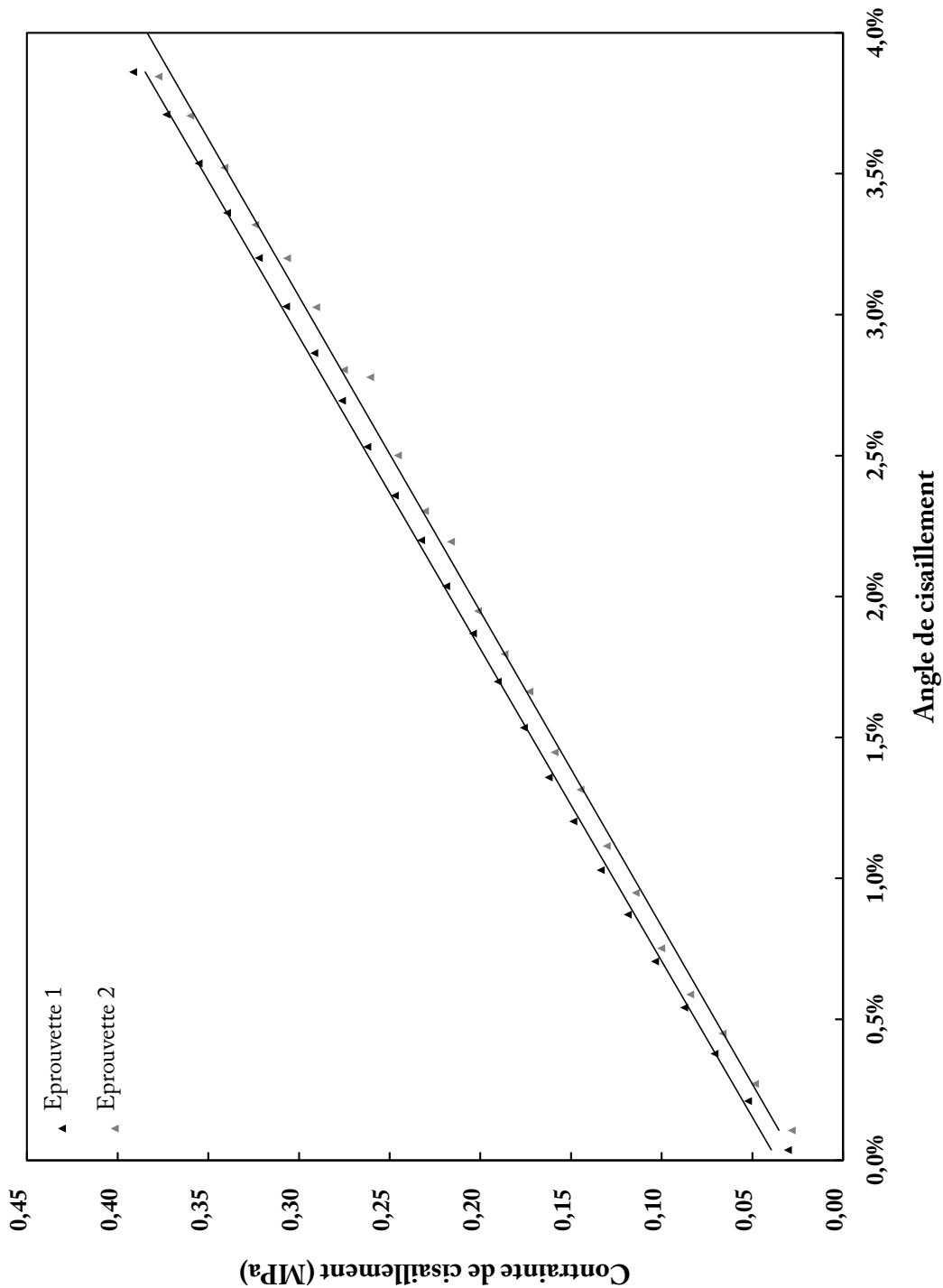


Figure 5.16 Courbes contrainte-angle de cisaillement de deux membranes renforcées à $\pm 45^\circ$

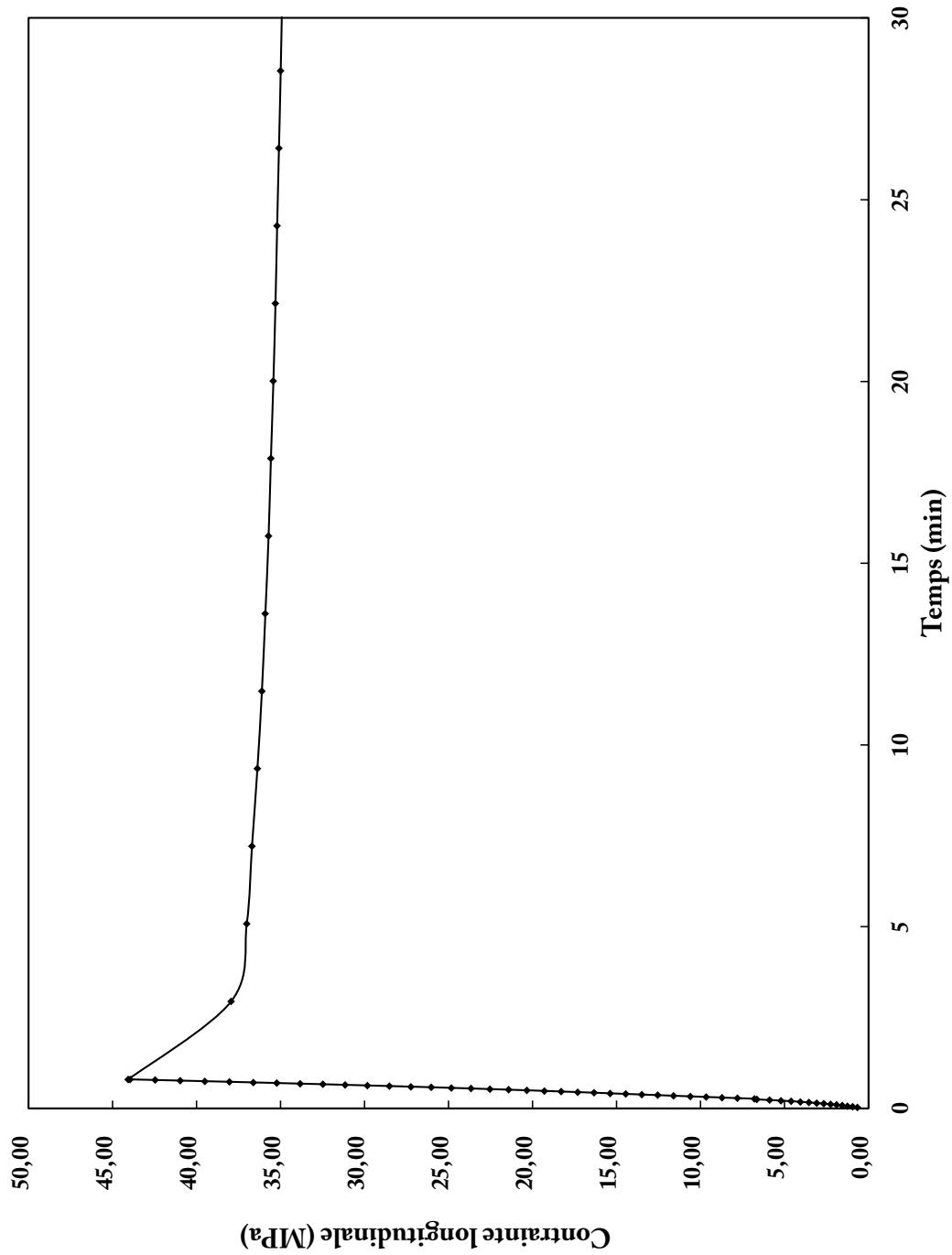


Figure 5.17 Courbe contrainte-temps d'une membrane renforcée à 0/90° sous une déformation de 2,7 %

CHAPITRE 6

MODÉLISATION

6.1 Propriétés élastiques du matériau

Le tableau 6.1 liste les propriétés utilisées dans les modèles. Les valeurs de E_1 , E_2 , ν_{12} et G_{12} sont celles qui ont été obtenues par les essais de traction mais pour lesquelles une diminution de 15% de la valeur nominale a été appliquée pour tenir compte du phénomène de relaxation. Les autres propriétés ont été choisies arbitrairement car leur influence sur la déformée d'une membrane est négligeable [9]. L'annexe D présente une étude de sensibilité des propriétés hors plan et révèle que l'erreur relative de la flèche maximale w_{max} par rapport aux propriétés du tableau 6.1 est inférieure à 1 % pour la plage de données simulées.

6.2 Modèles par éléments finis de la membrane d'épaisseur constante

Les tests de gonflement ont montré que la membrane glissait sous les barres de fixation. Les conditions aux rives (CR) liées à ce phénomène n'ont pas été investiguées précisément. Une approche d'encadrement avec différentes CR a été préférée. Les prochains points listent les hypothèses communes à tous les modèles, les CR simulées ainsi que les maillages utilisés.

Hypothèses communes à tous les modèles par éléments finis

Tous les modèles ont été réalisés avec ANSYS Mechanical APDL v. 13 [32, 41]. La résolution non linéaire a été activée en raison des grands déplacements anticipés et pour tenir compte correctement de l'effet membrane. En réalité, le programme de calcul utilise une résolution linéaire de manière incrémentale. À chaque étape, il applique une fraction du chargement total, s'assure que l'équilibre est atteint par l'évaluation de l'effort résiduel δF (différence entre les efforts externes F_e et internes F_i) puis recalcule la matrice de rigidité. Dans les modèles réalisés, les solutions étaient considérées en équilibre si

$$\| \delta F \| < 0,005 \| F_i \|$$

5 % du chargement total a été appliqué à la première itération, puis les autres incrémentations ont été déterminées automatiquement par l'algorithme de résolution. Par ailleurs, des éléments SHELL181 (élément bilinéaire à 4 noeuds) et PLANE183 (élément de Serendip quadratique à 8 noeuds adapté pour simuler des déformations planes) ont été utilisés.

Membrane simplement appuyée

Le premier modèle simulait une membrane simplement appuyée, ce qui correspondait au cas où la membrane serait entièrement fixe sous les barres de fixation. La géométrie, les éléments choisis et les CR appliquées sont présentées sur la figure 6.1.

Membrane retenue par les vis

Le second modèle correspondait au cas où la membrane glisserait sans frottement sous les barres de fixation en n'étant retenue que par les vis. Le glissement serait maximal. La géométrie, les éléments choisis et les CR appliquées sont présentées sur la figure 6.2.

Membrane retenue par les vis et en déformation plane sous les barres de fixation

Le troisième modèle simulait une membrane retenue par les vis (c.-à-d. glissement possible) mais suffisamment serrée sous les barres de fixation pour qu'elle soit en état de déformation plane ($\varepsilon_z = 0$). Ce modèle est intermédiaire aux deux autres. La flèche maximale devrait donc se situer entre les deux précédentes. La géométrie, les éléments choisis et les CR appliquées sont présentées sur la figure 6.3.

Maillage et convergence

Une étude de convergence qui consistait à progressivement augmenter la densité du maillage jusqu'à la convergence de la flèche maximale a été effectuée. La figure 6.5 en montre un exemple. Le nombre d'éléments utilisés a aussi été fixé en fonction de la pression appliquée pour éviter les problèmes de distorsion (tableau 6.2). La figure 6.4 présente un maillage à 3135 éléments de la géométrie de la membrane d'épaisseur constante.

6.3 Modèle analytique

L'équation 2.6 présentée en revue de littérature relie la flèche maximale d'une membrane isotrope, rectangulaire et simplement appuyée, à la pression appliquée, ses propriétés mécaniques et son rapport de forme. En s'inspirant de cette relation, on suppose l'équation suivante pour une membrane quadratique maintenue par des CR quelconques :

$$w_{max} = f(\nu_{12}, G_{12}, L/l, h) \left(\frac{p l^4}{E h_{moy}} \right)^{\frac{1}{3}} g(CR) \quad (6.1)$$

avec $E = E_1 = E_2$, h_{moy} l'épaisseur moyenne de la membrane et g une fonction qui dépend

Tableau 6.1 Propriétés élastiques de la membrane utilisées pour les modèles

Propriété	Valeur
Propriétés mesurées	
E_1 (sens chaîne)	4148 MPa
E_2 (sens trame)	4148 MPa
ν_{12}	0,85
G_{12}	7,65 MPa
Propriétés peu influentes	
E_3	41,48 MPa
ν_{23}	0,33
ν_{13}	0,33
G_{23}	7,65 MPa
G_{13}	7,65 MPa

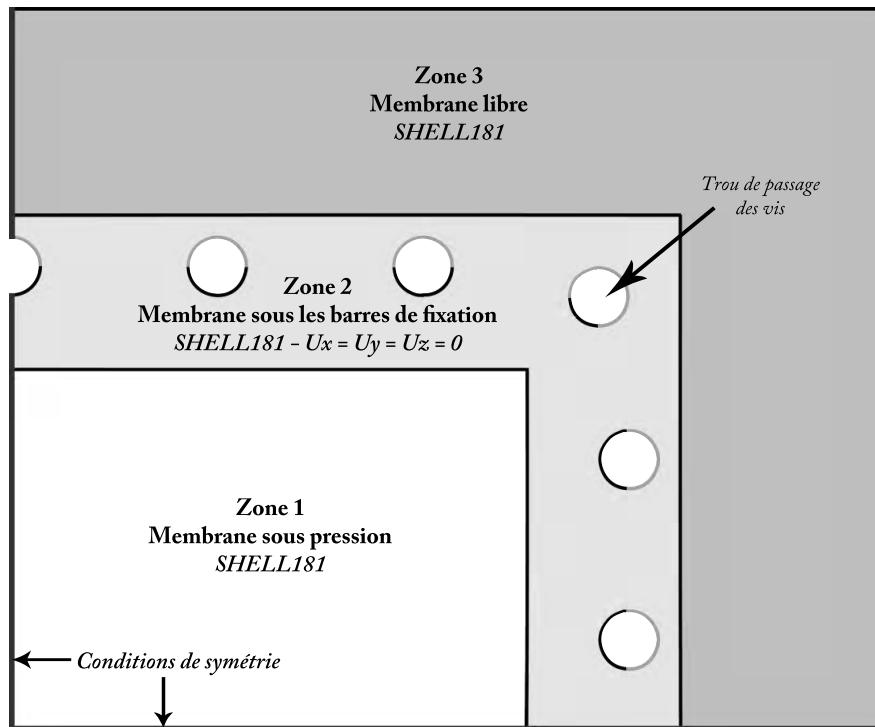


Figure 6.1 Modèle pour la membrane d'épaisseur constante simplement appuyée

Tableau 6.2 Nombre d'éléments en fonction de la pression appliquée

Pression	Nombre d'éléments
0,26 bar (3,75 psi)	23349
0,72 bar (10,5 psi)	3135
0,86 bar (12,5 psi)	2417

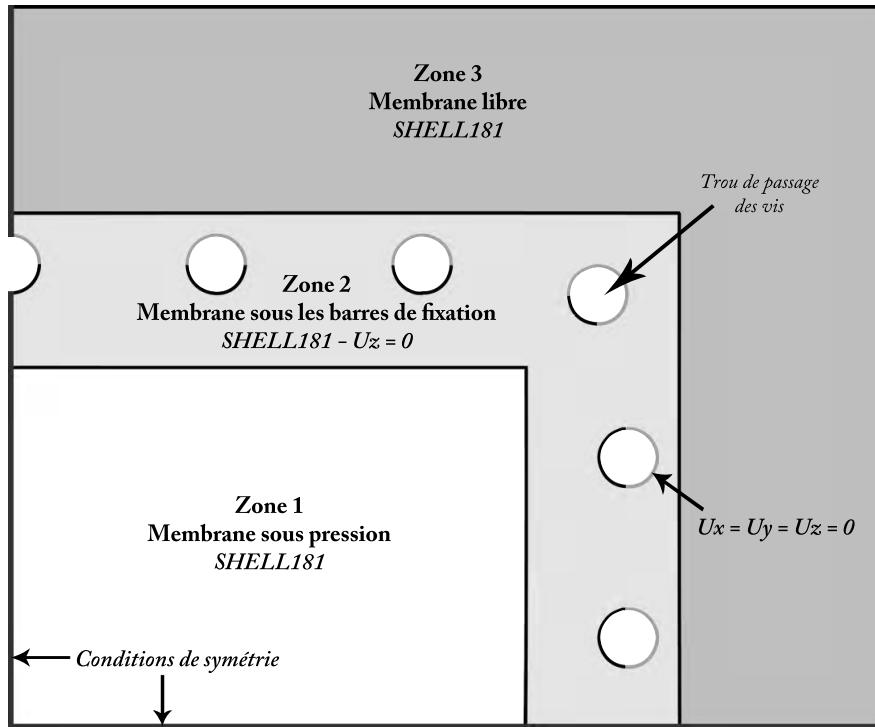


Figure 6.2 Modèle pour la membrane d'épaisseur constante retenue par les vis

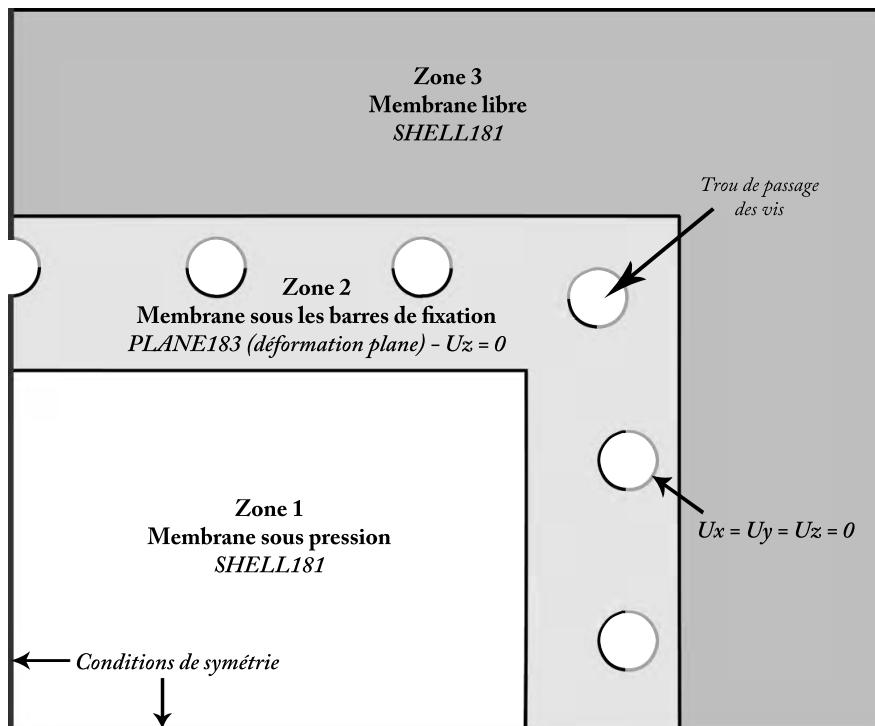


Figure 6.3 Modèle pour la membrane d'épaisseur constante retenue par les vis et en déformation plane sous les barres de fixation

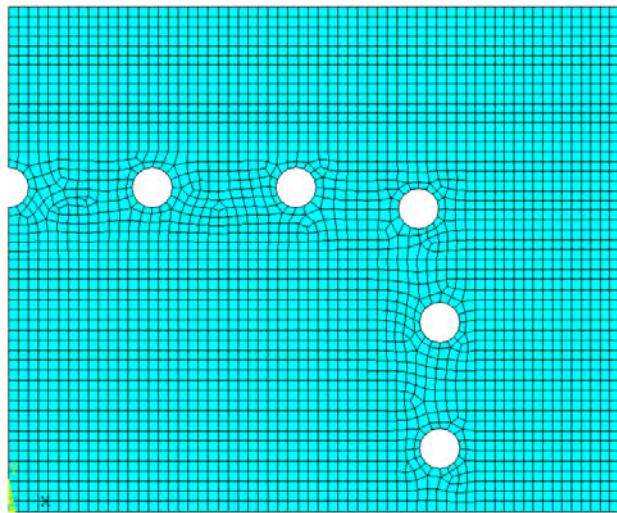


Figure 6.4 Maillage à 3135 éléments de la géométrie de la membrane d'épaisseur constante

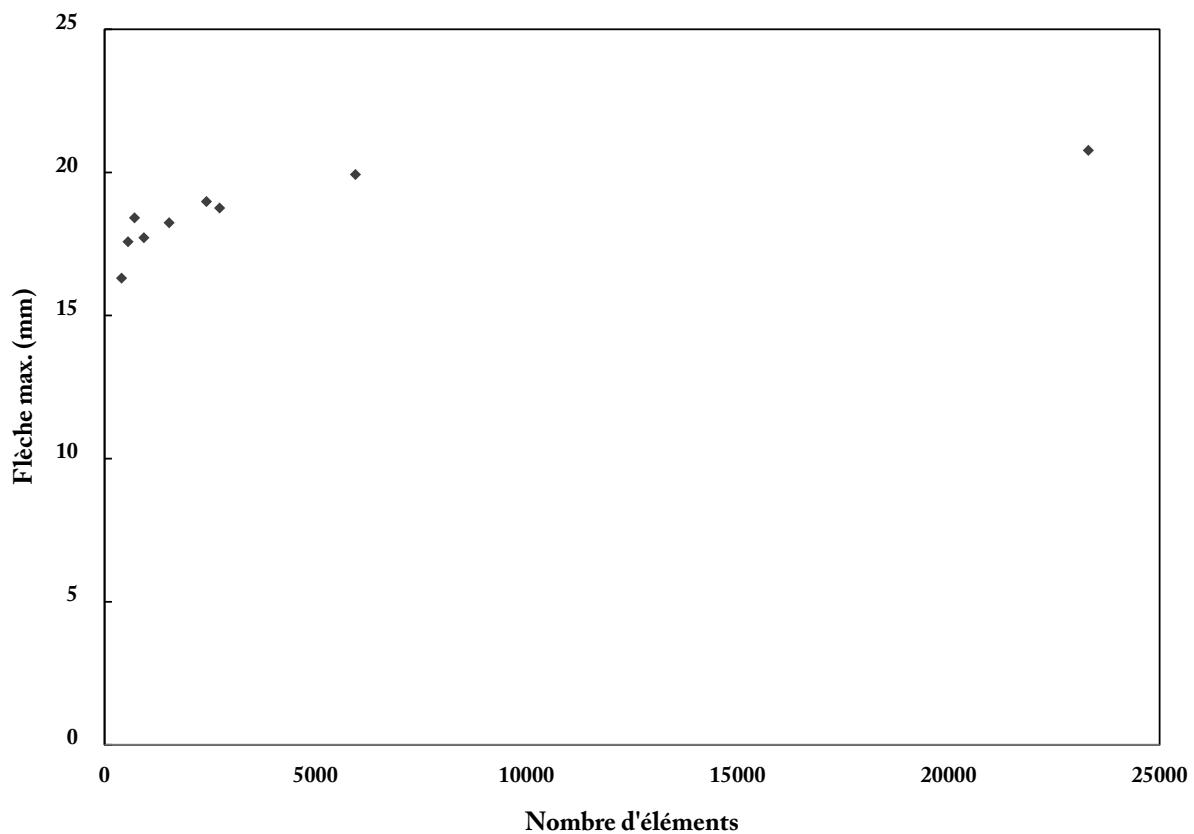


Figure 6.5 Flèche maximale en fonction du nombre d'éléments pour la membrane retenue par les vis et en déformation plane, soumise à une pression de 0,86 bar (12,5 psi)

des CR. Pour une membrane simplement appuyée, $g(CR) = 1$. Les équations 2.6 et 6.1 sont équivalentes pour une membrane isotrope, rectangulaire et simplement appuyée.

6.4 Analyse des résultats simulés et analytiques

Le modèle analytique a été utilisé pour deux objectifs :

1. caractériser l'influence des CR sur la flèche maximale à l'aide des résultats numériques ;
2. approcher analytiquement les résultats expérimentaux des essais de gonflement.

La figure 6.6 montre les résultats expérimentaux et des modélisations numériques et analytiques des essais de gonflement de la membrane d'épaisseur constante. Les résultats numériques ont permis d'ajuster les valeurs de f et g de l'équation 6.1 par la méthode des moindres carrés. Les principales conclusions sont :

- les résultats des modèles numériques et analytiques (équation 6.1) sont parfaitement superposés pour la membrane simplement appuyée – $g(CR) = 1$ – avec

$$f(\nu_{12}, G_{12}, L/l, h) = 0,22$$

L'épaisseur moyenne vaut $h_{moy} = h = 2,25$ mm et la valeur de f est la même pour tous les modèles analytiques car la même membrane d'épaisseur constante a été testée ;

- la corrélation entre les résultats des modèles numériques et analytiques est excellente. Les paramètres obtenus sont :

- $g(CR) = 3,16$ pour la membrane retenue par les vis ;
- $g(CR) = 1,66$ pour la membrane retenue par les vis et en déformation plane sous les barres de fixation ;
- les résultats expérimentaux sont approchés par le modèle analytique avec $g(CR) = 2,63$. C'est le coefficient qui modélise la fixation de démonstrateur ;
- comme les essais de gonflement ont révélé le phénomène de glissement et qu'il est probable que la membrane n'était assez serrée pour avoir $\varepsilon_z = 0$, il est cohérent que les données expérimentales se situent entre ces deux modèles.

Un modèle par éléments finis de la membrane d'épaisseur variable, simplement appuyée, a été réalisé de manière analogue à la membrane d'épaisseur constante (figure 6.7). Le but était de valider le coefficient obtenu pour la fixation du démonstrateur. Les principales conclusions découlant des résultats expérimentaux et des modélisations (figure 6.8) sont :

- les modèles numériques et analytiques concordent parfaitement avec

$$f(\nu_{12}, G_{12}, L/l, h) = 0,23$$

L'épaisseur moyenne h_{moy} est de 1,5 mm et la valeur de f est la même pour tous les modèles analytiques car la même membrane d'épaisseur variable a été testée ;

- le modèle analytique s'apparente aux données expérimentales avec le même coefficient $g(CR) = 2,63$.

En conclusion, les différents modèles ont permis mettre en avant le rôle important des CR sur le calcul de la flèche maximale d'une membrane sous pression, de caractériser la fixation du démonstrateur et de représenter fidèlement les essais expérimentaux. Cependant, les essais de traction avait révélé un comportement non linéaire de la membrane (figure 5.14) qui était plus souple lors des premiers pour cents de déformation. En réalité, la membrane avait donc une plus grande déformée au début du gonflement, avant qu'elle n'atteigne sa rigidité finale. Par conséquent, il est possible que la fonction g dépende à la fois des CR et de cet effet qui semble être le même pour les membranes d'épaisseur constante et variable. Lors d'une étude future, le frottement pourrait être pris en compte dans les modèles numériques afin d'analyser son influence et les comparer à la fixation réelle.

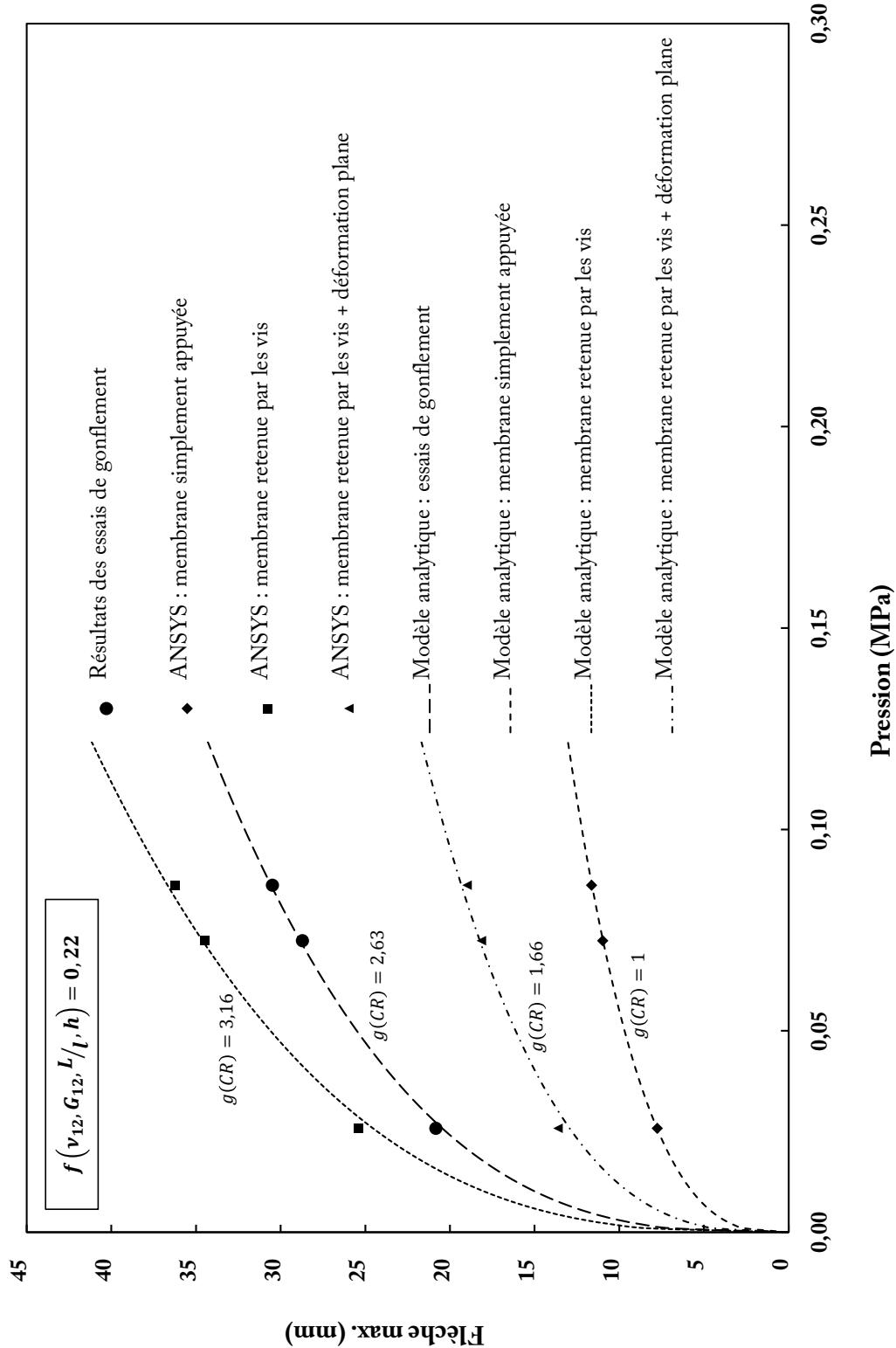


Figure 6.6 Flèche maximale de la membrane d'épaisseur constante en fonction de la pression appliquée

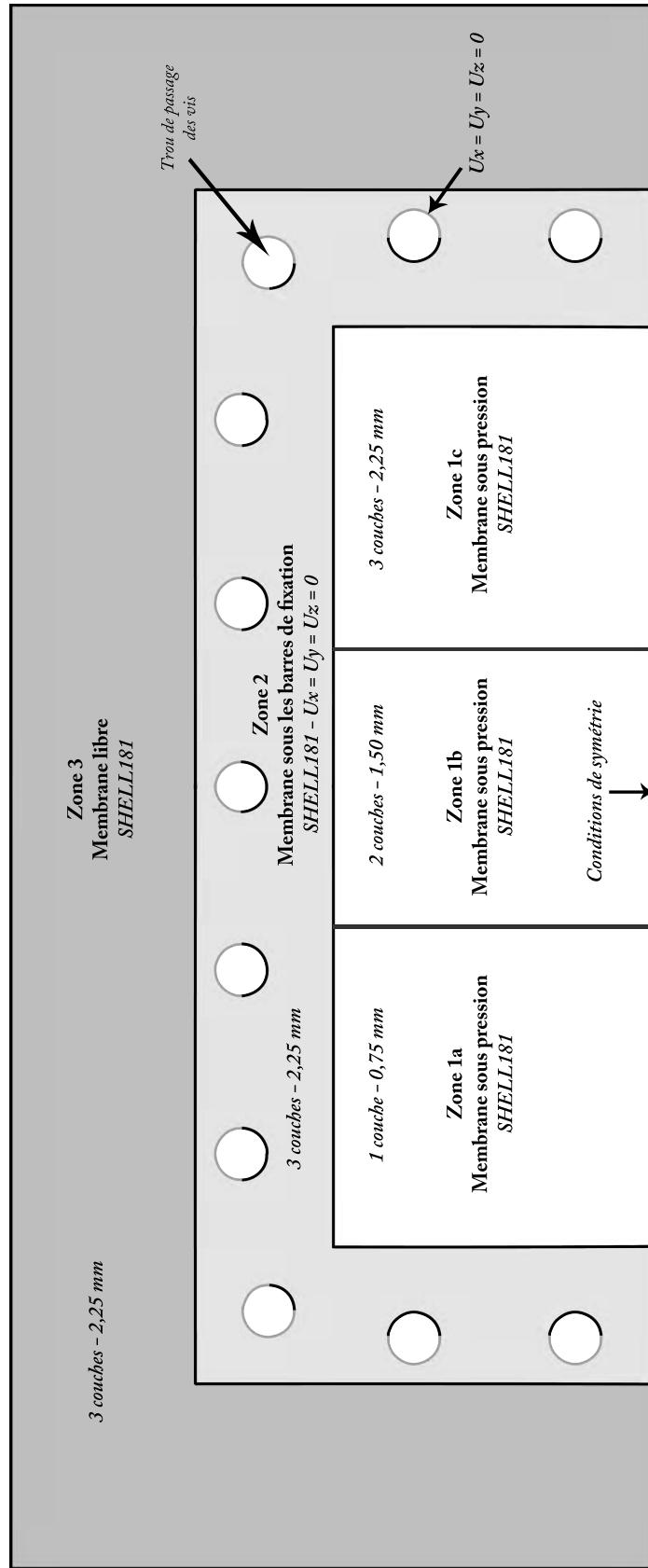


Figure 6.7 Modèle pour la membrane d'épaisseur variable simplement appuyée

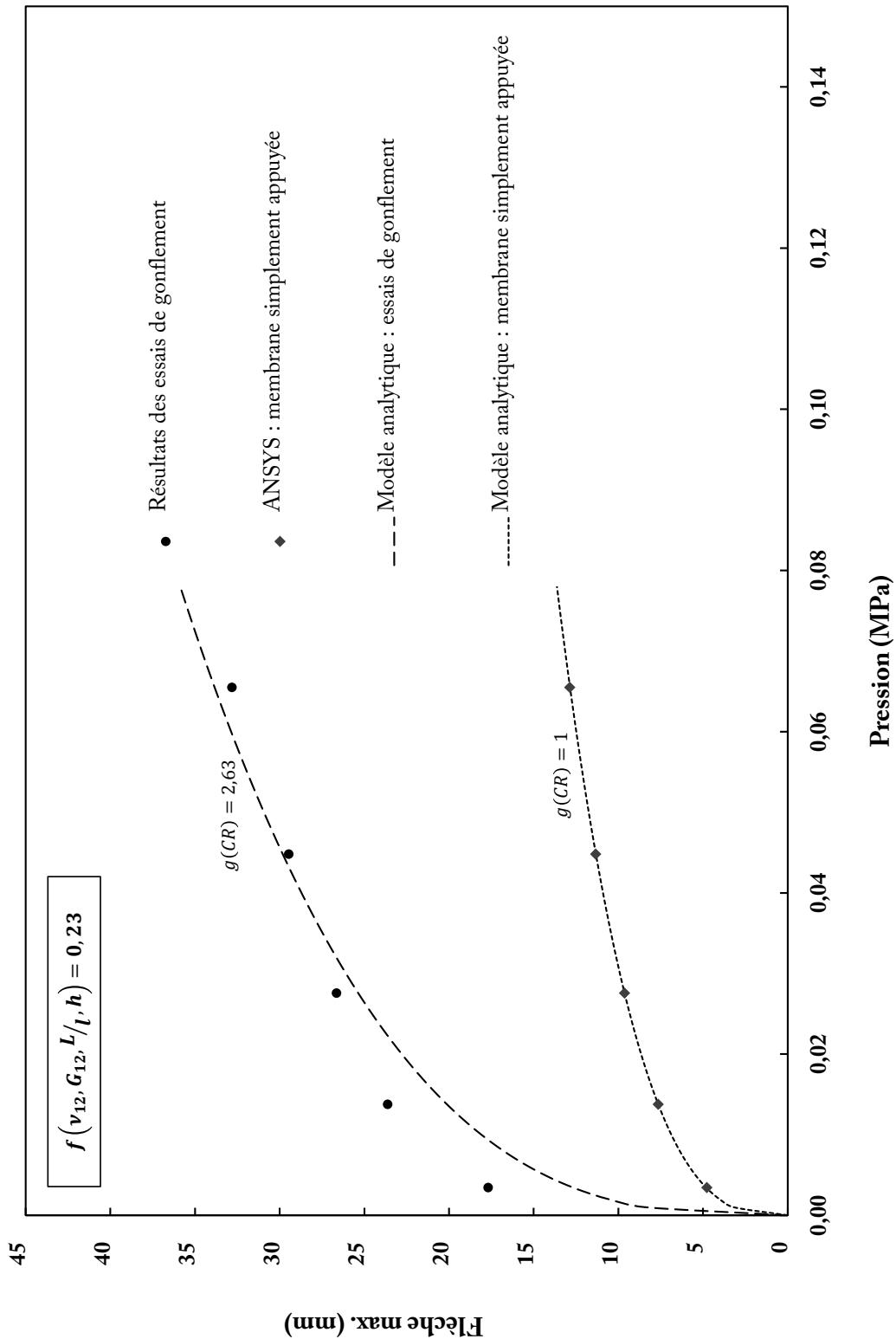


Figure 6.8 Flèche maximale de la membrane d'épaisseur variable en fonction de la pression appliquée

6.5 Modélisation de la membrane 3D insérable dans un barrage

6.5.1 Contexte

Cette section présente le calcul préliminaire d'une membrane 3D insérable dans la centrale Les Cèdres d'Hydro-Québec dont la hauteur de chute est d'environ 10 m. Pour des raisons de confidentialité, les détails de la géométrie du barrage et de la membrane ne sont pas présentés. La membrane modélisée avait une surface d'environ 85 m² et était soumise à une pression différentielle de 1,5 bar, ce qui représente une force de poussée sous la membrane de 12 750 kN.

6.5.2 Choix d'architecture : une membrane quasi isotrope

Une membrane stratifiée symétrique quasi isotrope a été choisie. Ce type d'empilement permet d'éviter les effets de couplage tension/flexion et tension/torsion et est très employé en aéronautique [42] car il présente une rigidité uniforme, une résistance dans toutes les directions et empêche la propagation des fissures.

La règle de Werren et Norris [43] a été utilisée pour définir la séquence d'empilement. Elle stipule que si un stratifié est composé d'un total de n plis unidirectionnels identiques, divisés en m groupes ($m \geq 3$) de q plis chacun ($q = n/m$) et orientés de façon décalée de π/m , alors son comportement est isotrope dans le plan. Pour $m = 4$, les orientations sont -45° , 0° , 45° et 90° . Si chaque groupe a q plis, alors le stratifié aura au total $n = 4q$ plis. L'exemple suivant suit de la règle de Werren et Norris :

$$[0^\circ_q / 90^\circ_q / -45^\circ_q / 45^\circ_q] \quad (6.2)$$

Pour un tissu équilibré, comme c'est le cas pour les membranes utilisées dans ce projet, il faut placer un nombre identique de plis à 0° (renforts du tissu suivant $0^\circ/90^\circ$) et à 45° (renforts du tissu suivant $\pm 45^\circ$). L'architecture donnée par la formule 6.2 devient alors :

$$[0^\circ_q / 45^\circ_q] \quad (6.3)$$

La membrane modélisée pour le barrage avait la séquence d'empilement symétrique suivante :

$$[(0^\circ / 45^\circ)_{12}]_S \quad (6.4)$$

Elle respecte la règle de Werren et Norris tout en étant découpée. La membrane simulée était donc composée de 48 plis d'épaisseur de 0,75 mm, ce qui correspond à une épaisseur totale de 36 mm. Ce choix d'empilement a été sélectionné par essais et erreurs afin de trouver une membrane qui résiste au chargement appliqué.

6.5.3 Géométrie, maillage, conditions aux rives et chargement

La géométrie de la membrane a été maillée avec des éléments de Serendip quadratiques à 8 noeuds SHELL281 (figure 6.9). Les propriétés mécaniques utilisées étaient les mêmes que celles définies dans le tableau 6.1. Même si la membrane est plus épaisse, seules les propriétés dans le plan sont importantes.

Dans cette analyse, la membrane était simplement appuyée et gonflée sous une pression de 1,5 bar. Cette valeur fixée arbitrairement était supérieure de 50 % à la pression hydrostatique associée à la hauteur de chute du barrage Les Cèdres et jouait donc le rôle de facteur de sécurité. Une étude plus approfondie des pressions liées à l'écoulement devra être menée.

6.5.4 Analyse des résultats

La figure 6.10 présente le champ de déplacement aux noeuds de la membrane lorsque soumise à une pression de 1,5 bar. La norme maximale du vecteur déplacement atteint 362 mm. L'analyse par éléments finis indique une contrainte de Tresca maximale d'environ 70 MPa pour une déformation principale maximale qui atteint jusqu'à 1,4 %. Ces résultats sont inférieurs aux valeurs conservatrices obtenues lors des essais de traction (déformation de 3,5 % pour une contrainte 100 MPa). Les prédictions numériques pour cette membrane 3D prévue pour un barrage de basse chute sont encourageantes.

Cependant, les valeurs obtenues fixent une borne inférieure car elles sont associées à des CR idéales pour lesquelles la membrane est parfaitement bloquée sur son contour. De plus, on souhaiterait avoir en réalité la forme de la figure 6.9 lorsque la membrane est gonflée. On en tire donc deux recommandations pour les conceptions futures :

1. une géométrie initiale avec des renforts optimisés doit être définie pour obtenir la forme désirée sous pression ;
2. un système de fixation au comportement maîtrisé doit être conçu pour simuler correctement la membrane.

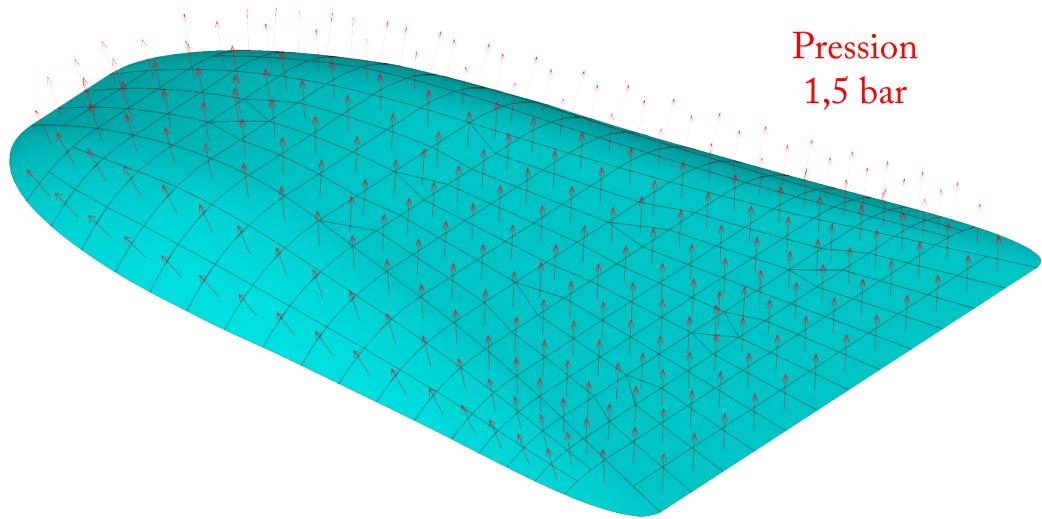


Figure 6.9 Géométrie initiale et maillage de la membrane 3D sous pression

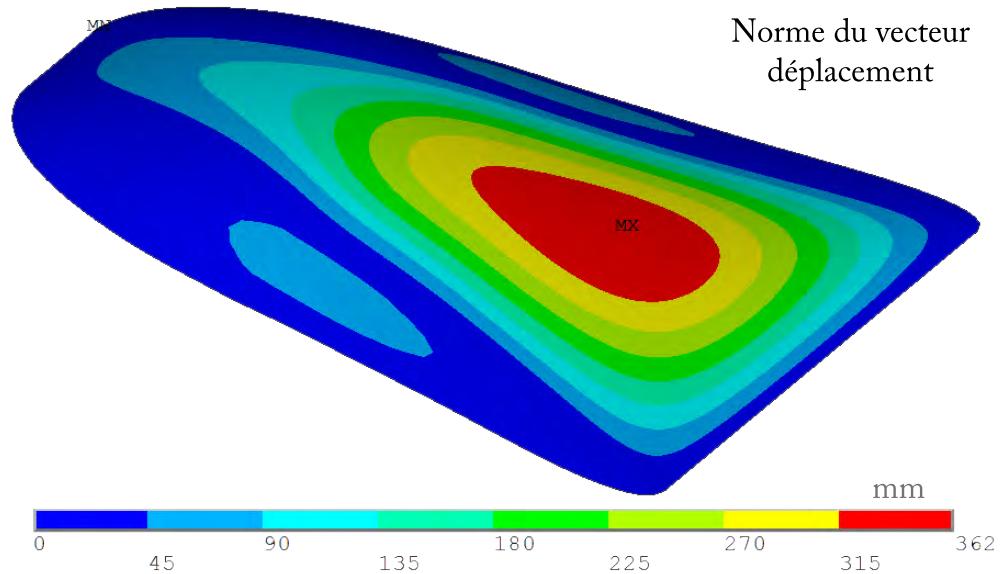


Figure 6.10 Champ de déplacement aux nœuds de la membrane 3D sous pression

CHAPITRE 7

CONCLUSION

7.1 Synthèse des travaux

Cette étude avait pour but d'évaluer la faisabilité technique d'un projet industriel : installer une membrane élastomère à renfort textile dans l'aspirateur d'un barrage afin d'en modifier l'écoulement. Pour atteindre cet objectif, la maîtrise a été divisée en trois parties :

- réaliser un démonstrateur pour valider le gonflement à l'eau d'une membrane ;
- effectuer des essais pour obtenir les paramètres matériau ;
- créer des modèles numériques pour prédire la réponse d'une membrane sous pression.

La conception du montage d'essai a été inspirée par les moules de fabrication de composites utilisés chez ERFT Composites. L'architecture des membranes a tenu compte des recommandations faites lors des précédents travaux, notamment sur le taux volumique de fibres et l'amélioration de l'interface fibres/matrice. Les résultats des essais de traction effectués sur les échantillons de la membrane d'épaisseur constante ont confirmé ces choix. Pour preuve, la rigidité dans le plan a été multipliée par plus de dix par rapport aux membranes étudiées par A. Favre.

Parallèlement, la méthodologie de test a été modifiée grâce à l'utilisation de la CIN. L'influence de la relaxation a de plus été abordée succinctement. Après 5 minutes de maintien à la même déformation, on observe une chute des propriétés mécaniques de l'ordre de 15 %.

Avant la découpe des échantillons, les membranes avaient été gonflées à l'eau pour valider le concept. Néanmoins un glissement des membranes sous les barres de fixation a été remarqué. Les observations et les données expérimentales récoltées grâce à la numérisation ont servi à développer différents modèles par éléments finis.

Les premiers modèles avaient pour objectifs de reproduire les tests de gonflement. Il en ressort une grande variabilité des résultats en fonction des CR utilisées pour représenter la fixation. Elles ont une influence majeure sur la déformée de la membrane. Cependant, le modèle analytique proposé a permis de caractériser les CR, en particulier la fixation du

démonstrateur, et d'approcher analytiquement les résultats expérimentaux des essais de gonflement.

Le dernier modèle a été développé pour évaluer la faisabilité de la membrane 3D insérable dans le barrage des Cèdres. Les solutions numériques obtenues pour une membrane symétrique, quasi isotrope, bloquée en translation sur son contour, d'une surface de 85 m², et d'une épaisseur de 36 mm (48 plis de 0,75 mm) sont prometteuses.

Le projet industriel semble donc réaliste, mais des obstacles listés ci-dessous doivent encore être surmontés pour qu'il puisse arriver à son terme.

7.2 Travaux futurs et recommandations

À la suite de cette étude, une liste des travaux et recommandations à mettre en œuvre a été dressée dans l'ordre des choses, des plus critiques pouvant empêcher l'aboutissement du projet industriel, aux moins importantes :

- concevoir un système de fixation pour la membrane dont le comportement est maîtrisé. Les systèmes d'ancrage utilisés pour fixer les barrages gonflables [3] peuvent servir de référence ;
- définir la géométrie initiale de la membrane 3D afin qu'elle ait le profil désiré une fois sous pression. En particulier, la séquence d'empilement et la présence de zones plus ou moins renforcées doivent être optimisées ;
- adapter une technique de fabrication de membranes 3D renforcées de plusieurs dizaines de couches de tissus pour une surface supérieure à 85 m² ;
- étudier l'interaction fluide/structure avec notamment une analyse vibratoire ;
- caractériser la nouvelle membrane pour valider sa rigidité, sa résistance à la rupture ou encore l'effet de la relaxation et du vieillissement sur ses propriétés. Des échantillons provenant de différentes membranes peuvent être testés pour vérifier la variabilité du comportement mécanique dû au procédé de fabrication.

Finalement, ces travaux futurs correspondent aux fonctions de contraintes définies de le cahier des charges de la membrane.

Il serait très intéressant de pouvoir installer une membrane 3D réduite dans un aspirateur de barrage miniature afin de tester ses performances réelles.

RÉFÉRENCES

- [1] R. Simpson, “3 – Rubber,” *Rubber Basics*. Rapra Technology Limited, 2002.
- [2] R. Schaefer, “33 – Mechanical properties of rubber,” *Harris' shock and vibration handbook, 5th edition*, C. Harris et A. Piersol, éditeurs. McGraw-Hill, 2002, 33.1–33.18.
- [3] BRL-Ingénierie, VNF, et CETMEF, “Guide - Barrages gonflables avec ou sans volets métalliques,” 2012, [En ligne] <http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/guide-barrages-gonflables-avec-ou-a991.html> [14 Fév. 2014].
- [4] P. Martinon, “Composites à base d’elastomères,” *Techniques de l’ingénieur*, no. a2790, 1994.
- [5] A. Gourgues-Lorenzon et J. Haudin, “XIV – Durcissement et renforcement des matériaux,” *Matériaux pour l’ingénieur*, ser. Collection Les cours de l’École des mines de Paris. Ecole des mines de Paris, 2006.
- [6] P. Mallick, “2 – Materials,” *Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition*. CRC Press Taylor & Francis, 2007, [En ligne] <http://www.crcnetbase.com/isbn/978-0-8493-4205-9>.
- [7] “Silicon rubber,” The A to Z of Materials, 2014, [En ligne] <http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=920> [10 Mars 2014].
- [8] K. Triconnet, “Identification des propriétés mécaniques à partir de mesures de champs dans un matériau multi-phase,” Thèse de doctorat, Arts et Métiers ParisTech, Paris, France, 2007, [En ligne] <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00351691>.
- [9] J. Vlassak et W. Nix, “A new bulge test technique for the determination of Young’s modulus and Poisson’s ratio of thin films,” *Journal of Materials Research*, vol. 7, no. 12, 3242–3249, 1992.
- [10] A. Favre, “Caractérisation de l’effet du vieillissement en milieu aqueux sur les propriétés mécaniques de composites à matrice élastomère,” Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada, 2013, [En ligne] <http://publications.polymtl.ca/1099>.

- [11] "Production d'électricité," Ministère des Ressources Naturelles du Québec, 2011, [En ligne] <http://www.mrn.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-production-electricite.jsp> [11 Juin 2014].
- [12] "L'hydroélectricité," Hydro-Québec, 2014, [En ligne] <http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydroelectricite> [17 Janv. 2014].
- [13] M. François et F. Mazzouji, "L'innovation dans le domaine de l'hydraulique," *La Houille Blanche*, no. 6-7, 35–40, 2002.
- [14] A. Caloumenos, "Membrane gonflable pour aspirateur," Alstom, 2010, présentation confidentielle.
- [15] "Crefarre : un consortium de recherche en fabrication et réparation des roues d'eau," Hydro-Québec, 2011, [En ligne] <http://www.hydroquebec.com/innovation/fr/infolettre.html> [17 Janv. 2014].
- [16] C. Duprat, "Simulation numérique instationnaire des écoulements turbulents dans les diffuseurs des turbines hydrauliques en vue de l'amélioration des performances," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, Grenoble, France, 2010, [En ligne] <http://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00540181>.
- [17] "Centrale de Long Spruce," Manitoba Hydro, [En ligne] http://www.hydro.mb.ca/francais/corporate/facilities/gi_producing_electricity.shtml [31 Janv. 2014].
- [18] P. Bélanger-Vincent, "Simulations avancées de l'écoulement turbulent dans les aspirateurs de turbines hydrauliques," Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2010, [En ligne] <http://www.theses.ulaval.ca/2010/27467>.
- [19] F.-A. Payette, "Simulation de l'écoulement turbulent dans les aspirateurs de turbines hydrauliques : Impact des paramètres de modélisation," Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2008, [En ligne] <http://www.theses.ulaval.ca/2008/25433>.
- [20] R. Fox, A. McDonald, et R. VA, "Effects of swirling inlet flow on pressure recovery in conical diffusers," *AIAA Journal*, vol. 9, no. 10, 2014–2018, 1971.
- [21] C. Beaubien, "Simulations numériques de l'écoulement turbulent dans un aspirateur de turbine hydraulique," Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2013, [En ligne] <http://www.theses.ulaval.ca/2013/29942>.
- [22] CEI, "Turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines – essais de réception," *Commission Électrotechnique Internationale*, no. CEI 60193 :1999, 1999.

- [23] C. Bathias, “17 – Composites élastomères,” *Matériaux composites, 2^e édition.* Dunod, 2009, 407–420.
- [24] J. White, S. De, J. White, et K. Naskar, *Rubber technologist’s handbook : Vol. 2*, ser. Handbook Series. Smithers Rapra Technology, 2009.
- [25] R. Simpson, “4 – Rubber Compounding Ingredients,” *Rubber Basics.* Rapra Technology Limited, 2002.
- [26] W. Wennekes, R. Datta, J. Noordermeer, et F. Elkink, “Fiber adhesion to rubber compounds,” *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 81, no. 3, 523–540, 2008.
- [27] A. Berthureau et E. Dallies, “Fibres de verre de renforcement,” *Techniques de l’ingénieur*, no. am5132, 2008.
- [28] E. Ventsel et T. Krauthammer, *Thin Plates and Shells : Theory, Analysis, and Applications.* CRC Press Taylor & Francis, 2001, [En ligne] <http://www.crcnetbase.com/isbn/9780203908723>.
- [29] S. Timoshenko et L. Vial, *Théorie des plaques et des coques.* Librairie Polytechnique Ch. Béranger, 1951.
- [30] P. Dubas, “Calcul numérique des plaques et des parois minces,” Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Zurich (ETH), Zurich, Suisse, 1955, [En ligne] <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:32454>.
- [31] A. Delaplace, F. Gatuingt, et F. Ragueneau, *Aide-mémoire de mécanique des structures - Résistance des matériaux*, ser. Sciences Sup Série Aide-Mémoire. Dunod, 2008.
- [32] “ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis – Guide,” ANSYS Inc., Rapport technique, 2010.
- [33] F. Mortazavi, “Development of a global digital image correlation approach for fast high-resolution displacement measurements,” Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, Canada, 2013, [En ligne] <http://publications.polymtl.ca/1076>.
- [34] L. Crouzeix, “Identification de champs de propriétés mécaniques de structures composites à partir de mesures de champs de déplacement,” Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, Toulouse, France, 2008, [En ligne] <http://thesesups.ups-tlse.fr/455>.
- [35] J.-J. Orteu, “Mesure 3d de formes et de déformations par stéréovision,” *Techniques de l’ingénieur*, no. bm7015, 2002.

- [36] M. K. Small et W. Nix, “Analysis of the accuracy of the bulge test in determining the mechanical properties of thin films,” *Journal of Materials Research*, vol. 7, no. 06, 1553–1563, 1992.
- [37] B. Marvalova, J. Kafka, et J. Vlach, “Experimental determination of mechanical properties of elastomeric composites reinforced by textiles made of sma wires and numerical modeling of their behaviour,” *Constitutive Models for Rubber VII*, S. Jerrams et N. Murphy, éditeurs, 7th European Conference on Constitutive Models for Rubbers, ECCMR 2012. CRC Press Taylor & Francis, 2012, 423–426, [En ligne] <http://www.crcnetbase.com/isbn/9781466553996>.
- [38] B. Marvalova, I. Petrikova, J. Kafka, et H. Tuan, “Inflation test of orthotropic composite membrane with rubber matrix reinforced by plain weave fabric,” *Constitutive Models for Rubber VIII*, N. Gil-Negrete et A. Alonso, éditeurs, 8th European Conference on Constitutive Models for Rubbers, ECCMR 2013. CRC Press Taylor & Francis, 2013, 645–648, [En ligne] <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b14964-117>.
- [39] M. G. Allen, M. Mehregany, R. T. Howe, et S. D. Senturia, “Microfabricated structures for the insitu measurement of residual stress, young’s modulus, and ultimate strain of thin films,” *Applied Physics Letters*, vol. 51, no. 4, 241–243, 1987.
- [40] Y. Xiang, X. Chen, et J. J. Vlassak, “Plane-strain bulge test for thin films,” *Journal of materials research*, vol. 20, no. 9, 2360–2370, 2005.
- [41] “Element Reference,” ANSYS Inc., Rapport technique, 2009.
- [42] U. S. Department of Transportation, “7 – Advanced Composite Material,” *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe*. Federal Aviation Administration, 2012, [En ligne] http://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/ [03 Juin 2014].
- [43] P. Vannucci et G. Verchery, “A new method for generating fully isotropic laminates,” *Composite structures*, vol. 58, no. 1, 75–82, 2002.
- [44] J. Guillot, “Modélisation et calcul des assemblages vissés. généralités,” *Techniques de l’ingénieur*, no. bm5560, 2007.
- [45] G. Drouin, *Éléments de machines*. Éditions de l’École polytechnique de Montréal, 1986.

ANNEXE A

Dessins techniques du montage d'essai

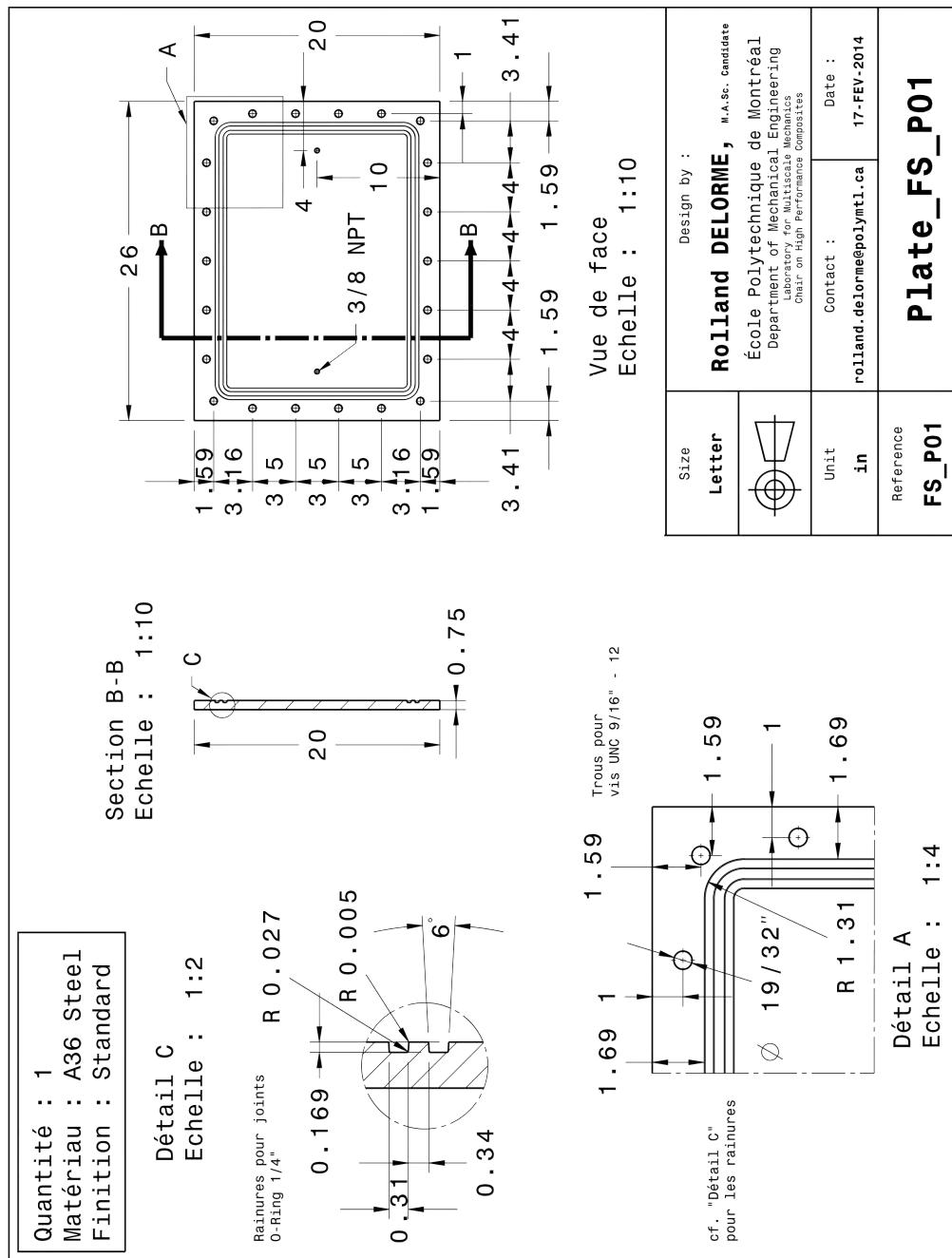


Figure A.1 Plateau de support

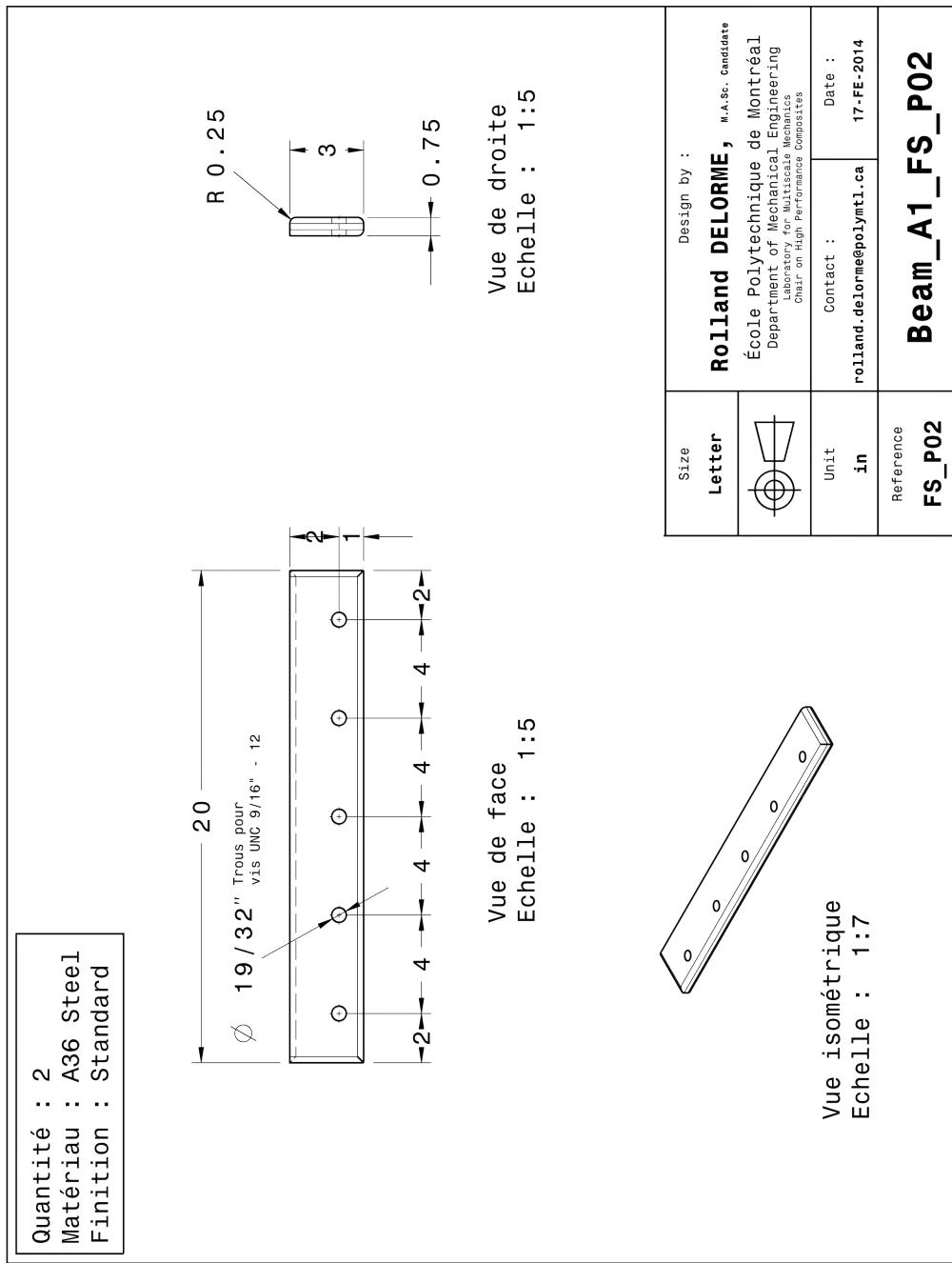


Figure A.2 Barre de fixation A1

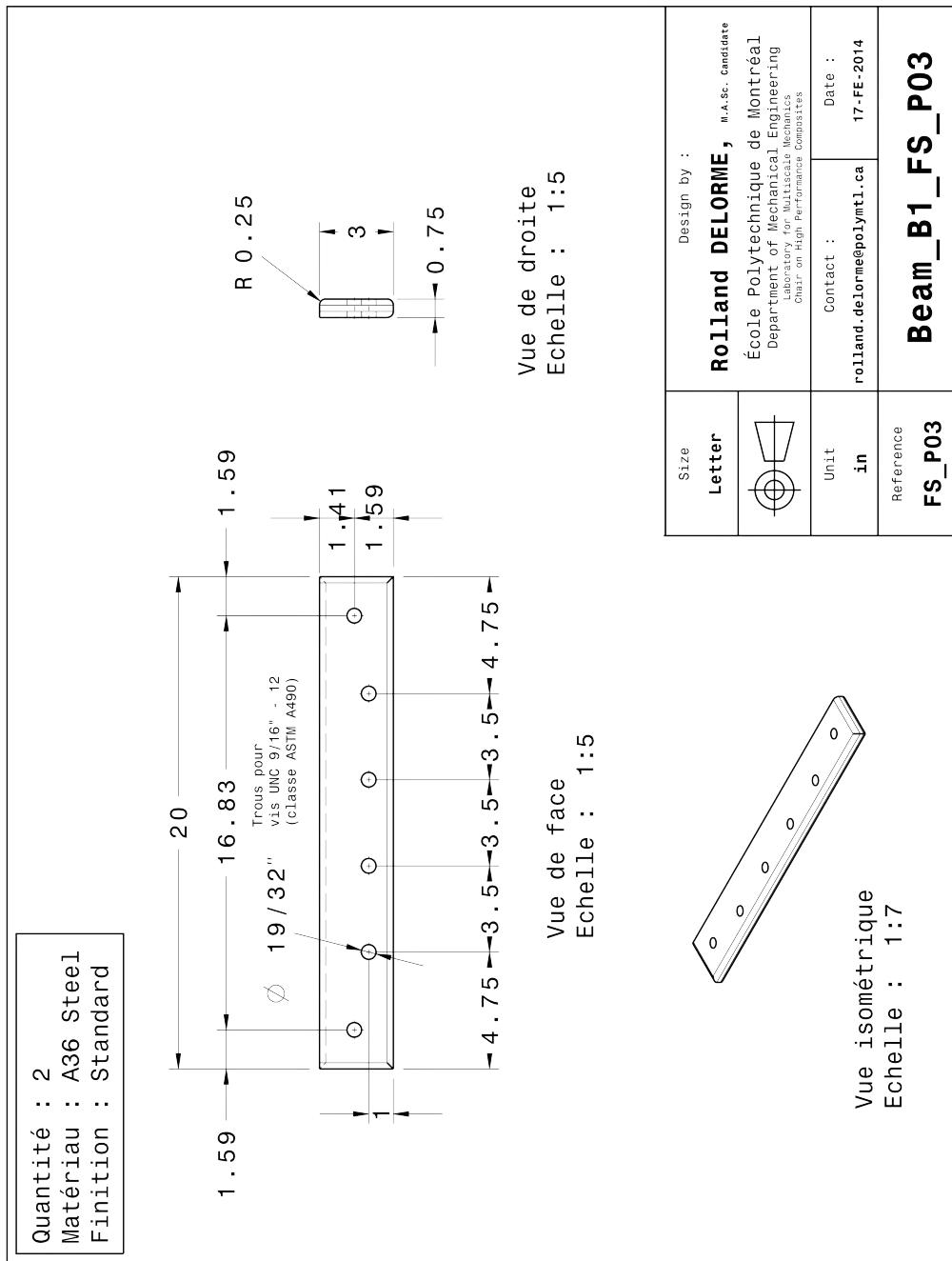


Figure A.3 Barre de fixation B1

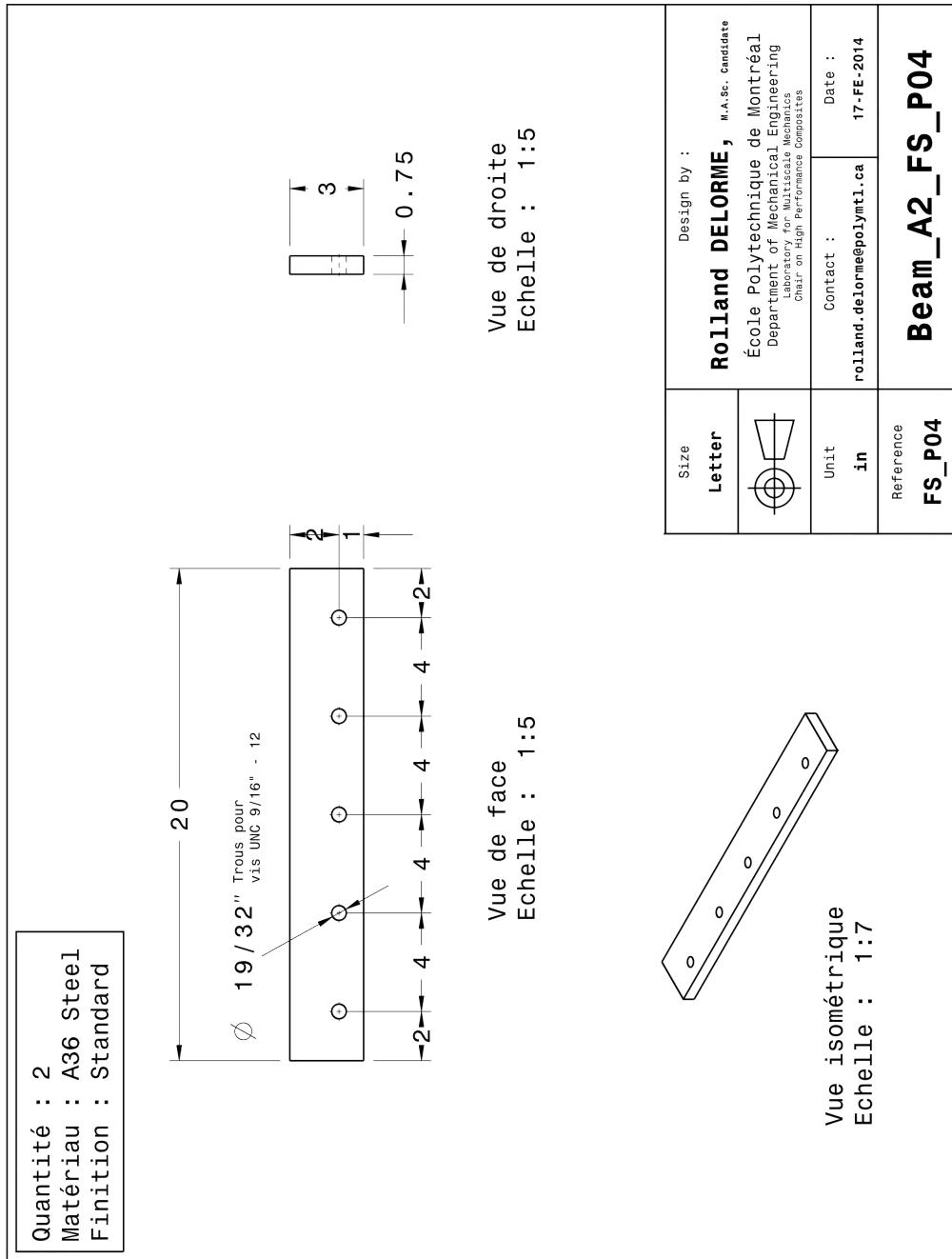


Figure A.4 Barre de fixation B2

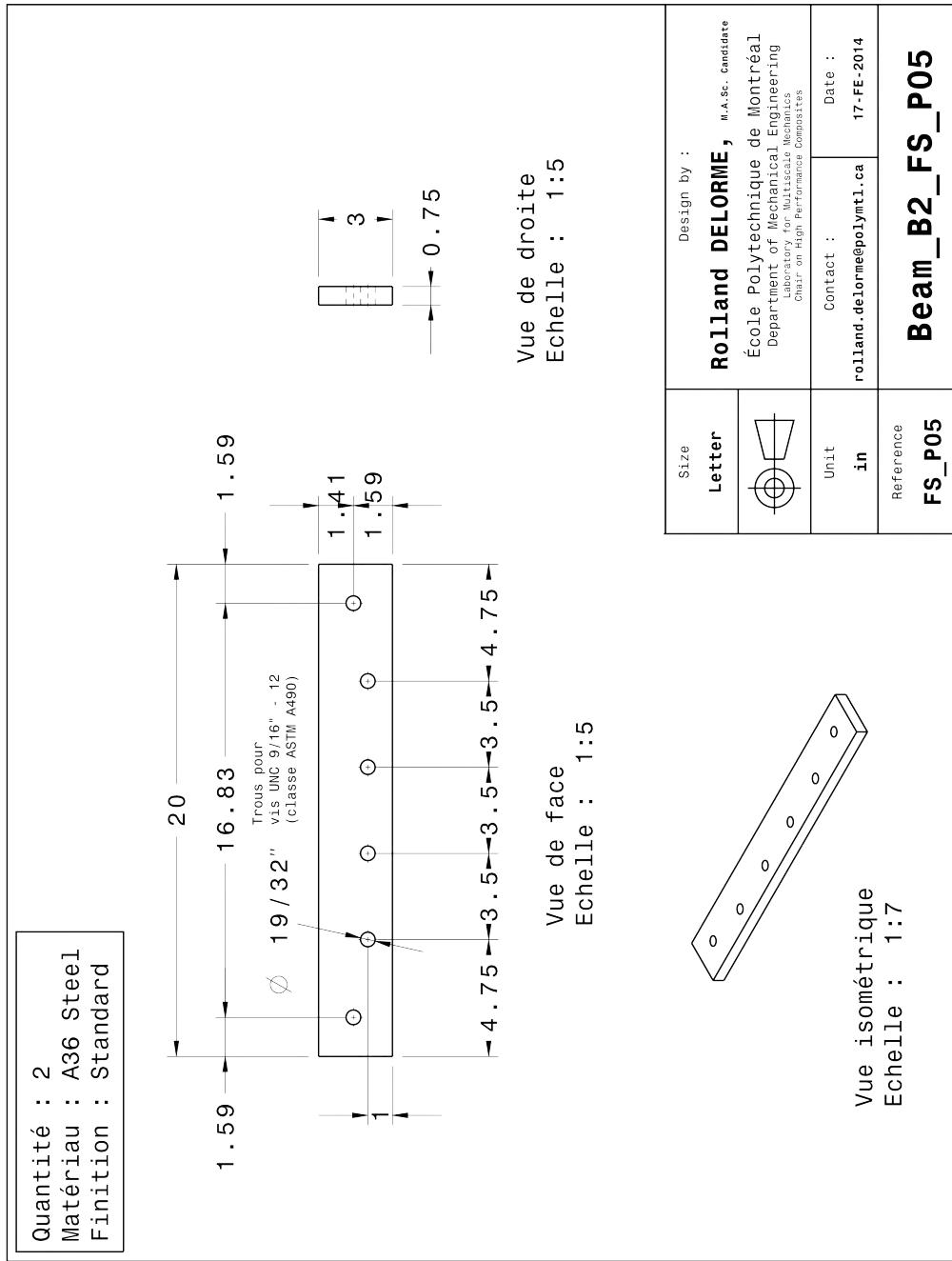


Figure A.5 Barre de fixation B2

ANNEXE B

Analyse par éléments finis du plateau de support et barres de fixation

La figure B.1 présente de la déformée du plateau de support (modélisé par des éléments SHELL181) et des barres de fixation (modélisées par des éléments BEAM189), bloqués en translation sur leur contour. Le plateau était soumis à la pression de dimensionnement de 4,6 bar (68 psi) dans la partie centrale entourée par les barres des fixations. La flèche maximale de 1,05 mm, qui est localisée au centre du plateau, est associée à des déformations non perceptibles. Cela permet d'utiliser le plateau comme surface de référence pour la mesure de la déformée de la membrane gonflée.

La figure B.2 présente le champ de rotation aux nœuds du plateau de support et des barres de fixation pour la même simulation. La rotation maximale de $0,34^\circ$ est localisée au niveau des barres de fixation. Elle est assez faible pour éviter la rupture en flexion des boulons qui seront installés.

Ces résultats convergés ont été obtenus par une analyse linéaire, confirmée par une analyse non linéaire. Le but était de s'assurer que les hypothèses de Kirchhoff étaient vérifiées.

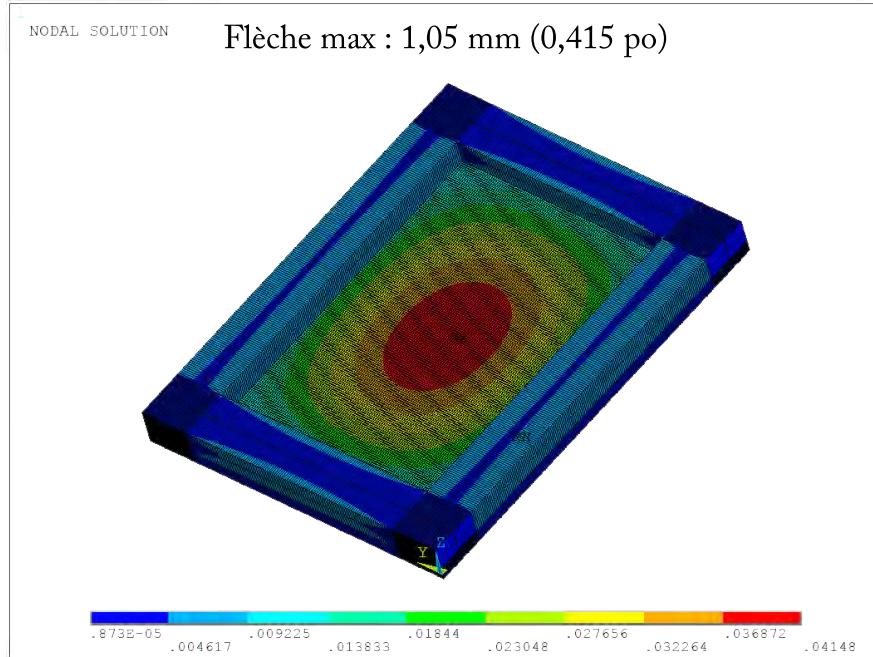


Figure B.1 Déformée du plateau de support et des barres de fixation – La flèche maximale de 1,05 mm est localisée au centre du plateau soumis à 4,6 bar. Elle est assez faible pour ne pas perturber la mesure de la flèche de la membrane gonflée.

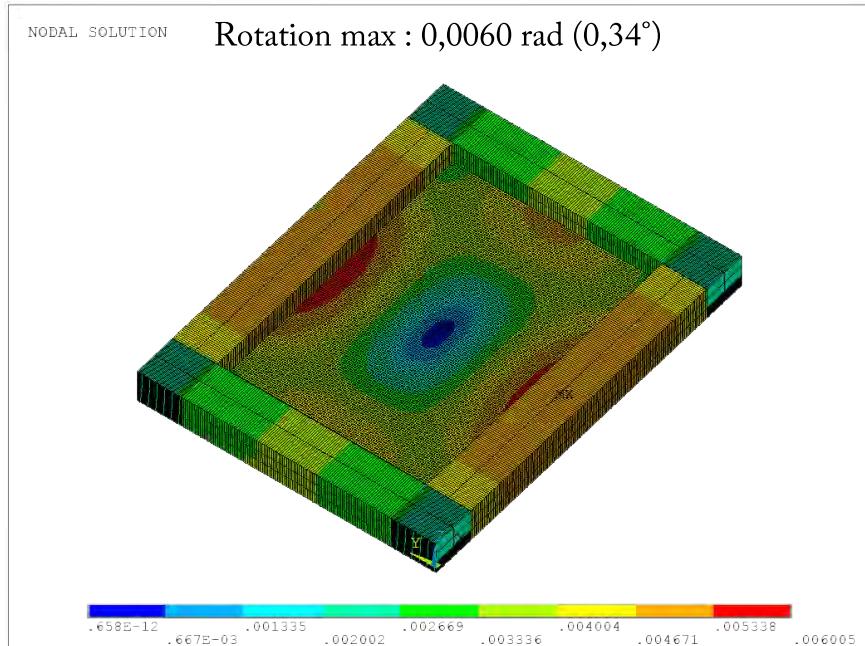


Figure B.2 Rotation dans le plateau de support et les barres de fixation – La rotation maximale de 0,34° est localisée au niveau des barres de fixation. Elle est assez faible pour éviter la rupture en flexion des boulons qui seront installés.

ANNEXE C

Dimensionnement de l'assemblage boulonné

Des boulons à UNC de diamètre 9/16" (14,29 mm) avec un nombre de TPI de 12 ont été choisis afin d'assurer la tenue de l'assemblage [44]. Les caractéristiques des boulons sont rappelées dans le tableau C.1. Les dessins techniques se trouvent en Annexe ??.

Raideurs de l'assemblage

Les raideurs k_b et k_m des boulons et des membrures ainsi que la proportion des efforts extérieurs λ_b repris par les boulons sont définis par les équations suivantes tirées de l'ouvrage [45] :

$$k_m = \frac{2\pi d_n^2}{\left(\frac{L_{fix}}{E_{acier}} + \frac{L_{me}}{E_{me}}\right)} = 23522 \text{ N.mm}^{-1} \quad (\text{C.1a})$$

$$k_b = \frac{A_s E_b}{L_{fix} + L_{me}} = 397505 \text{ N.mm}^{-1} \quad (\text{C.1b})$$

$$\lambda_b = \frac{k_b}{k_m + k_b} = 0,94 \quad (\text{C.1c})$$

d_n est le diamètre nominal de la vis et L_{fix} et L_{me} sont respectivement les épaisseurs totales de la fixation et de la membrane prises dans les boulons. E_{acier} est le module de Young des vis et fixations en acier et E_{me} le module d'élasticité transverse de la membrane. Les valeurs de ces paramètres sont données le tableau C.2.

Effort de tension et de serrage dans un boulon

L'assemblage boulonné doit répondre à différentes contraintes de conception (tableau 4.1). En particulier, il doit tenir à une pression de 0,469 MPa (68 psi), qui agit sur une surface de 180646 mm² (280 po²). Sachant qu'il y a 22 boulons, l'effort résultant F_r par boulon est donc de 3850 N.

Par ailleurs, il est important de connaitre la pression de contact p_c à ne pas dépasser pour éviter d'endommager la membrane. On peut la définir comme la moyenne arithmétique

Tableau C.1 Caractéristiques des boulons 9/16" – 12 UNC

Diamètre nominal vis/écrou d_n	
En po	9/16
En mm	14,288
Pas P	
TPI	12
En mm	2,117
Diamètre du trou de passage d_t	
En po	19/32
En mm	15,081
Diamètre sur flancs d_2 (mm)	12,873
Diamètre du noyau de la vis d_3	11,651
Diamètre résistant d_s (mm)	$d_s = \left(\frac{d_2+d_3}{2}\right)^2 = 12,262$
Section résistante A_s (mm ²)	$A_s = \frac{\pi d_s^2}{4} = 118,09$
Classe – Grade 8	
$R_{e,t}$ (en MPa)	820
$R_{m,t}$ (en MPa)	1030
Coefficient moyen de frottement f	0,15
Rayon externe s de la zone de contact pièce/écrou (mm)	18,653
Rayon moyen ρ_m de la zone de contact pièce/écrou (mm)	$\rho_m = \left(\frac{d_t+s}{2}\right) = 12,262$
Nombre de boulon n_b	22

entre la limite d'élasticité en compression $R_{e,c}$ et la résistance à la rupture en compression $R_{m,c}$ ([7, 44]). On obtient que $p_c = 17,75$ MPa. Il reste à définir la force de contact F_c qui écrase localement la membrane autour d'un boulon. Afin d'être conservateur et maximiser cette force, on suppose que la surface de contact S_c est une couronne plus grande que la surface sous tête de vis ou sous écrou. Elle s'écrit de la manière suivante et vaut :

$$S_c = \frac{\pi \left[(3d_n)^2 - d_n^2 \right]}{4} = 2\pi d_n^2 = 1283 \text{ mm}^2 \quad (\text{C.2})$$

La force de contact F_c , localisée autour d'un boulon est finalement de 22766 N.

En écrivant l'équilibre des forces, l'effort de tension F_b dans un boulon s'exprime :

$$F_b = F_r + F_c \quad (\text{C.3})$$

On peut aussi décomposer F_b entre un effort Q_s attribuable au serrage du boulon et la proportion de l'effort résultant F_r repris par le boulon :

$$F_b = Q_s + \lambda_b F_r \quad (\text{C.4})$$

En combinant les deux équations C.3 et C.4 et en majorant de 30 % suite aux incertitudes causées par l'outil de serrage [44], on trouve que l'effort de serrage maximal $Q_{s,max}$ s'exprime sous la forme :

$$Q_{s,max} = 1,3 \left[(1 - \lambda_b) F_r + F_c \right] = 29876 \text{ N} \quad (\text{C.5})$$

Tableau C.2 Paramètres de calcul pour k_b , k_m et λ_b

Paramètre	Valeur
d_n	14,288 mm
L_{fix}	$3 * 19,050 = 57,150$ mm
E_{acier}	200000 MPa
L_{me}	2,25 mm
E_{me}	41,5 MPa

Le couple de serrage associée à $Q_{s,max}$ est donnée par :

$$C_{s,max} = Q_{s,max} (0,16 P + 0,583 f d_2 + \rho_m f) = 127344 \text{ N.mm} \quad (\text{C.6})$$

Résistance des boulons

La contrainte de tension σ_t induite par F_b est donnée par :

$$\sigma_t = \frac{F_b}{A_s} = \frac{Q_{s,max} + \lambda_b F_r}{A_s} = 284 \text{ MPa} \quad (\text{C.7})$$

La contrainte de torsion τ résultante de $C_{s,max}$ s'exprime :

$$\tau = \frac{16 C_{s,max}}{\pi d_s^3} = 352 \text{ MPa} \quad (\text{C.8})$$

En appliquant le critère de von Mises, on obtient la contrainte équivalente :

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2} = 672 \text{ MPa} \quad (\text{C.9})$$

Pour s'assurer que l'assemblage est bien dimensionné, il faut que l'inégalité C.10 soit vérifiée :

$$\sigma_e \leq 0,9 R_{e,t} = 738 \text{ MPa} \quad (\text{C.10})$$

L'assemblage et ses 22 boulons sont donc sécuritaires vis-à-vis des contraintes de conception.

ANNEXE D

Étude de sensibilité des propriétés hors plan de la membrane

Cette annexe présente une étude de sensibilité des propriétés hors plan pour une membrane rectangulaire de 356 x 508 mm (14 x 20”), d’épaisseur 2,25 mm (0,09”), soumise à une pression de 0,41 bar (6 psi) et simplement appuyée (bloquée en translation sur son contour). Le tableau D.1 montre les propriétés implémentées dans les codes de calculs. Les tableaux D.2, D.3, D.4, D.5, D.6 et D.7 mettent en avant l’influence négligeable des paramètres hors-plan.

Tableau D.1 Propriétés de la membrane – Référence

Propriété	Valeur
Propriétés mesurées	
E_1 (sens chaîne)	4148 MPa
E_2 (sens trame)	4148 MPa
ν_{12}	0,85
G_{12}	7,65 MPa
Propriétés peu influentes	
E_3	41,48 MPa
ν_{23}	0,33
ν_{13}	0,33
G_{23}	7,65 MPa
G_{13}	7,65 MPa
w_{max}	0,3574”

Tableau D.2 Propriétés de la membrane – Sensibilité : $E_3 = 4,148$ MPa

Propriété	Valeur
Propriétés mesurées	
E_1 (sens chaîne)	4148 MPa
E_2 (sens trame)	4148 MPa
ν_{12}	0,85
G_{12}	7,65 MPa
Propriétés peu influentes	
E_3	4,148 MPa
ν_{23}	0,33
ν_{13}	0,33
G_{23}	7,65 MPa
G_{13}	7,65 MPa
w_{max}	0,3575"
Écart relatif	0,00 %

Tableau D.3 Propriétés de la membrane – Sensibilité : $E_3 = 414,8$ MPa

Propriété	Valeur
Propriétés mesurées	
E_1 (sens chaîne)	4148 MPa
E_2 (sens trame)	4148 MPa
ν_{12}	0,85
G_{12}	7,65 MPa
Propriétés peu influentes	
E_3	414,8 MPa
ν_{23}	0,33
ν_{13}	0,33
G_{23}	7,65 MPa
G_{13}	7,65 MPa
w_{max}	0,3575"
Écart relatif	0,00 %

Tableau D.4 Propriétés de la membrane – Sensibilité : $\nu_{13} = \nu_{23} = 0,01$

Propriété	Valeur
Propriétés mesurées	
E_1 (sens chaîne)	4148 MPa
E_2 (sens trame)	4148 MPa
ν_{12}	0,85
G_{12}	7,65 MPa
Propriétés peu influentes	
E_3	41,48 MPa
ν_{23}	0,01
ν_{13}	0,01
G_{23}	7,65 MPa
G_{13}	7,65 MPa
w_{max}	0,3570"
Écart relatif	-0,12 %

Tableau D.5 Propriétés de la membrane – Sensibilité : $\nu_{13} = \nu_{23} = 0,49$

Propriété	Valeur
Propriétés mesurées	
E_1 (sens chaîne)	4148 MPa
E_2 (sens trame)	4148 MPa
ν_{12}	0,85
G_{12}	7,65 MPa
Propriétés peu influentes	
E_3	41,48 MPa
ν_{23}	0,49
ν_{13}	0,49
G_{23}	7,65 MPa
G_{13}	7,65 MPa
w_{max}	0,3576"
Écart relatif	0,16 %

Tableau D.6 Propriétés de la membrane – Sensibilité : $G_{13} = G_{23} = 0,765$ MPa

Propriété	Valeur
Propriétés mesurées	
E_1 (sens chaîne)	4148 MPa
E_2 (sens trame)	4148 MPa
ν_{12}	0,85
G_{12}	7,65 MPa
Propriétés peu influentes	
E_3	41,48 MPa
ν_{23}	0,33
ν_{13}	0,33
G_{23}	0,765 MPa
G_{13}	0,765 MPa
w_{max}	0,3569"
Écart relatif	-0,14 %

Tableau D.7 Propriétés de la membrane – Sensibilité : $G_{13} = G_{23} = 76,5$ MPa

Propriété	Valeur
Propriétés mesurées	
E_1 (sens chaîne)	4148 MPa
E_2 (sens trame)	4148 MPa
ν_{12}	0,85
G_{12}	7,65 MPa
Propriétés peu influentes	
E_3	41,48 MPa
ν_{23}	0,33
ν_{13}	0,33
G_{23}	76,5 MPa
G_{13}	76,5 MPa
w_{max}	0,3589"
Écart relatif	0,38 %