

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département :Génie mécanique



جامعة أحمد زبانه-غليزان
Ahmed Zabana Relizane University

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Génie des matériaux

Intitulé

**Étude de réparation de réservoir d'hydrogène à l'aide de
matériaux composites sous chargement mécanique**

Présenté par :

Mr : BERREZIGA Anes

Devant les membres de jury :

Président : Mr. FELLAH Ahmed

Maître assistant (B)

(U. Relizane)

Encadreur : Mme . BELKADDOUR Leila

Maître de conférence (B)

(U. Relizane)

Co-Encadreur : Mme .BENZINEB Hayet

DOCTEUR

(U. Relizane)

Examinatrice : Mme . BELGACEM Souad

Maître de conférence (B)

(U. Relizane)

Année universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à **Dieu Tout-Puissant** pour m'avoir donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Je remercie **mes parents et ma famille**.

Ma gratitude va à **Madame Belkaddour Leila**, directrice du projet, et à **Madame BenzinebHayet**, codirectrice, pour leur encadrement et leurs précieux conseils.

Je remercie également **les enseignants du département de génie mécanique** pour la qualité de leur enseignement.

Et à toute personne ayant eu un effet positif dans ma Carrière.

Abstract :

The corrosion of hydrogen storage tanks represents a major risk, especially under extreme pressure conditions. This study focuses on the analysis of the repair of a corroded cryogenic tank using composite patch materials to evaluate their mechanical efficiency. Three types of composites were studied: carbon/epoxy, glass/epoxy, and graphite/epoxy.

The main objective is to compare the performance of these materials in terms of stress reduction in the corroded area and restoration of the tank's stiffness. A finite element modeling approach was used to simulate the mechanical behavior of the repaired tank under internal pressure.

The results show that the choice of composite material significantly affects the reinforcement efficiency. The glass/epoxy patch demonstrated the best performance, followed by carbon/epoxy, while graphite/epoxy was less effective in this context.

This study highlights the importance of proper material selection for ensuring the safety and durability of corroded hydrogen tanks.

Keywords : corrosion, hydrogen tanks, pressure, repair, patches

الملخص:

تُعدّ تآكلات خزانات تخزين الهيدروجين خطراً كبيراً، خصوصاً في ظروف الضغط الشديدة. يركّز هذا العمل على تحليل عملية إصلاح خزان كروي جيني متآكل باستخدام رقع مصنوعة من مواد مركبة، وذلك لتقييم كفاءتها الميكانيكية. تمّ دراسة ثلاثة أنواع من المواد المركبة: الكربون/إيبوكسي، الزجاج/إيبوكسي، والغرافيت/إيبوكسي.

الهدف الرئيسي هو مقارنة أداء هذه المواد من حيث تقليل الإجهادات في منطقة التآكل واستعادة صلابة الخزان. تم اعتماد النمذجة باستخدام طريقة العناصر المحددة لمحاكاة السلوك الميكانيكي للخزان المُرمّم تحت الضغط الداخلي.

أظهرت النتائج أن اختيار مادة الرقعة المركبة يؤثر بشكل كبير على فعالية التقوية. حيث أظهرت رقعة الزجاج/إيبوكسي أفضل أداء، تليها الكربون/إيبوكسي، في حين كان أداء الغرافيت/إيبوكسي أقل فاعلية في هذا السياق.

تُبرز هذه الدراسة أهمية اختيار المادة المناسبة لعملية الإصلاح من أجل ضمان سلامة ومتانة خزانات الهيدروجين المتآكلة.

الكلمات المفتاحية: التآكل، خزانات الهيدروجين، الضغط، الإصلاح، الرقع.

Résumé :

La corrosion des réservoirs d'hydrogène constitue un risque majeur, notamment dans des conditions extrêmes de pression. Ce travail porte sur l'analyse de la réparation d'un réservoir cryogénique corrodé à l'aide de patches en matériaux composites afin d'évaluer leur efficacité mécanique. Trois types de composites ont été étudiés : carbone/époxy, verre/époxy et graphite/époxy.

L'objectif principal est de comparer les performances de ces matériaux en termes de réduction des contraintes dans la zone corrodée et de restauration de la rigidité du réservoir. Une modélisation par la méthode des éléments finis a été réalisée pour simuler le comportement mécanique du réservoir réparé sous pression interne.

Les résultats montrent que le choix du matériau composite influence fortement l'efficacité du renforcement. Le patch en verre/époxy présente les meilleures performances, suivi du carbone/époxy, tandis que le graphite/époxy est moins performant dans ce contexte.

Cette étude met en évidence l'importance de la sélection appropriée du matériau de réparation pour garantir la sécurité et la durabilité des réservoirs d'hydrogène corrodés.

Les mots clés : corrosion, réservoirs d'hydrogène, pression, réparation, patches

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Désignation des aluminiums et alliages produits corroyés NF EN 573.....	07
Figure I.2 : Réservoir à toit flottant.....	11
Figure 1.3 : Les sphères.....	12
Figure 1.4 : Réservoirs horizontaux.....	13
Figure I.5 : Barthelemy, 2009.....	14
Figure I.6 : Réservoir à double paroi.....	16
Figure I.7 : Réservoir à double paroi.....	17
Figure I.8 : Corrosion interne d'un tube de cuivre.....	18
Figure I.9 : Corrosion externe dans un aluminium.....	19
Figure I.10 : Comparaison entre les critères de Von Mises et de Tresca.....	20
Figure I.11 : Comparaison entre les critères de Von Mises et de Tresca.....	21

Chapitre II

Figure II.1 : Elements d'un matériau composite.....	25
Figure II.2 : Reparation composite longue duree pour renforcement de reservoir et cuve sous pression.....	26
Figure II.3 : Réparations par assemblage hybride.....	27
Figure II.4 : Remplissage avec un angle biseaute.....	27
Figure II.5 : Réparation par patch interne.....	29
Figure II.6 : Géométrie de la plaque patchée.....	32
Figure II.8 : Variation du FIC en fonction de la longueur de fissure.....	33
Figure II.9 : Les dimensions de la structure.....	34
Figure II.10 : Distribution des contraintes de Von Mises sous différentes pressions et différentes épaisseurs de patch.....	34

Figure II.11 : Effet de module de cisaillement de l'adessif sur les valeurs de FIC.....	35
Figure II.12 : Evolution de FIC en fonction de module de cisaillement de l'adessif.....	36
Figure II.13 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les variations du FIC.....	36

————— **Chapitre III** —————

Figure III.1: Dimensions de la structure.....	39
Figure III.2 : Réparation par patch de la corrosion ellipsoïdale dans un réservoir.....	41
Figure III.3 : Patch et maillage de la structure.....	41
Figure III.4 : La distribution des contraintes de von mises en fonction de longueur longitudinale(verre/epoxy).....	42
Figure III.5 : La distribution des contraintes de von mises en fonction de longueur longitudinale (carbone/epoxy).....	42
Figure III.6 : La distribution des contraintes de von mises en fonction de longueur longitudinale (bore/epoxy).....	42
Figure III.7 : Distribution des contraintes de con mises en fonction de longueur transversale (verre/epoxy).....	44
Figure III.8 : Distribution des contraintes de Von mises en fonction de longueur transversale (carbone/epoxy)	44
Figure III.9 : Distribution des contraintes de Von mises en fonction de longueur transversale (bore/epoxy).....	44
Figure III.10 : Distribution des contraintes de con mises en fonction de longueur circonférentielle (verre/epoxy).....	46
Figure III.11 : Distribution des contraintes de con mises en fonction de longueur circonférentielle (carbone/epoxy).....	46
Figure III.12 : Distribution des contraintes de con mises en fonction de longueur circonférentielle (bore/epoxy).....	46

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Désignations et teneur en masse des alliages de corroyage.....	06
Tableau I.2 : Proportion des éléments d'addition du 6061	08
Tableau I.3 : Propriétés mécaniques couramment admises du 6061.....	09

Chapitre II

Tableau II.1 : Dimensions et propriétés des matériaux.....	32
--	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des matériaux.....	40
--	----

Table des matières

Remerciement

Abstract

ملخص

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....01

**Chapitre I l'aluminium 6061 t6 et le comportement
mécanique des réservoirs d'hydrogène**02

Introduction.....03

I.1 Les alliages d'aluminium.....03

I.1.2 Les alliages de corroyage.....04

I.1.3 Les familles d'alliages04

I.1.4 Les alliages de moulage.....05

I.1.5 Classification des alliages d'aluminium05

I.1.5.1 La classification des alliages de corroyage05

I.1.5.2 Identification symbolique (Norme européenne)07

I.1.6 L'alliage d'aluminium 606107

I.1.6.1 Présentation générale du 606106

I.1.6.2 Propriétés de l'alliage 606107

I.1.6.3 Les propriétés mécanique du 6061-T607

I.2 Réservoirs d'hydrogène08

I.2.1 Classification des réservoirs de stockage10

I.2.1.1 Réservoir à toit flottant10

I.2.1.2 Réservoirs sous pression12

I.2.1.3 Autres types des réservoirs	13
I.3 Comportement mécanique des réservoirs d'hydrogène	15
I.3.1 Comportement des réservoirs d'hydrogène de type I et II aux agressions mécaniques	15
I.3.2 Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et IV aux agressions mécaniques	15
I.4 Le réservoir double paroi	16
I.5 Types de corrosions dans les réservoirs d'hydrogène	17
I.5.1 Corrosion interne	17
I.5.2 Corrosion externe	18
I.6 Critères d'étude mécanique des réservoirs corrodés	20
I.6.1 Critères de von mises	20
I.6.2 Critères de Tresca.....	21
Conclusion	22
Chapitre II Les techniques de réparation par composites.....	23
Introduction	24
II.1 Les techniques de réparation par composites	24
II.1.1 Les matériaux composites	24
II.1.2 Techniques de réparation	25
II.1.2.1 Réparation par patch	25
II.1.2.2 Réparation par assemblage hybride	26
II.1.2.3 Réparation par remplissage de la zone endommagée	27
II.1.2.4 Réparation par collage des patches composites externes	28
II.1.2.5 Réparation par patches internes	29
II.1.2.6 Réparation par saignement	29
II.1.2.7 Réparation par injection	30
II.2 Assemblage par collage	31

II.2.1 Les avantages	31
II.2.2 Les inconvénients	31
II.3 Effet des propriétés mécanique	32
II.3.1 Effet des propriétés mécanique du patch	32
II.3.2 Effets des propriétés mécanique de l'adessif	35
Conclusion	37

Chapitre III l'analyse numérique du comportement mécanique des réservoirs d'hydrogène réparés à l'aide de patchs composites.....38

Introduction	39
III.1 Modèles géométriques	39
III.2 Résultats et discussions	42
III.2.1 Variation des contraintes de von mises en fonction de longueur longitudinale sous différentes pressions internes	42
III.2.2 Variation des contraintes de von mises en fonction de longueur transversale sous différentes pressions internes	44
III.2.3 Variation des contraintes de von mises en fonction de longueur circonférentielle sous différentes pressions internes	46
Conclusion	47

Conclusion générale.....48-49

Bibliographie	50
---------------------	----

Nomenclatures

Re	Limite d'élasticité
R	Résistance à la rupture
A	Allongement à la rupture
E	Module d'élasticité (Module de Young)
ν	Coefficient de poisson
$\bar{\sigma}$	La contrainte de Von Mises
F (σ)	Critère de Tresca
Max $\ \tau\ $	Critère de cisaillement maximal
τ_{max}	Cisaillement maximal
r_y	Rayon de la zone plastique
K_I, K_{II}, K_{III}	Facteur d'intensité de contraintes en mode I, II et III
G	Taux de restitution d'énergie
H	Hauteur
W	Largeur
L	Longueur
t	Epaisseur
FIC	Facteur d'intensité de contraintes
G	Module de cisaillement
α_T	Coefficient de dilatation thermique dans la direction transverse
α_L	Coefficient de dilatation thermique dans la direction longitudinale
T	Température
σ_e	Contrainte équivalente de von mises
$\sigma_{\theta\theta}$	Contrainte circonfrontriale

σ_{zz}	Contrainte de traction
σ_{rr}	Contrainte radiale
P_i	Pression

Introduction Générale

Dans le contexte de la transition énergétique, l'hydrogène joue un rôle central comme alternative aux énergies fossiles. Son utilisation croissante dans divers secteurs s'accompagne cependant de défis technologiques importants, notamment pour le stockage et le transport sécurisé. Les réservoirs cryogéniques, soumis à de fortes sollicitations mécaniques, doivent faire face à des risques de dégradation qu'il est crucial de maîtriser.

Parmi les principales causes de détérioration des réservoirs, on retrouve les contraintes mécaniques répétées, la fatigue des matériaux, ainsi que différents types de corrosion, dont la corrosion localisée telle que la corrosion par piqûres, qui peut entraîner des fissures et compromettre l'intégrité structurelle de ces réservoirs. Ces détériorations posent un risque important pour la sécurité et exigent des solutions de réparation efficaces, durables et économiquement viables, capables de restaurer les performances mécaniques du réservoir sans nécessiter son remplacement complet.

Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique d'innovation. Il a pour objectif d'étudier et d'évaluer l'efficacité de différentes techniques de réparation de réservoirs d'hydrogène par matériaux composites, à travers une double approche combinant modélisation numérique par éléments finis et analyses analytiques. Plus précisément, ce mémoire se propose de :

Le premier chapitre présente dans un premier temps les caractéristiques de l'alliage d'aluminium 6061-T6, largement utilisé dans les applications aérospatiales et cryogéniques pour ses excellentes propriétés mécaniques et sa résistance à la corrosion. Ensuite, une attention particulière est portée sur le comportement mécanique des réservoirs d'hydrogène soumis à des conditions extrêmes de pression.

Le deuxième chapitre consacré aux techniques modernes de réparation des structures endommagées, en particulier l'utilisation des matériaux composites pour renforcer les zones fissurées ou corrodées.

Le troisième chapitre aborde la réparation numérique de réservoirs cryogéniques en analysant l'efficacité de différents types de matériaux composites utilisés comme patches de renforcement. Les matériaux étudiés comprennent le carbone/époxy, le verre/époxy et le graphite/époxy. Une modélisation 3D par éléments finis permet d'évaluer la performance de chaque matériau en termes de réduction des contraintes localisées et d'amélioration de la tenue mécanique de la structure.

Chapitre I :

l'aluminium 6061-T6 et le comportement mécanique des réservoirs d'hydrogène

Introduction :

Dans le contexte de la transition énergétique, l'hydrogène s'impose comme une solution prometteuse pour le stockage et le transport de l'énergie propre. Toutefois, les réservoirs destinés à contenir ce gaz, notamment à l'état cryogénique, sont soumis à des sollicitations mécaniques importantes et à divers phénomènes de dégradation, dont la corrosion. Ce premier chapitre vise à poser les bases scientifiques et techniques indispensables à la compréhension du comportement des réservoirs d'hydrogène, en mettant un accent particulier sur leur résistance mécanique et leur durabilité.

Nous nous intéressons tout d'abord au comportement mécanique des réservoirs soumis à des pressions internes élevées. Dans ce cadre, l'utilisation de l'alliage d'aluminium 6061-T6 est étudiée en raison de ses excellentes propriétés mécaniques, de sa légèreté et de sa bonne résistance à la corrosion. L'analyse de cet alliage comprend ses caractéristiques, ses propriétés mécaniques et ses avantages dans le domaine du stockage d'hydrogène.

Le chapitre traite également des phénomènes de corrosion, en présentant les différents types rencontrés dans les environnements industriels, avec un focus particulier sur la corrosion localisée, notamment la corrosion par piqûres, qui constitue une menace sérieuse pour l'intégrité des réservoirs.

I.1 Les alliages d'aluminium :

L'aluminium est le plus souvent utilisé sous forme d'alliages afin d'en améliorer la résistance. Pour cela, on agit à la fois sur la composition chimique de l'alliage et sur les traitements thermiques ou thermomécaniques appliqués, dans le but d'atteindre un équilibre optimal entre différentes propriétés en fonction de l'usage souhaité [01].

On distingue deux grandes familles d'alliages d'aluminium :

- **Les alliages de déformation (ou corroyés)** : obtenus par des procédés de mise en forme plastique, à chaud ou à froid, tels que le laminage ou le filage.
- **Les alliages de fonderie (ou de moulage)**: fabriqués exclusivement par coulée en moule, sans déformation mécanique ultérieure.

I.1.2 Les alliages de corroyage :

Les alliages de corroyage sont obtenus par une déformation plastique à chaud (appelée corroyage), après avoir été coulés sous forme de plaques ou de billettes. Ils subissent ensuite des procédés de transformation à chaud tels que le laminage, le filage, le forgeage ou encore le matriçage.

Selon l'usage auquel ils sont destinés, ces alliages doivent présenter les propriétés principales suivantes :

- Une bonne résistance mécanique
- Une bonne ductilité
- Une résistance à la propagation des fissures
- Une résistance à la fatigue (notamment en cas d'efforts alternés)
- Une bonne résistance aux diverses formes de corrosion
- Une conductivité électrique satisfaisante [02]

I.1.3 Les familles d'alliages :

- **a) Alliages durcissables par écrouissage :**

Les alliages des séries 1000, 3000, 5000 ainsi que la majorité de ceux de la série 4000 sont classés parmi les matériaux non durcissables par traitement thermique. Toutefois, leurs propriétés mécaniques peuvent être améliorées par écrouissage (ou durcissement mécanique) et par modification de la taille des grains. La capacité de ces alliages à durcir par solution solide ou par vieillissement reste limitée, en raison de la faible solubilité des éléments d'alliage dans l'aluminium à température ambiante.

- **b) Alliages durcissables par traitement thermique :**

Les séries 2000, 6000 et 7000 regroupent des alliages pouvant être trempés, c'est-à-dire durcis par traitement thermique. Ces matériaux présentent un bon rapport résistance/poids, bien qu'ils possèdent une capacité de précipitation ou de transformation modérée. Il est important de noter qu'ils perdent leurs propriétés mécaniques lorsqu'ils sont exposés à des températures supérieures à 175 °C .

I.1.4 Les alliages de moulage :

- Les alliages de moulage sont largement utilisés, aussi bien pour la production en série que pour les pièces uniques. La plupart des nuances d'alliages se prêtent facilement au moulage, que ce soit avec des moules métalliques permanents ou des moules en sable. Le retrait volumique important observé lors du moulage (entre 3,5 % et 8,5 %) peut être atténué grâce à une conception optimisée des pièces.
- De nombreux alliages fréquemment utilisés contiennent du silicium en quantité suffisante pour déclencher une réaction eutectique, ce qui abaisse leur température de fusion, améliore leur fluidité ainsi que leur mouillabilité. Le moulage en coquille ou sous pression permet un refroidissement plus rapide comparé au moulage en sable, entraînant un grain plus fin et de meilleures propriétés mécaniques. Par ailleurs, l'ajout de bore ou de titane contribue également à l'affinage du grain. Enfin, la présence de cuivre, de magnésium ou de zinc favorise ou accentue le durcissement des alliages.

I.1.5 Classification des alliages d'aluminium :

I.1.5.1 La classification des alliages de corroyage :

Identification numérique (Norme européenne EN 485-2)

La désignation des alliages d'aluminium suit un code numérique à quatre chiffres, conforme à la norme européenne EN 485-2, à la norme NF EN 573 (Afnor), ainsi qu'aux standards de l'Aluminium Association.

- Le premier chiffre indique la famille de l'alliage, en fonction des éléments d'addition principaux :
 - Série 1000 : Aluminium pur (sans ajout d'éléments d'alliage)
 - Série 2000 : Aluminium – Cuivre
 - Série 3000 : Aluminium – Manganèse
 - Série 4000 : Aluminium – Silicium (alliages de moulage)
 - Série 5000 : Aluminium – Magnésium
 - Série 6000 : Aluminium – Magnésium + Silicium
 - Série 7000 : Aluminium – Zinc + Magnésium
 - Série 8000 : Autres alliages spécifiques

- Le deuxième chiffre reflète les modifications ou variantes apportées à un alliage de base dans chaque série (à l'exception de la série 1000, où il indique les limites relatives aux impuretés).
- Le troisième chiffre :
 - Pour la série 1000, il précise la teneur en aluminium pur (exemple : 1350 = 99,50 % d'Al).
 - Pour les autres séries, il participe simplement à l'identification spécifique de l'alliage.
- Le quatrième chiffre, comme le troisième (hors série 1000), sert à différencier davantage les nuances à l'intérieur d'une même série.[03]

	Durcissement par écrouissage A sans traitement thermique Alliages non trmpant				Durcissement structural Alliages trempant A traitement thermique			
	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
Famille	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
Eléments d'alliage	aucun	Mn	Mg	Si+Fe	Cu	Si	Mg+Si	Zn+Mg
Teneur en masse (%)	0	0.5-1.5	0.5-5	Si: 0,3-1 Fe: 0,6-2	2-6	0.8-1.7	Mg : 0,5-1,5 Si: 0,5-1,5	Zn : 5-7 Mg : 1-2

Tableau I.1 : Désignations et teneur en masse des alliages de corroyage [03]

I.1.5.2 Identification symbolique (Norme européenne) :

Cette désignation vient en complément de l'identification numérique. Pour les produits corroyés en aluminium non allié, elle se compose du symbole chimique "Al", suivi d'un espace, puis du taux de pureté exprimé avec une ou deux décimales (ex. : Al 99.5 ou Al 99.50). Par Exemples : EN AW-2014 [Al Cu4SiMg] (Figure I.1) [4].



Figure I.1 : Désignation des aluminums et alliages produits corroyés NF EN 573

I.1.6 L'alliage d'aluminium 6061 :

I.1.6.1 Présentation générale du 6061 :

Ce mémoire porte sur l'alliage d'aluminium 6061, un alliage couramment utilisé appartenant à la série 6XXX, dont les principaux éléments d'addition sont le magnésium et le silicium. Les alliages de cette série présentent des compositions variables, avec des teneurs en magnésium allant de 0,3 à 1,5 %, et en silicium de 0,3 à 1,4 %. Ils peuvent également contenir des éléments secondaires tels que le chrome, le cuivre, le manganèse, ou encore le plomb, qui influencent également leurs propriétés.

Les alliages 6XXX, et en particulier le 6061, se distinguent par les caractéristiques suivantes [05] :

- Excellentes propriétés de formage à chaud, notamment lors du laminage, du filage et du matriçage.
- Très bonne aptitude au formage à froid, en particulier dans les états recuits (O) et, dans une moindre mesure, trempés puis mûris (T4).
- Bonnes propriétés mécaniques à l'état trempé et mûri (T6).

- Excellente résistance à la corrosion, améliorée par des traitements tels que l'anodisation.
- Finitions de surface de haute qualité possibles dès la sortie de presse, et optimisables par brillantage ou anodisation.
- Bonne soudabilité, même à l'état T6, avec un coefficient de joint soudé avoisinant 0,65.
- Bonne tenue aux basses et très basses températures, mais résistance limitée à la chaleur au-delà de 150–200 °C, en fonction de la durée d'exposition.

Les alliages de la série 6XXX sont à durcissement structural, c'est-à-dire qu'ils acquièrent une résistance mécanique accrue après traitement thermique, grâce à la précipitation de composés de magnésium et de silicium. Le type et la composition des précipités varient selon les conditions du traitement.

L'alliage 6061-T6 est particulièrement apprécié pour ses propriétés mécaniques élevées, sa bonne soudabilité, et sa résistance à la corrosion et à la fatigue, même après soudage. Il est largement utilisé dans les structures terrestres (charpentes, équipements de manutention) ainsi que dans les structures de véhicules.

% Masse	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Autres (chacun)	Autres (total)
Minimum	0,40	–	0,15	–	0,80	0,04	–	–	–	–
Maximum	0,80	0,70	0,40	0,15	1,20	0,35	0,25	0,15	0,05	0,15

Tableau I.2 : Proportion des éléments d'addition du 6061[03]

I.1.6.2 Propriétés de l'alliage 6061 :

L'alliage d'aluminium 6061 se distingue par les caractéristiques suivantes :

- Bonnes propriétés mécaniques à température ambiante, avec une augmentation notable de la résistance à la traction aux basses et très basses températures ;
- Excellente aptitude à la mise en forme, facilitant les opérations de fabrication ;
- Résistance à la fatigue modérée, adaptée à de nombreuses applications structurelles ;
- Très bonne soudabilité, notamment par soudage à l'arc ;
- Excellente résistance à la corrosion, y compris dans des environnements agressifs ;
- Résistance à la corrosion sous contrainte, un atout majeur dans les milieux hostiles [06].

I.1.6.3 Les propriétés mécaniques du 6061-T6 :

De nombreuses recherches ont été menées sur les alliages d'aluminium de la série 6XXX, en particulier le 6061, principalement d'un point de vue métallurgique mais aussi d'un point de vue mécanique. Le tableau I.3 [15, 17, 18, 19, 20] énumère les caractéristiques mécaniques fréquemment reconnues (limite d'élasticité à 0,2 % RE (0,2), résistance à la rupture R_r, allongement à la rupture A, module d'élasticité E et coefficient de poisson ν).

R _{E (0,2)}	R _r (MPa)	A(%)	E (GPa)	ν
≈ 280	≈ 310,5	≈ 15	≈ 69,5	0.33

Tableau I.3 : Propriétés mécaniques couramment admises du 6061

I.2 Réservoirs d'hydrogène :

L'hydrogène est une source d'énergie prometteuse pour l'avenir en raison de sa propreté et de sa haute densité énergétique, mais son stockage présente encore plusieurs défis. Étant un gaz léger, il nécessite des réservoirs capables de supporter des pressions très élevées, tout en étant légers et sécurisés. Les réservoirs à haute pression sont donc conçus pour résister à des contraintes mécaniques importantes, telles que la fatigue et la déformation, tout en prévenant les risques de fuites et d'explosions.

Pour répondre à ces exigences, les matériaux composites, composés de matrices et de fibres, sont utilisés pour fabriquer ces réservoirs. Ces matériaux sont choisis pour leur capacité à combiner une grande résistance mécanique et un faible poids. Les fibres de carbone, par exemple, sont souvent utilisées pour renforcer les réservoirs d'hydrogène, car elles offrent une résistance à la traction exceptionnelle. Ce chapitre explore les comportements mécaniques de ces réservoirs, notamment leur capacité à supporter la pression et leur durée de vie sous des conditions extrêmes. Il examine également les matériaux composites, leur composition et leurs propriétés qui les rendent adaptés à cette application critique.

I.2.1 Classification des réservoirs de stockage :

Les réservoirs d'hydrogène sont classés en quatre grandes catégories selon leur structure et les matériaux utilisés :

I.2.1.1 Réservoirs à toit flottant :

Ils sont comparables aux réservoirs à toit fixe à l'exception de la conception du toit et sont utilisés pour le stockage de produits volatils (pétrole brut, condensat, carburants automobiles, etc.).

Dans cette situation, le toit repose directement sur le liquide et flotte au-dessus de celui-ci grâce à deux fonds qui forment des poches d'air distinctes, ce qui abaisse le poids spécifique de l'ensemble du toit par rapport au liquide. [07]

Des bandes de caoutchouc qui glissent sur la paroi intérieure de la coque du réservoir scellent le périmètre du toit, diminuant ainsi les pertes par évaporation. Ce système d'étanchéité permet également au toit de se déplacer. Lorsque le toit repose sur le fond du réservoir, il est soutenu par des supports uniques (pieds).

Il existe deux types de toits flottants :

- à flotteur unique

- à double flotteur

a) toit à flotteur unique (simple ponton) : Il est constitué d'une surface de plaque centrale avec un anneau circulaire soudé à sa périphérie, composé de compartiments étanches flottants.

b) toit à double flotteur (double ponton) : Il comporte deux surfaces circulaires en tôle. L'une recouvre l'autre et en est séparée par des cloisons ou des charpentes afin de créer un coussin d'air entre le produit stocké et le milieu environnant.[03]

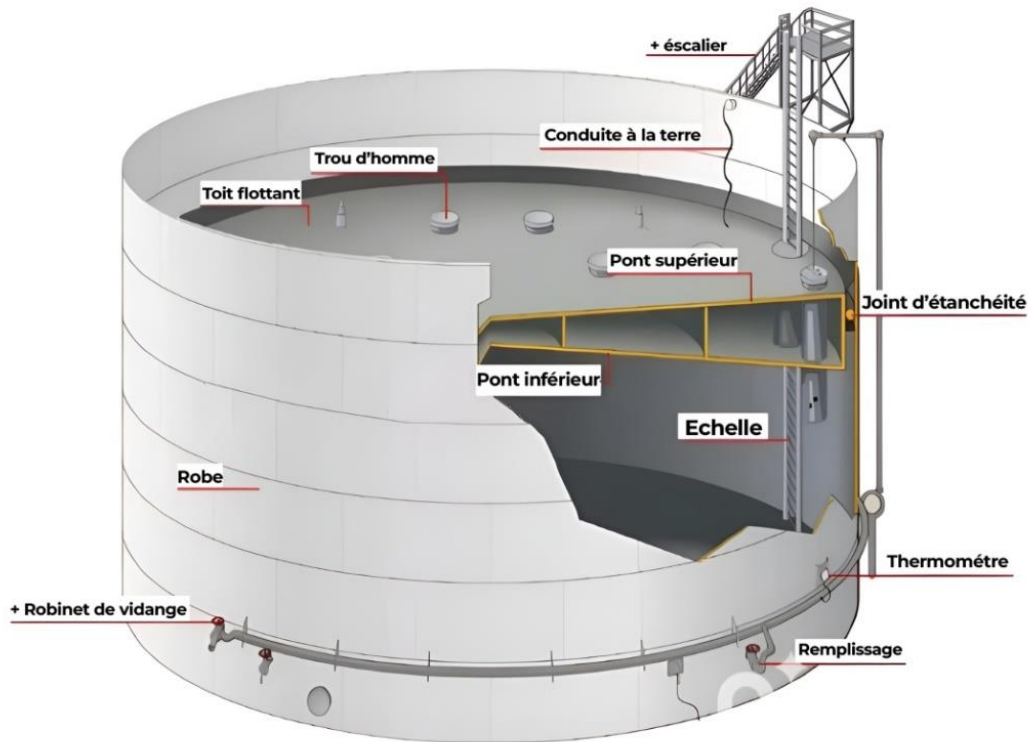


Figure I.2 : Réservoir à toit flottant [07]

Les réservoirs à toit flottant sont équipés d'accessoires supplémentaires.

- Au-dessus de la robe, un anneau de renfort avec main courante sert à renforcer la structure et faciliter l'accès autour du toit.
- Une plate-forme supérieure est placée au-dessus de cet anneau, avec une échelle coulissante montée sur glissières.
- Un clapet d'aération automatique s'ouvre lorsque le toit repose au fond, remplissant le rôle des événements des réservoirs à toit fixe.

Concernant l'étanchéité entre la toiture flottante et la robe du bac, plusieurs systèmes de joint sont utilisés :

- Joint mécanique : composé de patins en acier frottant contre la paroi. Un joint souple non tendu placé au-dessus du liquide assure l'étanchéité, maintenu par un contrepoids.
- Joint liquide : utilise un "boudin" rempli de kérosène ou de gazole pour garantir l'étanchéité entre la robe et le toit.
- Système d'évacuation des eaux de pluie : L'eau de pluie s'accumule au centre du toit flottant, puis s'évacue à travers un tube

articulé qui la dirige vers le bas de la robe. En cas de bouchage, un drain de sécurité permet à l'eau de s'écouler dans le produit, évitant ainsi une montée du toit.

- Béquille : Quand le niveau du liquide devient trop élevé pour que le toit flotte, celui-ci repose sur des supports.

Deux types existent :

- Béquilles réglables, avec une hauteur adaptable selon les besoins d'exploitation.
- Déversoir d'injection de mousse : Permet d'injecter de la mousse sur le joint d'étanchéité extérieur. Un anneau métallique soudé au toit retient la mousse sur les bords pour couvrir tout le joint.[05]

I.2.1.2 Réservoirs sous pression :

A) les sphères : Dans les raffineries, certains réservoirs sphériques qui stockent des liquides comme le propane ou le butane sous pression. Leur rayon varie entre 5 et 10 m, et leur volume entre 500 et 4500 m³. La masse stockée dépend de la densité du liquide : par exemple, une sphère de 1000 m³ contient entre 400 t (propane) et 700 t (oxyde d'éthylène). Les parois font plus de 10 mm d'épaisseur, et les pressions internes varient de 8–9 bars pour le butane à 25 bars pour le propane. [05]



Figure 1.3 : Les sphères [08]

B) Les réservoirs horizontaux cylindriques :

Peuvent stocker les mêmes produits que les réservoirs sphériques. Leur diamètre varie de 1,5 à 3 m, leur longueur atteint environ 10 m, et leur capacité va de 100 à 2 000 m³. Les plus grands peuvent mesurer plusieurs dizaines de mètres. Ils sont généralement soutenus par des berceaux, parfois ceinturés pour plus de stabilité.[05]



Figure 1.4 : Réservoirs horizontaux [07]

I.2.1.3 Autres types des réservoirs :

A) Réservoirs de Type I

Une bouteille tout métal traditionnelle en acier utilisée pour le stockage de liquides et de gaz destinés aux processus industriels. Peu chers à produire, mais lourds . [09]

- Pression maximale : 200-300 bars.
- Avantages : Simplicité de fabrication, faible coût.
- Inconvénients : Poids élevé, susceptibilité à la corrosion et à la fragilisation par l'hydrogène.[10]

B) Réservoirs de Type II

Une couche supplémentaire de fibre de carbone est ajoutée pour le renfort sur le pourtour intérieur d'un réservoir et y partage la charge avec le métal. Ce type est plus résistant et pèse moins lourd , il est cependant plus cher à fabriquer que le type I .[09]

- Pression maximale : 300-450 bars.

- Avantages : Poids réduit par rapport au Type I, meilleure résistance mécanique.
- Inconvénients : Coût de fabrication plus élevé.[10]

C) Réservoirs de Type III

Un réservoir en composite de fibre de carbone doté d'un réservoir intérieur en acier ou en aluminium. Le réservoir extérieur en fibre de carbone supporte la charge. Ce type nécessite de plus grandes quantités de fibre de carbone, ses coûts sont plus élevés que pour le type 2, mais il supporte des pressions plus élevées.[09]

- Pression maximale : 500-700 bars.
- Avantages : Réduction significative du poids, meilleure résistance aux pressions élevées.
- Inconvénients : Risques liés à la fatigue mécanique et à la perméation de l'hydrogène.

D) Réservoirs de Type IV

Un réservoir en fibre de carbone avec un liner intérieur en plastique polyéthylène. Il présente un poids beaucoup moins élevé et une très grande résistance. Cher en comparaison à cause du volume de fibre de carbone.[09]

- Pression maximale : 700 bars.
- Avantages : Poids le plus faible, résistance élevée à la corrosion et à la fragilisation.
- Inconvénients : Coût de production élevé, vieillissement des polymères sous contrainte. [10]

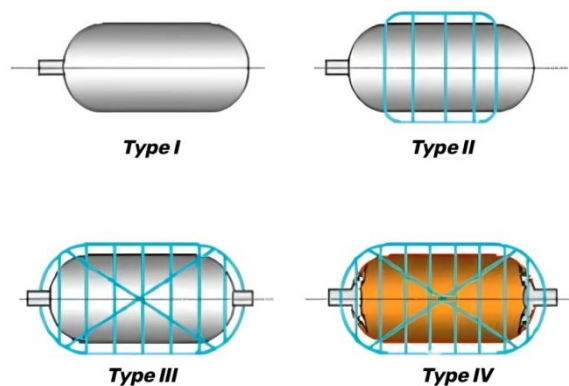


Figure I.5 : Barthelemy, 2009[11]

I.3 Comportement Mécanique des Réservoirs d'Hydrogène :

I.3.1 Comportement des réservoirs d'hydrogène de type I et II aux agressions mécaniques :

Réservoir de type I :

Le comportement mécanique des réservoirs métalliques de type I face aux sollicitations mécaniques est bien connu grâce à de nombreuses études. Parmi celles-ci, les travaux de Le Roux (2018) sur les impacts accidentels et ceux de Noret (2012) sur les ondes de pression sont notables. Par ailleurs, les outils de modélisation par éléments finis sont devenus fiables et permettent une analyse approfondie du comportement de ces réservoirs face aux agressions mécaniques. [12]

Réservoir de type II :

Bien que les réservoirs de type II soient souvent considérés comme métalliques, l'ajout de fibres de carbone en renfort circonférentiel peut influencer leur comportement face aux agressions mécaniques. Malgré les tests standards (tir de projectile à 850 m/s et chute de 1,83 m), ces essais ne couvrent pas toutes les situations possibles, comme la pénétration accidentelle dans la couche composite et la paroi métallique. De plus, la littérature scientifique ne présente pas d'études spécifiques sur le comportement mécanique des réservoirs de type II face à ce type d'agressions.[12]

I.3.2 Comportement des réservoirs d'hydrogène de type III et IV aux agressions mécaniques :

Les recherches sur les réservoirs composites de type III et IV ont montré que leur résistance aux impacts mécaniques ne dépend pas uniquement de l'énergie cinétique. D'autres facteurs comme la géométrie, la répartition des matériaux et la configuration de l'impact jouent un rôle important. Certains réservoirs résistent à 5000 J, d'autres échouent à 2500 J. Les réservoirs de grande capacité (ex. 100 L) dissipent mieux l'énergie que les petits (2,4 L), mais même un faible impact peut causer des dommages internes importants, réduisant la pression de rupture jusqu'à 70 %.

Ces dommages incluent des ruptures de fibres, des délaminages et des fissures internes, souvent invisibles extérieurement mais très dangereux. Le projet HYPACTOR a aussi révélé

que des impacts répétés fragilisent davantage les réservoirs, pouvant provoquer des fuites ou des éclatements, surtout au-delà de 1–3 kJ pour des réservoirs de 36 L.

Enfin, bien que des méthodes de détection des dommages internes existent (radiographie, tests acoustiques), elles ne sont pas systématiquement utilisées, ce qui soulève des questions de sécurité, surtout dans un contexte d'utilisation à haute pression comme pour l'hydrogène. [12]

I.4 Le Réservoir double paroi :

Les réservoirs à double paroi offrent un niveau supérieur de sécurité et de protection environnementale grâce à leur conception avancée. Contrairement aux modèles à simple paroi, ils sont constitués de deux enveloppes métalliques : un réservoir principal entouré d'une couche de confinement secondaire. Cette architecture "réservoir dans le réservoir" renforce efficacement la sécurité en limitant les risques de fuites.



Figure I.6 : Réservoir à double paroi [13]

La paroi de confinement secondaire joue un rôle clé : en cas de défaillance de la première enveloppe, elle capte le liquide avant qu'il ne puisse contaminer l'environnement. Ce dispositif est particulièrement crucial pour le stockage de produits dangereux, susceptibles de nuire à l'écosystème ou de provoquer un incendie.



Figure I.7 : Réservoir à double paroi [14]

I.5 Types de corrosions dans les réservoirs d'hydrogène :

I.5.1 Corrosion interne :

La corrosion interne des réservoirs peut survenir en raison de plusieurs facteurs, notamment :

La présence de substances nocives ou polluantes dans le produit stocké, en particulier lorsqu'elles interagissent avec d'autres conditions. Par exemple, la combinaison de composés soufrés et de vapeur d'eau peut entraîner la corrosion de la partie intérieure du toit et de la paroi du réservoir.

L'infiltration et l'accumulation d'eau à l'intérieur du réservoir, causées par des phénomènes de "respiration" dus aux variations de température, la condensation de la vapeur d'eau, la présence d'eau dans le produit lui-même, ou encore l'entrée d'eau de pluie par les joints des toits flottants.

La mauvaise qualité des matériaux utilisés, notamment pour les soudures, peut également favoriser la corrosion en affaiblissant la protection interne du réservoir.



Figure I.8 : Corrosion interne d'un tube de cuivre [15]

I.5.2 Corrosion externe :

La corrosion externe des réservoirs peut résulter de plusieurs facteurs, souvent liés à des défauts de conception, de matériaux ou à des conditions environnementales agressives :

- **Présence de polluants dans la couche supérieure de la fondation**, tels que l'argile, les pierres, les cendres ou d'autres objets pointus, pouvant créer des zones de concentration d'oxygène aux points de contact avec le fond du réservoir. Ces zones localisées favorisent la corrosion ponctuelle, où les points de contact jouent le rôle d'anode tandis que le reste du fond agit comme cathode.
- **Mauvaise qualité de la fondation**, notamment en cas de contact insuffisant entre la tôle de rive et la base du réservoir, ce qui permet l'infiltration d'eau par capillarité ou pénétration directe.
- **Accumulation d'eau de pluie** sur certaines zones du réservoir, comme les bords, les coins du toit ou les plaques supérieures, pouvant entraîner une corrosion localisée, surtout en cas de délamination des feuilles marginales au niveau de la base.
- **Utilisation de matériaux de faible qualité pour les soudures**, en particulier au niveau des plaques annulaires et des plaques de fond, ce qui affaiblit la résistance à la corrosion.
- **Présence de résidus d'écailles sur les plaques**, qui peut initier des processus de corrosion sous dépôt.
- **Température élevée du produit stocké**, qui accélère les réactions de corrosion, notamment sous l'isolation thermique.
- **Conditions environnementales agressives**, telles que les atmosphères industrielles, maritimes, tropicales ou agricoles. Ces environnements exposent le réservoir à une

humidité élevée, à des concentrations importantes de chlorures ou de polluants chimiques (comme le dioxyde de soufre - SO_2), ainsi qu'à des effets de la pluie, du vent et des variations de température.

- Enfin, la **géométrie du fond du réservoir** joue un rôle : les réservoirs à fond concave (cône vers le bas) présentent un risque accru de corrosion des plaques périphériques, car la température plus élevée et l'évacuation inefficace de l'eau favorisent l'accumulation de produits corrosifs.



Figure I.9 : Corrosion externe dans un aluminium [16]

I.6 Critères d'étude mécanique des réservoirs corrodés :

I.6.1 Critères de Von Mises :

Ce critère, de nature énergétique, établit un lien entre le seuil de plasticité et l'énergie associée à la déformation élastique en cisaillement.

Les contraintes de Von Mises s'écrit comme suit :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{1}{3}\right)^2 [(2\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (-\sigma_{xx} + 2\sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2]} \quad (01)$$

Soit :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy})} \quad (02)$$

En traction bi-axiale, le critère de Von Mises s'écrit ainsi :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy})} \leq Re \quad (03)$$

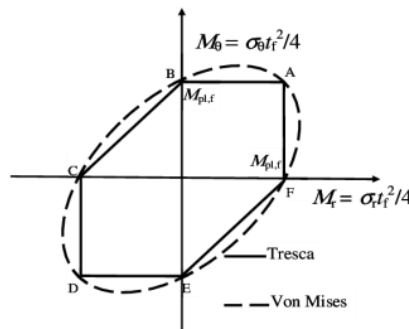


Figure I.10 : comparaison entre les critères de Von Mises et de Tresca [17,25]

La surface $\bar{\sigma} = Re$ est appelé frontière de plastification, en traction bi axiale, la frontière de plastification correspond à un ellipsoïde incliné de 45° (figure I.17). Par rapport aux axes de contraintes principales. Le grand axe correspond à un état de bi-traction ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = Re$) ou de bi-compression. La longueur de petit axe de rayon vaut $2\sqrt{2/3} Re$.

I.6.2 Critères de Tresca :

Ce critère se base sur le critère de cisaillement maximal qui s'écrit comme suit :

$$\text{Max}|\tau| = \frac{1}{2} |\sigma_3 - \sigma_1| \quad (04)$$

Le critère de Tresca peut s'écrire alors :

$$F(\sigma) = \sup_i |\sigma_i - \sigma_j| - \sigma_0 \quad (05)$$

De la même façon que le critère de Von Mises, le critère de Tresca est invariant par ajout d'une contrainte hydrostatique puisqu'elle basée sur le cisaillement maximal (figI.17). L'écart entre les deux critères est de l'ordre de $(1 - \sqrt{\frac{3}{2}} \sim (13\%))$

Si $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ alors le critère ne fait plus apparaître sauf le cisaillement maximal

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (06)$$

L'utilisation du critère de Von Mises en mode I conduit à des contours décrits sur la figure I.18 et aux équations suivantes :

En contraintes plane :

$$r_y = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_e^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} (1 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2}) \quad (07)$$

En déformation plane :

$$r_y = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_e^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} ((1 - 2\nu)^2 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2}) \quad (08)$$

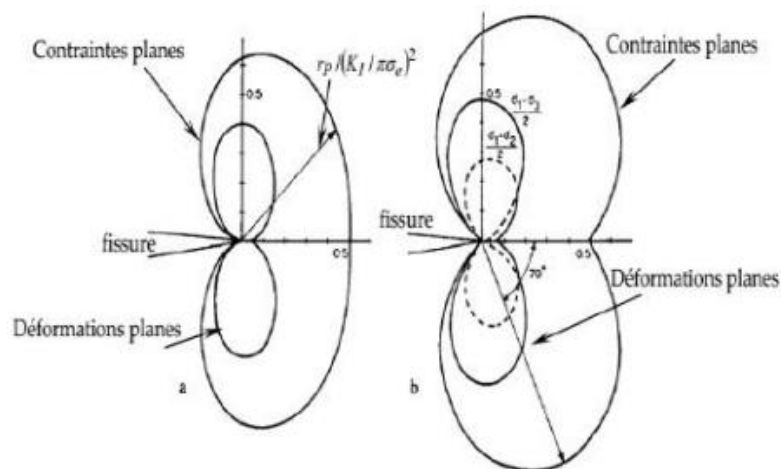


Figure I.11 : comparaison entre les critères de Von Mises et de Tresca [18,19]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré en profondeur les aspects fondamentaux liés au comportement mécanique des réservoirs d'hydrogène, avec une attention particulière portée aux réservoirs cryogéniques et à ceux à toit flottant. L'étude des différents types de réservoirs a permis de mieux comprendre les défis techniques associés au stockage sécurisé de l'hydrogène, notamment sous forme liquide à très basse température.

Nous avons également mis en évidence l'intérêt de l'alliage d'aluminium 6061-T6, reconnu pour sa combinaison optimale entre légèreté, résistance mécanique et résistance à la corrosion. La présentation des techniques de mise en forme de cet alliage permet d'envisager son utilisation efficace dans la réparation ou la fabrication de composants critiques des réservoirs.

En parallèle, l'analyse des différents types de corrosion, et plus particulièrement de la corrosion par piqûre, a souligné l'importance de bien choisir les matériaux pour garantir la durabilité des réservoirs en service. Enfin, l'introduction des critères mécaniques comme ceux de Von Mises et Tresca a permis de poser les bases nécessaires pour l'évaluation mécanique des réservoirs corrodés, ouvrant la voie à l'étude des techniques de réparation qui seront abordées dans le chapitre suivant.

Chapitre II :

Les techniques de réparation par composites

Introduction :

Face aux contraintes mécaniques et aux phénomènes de corrosion pouvant affecter l'intégrité des réservoirs d'hydrogène, la réparation constitue une alternative efficace et économique par rapport au remplacement complet des structures endommagées. Parmi les solutions modernes et performantes, l'utilisation des matériaux composites s'est imposée comme une technologie de choix, notamment grâce à leurs propriétés mécaniques élevées, leur légèreté, ainsi que leur résistance à la corrosion.

Ce chapitre étudie des différentes techniques de réparation utilisant des composites, notamment l'approche par patch composite, qui consiste à appliquer un renfort localisé sur la zone endommagée. Nous aborderons également les types de matériaux composites utilisés, les méthodes d'application, les avantages et les limites de ces techniques, ainsi que les critères de choix des matériaux en fonction des sollicitations mécaniques et des conditions environnementales.

L'objectif est de fournir une compréhension globale des réparations composites, tout en mettant en évidence leur pertinence pour les structures soumises à des pressions internes élevées, telles que les réservoirs d'hydrogène, notamment ceux fabriqués en alliage d'aluminium.

II.1 Les Techniques de réparation par composites :

II.1.1 Les Matériaux composites :

Le terme « matériau composite » désigne l'association de deux ou plusieurs matériaux distincts à une échelle macroscopique relativement petite, dans le but de former un nouveau matériau. Une interphase se crée entre les composants, jouant un rôle crucial dans la transmission des efforts entre eux et garantissant une bonne adhérence. Contrairement aux alliages métalliques, les composants des composites restent visibles à l'œil nu, bien qu'ils soient combinés à une échelle très fine.

Le matériau final présente une homogénéité macroscopique, ce qui signifie qu'il se comporte comme une seule entité, même si ses composants restent physiquement distincts. L'un des grands avantages de ces matériaux est leur performance supérieure par rapport à chacun de leurs éléments pris individuellement, à condition que leur conception soit optimisée. On peut

ainsi améliorer des propriétés telles que la solidité, la rigidité, la résistance à la corrosion, la légèreté ou encore la durabilité.

Cependant, il est impossible d'optimiser toutes ces propriétés simultanément, certaines étant incompatibles entre elles, comme c'est le cas de la conductivité thermique et de l'isolation thermique [56,19] . Le véritable objectif consiste donc à concevoir un matériau composite équilibré, possédant les caractéristiques clés requises pour répondre aux exigences d'une application spécifique.

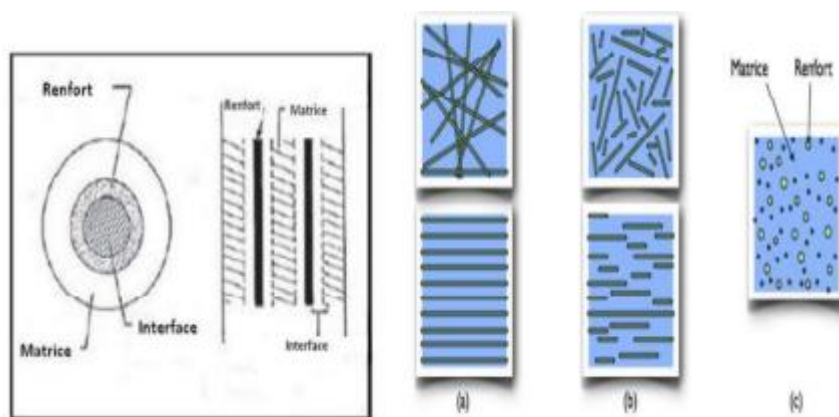


Figure II.1 éléments d'un matériau composite [19]

II.1.2 Techniques de réparations :

II.1.2.1 Réparation par patch :

Dans de nombreuses études, l'influence de divers paramètres sur le comportement des défauts de corrosion a été analysée, notamment sur des structures tubulaires. Parmi ces paramètres figurent le type de patch, sa taille, le nombre de plis, l'asymétrie de la structure de réparation, la tension du composant avant collage, la plasticité, ou encore les contraintes résiduelles. La littérature récente accorde une attention particulière à ces aspects.

L'objectif de ces travaux est principalement de restaurer les zones corrodées[21,22], ce qui correspond à notre propre intention. Les patches composites sont largement employés dans l'aéronautique, le secteur naval, les véhicules sportifs (vélos, motos, etc.) pour réparer les structures endommagées par la corrosion. Ils permettent non seulement de protéger et de masquer les zones affectées, mais aussi de prolonger la durée de vie des structures réparées.

Grabovac et D. Whittaker, par exemple, ont appliqué ces techniques à la réparation de grands navires métalliques.[23] De plus, l'équipe Honda Racing F1, à travers les travaux de G. Savage et M. Oxley, a proposé divers procédés de réparation pour les structures composites, tels que l'insertion, l'injection de résine ou encore l'application de patches composites. Leurs contributions apportent des conseils précieux en matière de conception de réparations et de considérations pratiques.[24]



Figure II.2 Réparation composite longue durée pour renforcement de reservoir et cuve sous pression [20]

Par ailleurs, les patches composites trouvent également des applications dans le domaine de l'ingénierie civile. Yao et ses collaborateurs [26] ont mené une étude expérimentale afin d'évaluer la performance de l'adhésion entre patches composites et béton, en analysant les cas de simple et de double recouvrement sous sollicitation en traction. Dans le cadre de notre étude, nous nous focaliserons exclusivement sur le comportement de la réparation de structures cylindriques en alliage d'aluminium Al 6061, par collage de patches composites rigides.

II.1.2.2 Réparations par Assemblage hybride :

Afin d'assurer l'étanchéité et de limiter les phénomènes de corrosion, la majorité des assemblages mécaniques dans l'aéronautique intègrent aujourd'hui des boulons ou rivets associés à un mastic d'étanchéité appliqué à l'interface (voir Fig. II.4). Par ailleurs, les constructeurs aéronautiques cherchent à conférer une fonction structurelle au mastic, dans le but de réduire le nombre d'éléments de fixation. La conception de ces assemblages hybrides repose sur le développement de modèles mécaniques fiables, permettant d'optimiser les paramètres de conception (dimensions, propriétés de l'adhésif, couple de serrage, etc.) en fonction des exigences en résistance mécanique ou en rigidité.[03]

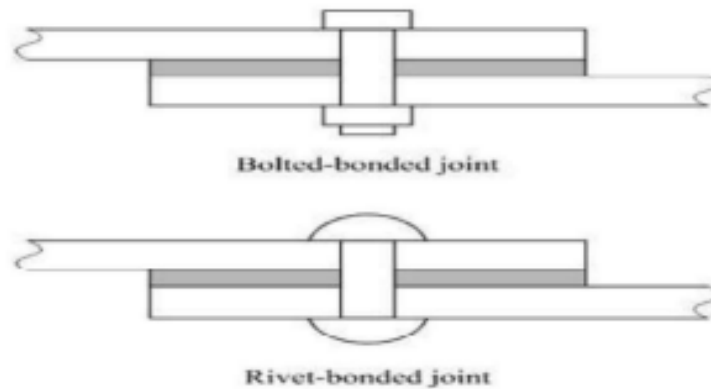


Figure II.3 : Réparations par assemblage hybride

II.1.2.3 Réparation par remplissage de la zone endommagée :

Pour garantir une adhésion optimale, la réparation par remplissage de la zone endommagée commence par une préparation minutieuse de la surface, consistant à créer un biseau de 2 à 3° ou à réaliser une surface étagée autour du périmètre endommagé (voir Fig. 2.5). La cavité ainsi obtenue est ensuite remplie de pré imprégnés, appliqués couche par couche selon l'orientation souhaitée. Cette opération est suivie d'un cycle de polymérisation, nécessaire pour durcir l'ensemble de la structure. Cette technique, largement répandue dans l'industrie, permet d'obtenir d'excellentes performances mécaniques tout en restaurant la géométrie d'origine. Toutefois, le procédé reste long, complexe, et exige un savoir-faire technique important pour garantir l'efficacité de la réparation.

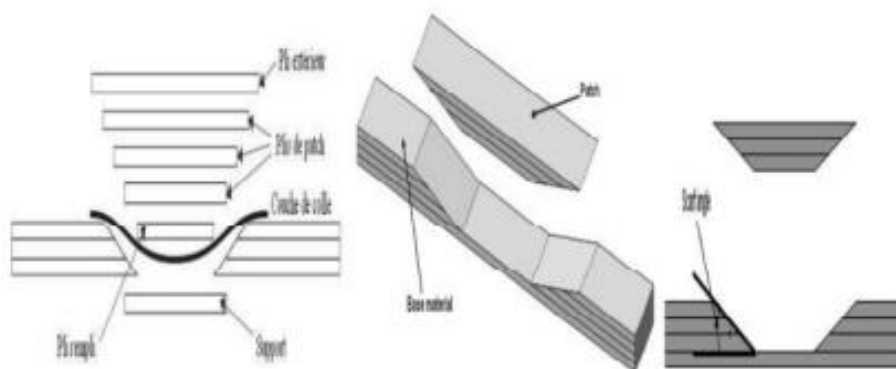


Figure II.4 : Remplissage avec un angle biseaute [27]

La technologie de réparation par composites est également appliquée à la remise en état des grands navires métalliques [28]. Dans ces cas, la zone endommagée est préparée de manière méthodique, puis la section détériorée est reconstruite progressivement, pli par pli, à l'aide de

matériaux composites.

Parmi les contributions notables, Breitzman et al. [29] ont étudié les propriétés mécaniques en traction de structures réparées à l'aide de patches biseautés, dans le but d'optimiser les paramètres de réparation.

De son côté, Ridha et al. [30] se sont intéressés à la modélisation numérique d'un stratifié [45/0/-45/90] réparé à l'aide d'un patch en escalier, mettant en évidence l'influence de la géométrie de la réparation sur le comportement global du composite.

II.1.2.4 Réparations par collage des patches composites externes :

L'industrie aéronautique porte un intérêt croissant aux réparations par patches, dont les performances dépendent à la fois des caractéristiques du patch et du comportement mécanique de l'adhésif. La conception et l'optimisation de ces réparations exigent donc une compréhension approfondie du comportement de l'assemblage. De nombreuses études se sont intéressées à l'influence des formes géométriques des patches (circulaire, carrée, rectangulaire, elliptique, hexagonale, etc.) pour une couverture optimale de la zone endommagée. Par exemple, Soutis et al. [31,32] ont étudié les performances en compression de structures réparées avec différentes formes et épaisseurs de patches, en tenant compte également de l'épaisseur du joint collé. Liu et Wang [33], quant à eux, ont mené des essais en traction pour analyser l'effet de la séquence d'empilement des patches sur les performances mécaniques.

Sur le plan de la modélisation numérique, Campilho et al. [34] ont simulé le comportement du joint structure-patch en 2D, pour des configurations à recouvrement simple et double. De son côté, Cheng [27] a cherché à évaluer l'efficacité des assemblages collés comme solution de réparation des structures composites endommagées. Il a ainsi développé des modèles phénoménologiques basés sur des observations expérimentales des mécanismes d'endommagement en sollicitation uniaxiale. Les résultats obtenus ont montré une bonne corrélation avec les essais expérimentaux. Une méthode simple d'aide à la conception a également été proposée. Toutefois, la modélisation s'appuyait sur la théorie linéaire et des techniques d'homogénéisation, ce qui limite la prédiction à l'amorce des endommagements, sans en décrire l'évolution progressive.

II.1.2.5 Réparation par patches internes :

Les patches internes, épousant le contour de la structure, sont utilisés pour restaurer les zones endommagées retirées (Fig. II.5). Les patches de réparation en composites se divisent en deux catégories selon leur état : patches durs, déjà solidifiés avant la pose, et patches mous, appliqués à l'état non solidifié puis durcis une fois en place. Il est important de souligner que les propriétés des plaques composites dépendent fortement des qualités des plis élémentaires ainsi que de la séquence d'empilement utilisée.

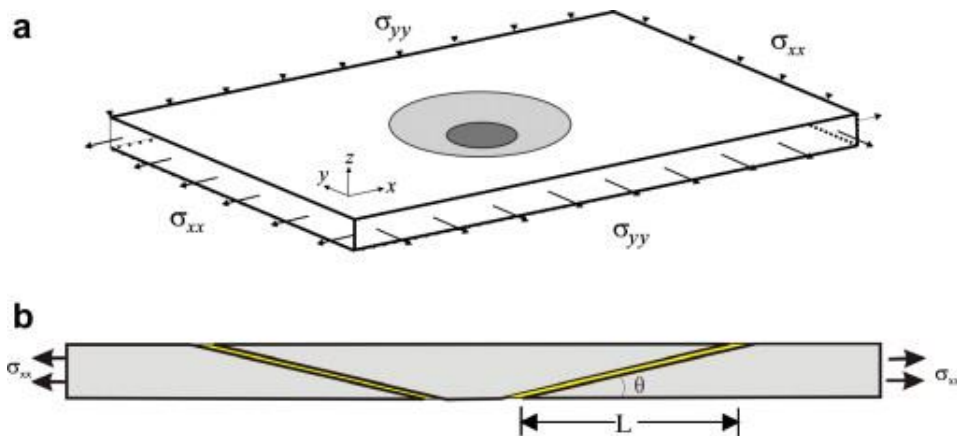


Figure II.5 : Réparation par patch interne [35]

II.1.2.6 Réparation par saignement :

Au début des années 1990, des avancées techniques ont permis la création de fibres creuses, inspirées des mécanismes naturels de guérison. L'idée était d'appliquer ce principe aux matériaux composites, qui, comme les plantes, sont souvent constitués de fibres. La principale difficulté technique consistait à remplir ces fibres creuses avec une colle réparatrice. Le processus de réparation repose sur un mécanisme simple : lorsque le matériau est endommagé et que les fibres creuses se brisent, la résine qu'elles contiennent s'écoule dans la zone endommagée pour réparer les fissures.

Ce phénomène d'auto-guérison a été démontré par Dry [36], qui a restauré certaines propriétés mécaniques en flexion. Par la suite, Pang et Williams ont approfondi ces recherches, obtenant des résultats remarquables sur la diffusion de la résine dans les fractures et la récupération des propriétés mécaniques [37,38]. White a proposé une approche alternative en encapsulant la résine réparatrice dans des sphères creuses. Lorsque la matrice se fissure, ces sphères libèrent la résine pour réparer les dommages [39].

II.1.2.7 Réparation par injection :

Dans les années 1990, des études ont exploré la technique d'injection de résine [40] pour réparer les composites renforcés de fibres courtes, particulièrement vulnérables aux chocs et sujets à des dommages matriciels importants. Cette méthode consiste à injecter de la colle dans les fissures afin de rétablir partiellement les propriétés mécaniques. Bien que l'injection seule n'apporte qu'une amélioration limitée, son association avec deux couches de renfort superficiel permet de restaurer quasiment l'intégrité du matériau.

Wu [41] a étendu cette approche aux composites à fibres longues, en étudiant spécifiquement le comportement en compression d'éprouvettes présentant des délaminations artificielles et ouvertes. Dans ces conditions contrôlées, une injection correctement réalisée permet de récupérer jusqu'à 98% des performances initiales. Toutefois, les protocoles industriels recommandés pour les réparations par infiltration se limitent généralement aux délaminations superficielles en bordure de plaques ou autour de trous [42], sans affecter les zones structurelles critiques.

Les guides techniques disponibles restent imprécis, reposant largement sur l'expérience subjective des opérateurs, ce qui explique les résultats inconstants observés en maintenance aéronautique. Une exception notable est la méthode développée par Russell [43], qui figurait parmi les plus avancées. Destinée à la réparation in-situ d'un avion militaire (le chasseur McDonnell Douglas CF-18), elle ciblait un composite quasi-isotrope AS4/3501-6 (carbone/époxy) de 6 mm d'épaisseur. Bien que prometteuse, cette approche n'a jamais été finalisée pour des raisons non documentées.

II.2 Assemblage par collage :

II.2.1 les avantages :

Applications industrielles :

- Utilisé dans de nombreux secteurs : automobile, construction, électroménager, électronique, loisirs, aéronautique, mécanique, etc.
- Méthode d'assemblage universelle : tout matériau peut être collé si les surfaces sont bien préparées.

Avantages techniques :

- Le collage agit comme un simple traitement de surface, causant moins de dommages que les méthodes mécaniques (ex. : perçage).
- Permet une meilleure répartition des contraintes grâce au transfert continu des charges → meilleure résistance aux chocs et vibrations.
- Allègement des structures comparé aux assemblages boulonnés.
- Peut également servir de mastic assurant l'étanchéité.
- Favorise des surfaces lisses, ce qui améliore l'aérodynamisme.

Avantages esthétiques et matériaux :

- Résultat visuellement plus propre et soigné.
- Possibilité de lier des matériaux différents sans précaution particulière contre la corrosion. [03]

II.2.2 Les inconvénients :

- Les assemblages collés présentent plusieurs limitations majeures.
- Contrôle difficile de l'épaisseur et de la qualité du joint.
- Irréversibilité : impossibilité de démonter l'assemblage après collage.
- Exigence de préparation : les surfaces à coller doivent être soigneusement traitées.
- Faible résistance au pelage, nécessitant un chargement principalement en cisaillement
- Sensibilité aux conditions environnementales, notamment à l'humidité et aux variations de température .
- Durabilité limitée, avec une dégradation accélérée sous l'effet de solvants ou d'agents oxydants .
- Temps de polymérisation parfois long, rallongeant les cycles de production .
- Conception complexe, exigeant une sélection rigoureuse de l'adhésif et une optimisation géométrique du joint.

II.3 Effet des propriétés mécaniques :

La réparation par matériaux composites joue un rôle de plus en plus crucial dans le prolongement de la durée de vie des structures endommagées. L'efficacité de ce type de réparation dépend de plusieurs facteurs clés, parmi lesquels : les propriétés mécaniques des patches et des adhésifs utilisés, la configuration des patches ainsi que leur forme géométrique. Ces éléments influencent directement les performances mécaniques et la durabilité de la réparation.

II.3.1 Effet des propriétés mécaniques du patch :

Les chercheurs et les ingénieurs se sont fortement intéressés à la technique de réparation par collage de patches, en raison des nombreux avantages offerts par les matériaux composites. De nombreuses études ont été menées pour analyser l'influence du type de patch composite collé sur les mécanismes de rupture, notamment à travers les facteurs d'intensité de contrainte (FIS)[44,45].

Dans ce cadre, la modélisation par éléments finis a été utilisée pour évaluer l'impact des propriétés mécaniques de patches composites, tels que Bore/époxy et Graphite/époxy, sur l'efficacité de la réparation en mode I pur [45]. La figure II.6 illustre la représentation géométrique du système réparé.

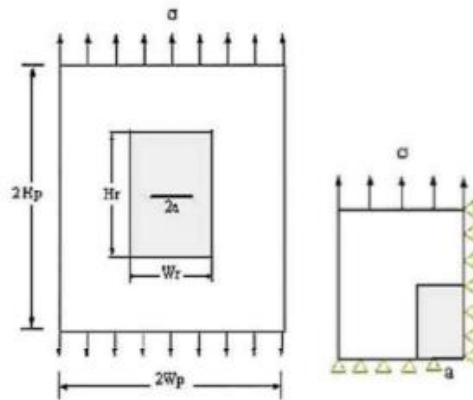


Figure II.6 : Géométrie de la plaque patchée [46]

En raison de la symétrie de la géométrie et des conditions de chargement selon les axes X-X et Y-Y, seule un quart (1/4) de la structure est modélisé afin de réduire le temps de calcul. Les dimensions ainsi que les propriétés des matériaux du modèle réparé sont présentées dans le tableau II.1.

Propriétés et dimensions	Matériaux			
	Aluminium 7075 T3	Adhésif (FM73)	Boron/epoxy	Graphite/epoxy
E ₁ (GPa)	72	0.97	208	172
E ₂ ; E ₃ (GPa)	-	-	25.4	10.34
ν ₁₂ ; ν ₁₃	0.33	0.32	0.17	0.3
ν ₂₃	-	-	0.04	0.18
G ₁₂ (GPa)	-	-	7.24	4.82
G ₁₃ ; G ₂₃ (GPa)	-	-	4.94	3.1
W (mm)	120	180	180	180
H (mm)	120	90	90	90
t (mm)	3	0.2	1	1

Tableau II.1 : Dimensions et propriétés des matériaux [45]

L'effet de type de patchs composites collés sur la réparation d'une plaque fissurée est représenté sur la figure II.8 :

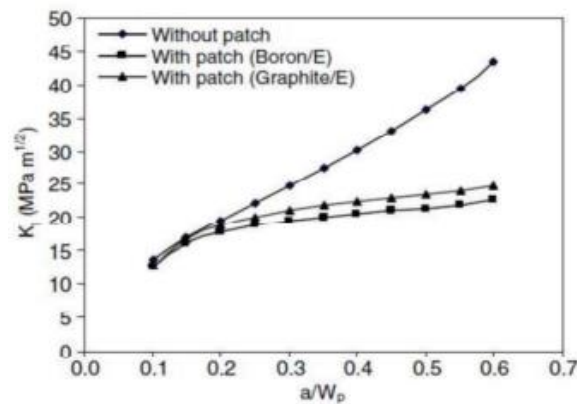


Figure II.8 : Variation du FIC en fonction de la longueur de fissure [45]

Ce dernier met en évidence les variations du facteur d'intensité de contrainte en mode I (KI) en fonction de la longueur de la fissure, pour deux types de patchs composites : Graphite/Époxy et Boron/Époxy. Il est observé que plus la fissure s'allonge, plus le facteur KI augmente. Toutefois, l'ajout de patchs composites permet de réduire significativement le facteur d'intensité de contrainte (FIC), ce qui améliore la transmission de la charge dans la zone endommagée. Le patch Boron/Époxy, plus rigide, entraîne une réduction plus marquée du facteur KI que le

patch Graphite/Époxy, suggérant ainsi que les matériaux plus rigides sont préférables pour optimiser la réparation et prolonger la durée de vie des structures endommagées [45,46].

La propagation par fatigue d'une fissure dans une structure tridimensionnelle sollicitée mécaniquement est généralement associée à une géométrie semi-elliptique évolutive de la fissure [47,48].

Dans ce contexte, une étude a été menée sur le comportement mécanique d'un réservoir, visant à déterminer, d'une part, les contraintes maximales dans la zone critique proche du front de fissure, et d'autre part, les dimensions optimales du patch à appliquer dans cette même zone.

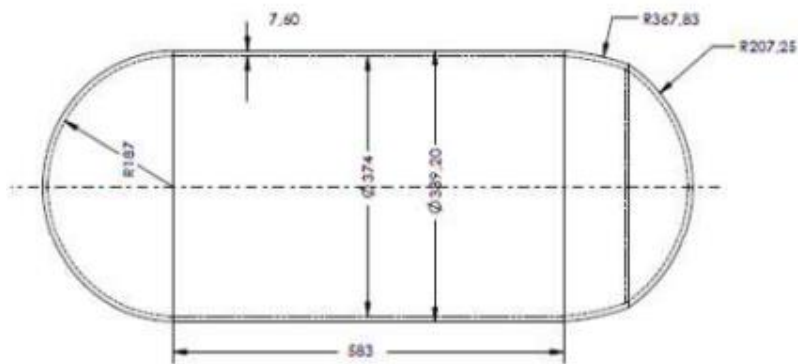


Figure II.9 : Les dimensions de la structure [49]

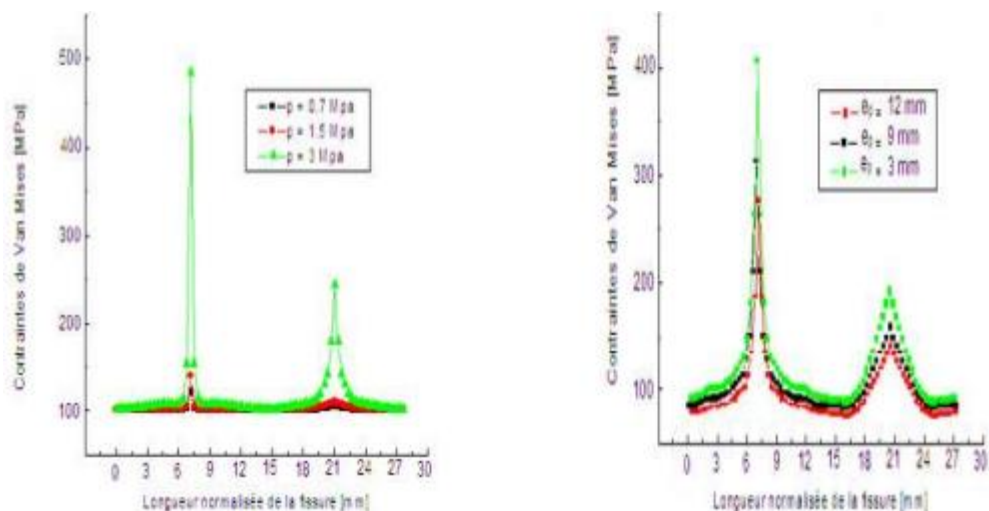


Figure II.10 : Distribution des contraintes de Von Mises sous différentes pressions et différentes épaisseurs de patch [49] [03]

La figure II.10 illustre l'évolution des contraintes de Von Mises le long d'une fissure axiale non réparée, en fonction de différentes pressions internes et épaisseurs de patch.

Dans un premier temps, les contraintes maximales sont localisées à l'extrémité de la fissure, du côté sphérique du réservoir. Dans un second temps, on observe que l'augmentation de la pression interne entraîne une élévation proportionnelle des contraintes au niveau du front de fissure.

L'application d'un patch composite sur une fissure semi-elliptique permet de réduire significativement la concentration des contraintes à son extrémité. De plus, l'augmentation du nombre de couches dans le patch conduit à une diminution notable des contraintes maximales, atteignant jusqu'à 56 % de réduction sous une pression interne maximale de 3 MPa [49].

II.3.2 Effets des propriétés mécaniques de l'adhésif :

L'adhésif est essentiel dans la réparation de patchs composites collés car il transfère la charge entre le patch composite et la plaque fissurée et maintient les deux éléments ensemble. Par conséquent, diverses recherches ont été menées pour étudier l'effet des propriétés mécaniques de l'adhésif sur la structure réparée. Les meilleurs adhésifs ont un faible module de cisaillement, ce qui permet de diminuer la tension impartie par la liaison. Dans le cas de structures réparées, l'objectif est de transférer autant de contraintes que possible à l'adhésif et donc au patch, afin de les réduire à l'extrémité de la fissure. Pour réparer des fissures ou des défauts, il est donc préférable d'utiliser des adhésifs ayant un module de cisaillement élevé (adhésif de qualité inférieure) [44, 50, 51].

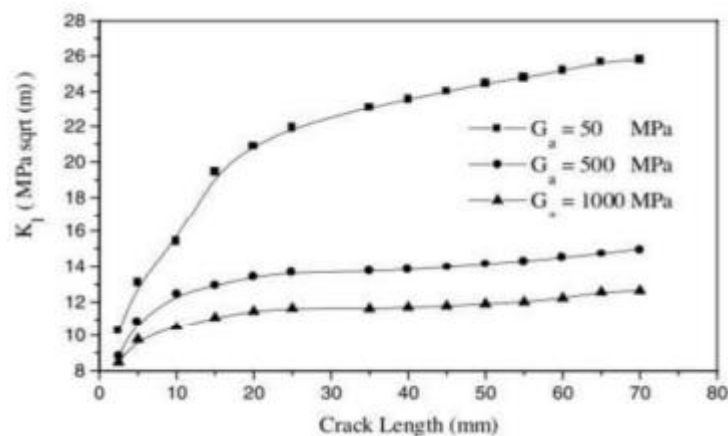


Figure II.11 : Effet de module de cisaillement de l'adhésif sur les valeurs de FIC [44]

La figure II.11 présente la variation du facteur d'intensité de la contrainte en fonction de la longueur de la fissure, pour différentes valeurs du module de cisaillement de la colle. On observe que le facteur d'intensité de la contrainte diminue à mesure que le module de cisaillement augmente, ce qui confirme les observations précédentes.

La figure II.12 offre une interprétation plus approfondie de l'impact du comportement mécanique de l'adhésif sur le facteur d'intensité de la contrainte. Les résultats montrent que si une augmentation du module de cisaillement permet de réduire le facteur d'intensité, elle entraîne également une diminution de la résistance de l'adhésion, pouvant aboutir à une défaillance de l'interface adhésive. Ainsi, le choix de la colle est crucial : elle doit présenter un bon compromis entre rigidité et capacité d'absorption des contraintes, afin d'assurer une transmission efficace des efforts au patch sans compromettre la fiabilité de la réparation.

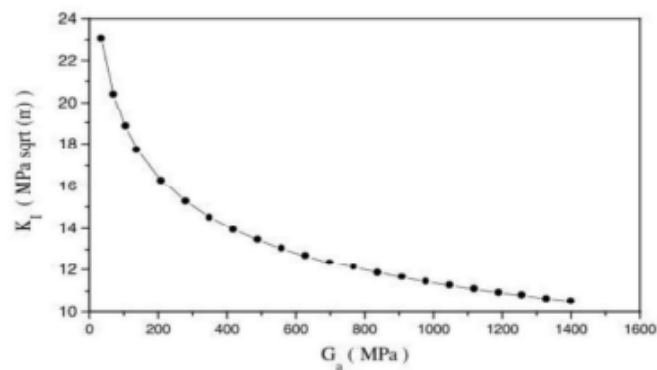


Figure II.12 : Evolution de FIC en fonction de module de cisaillement de l'adhésif [44]

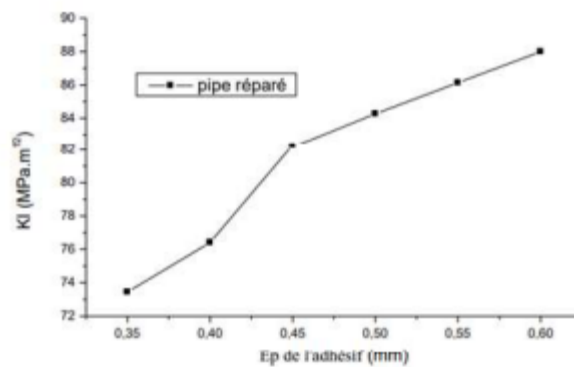


Figure II.13 : Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur les variations du FIC [44]

La figure II.13 illustre la variation du facteur d'intensité de la contrainte en fonction de l'épaisseur de l'adhésif pour une fissure réparée par patch. On constate que le facteur d'intensité de la contrainte augmente avec l'épaisseur. Pour les petites épaisseurs, la réparation a un bon effet. Au-delà de la valeur de 2,5 mm, la variation de la composante d'intensité de contrainte tend vers une asymptote horizontale, indiquant un effet de saturation. L'adhésif étant l'agent responsable de la propagation de la charge de la conduite au patch, son épaisseur doit être optimisée, car une faible épaisseur peut entraîner une contrainte de cisaillement plus élevée, provoquant la rupture de l'adhésion.

Conclusion :

Le chapitre II a permis d'explorer en profondeur les diverses techniques de réparation par matériaux composites, qui se sont imposées comme des solutions efficaces et flexibles pour restaurer l'intégrité des réservoirs d'hydrogène endommagés. Nous avons étudié plusieurs méthodes de réparation, telles que le patch composite, l'assemblage hybride, ainsi que la réparation par collage de patches externes. Ces approches se distinguent par leur capacité à offrir des réparations localisées tout en maintenant une haute performance mécanique et une résistance accrue à la corrosion.

L'analyse des propriétés mécaniques des patches composites a montré l'importance de choisir des matériaux compatibles et adaptés aux sollicitations spécifiques des réservoirs d'hydrogène. Les études sur l'effet des propriétés mécaniques du patch ont permis de souligner la performance globale de la réparation, ainsi que les variations du taux de la zone endommagée en fonction de la profondeur de la fissure. Cette analyse a également permis d'examiner en détail le comportement de l'adhésif FM73 dans les réparations par collage, un aspect déterminant pour la durabilité et l'efficacité des réparations.

En résumé, ce chapitre a mis en évidence l'importance d'une approche méthodique et bien choisie des techniques de réparation par composites pour garantir la sécurité, la durabilité et la performance des réservoirs d'hydrogène réparés. L'utilisation de ces matériaux permet non seulement de restaurer les performances mécaniques des réservoirs, mais aussi de prolonger leur durée de vie, ce qui est essentiel dans le cadre de leur utilisation à long terme.

Chapitre III :

Analyse numérique du comportement mécanique des réservoirs d'hydrogène réparés à l'aide de patchs composites

Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'analyse numérique du comportement mécanique des réservoirs d'hydrogène réparés à l'aide de patchs composites, en particulier sous l'effet de différentes pressions internes. L'objectif principal est de comprendre comment les contraintes se répartissent dans le réservoir réparé et d'évaluer l'efficacité de la réparation selon plusieurs directions d'observation.

Chaque simulation est effectuée pour différentes valeurs de pression interne, ce qui permet d'observer l'impact de la charge appliquée sur la performance du patch composite et la sécurité globale du réservoir. Cette interprétation met en lumière les zones critiques de sollicitation, ainsi que l'évolution des contraintes en fonction de la géométrie et des conditions de chargement.

III.1 Modèles géométriques :

La géométrie de la structure corrodée considérée dans cette étude est présentée sur la figure III.1. Considérons les dimensions suivantes pour un réservoir en aluminium 6061-T6 : le rayon Extérieur ($R_{ext} = 376$ mm), le rayon intérieur ($R_{int} = 364$ mm), l'épaisseur du réservoir est ($t = 12$ mm), la longueur du réservoir est ($L = 1800$ mm).

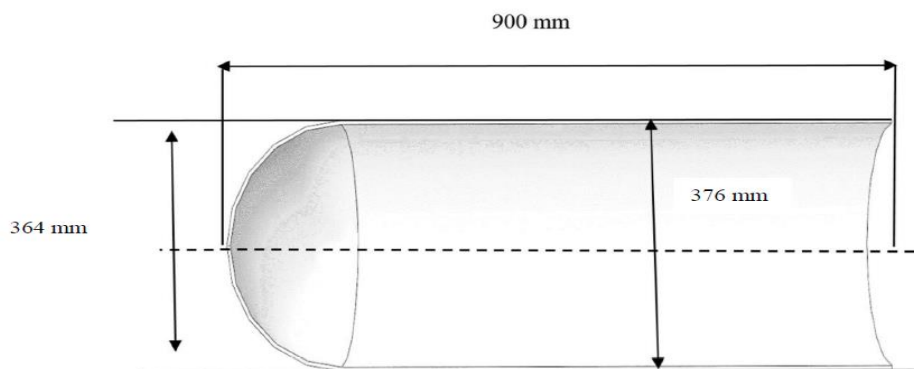


Figure III.1 : Dimensions de la structure

La corrosion ellipsoïde est modélisée dans le plan longitudinal du réservoir. Elle a deux dimensions : profondeur (petit demi-axe) (a) et longueur (grand demi-axe) (c).

Cette étude propose une géométrie unique pour examiner l'influence du patch. Les propriétés géométriques du patch pour une surface de recouvrement peuvent être identifiées sur la figure III.2

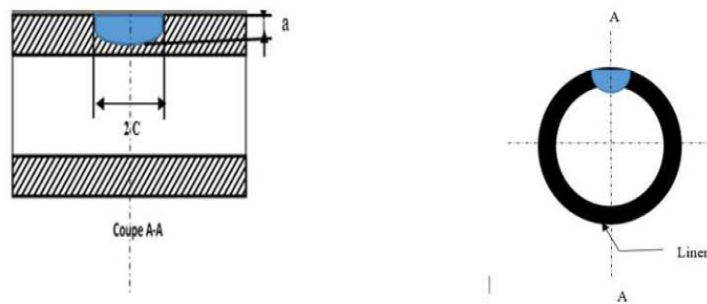


Figure III.2 : Réparation par patch de la corrosion ellipsoïdale dans un réservoir

Nous avons également considéré les matériaux de renforcement du réservoir, notamment les patches composites (carbone/époxy, verre/époxy, Bore/époxy) ainsi que l'adhésif, dont les propriétés mécaniques sont présentées au tableau III.1.

	E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_1	G_2	G_3
Liner	68			0.33					
Adhésive	2.55			0.33					
Carbone/époxy	134	10.3	10.3	0.33	0.33	0.53	5.5	5.5	3.2
Bore/époxy	200	19.6	19.6	0.3	0.28	0.28	7.2	5.5	5.5
Verre/époxy	50	14.5	14.5	0.33	0.33	0.33	2.56	2.56	2.24

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des matériaux. [52,53]

Le modèle numérique tridimensionnel développé pour cette étude représente un réservoir en aluminium 6061-T6 endommagé par la corrosion et réparé à l'aide de trois types de patches composites (carbone/époxy, verre/époxy, Bore/époxy)

La modélisation tridimensionnelle par éléments finis a été réalisée avec ABAQUS [54].

En raison de la symétrie de la géométrie et des charges appliquées, seul un modèle 1/4 a été utilisé. Comme l'illustrent les figures 3.2, tout d'abord, pour analyser le comportement mécanique du réservoir à la pression interne, nous avons utilisé des éléments solides avec une version d'ordre supérieur du type hexaédrique à déplacement linéaire couplé à la température C3D8RT, tandis que l'élément utilisé dans le maillage de la partie corrodée du cylindre est le type tétraédrique linéaire C3D4RT. En effet, cet élément tolère les formes irrégulières sans perte de précision. De même que le nombre total d'éléments générés pour cette structure est de 300888. La corrosion presque au milieu de le réservoir provoquant une concentration de contrainte. Par conséquent, un maillage raffiné est effectué autour de la corrosion

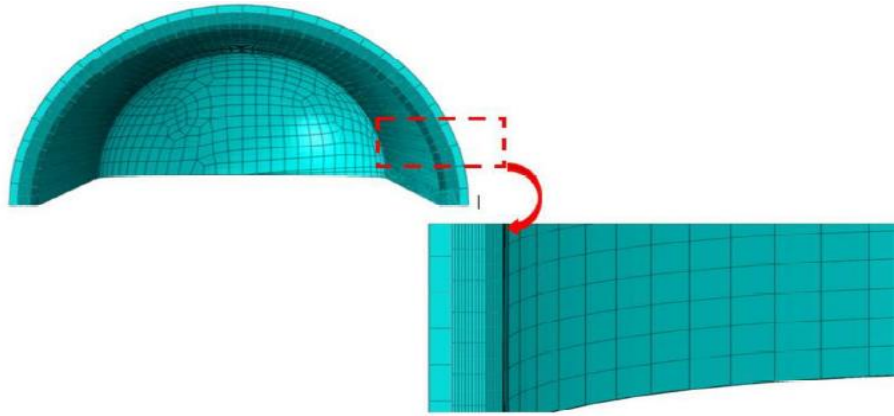


Figure III.3 : Patch et maillage de la structure

Tout calcul par éléments finis nécessite la définition des conditions aux limites, dans notre cas, un quart de la structure soumis à une pression interne P_i allant de 25 jusqu' à 35 MPa

Les contraintes de von mises à la pointe de la corrosion sont calculés en utilisant la technique de plasticité. Ce critère considère que le seuil de plasticité est lie a l'énergie élastique de cisaillement .c'est l'énergie déviatrice qui provoque la plasticité selon les plans de cisaillement maximum . cette énergie est définie par eq(1) : [55]

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2} \quad \text{éq (1)}$$

Tel que :

σ_e : contrainte équivalente de von mises

$\sigma_{\theta\theta}$: contrainte circonferentielle

σ_{zz} : contrainte de traction

σ_{rr} : contrainte radiale

III.2 Résultats et discussions :

La partie simulation a été axée sur l'étude de l'efficacité du renforcement contre la corrosion d'un réservoir en aluminium. Trois types de patchs composites (bore/époxy, verre/époxy et carbone/époxy) ont été utilisés pour la réparation, en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et de renforcement structurel. Le logiciel ABAQUS [54] a été utilisé pour réaliser l'analyse tridimensionnelle dans cette étude. L'objectif était d'examiner l'effet de la pression sur la variation de la contrainte de Von Mises appliquée à un réservoir cryogénique corrodé, ainsi que l'influence de différents types de patchs utilisés pour la réparation

III.2.1 Variation des contraintes de von mises en fonction de longueur longitudinale sous différentes pressions internes :

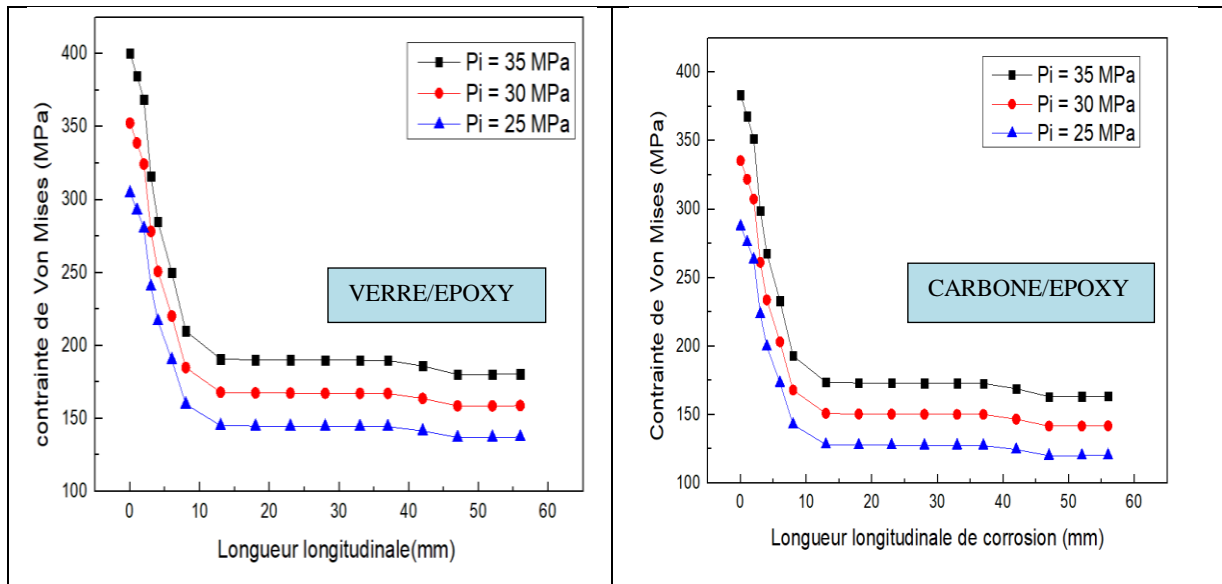


Figure III.4 : la distribution des contraintes de von mises en fonction de longueur longitudinale(verre/epoxy)

Figure III.5 : la distribution des contraintes de von mises en fonction de longueur longitudinale (carbone/epoxy)

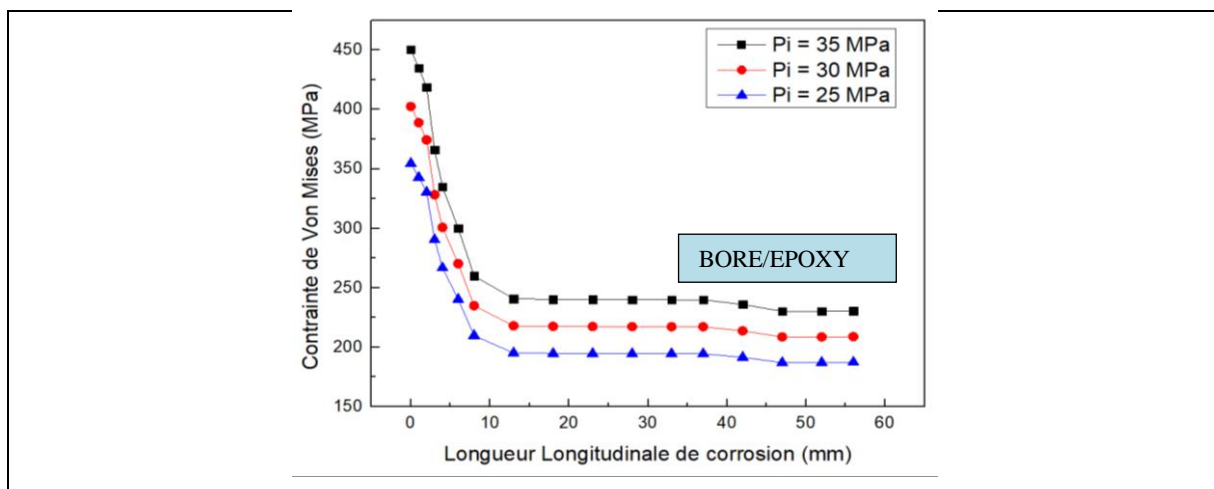


Figure III.6 : la distribution des contraintes de von mises en fonction de longueur longitudinale (bore/epoxy)

Les trois figures montrent la distribution des contraintes de Von Mises en fonction de la longueur longitudinale de corrosion pour trois matériaux composites (Verre/Époxy, Carbone/Époxy et Bore/Époxy) soumis à différentes pressions internes (25, 30 et 35 MPa). Dans tous les cas, on observe un pic de contrainte élevé au début de la zone corrodée (0 mm), suivi d'une décroissance rapide vers un plateau relativement stable.

Le Verre/Époxy (figure III.3) présente des contraintes plus élevées et un plateau situé autour de 140 à 220 MPa selon la pression, ce qui traduit une faible capacité à redistribuer les contraintes. Le Carbone/Époxy (figure III.4) montre un comportement similaire mais avec des valeurs globalement plus faibles, reflétant une meilleure performance pour la réduction des contraintes. Le Bore/Époxy (figure III.5) se distingue par un pic initial très élevé (atteignant environ 440 MPa sous 35 MPa), mais aussi par une descente rapide vers un plateau situé autour de 230 MPa, indiquant une excellente capacité d'absorption des pics de contrainte. Globalement, ces courbes mettent en évidence une forte concentration de contraintes en amont du défaut et montrent que le Carbone/Époxy est le plus performant pour les zones critiques, tandis que le Verre/Époxy offre un bon compromis et le bore/Époxy est le moins efficace mécaniquement.

III.2.2 Variation des contraintes de von mises en fonction de longueur transversale sous différentes pressions internes :

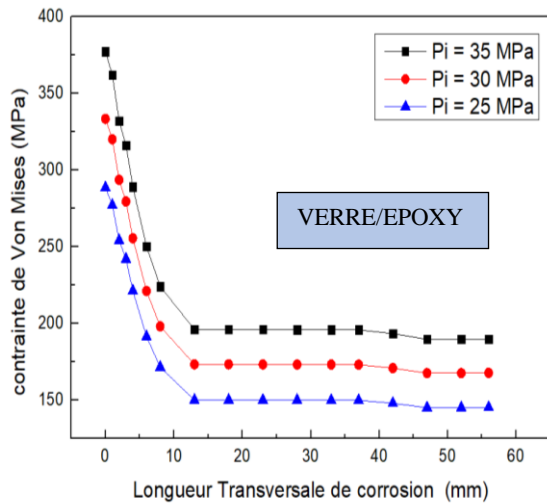


Figure III.7 : Distribution des contraintes de con mises en fonction de longueur transversale (verre/epoxy)

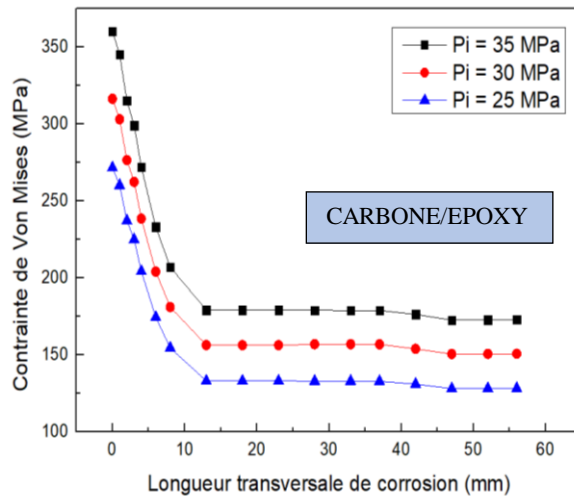


Figure III.8 : Distribution des contraintes de Von mises en fonction de longueur transversale (carbone/epoxy)

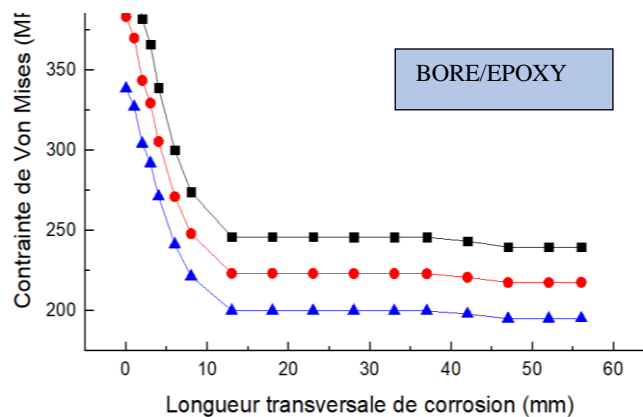


Figure III.9 : Distribution des contraintes de Von mises en fonction de longueur transversale (bore/epoxy)

Les figures montrent la distribution des contraintes de Von Mises en fonction de la longueur transversale de corrosion pour trois matériaux composites (Verre/Épox, Carbone/Épox et Bore/Épox) soumis à des pressions internes de 25, 30 et 35 MPa. Dans tous les cas, on observe un pic initial de contrainte suivi d'une décroissance rapide vers un plateau.

Le Verre/Épox(figure III.6) atteint un pic d'environ 355MPa (sous 35 MPa), avec une chute vers un plateau autour de 190 MPa, indiquant une meilleure répartition transversale que

longitudinale, mais une contrainte de fond toujours élevée. Le Carbone/Époxy(figure III.7) présente un pic plus modéré (~360MPa) et un plateau plus bas (~170 MPa), traduisant une bonne stabilité et une meilleure capacité à lisser les contraintes. Le Bore/Époxy (figure III.8) affiche les pics les plus élevés (~415 MPa), mais sa pente de décroissance est très raide, atteignant un plateau élevé (~240 MPa), ce qui montre une excellente absorption des pics mais une contrainte résiduelle plus importante.

Ainsi, le Carbone/Époxy reste le matériau le plus équilibré pour la direction transversale, tandis que le verre/Époxy est performant pour encaisser les pics localisés, et le bore/Époxy reste globalement le moins favorable.

III.2.3 Variation des contraintes de von mises en fonction de longueur circonférentielle sous différentes pressions internes :

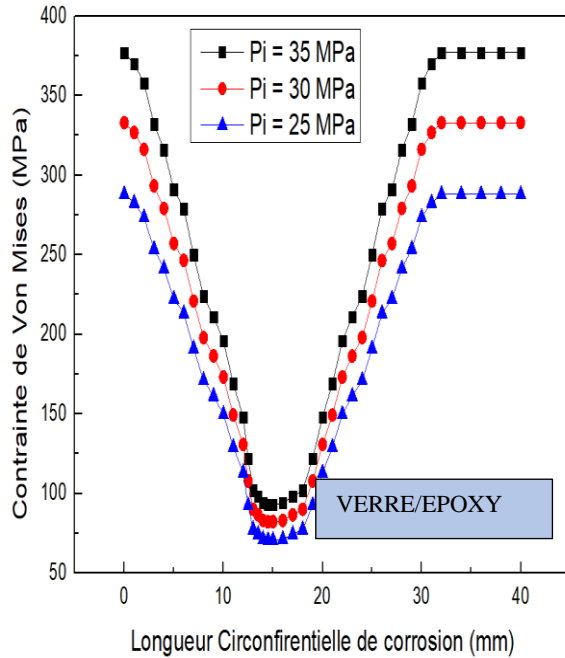


Figure III.10 : Distribution des contraintes de con mises en fonction de longueur circonférentielle (verre/epoxy)

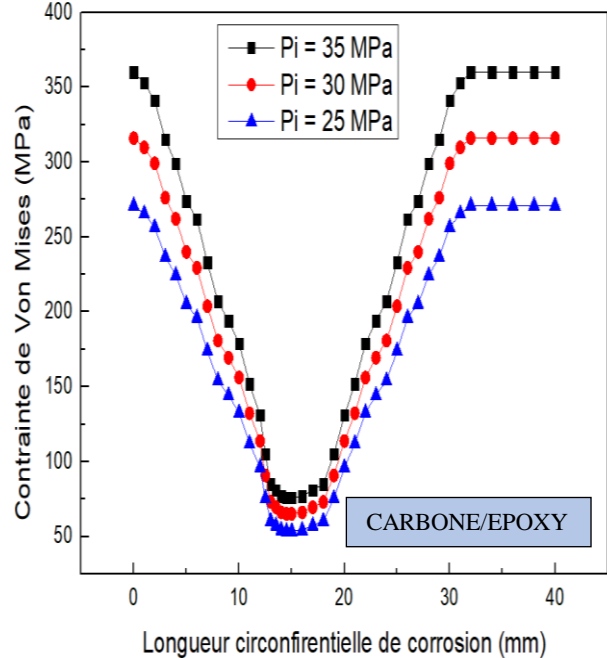


Figure III.11 : Distribution des contraintes de con mises en fonction de longueur circonférentielle (carbone/epoxy)

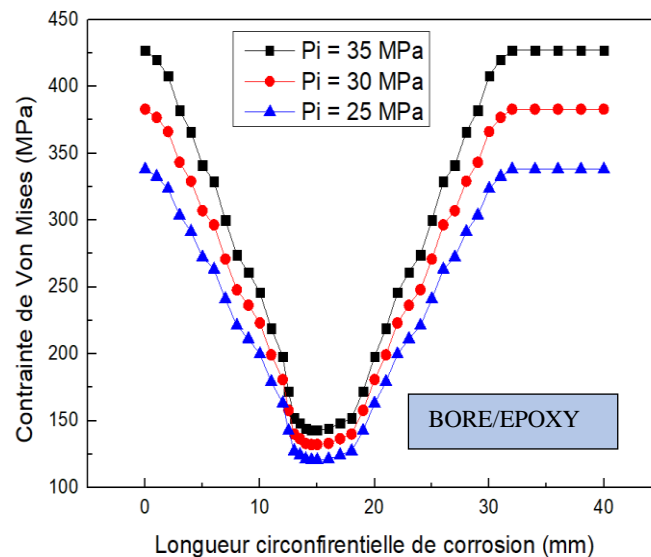


Figure III.12 : Distribution des contraintes de con mises en fonction de longueur circonférentielle (bore/epoxy)

Les figures illustrent la répartition des contraintes de Von Mises en fonction de la longueur circonférentielle de corrosion pour les matériaux Verre/Époxy, Carbone/Époxy et Bore/Époxy soumis à trois niveaux de pression interne (25, 30 et 35 MPa). Dans les trois cas, les courbes indiquent une concentration de contraintes aux extrémités du défaut (0 mm et 40 mm), avec un minimum au centre (environ 20 mm), zone la moins sollicitée.

Le Verre/Époxy (figure III.9) présente des pics élevés (~370 MPa) aux bords et un creux autour de 80 MPa, traduisant une forte variation de contrainte et une mauvaise répartition. Le Carbone/Époxy (figure III.10) montre également des pics légèrement inférieurs (~360 MPa) et un minimum plus bas (~60 MPa), ce qui reflète une meilleure atténuation des charges mécaniques. Le Bore/Époxy (figure III.11) atteint les pics les plus élevés (~430 MPa) mais chute rapidement à un minimum situé autour de 130 MPa, indiquant une excellente absorption des pics mais une contrainte résiduelle plus élevée.

Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser numériquement, via ABAQUS, le comportement mécanique de réservoirs d'hydrogène réparés avec différents patchs composites (verre/époxy, carbone/époxy, bore/époxy) appliqués sur une corrosion ellipsoïdale. Les courbes de Von Mises ont été étudiées selon trois directions : longitudinale, transversale et circonférentielle.

Les résultats ont montré que le carbone/époxy offre les meilleures performances, en réduisant efficacement les pics de contraintes et en assurant une répartition plus homogène, même sous pression interne élevée. Le verre/époxy reste modérément performant, tandis que le bore/époxy, bien que rigide, présente des contraintes résiduelles élevées.

Ainsi, le carbone/époxy apparaît comme le matériau le plus fiable pour la réparation des réservoirs, et la simulation numérique s'avère un outil pertinent pour optimiser le choix des composites dans les applications critiques.

Conclusion générale :

Dans un contexte mondial marqué par une transition énergétique de plus en plus pressante, l'hydrogène s'impose comme une solution incontournable pour répondre aux enjeux environnementaux et réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Toutefois, le développement à grande échelle des technologies basées sur l'hydrogène, notamment dans les domaines du transport, du stockage et de l'industrie, implique de surmonter de nombreux défis techniques. Parmi ces défis, la fiabilité et la sécurité des réservoirs de stockage d'hydrogène à haute pression occupent une place centrale.

Cette étude a permis d'analyser en détail le comportement mécanique de réservoirs d'hydrogène corrodés et réparés à l'aide de patches en matériaux composites, sous l'effet de différentes pressions internes et selon plusieurs directions d'analyse (longitudinale, transversale et circonférentielle). L'objectif principal était de réduire la concentration des contraintes dans les zones endommagées et de prolonger la durée de vie des structures. Les résultats montrent clairement que la présence de corrosion, combinée à la pression interne, engendre une augmentation significative des contraintes de Von Mises, notamment au fond de la cavité corrodée. L'étude a mis en évidence l'influence notable des propriétés mécaniques du matériau composite utilisé pour la réparation. Les comparaisons entre le Verre/Époxy, le Carbone/Époxy et le Bore/Époxy montrent que le choix du matériau de patch joue un rôle déterminant dans la redistribution des contraintes. Le Carbone/Époxy se distingue par sa capacité à réduire efficacement les contraintes au centre des défauts, offrant un bon compromis entre rigidité et souplesse, tandis que le Verre/Époxy montre des performances plus limitées. Le Bore/Époxy, bien que générant des pics de contraintes plus élevés, présente une capacité importante à encaisser les charges localisées, ce qui le rend adapté aux zones critiques. L'analyse selon les trois directions a confirmé des tendances similaires, avec des profils en « pic-plateau » en longitudinal et transversal, et en circonférentiel.

En conclusion, l'application de patches composites représente une solution efficace et économique pour renforcer les réservoirs corrodés soumis à des chargements mécaniques sévères, à condition de bien adapter le matériau composite aux conditions de service (pression, géométrie de la corrosion, direction des efforts). Cette approche contribue ainsi à la sécurité, à la durabilité et à la rentabilité des installations de stockage d'hydrogène.

Références

- [01] D.J.Chakrabartia,DavidE.Laughlinb, Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si AlloyswithCuadditions, Progress in Materials Science49,p.389-410,2004
- [02] J.P Baïllon, J.M.Dorlot. Des Matériaux, troisième édition, Montréal : Ecole Polytechnique de Montréal, 480p, 2000.
- [03] Mme BELKADDOUR Leila , Analyse du comportement thermomécanique de la réparation par patch en composite d'un réservoir cryogénique corrodé, THESE DE DOCTORAT LMD 3ème cycle , 2023 .
- [04] Michelle Colombié, matériaux métallique, Fabrication de l'aluminium et de Ses alliages, page (343-376).
- [05] Develay R. Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés. Principaux alliages. Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques, vol. M 440, 1992, Techniques de l'ingénieur.
- [06] S. Gudic, I. Smoljko, M. kliskic, Mater. Chem. andPhys 121 (2010) 561-566.
- [07] Mécanique Pérolière et Transport des HC, Ecole d'Arzew, IAP, février 2015.
- [08] UNIVERSITE D'ORAN ES-SENIA ,Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle,Département de Sécurité Industrielle et Environnement , BENYAMINA NOURREDINE , 2011.
- [09] [NPROXX. (2019). Différents types de réservoirs sous pression 30 mai 2019.]
- [10] [Hyfindr Hydrogen Tank Guide (2023) (hyfindr.com)]
- [11] [Barthelemy, H (2009). Hydrogen storagetechnologies: compatibilityofmaterialswith hydrogen. Teachingmaterials of the 4th ISCARW, Corsica, June, 2009.] Page 09
- [12][Jérôme Daubech ,
SÉCURITÉ ET PROTECTION DES RÉSERVOIRS HYPERBARES D'HYDROGÈNE , 18 janvier 2024 p .55- p .64] Consulté sur www.ineris.fr
- [13] Pearson, J. (2023). Single Wall vs Double Wall Above Ground Storage Tanks: A ComprehensiveComparison. Weldco Fabrication.
- [14] DENIOS. (2024). Réservoir à double paroi conforme à la norme EN 12285 – 20 000 litres avec électropompe 70 l/min.
- [15] 2008, Samir Nébat / Guy taché – AQC (Agence Qualité Construction)
- [16] Bricovis. Michel – expert technique , (2023). Alu corrodé : quels traitements faut-il utiliser ?
- [17] Wikipidia . Traitement thermomécanique des alliages d'aluminium0
- [18]M. Salem. Effets des adhésifs viscoélastiques et viscoplastiques sur le comportement en rupture des assemblages collés. These de doctorat. Universsité de S. Belabbes. 2015.

- [19] J.M. Berthelot. Mécanique des matériaux et structures composites. Lavoisier, 4ème édition édition, 2010.
- [20] 3X Engineering. (2025). REINFORCEKIT® PATCH : Patch composite pour réparation de réservoirs et cuves sous pression.
- [21] A. C. Okafor, N. Singh, U.E. Enemuoh, S.V. Rao. Design, analysis and performance of adhesivelybonded composite patch repair of cracked aluminium aircraft panels. *Composite Structures* 71 (2005) 258-270
- [22] S. Naboulsi, S. Mall. Modelling of crackedmetallic structure withbonded composite patch using the threelayer technique. *Composite Structures* 35 (1996) 295-308
- [23] Pengcheng CHENG, Etude et optimisation de la réparation des composites Stratifiés par collage des patches externes, université de bourgogne, thèse de doctorat (2010)
- [24] G. Savage, M. Oxley. Repair of composite structures on Formula 1 race cars. *Engineering FailureAnalysis*
- [25] Mme BENZINEB Hayet , Analyse de l'endommagement de l'adhésif d'une plaque corrodée et réparée sous chargement thermomécanique , THESE DE DOCTORAT , 2023 .
- [26] J. Yao, J.G. Teng, J.F. Chen. Experimentalstudy on FRP-to-concretebonded joints. *Composites: Part B* 36 (2005) 99-113
- [27] Cheng P.C. Etude et optimisation de la réparation des composites stratifiées par collage des patches externes. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2010.
- [28] Grabovac I., Whittaker D., Application of bonded composites in the repair of ships structures - A 15-year service experience. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 40, 2009, pg. 1381-1398.
- [29] Breitzman T., Iarve E., Cook B., Schoeppner G., Lipton R. Optimization of a composite scarfrepair patch undertensileloading. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 40, 2009, pg. 1921-1930.
- [30] Ridha M., Tan V., Tay T. Traction-separationlaws for progressive failure of bondedscarfrepair of composite panel. *Composite Structures*, 93, 2011, pg. 1239-1245.
- [31] Hu F.Z., Soutis C., Strengthprediction of patch-repaired CFRP laminatesloaded in compression. *Composites Science and Technology*, 60, 2000, pg. 1103-1114
- [32] Soutis C., Hu F.Z. Design and performance of bonded patch repairs of composite Structure. *Proc InstnMechEngrs*, 211Part G, 1997.
- [33] Liu X., Wang G. Progressive failureanalysis of bonded composite repairs. *Composite Structures*, 81, 2007, pg. 331-340.
- [34] Campilho R., de Moura M., Ramantani D., Morais J., Domingues J., Bucklingstrength of adhesively-bonded single and double-straprepairs on carbon-epoxy structures. *Composites Science and Technology*, 70, 2010, pg. 371-379.

- [35] Chun H. Wang, Andrew J. Gunnion. On the design methodology of scarf to composite laminates. *Composites Science and Technology*, 68 (2008).
- [36] Dry C, "Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials", *Composite Structures*, V.35, pp.263-269, 1996
- [37] Pang J. W. C., Bond I. P., "Bleeding composites - damage detection and self-repair using a biomimetic approach", *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, V.36, pp.183-188., 2005.
- [38] Williams G., Trask R., Bond I., "A self-healing carbon fibre reinforced polymer for aerospace applications", *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, V.38, pp.1525-1532., 2007.
- [39] White S. R., Sottos N. R., Geubelle P. H., Moore J. S., Kessler M. R., Sriram S. R., Brown E. N., Viswanathan S., "Autonomic healing of polymer composites", *Nature*, V.409, ISBN: 0028-0836, pp.794-797., 2001
- [40] Liu D., Lee C. Y., Lu X., "Repairability of Impact-Induced Damage in SMC Composites", *Journal of Composite Materials*, V.27, pp.1257-1271., 1993
- [41] Wu K. W., Lee C. L., Chang Y. C., Ong C. L., "Compressive strength of delaminated and repaired composite plates", *Materials Chemistry and Physics*, V.43, pp.173-177., 1996.
- [42] Airbus, "Structural Repair Manual A330", Technical Data Support and Services, 2006.
- [43] Russell A. J., Bowers C. P., "Repairing Delamination with Low Viscosity Epoxy Resins", AGARD (Advisory Group for Aerospace Research & Developments) CP 530, Neuilly sur Seine, p.1-10, 1992
- [44] B. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier, Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode, *Compos. Struct.* 56(4) (2002) 401-406.
- [45] M. R. Ayatollahi, R. Hashemi, Computation of stress intensity factors (K I, K II) and T stress for cracks reinforced by composite patching, *Compos. Struct.* 78(4) (2007) 602-60.
- [46] Krawczak, P., 2002, Réservoirs haute pression en composites : Techniques de l'ingénieur Applications des composites, v. base documentaire : TIB140DUO.
- [47] Boukharouba T., Chehimi C., Gilgert J., Pluinage G., Kushwaha S., Raj V., Behaviour of semi-elliptical cracks in finite plates subjected to cyclic bending, *Handbook of fatigue crack propagation in metallic structure*, Elsevier Science, 707-731, 1994.
- [48] Benhamena A., Bachir Bouiadjra B., Amrouche A., Mesmacque G., Benseddiq N., Benguediab M., Three finite element analysis of semi-elliptical crack in high density polyethylene pipe subjected to internal pressure, *Material and Design*, Elsevier, 31, 3038-3043, 2
- [49] Medjdoub, Sidi Mohamed. "Étude de l'effet de la réparation par patch des fissures dans les réservoirs de stockage sous pression interne." CFM 2013-21ème Congrès Français de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2013.

- [50] D. Ouinas, B. Bachir Bouiadjra, B. Achour, N. Benderdouche, Modelling of a cracked aluminium plate repaired with composite octagonal patch in mode I and mixed mode, *Mater. Design.* 30(3) (2009) 590-595.
- [51] C. Soutis, F. Z. Hu, Design and performance of bonded patch repairs of composite structures, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G : J. Aerospace. Eng.* 211(4) (1997) 263-271.
- [52] H. Qiu, M. Enoki, Y. Kawaguchi, and T. Kishi, "A model for the static fracture toughness of ductile structural steel," *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, vol. 70, pp. 599–609, 2003. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00079-6)
- [53] S. Fintová, I. Kuběna, L. Trško, V. Horník, and L. Kunz, "Fatigue behavior of AW7075 aluminum alloy in the ultra-high cycle fatigue region," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 774, 138922, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.138922>
- [54] ABAQUS Standard/User's Manual, Version 6.11. Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA, 2007.
- [55] Bouziane Abedelkader, "Contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure" (Master's thesis in Mechanical Engineering, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, 2008).
- [56] D. Gay. *Matériaux composites*. Hermès, 5ème édition, 1997.