

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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie mécanique

Mémoire de Fin d'Étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergies Renouvelables en Mécanique

Thème

**Etude d'un réservoir de stockage
d'hydrogène type IV spécifique pour les
véhicules propres**

Devant le jury composé de :

BOUSBIA SAIF EDINE

Examineur

MAGDOUD Sofiane

Rapporteur

Présenté par

BOUDINA Djabbari

KOUIDRI Mohammed

RIGHI Khalifa

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

*Après ces 5 années que nous avons passées à l'université **Shahid Hama Lakhdar El Oued**, nous sommes sur le point de la quitter pour commencer ma carrière. Cette formation passionnante m'a permis d'obtenir UN diplôme en **génie mécanique, énergies renouvelables**, Nous Suis sur le point de quitter l'université avec UN certain sentiment ET une grande gratitude. Rencontrer des professeurs brillants ET des étudiants exceptionnels m'a permis d'évoluer dans UN domaine qui me passionne mais aussi de me sentir soutenu et entouré.*

*Ces années riches en découvertes resteront longtemps gravées dans notre mémoire, tout comme les méthodes et principes inculqués par le professeur **MEGDOUD SOUFIANE** : curiosité, goût du travail et de l'effort, sens de la persévérance, et volonté de se remettre en question....beaucoup de trésors qui nous seront sans aucun doute utiles tout au long de notre vie.*

Pour toutes ces raisons, nous tenons à vous exprimer notre plus profonde gratitude ainsi qu'à toute l'équipe pédagogique. Nous garderons de bons souvenirs de notre passage dans cette université qui nous a tant donné pendant si longtemps .

Merci, nous abordons une nouvelle étape de notre vie avec confiance et vitalité.

Avec nos sincères remerciements, nous vous prions de recevoir, Monsieur le Directeur, mes respectueuses salutations..

Dédicaces

*L'homme existait sur la surface de la terre, et il ne vivait pas isolé du reste de l'humanité Et à toutes les étapes de la vie, il y a des gens qui méritent nos remerciements Les premières personnes à remercier sont les parents. En raison de leur mérite qui atteint le ciel, Leur présence est une raison de salut et de prospérité dans ce monde et dans l'au-delà. A nos professeurs qui nous ont accompagnés tout au long de la lutte dans la marche de la vie universitaire A notre estimé professeur **MEGDOUD SOUFIANE**, qui nous a accompagnés tout au long de la réalisation de ce travail et a un grand mérite en complétant notre mémo A nos amis, à qui je témoigne qu'ils sont les meilleurs compagnons en toutes matières. A chaque être humain nous a aidés même un peu dans ce travail Je vous dédie de tout cœur mes humbles recherches dans **étude d'un réservoir de stockage d'hydrogène type IV spécifique pour les véhicules propres.***

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Sommaire	III
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES Tableaux.....	VII
Liste des Abréviations	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre 1]Présentation de réservoir de stockage d'hydrogène comprimé	
I.1.Les énergies renouvelables :	5
I.1.1.L'énergie hydraulique :	5
I.1.2.L'énergie solaire :	5
I.1.3.Energie éolienne :	6
I.1.4. Energie géothermique :	6
I.1.5.Energies de la biomasse :	6
I.2.Définition d'un véhicule "propre"	7
I.3.Stockage d'hydrogène:	9
I.3.1.La production d'hydrogène:	9
I.3.2.Transformation d'énergie fossile :	10
I.3.3.Transformers l'hydrogène en énergie :	10
I.3.4.Les principales formes de stockage :	12
I.4.Types des réservoirs des véhicules :	14
I.4.1.Introduction :	14
I.4.2.Définition d'un réservoir de stockage :	15
I.4.3.Types des réservoirs de stockage :	15
I.5.Matériau étudié :	19
I.5.1.Liner :	19
Chapitre II: Les comportements mécaniques	
II.1.LA Mécanique de la rupture :	21
II.1.1. Endommagement et rupture du réservoir sous pression interne :	21
II.1.2. les modules à la rupture:	22
II.2.Les comportements mécaniques:	23

II.2.1. Comportement de feu de char composite:	23
Chapitre III:Simulation des réservoirs contient des fissurations sous pression interne de l'hydrogène	
III.1.Simulation des réservoirs contient des fissurations sous pression interne de l'hydrogène....	27
III.1.1. Introduction	27
III.1.2. ANSYS.....	27
III.1.3. Methodology	27
III.1.3.1.Modélisation de réservoir de type IV	27
III.1.4.Analyse de compensation.....	28
III.1.5.Modèle par éléments finis (EF) du réservoir et conditions de chargement.....	31
III.1.6.Ravitaillement du réservoir de type IV	31
III.1.7.Analyse des défaillances	32
III.2.RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	33
III.2.1.Simulation sans fissure.....	33
III.2.2.Simulation avec fissure	38
III.3.Conclusion.....	43
Conclusion générale	45
<i>Bibliographie</i>	74

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I: Présentation réservoir de stockage d'hydrogène comprimé		
Figure I.1	<i>Véhicule "propre"</i>	9
Figure I.2	<i>Les différents types de production d'hydrogène.</i>	10
Figure I.3	<i>Moteur et stockage cryogénique</i>	11
Figure I.4	<i>Pile à combustible</i>	12
Figure I.5	<i>Capacités volumétriques et gravité du filtre réel Pour stocker l "hydrogène</i>	12
Figure I.6	<i>Réservoirs type I</i>	16
Figure I.7	<i>Réservoirs type II</i>	17
Figure I.8	<i>Réservoirs type III</i>	17
Figure I.9	<i>Réservoirs type IV</i>	18
Figure I.10	<i>Présentation des types de réservoir de stockage d "hydrogène comprimé</i>	18
Chapitre II : Les comportements mécaniques		
Figure II.1	<i>Fissuration transverse observée dans une éprouvette bobinée à $\pm 45^\circ$ du matériau après un essai de traction</i>	22
Figure II.2	<i>Trois modules à la repture</i>	22
Figure II.3	<i>Stockage d "hydrogène sous pression</i>	23
Figure II.4	<i>Evolution de la pression interne - Influence de la pression initiale</i>	25
Chapitre III : Simulation des réservoirs contient des fissurations sous pression interne De l'hydrogène		
Figure III.1	<i>Modélisation d'un réservoir de type IV. A, vue 2D avec cotes ; B, vue en couches ; C, épaisseur des couches ; D, pile séquence de plis ; et E, enroulement de fibre</i>	29
Figure III.2	<i>A, Réservoir soumis à une pression interne ; B, hélicoïdal ; et C direction de la couche de cerceau le long du cylindre portion</i>	30
Figure III.3	<i>Modèle éléments finis de réservoir de type IV. A, vue en coupe et B ; pleinvue du réservoir</i>	32
Figure III.4	<i>Conditions de chargement en citerne de type IV</i>	33
Figure III.5	<i>Répartition des contraintes sur liner de type Réservoir IV à une pression nominale de service de 70 MPa et une température de 15 C en utilisant A, théorie des contraintes principales maximales et B, théorie des contraintes équivalentes (Von-Mises)</i>	34
Figure III.6	<i>Répartition des déformations sur le revêtement d'un réservoir de type IV à une pression de service nominale de 70 MPa et une température de 15 C en utilisant A, théorie de déformation élastique principale maximale et B, équivalent théorie de la déformation élastique (Von-Mises)</i>	35
Figure III.7	<i>Résultat de Deformation type IV</i>	36
Figure III.8	<i>A, Contrainte et B, déformation, produites sur la chemise à différentes pressions de ravitaillement</i>	37
Figure III.9	<i>A et B Représente l'emplacement de la fissure</i>	38
Figure III.10	<i>Résultat de Maximum principal Stress</i>	39

Figure III.11	<i>Résultat de Equivalent de Von Mises</i>	39
Figure III.12	<i>Résultat de Equivalent Elastic Strain</i>	39
Figure III.13	<i>Résultat de Maximum principal Elastic Strain</i>	40
Figure III.14	<i>Résultat de Deformation</i>	40
Figure III.15	<i>Résultat de sifs(k1)</i>	40
Figure III.16	<i>Facture de d'intensite de contrainte par rapport au propagation de fissure</i>	41
Figure III.17	<i>Résultat de Integral (JINT)</i>	41
Figure III.18	<i>Facture de d'intensite de contrainte par rapport au propagation de fissure</i>	42
Figure III.19	<i>Facture de J-Integral en terme de fissure Comparaison avec fente et sans fente</i>	42

LISTE DES TABLEAUX

Page

<i>Chapitre I: Présentation réservoir de stockage d'hydrogène comprimé</i>		
<i>Tableau I.1</i>	<i>Les différents types de réservoirs gazeux</i>	<i>13</i>
<i>Tableau I.2</i>	<i>Comparaisons entre stockage solide, stockage gazeux et stockage hybride solide/gazeux</i>	<i>14</i>
<i>Tableau I.3</i>	<i>Propriétés du liner métallique</i>	<i>19</i>
<i>Tableau I.4</i>	<i>Propriétés du composite</i>	<i>19</i>
<i>Chapitre III : Simulation des réservoirs contient des fissurations sous pression interne De l'hydrogène</i>		
<i>Tableau III.1</i>	<i>Spécification and des ign parametersof type IV tank</i>	<i>28</i>
<i>Tableau III.2</i>	<i>Plage des paramètres de ravitaillement</i>	<i>31</i>

Liste des Abréviations

HAP: Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

ISO: L'Organisation internationale de normalisation

H₂O: Eau

H₂: L'hydrogène

CO₂: Dioxyde de carbone

CH₄: Le méthane

N₂O: le monoxyde de diazote

PEHD: Le polyéthylène haute densité

t: l'épaisseur de la fibre de carbone

σ : l'angle d'enroulement

P: pression de service nominale

R: le rayon du réservoir et est la résistance ultime de la fibre de carbone

Introduction générale

Introduction générale

❖ Les véhicules propres :

En pratique, une automobile parfaitement propre n'existe pas. Lors de leur fabrication, de leur utilisation et de leur élimination, tous émettent des polluants et des gaz à effet de serre, même ceux qui font appel à la force humaine ou animale.

- La fabrication du véhicule consomme beaucoup d'énergie grise et de ressources. Par exemple, la production d'acier pour carrosseries et moteurs nécessite une sidérurgie lourde, qui reste l'une des industries les plus polluantes ; la production d'aluminium, de céramique ou de fibre de carbone nécessite une filière sidérurgique légère, qui reste l'une des plus polluantes. énergie énorme; les polymères sont principalement dérivés du pétrole, etc.
- Les procédés d'extraction 1 sont utilisés dans la production de batteries au lithium.
- Le CO₂ est nocif pour l'environnement.
- Les vecteurs énergétiques requièrent des filières de production polluantes et néfastes.

Le secteur des transports est responsable de l'émission de grandes quantités de polluants, qui ont un Impact direct ou indirect sur différents récepteurs environnementaux . Cette pollution prend de nombreuses formes selon l'endroit où vous vous trouvez : -Local (urbain) monoxyde de carbone et produits chimiques organiques volatils (contenant pour cent 40% de substances aromatiques comme le benzène), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), molécules (PM10, PM2,5, ...). -Au niveau local et régional: d'une part, on distingue les particules secondaires (nitrates et Phosphates) et les pluies acides, qui sont principalement responsables des oxydes d'azote et de soufre, et d'autre part, Pollution photochimique causée par les oxydes d'azote et les composés organiques volatils en action Précurseurs d'ozone troposphérique. À l'échelle mondiale: gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane ou le protoxyde azote. [5]

❖ **Les véhicules propres sont plus sûrs que les dangers spécifiques :**

L'utilisation de l'hydrogène, comme l'utilisation de tout autre vecteur énergétique, est pleine de dangers. Les moyens de prévention et de maîtrise de ces risques seront déterminés par la configuration particulière de la mise en œuvre ou de l'utilisation du gaz, tels que le type d'équipement utilisé, l'environnement dans lequel il est utilisé, les limites et contraintes extérieures, etc. véhicules équipés L'hydrogène est fourni par les piles à combustible à hydrogène et les stations-service à hydrogène. Un autre guide d'information est dédié à la composante production d'hydrogène. Des risques de criticité élevée (incendie, explosion) peuvent être pris en compte dans le déploiement des gares et des flottes de véhicules. ainsi que les dangers de niveaux de criticité a priori faibles (anoxie, risque acoustique, risque cryogénique). Due to its chemical nature, small size, and high diffusion coefficient, this can react with specific materials (steels, polymers), resulting in many phenomena :

- Dans les polymères, diffusion.
- La fragilisation du métal : dissociation de l'hydrogène et mouvement des atomes d'hydrogène par défaut de structure du métal (dislocation), suivie d'une recombinaison, mais pas toujours sous forme d'hydrogène (avec du manganèse ou du soufre par exemple) .
- Attaque de l'acier par l'hydrogène à haute température et recombinaison avec le carbone pour créer des poches de méthane Les fabricants qui utilisent de l'aluminium, de l'acier faiblement allié ou de l'acier inoxydable et des matériaux polymères adaptés à la distribution sont toutefois conscients de ces événements et en tiennent compte. ainsi que le stockage de gaz Dans le chapitre sur les stations de distribution, la problématique d'une fuite provoquée par une rupture de canalisation d'hydrogène sous pression est décrite. [6]

les lignes directrices générales pour la conduite de projets de mobilité hydrogène :

✓ Pensez à la sécurité dès le début:

- La gestion de la sécurité, comme toute activité ayant un objectif de maîtrise des risques, doit être rigoureuse et bien coordonnée. Il se compose des éléments suivants : la définition du risque acceptable par rapport à l'objectif de sécurité les écrits existants, tels que les règles, les directives, les guides de bonnes pratiques et les normes ;
- les recherches à mener ;
- éducation des employés;

La sécurité d'un équipement fait partie du processus de sécurité de fonctionnement d'un système tout au long de son cycle de vie, y compris dans le produit de l'utilisateur. Ceci est accompli à l'aide d'une variété d'outils. Son objectif est de maîtriser les défaillances. Lors de la phase de conception du système, la majorité des études de sûreté de fonctionnement sont réalisées. C'est l'obligation du constructeur de l'équipement, mais il est de la responsabilité de l'utilisateur ou du propriétaire d'exiger toute preuve d'excellente conception. installé dans le circuit basse pression », expliquent les constructeurs de véhicules à hydrogène. L'hydrogène est alimenté dans le réservoir via un tube spécial qui contient un antagoniste, Ce n'est que de la station au réservoir du véhicule que l'hydrogène peut circuler. Le réservoir peut être arrêté de se remplir. Lorsque le réservoir est plein, un pressostat (capteur de pression) ou la communication entre le véhicule et la station s'active automatiquement. Lorsque le réservoir est plein, l'opérateur reçoit un signal pour ouvrir la vanne et retirer la terre.. C'est l'automate de la station qui contrôle la vitesse de remplissage du réservoir du véhicule selon des règles désignées. Ces méthodes de remplissage ont été développées afin de gérer les phénomènes physiques liés à la transmission rapide des gaz comprimés. À la fin du processus de remplissage, l'hydrogène qui reste dans le tuyau de remplissage du pistolet est évacué vers l'évent de la station de remplissage.

Chapitre 1

**Présentation de réservoir de
stockage d'hydrogène comprimé**

Recherche Bibliographique

- En 22 septembre 2016 Michel Latroche, de l'influence d'éléments d'addition sur les propriétés de stockage de l'hydrogène, Il a abordé toutes les sources d'énergie disponibles dans la nature avant de passer aux énergies primaires [4].
- 25 juillet 2014. John A. Nairn, Calculation of J-Integral and Stress Intensity Factors using the Material Point Method, De nombreuses méthodes expérimentales sont disponibles pour étudier les propriétés de fracture dynamique des matériaux et des structures. En raison des échelles de temps très courtes pour les événements de fracture dynamique [5].
- Le 21 février 2014, Jacques RENARD, Conception et durabilité de réservoirs en composites destinés au stockage de l'hydrogène, Recherche sur un moteur propre avec "drainage de l'eau" à l'aide d'hydrogène comprimé Stocké dans un réservoir haute pression composé [7].
- 2006 pile à combustible pour automobile développée en par le CEA, La pile à combustible (PAC) peut convertir l'énergie chimique de combustion (réduire l'oxydation) Directement en énergie électrique et en chaleur[8].
- En 2014-2015. Edouard Berlier, La voiture dite „propre' l'est-elle vraiment? Si l'on prend en compte le processus en aval et en amont nous pouvons actuellement dire que non, Notre objectif était de prouver que les voitures «propres» Ce n'est pas encore écologique [9].
- 30 October 2009, analyse expérimentale d'un réservoir de stockage d'hydrogène, d. Chapelle b, M. L. Boubakar b, A. Benamar, Cet article traite d'une analyse expérimentale de filaments d'enveloppe de réservoir métallique en aluminium renforcé en carbone, le but de cette analyse est d'obtenir des résultats qui peuvent valider le modèle d'analyse analytique et l'approche de simulation sous ANSYS [12].
- April 2018 Nahia sassine1, arnaud bruch1, barthélemy harthong2, Frédéric-Victor donze2 Etude du comportement mécanique des réservoirs, Les réservoirs composites de type 1 utilisés pour stocker l'hydrogène gazeux ont rencontré un succès dans les applications de piles à combustible mobiles[16].
- 2016-2017, Abderrahim zegloul, concepts fondamentaux de la mécanique de la rupture principe de superposition affirme que dans un matériau élastique linéaire, les composantes des contraintes, des déformations et des déplacements sont «additives». Cette superposition est cependant soumise à certaines règles : par exemple, deux contraintes normales selon la direction x peuvent s'ajouter entre elles, alors qu'une contrainte normale ne peut être additionnée à une contrainte de cisaillement [20].

I.1. Les énergies renouvelables :

Contrairement à ce que l'on pourrait s'attendre, les énergies renouvelables représentent les toutes premières sources d'énergies utilisées par l'homme. Le soleil, les chutes d'eau, le vent, ou encore la chaleur terrestre constituent des sources d'énergies qui, par définition, se renouvellent naturellement après avoir été consommées et sont donc inépuisables sur une échelle de temps importante.

Une énergie est dite renouvelable quand, sur une centaine d'années, on n'en consomme pas plus que la nature n'en produit. Le caractère renouvelable ou non d'une source d'énergie dépend de la rapidité avec laquelle elle est utilisée[4].

I.1.1. L'énergie hydraulique :

L'énergie cinétique de l'eau (rivières, ruisseaux, barrages, courants océaniques et marées) alimente des turbines qui produisent de l'électricité. C'est la partie énergie cinétique des énergies hydrauliques.

I.1.2. L'énergie solaire :

a. Le photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micropuissance calculé en watt crête (W_c) peut être

b. Chauffe-eau solaire :

Un chauffe-eau solaire est un dispositif qui utilise le rayonnement du soleil pour chauffer de l'eau. De quoi alimenter votre logement en eau chaude sanitaire à moindre coût. En effet :

Utiliser un chauffe-eau solaire permet de réaliser de sérieuses économies d'énergie puisque l'énergie solaire est gratuite, contrairement au gaz naturel ou au mazout.

- c'est aussi une manière de couvrir une partie de ses besoins en eau chaude avec de l'énergie renouvelable, sans émission de CO_2 .

c. Centrale solaire à concentration :

Les centrales solaires peuvent thermodynamiques Ils sont regroupés en trois Des familles qui se démarquent Méthode de collecte et de concentration de l'énergie solaire: Systèmes de mise au point linéaire (capteurs cylindriques paraboliques ou collecteurs linéaires de Fresnel), centrales électriques à tour,

Le peut s'agir de cellules solaires thermodynamiques Il est classé en quatre domaines technologiques:Parabole, Fresnel, récepteur Milieu (tour), parabole de Stirling. Ces technologies, qui ne font qu'améliorer la composante directe du rayonnement solaire, Equipé de dispositifs de surveillance Chemin du soleil et miroirs Concentrez vos rayons[4].

I.1.3.Energie éolienne :

Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent alimente un générateur qui produit de l'électricité. Il existe plusieurs types d'énergie éolienne renouvelable: les éoliennes sur le domaine terrestre, les éoliennes sur le domaine offshore, les éoliennes ... mais elles ont toutes le même principe à grande échelle pour tous ces types d'énergies renouvelables.

I.1.4. Energie géothermique :

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), «moyenne énergie» (90 à 150°C), «basse énergie» (30 à 90°C) et «très basse énergie» (moins de 30°C).

I.1.5.Energies de la biomasse :

L'énergie de la biomasse provient des matériaux d'origine biologique. Elle peut être déclinée en trois catégories : la biomasse solide, le biogaz et enfin les biocarburants La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools) ;
- les gazeux (ex : biogaz).

I.2. Définition d'un véhicule "propre"

On entend souvent, de manière abusive, la dénomination propre ou écologique pour des voitures à émission nulle ou faible en CO₂. Contrairement à ce que cette dénomination pourrait laisser croire, aucun véhicule n'est entièrement écologique. Pour cause, les matières premières et l'énergie, indispensables à la construction, sont responsables de gaz à effet de serre. Sans oublier que des pièces d'usages telles qu'es pneus ou les batteries ne sont pas sans conséquence pour l'environnement. Finalement, lors du recyclage, aussi performant soit-il, tout véhicule est responsable de résidus et de déchets. De ce fait, même si la source d'énergie utilisée est entièrement renouvelable, ce qui n'est bien souvent pas le cas, la voiture pollue. Par ailleurs, les gaz à effet de serre ne se composent pas uniquement de CO₂. Notre Atmosphère se compose de nombreux gaz dont la plupart sont transparents et n'empêchent pas le rayonnement solaire. Toutefois, certains d'entre eux retiennent les rayons infrarouges et gardent donc la chaleur. Ce phénomène est naturel et indispensable. Toutefois, il est accentué par d'autres éléments qui ne font pas partie du phénomène naturel. Les principaux responsables sont la vapeur d'eau (H₂O), le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄) et le monoxyde de diazote (N₂O) (UCL., 2010, p.7).

C'est pourquoi, dans de nombreux articles et dans cette étude, la dénomination CO₂ comprend également une fraction de méthane et de monoxyde e diazote. Plusieurs études ont démontré l'intérêt des citoyens pour les problématiques environnementales. Ces derniers souhaiteraient contribuer à protéger au maximum outre planète. Ces éléments intègrent la logique de développement durable, un « Développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs⁷ ». La responsabilité sociétale des entreprises insiste sur le développement durable et se base sur la combinaison de trois piliers pour l'appliquer. Nous observons le pilier économique, le pilier social et finalement le pilier environnemental. Pour atteindre ce développement durable, la prise en compte de la planète doit faire partie intégrante du processus de développement (Francisco L. et al. 1996, p. 18). Il en va de même pour le secteur automobile. En effet, il est essentiel pour toute entreprise d'inclure dans sa stratégie les facteurs environnementaux liés à la rareté des ressources qu'elle exploite, à l'évolution du climat, aux droits des minorités et à l'impact de l'extraction au recyclage de ses produits⁸. Nous constatons également que les standards ISO évoluent avec cette vision de l'entreprise et de ses obligations (Guérin, A-J. et al. 2008, p. 116). De nombreux constructeurs se conforment à ces standards (Hill, N., 2013, slide 3). Toutefois, les ISO 14000 ne sont pas des normes et consistent simplement à proposer

certaines lignes directrices pour les entreprises. Jusqu'à présent, la voiture „propre' est souvent définie en termes d'utilisation, tout en sachant qu'elle ne prend pas en compte le cycle de vie entier du véhicule .

Afin de prétendre à une voiture propre, il semble essentiel d'insister sur d'autres facettes que la simple utilisation. Par ailleurs, la multitude de facteurs entrant en jeu nous pousse à mieux définir le concept. Pour ce faire, nous devons commencer par l'extraction, la production et l'assemblage avant de considérer la logistique et l'utilisation pour finalement terminer par le recyclage et la réutilisation des composants. Nous pouvons donc définir une voiture propre comme une voiture qui respecte l'environnement "du berceau à la tombe". Lors du design d'une voiture, tout doit être pensé, non seulement pour limiter et éliminer l'impact négatif d'usage, mais aussi pour les matériaux à utiliser et l'impact de l'extraction ou de la fabrication de ces derniers. Il faut se poser les questions pertinentes avant de faire les choix, tels que ; Pourquoi utiliser telle matière ? Quel est son impact ? Comment l'extraire ou la produire sans avoir d'impact sur l'environnement ? Il est vital de choisir des partenaires de confiance pour s'assurer que tous les accords soient bien respectés. Il faut également prendre en compte l'impact du transport des pièces et non seulement voir cela comme une fonction de minimisation des coûts. Bien entendu, l'assemblage sur les lignes de production doit être optimisé afin de réduire au maximum les externalités négatives causées. Ensuite, l'utilisation étant la partie la plus polluante (en terme de CO₂) de la vie d'une automobile, il est crucial pour les constructeurs de mitiger l'impact de leurs produits. Il semble utile d'insister pour une réduction de l'écart entre l'annonce du constructeur et la pratique. En effet, bien trop souvent les constructeurs annoncent des chiffres inatteignables en pratique qui faussent certains calculs .

Nous observons que l'écart est nettement supérieur dans le cas des véhicules hybrides. Il en va de même pour les véhicules électriques. Il est donc important pour les constructeurs de proposer une autonomie ou une consommation réaliste. Finalement, dès le design, il est indispensable de concevoir les véhicules en optimisant le recyclage de fin de vie. L'effet retardé de cette étape ne devrait pas réduire son importance. La définition semble simple. En effet, si l'on stipule qu'une voiture propre est une voiture sans impact sur l'environnement de sa création à son recyclage, et en tenant compte de l'utilisation, l'on obtient une définition cohérente. Toutefois, cette Définition est utopique et irréaliste aujourd'hui. En revanche, si l'on combine certaines définitions aux éléments repris ci-dessus, nous pouvons présenter notre définition de la voiture propre. Une voiture propre est une voiture qui minimise son impact sur l'environnement tout au long de son cycle de vie. Cela inclut la préservation des sols, des

eaux, de l'écosystème et des ressources naturelles. Un véhicule propre permet la mobilité sans pour autant compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins. Il est important de préciser que tant pour la responsabilité sociétale des entreprises que pour l'écologie en général, il est difficile de trouver une définition qui convient à tous. Nous proposons donc une définition sans prétendre que cette dernière soit exhaustive ou exclusive. Il est intéressant d'envisager un modèle universel qui comprend l'ensemble du cycle de vie des véhicules afin d'être le plus transparent et le plus complet possible. Nous reviendrons sur cet aspect plus loin dans notre étude. [5].



Fig I.1: Véhicule "propre"[5].

I.3. Stockage d'hydrogène:

I.3.1. La production d'hydrogène :

L'hydrogène ne se produit pas dans la nature à l'état libre et est produit en le séparant des atomes qu'il contient mutuel. Ce sont les atomes d'oxygène à l'état de l'eau, nous faisons donc l'électrolyse. Elles sont Atomes de carbone de matériaux fossiles séparés par réparation ou oxydation par fabrication L'eau est également impliquée dans les réactions. Hormis l'eau, les matières fossiles représentent 96% des substances Principaux producteurs d'hydrogène dans le monde. Divisé en: 49% de gaz naturel; 29% Hydrocarbures liquides 18% charbon de bois 1 .Au total, 60 millions de tonnes d'hydrogène sont produites Chaque année dans le monde 1 [1].

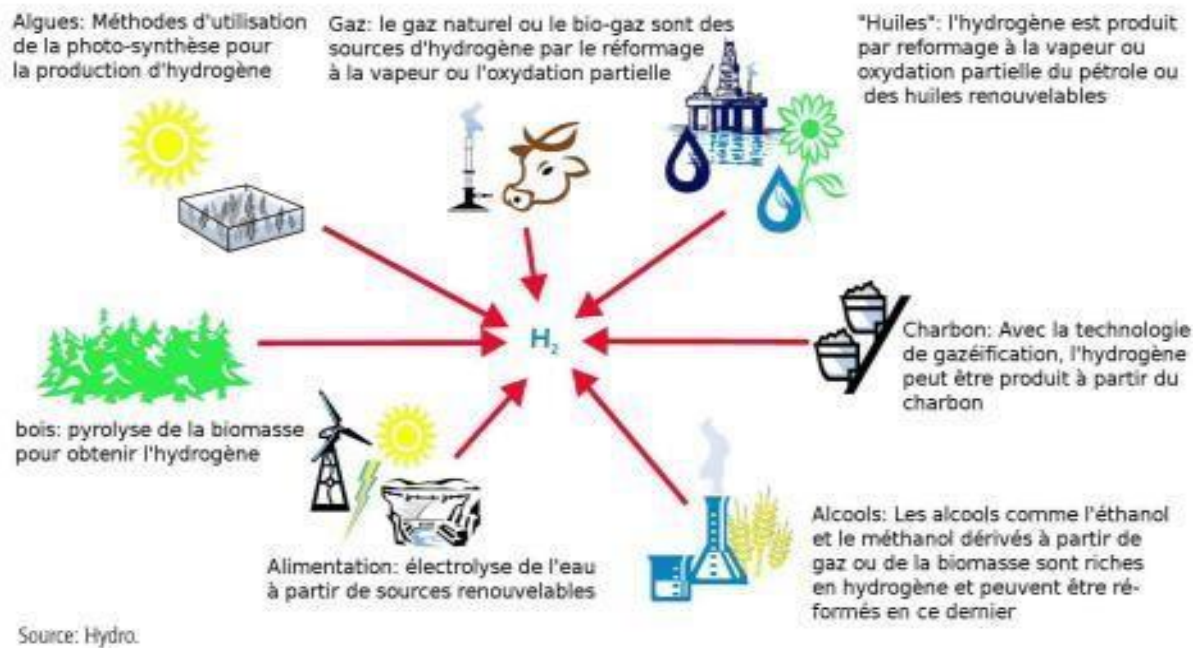


Fig I.2: Les différents types de production d'hydrogène.[1]

I.3.2. Transformation d'énergie fossile :

Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont des matières présentes dans le sous-sol de la Terre. Leur particularité, c'est qu'elles brûlent très bien : ce sont d'excellents carburants. On les appelle "hydrocarbures". Ils ont aussi l'avantage de pouvoir être facilement stockés et transportés, ce qui en fait la source d'énergie la plus pratique à utiliser. Mais ils présentent eux très gros inconvénients: le premier, c'est qu'en brûlant, ils dégagent beaucoup de particules qui polluent l'atmosphère. Le second, c'est que leur quantité sur Terre est limitée. En effet, les hydrocarbures ont mis plusieurs centaines de millions d'années à se former, ce qui signifie que leur stock n'est pas prêt de se renouveler ! Au rythme où l'Humanité les utilise, ce stock finira par s'épuiser. En effet, les énergies fossiles sont les plus utilisées dans le monde. Le pétrole, en particulier, est l'énergie de presque tous les transports. C'est pourquoi son prix est un élément fondamental pour l'économie. S'il augmente, le prix de toutes les marchandises qu'il sert à transporter augmente aussi. [15]

I.3.3. Transformer l'hydrogéné en énergie :

Pour les applications mobiles, deux voies se présentent principalement pour l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie : moteur à combustion interne et pile à combustible.

a. Combustion interne (ice)

Fig I.3: Moteur et stockage cryogénique [15]

Un moteur à combustion interne est un moteur thermique dans lequel la combustion d'un carburant avec une substance oxydante (généralement de l'air) se produit dans la chambre de combustion qui fait partie intégrante du circuit d'écoulement du fluide de travail. Dans un moteur à combustion interne, l'expansion du gaz à haute température et haute pression produit par la combustion provoque l'application d'une force directe sur des composants spécifiques du moteur. La force est généralement appliquée aux pistons, aux aubes de turbine, au rotor ou à la buse. Cette force déplace le composant sur une distance, convertissant l'énergie chimique en énergie mécanique utile. [9]

b. Pile à combustible :

La pile à combustible peut convertir directement l'énergie chimique de la combustion (réduction de l'oxydation) en énergie électrique, chaleur et eau. Comportant deux électrodes: l'anode oxydante (émetteur d'électrons); Cathode réduite (collecteur d'électrons) séparée par un électrolyte. L'électrolyte a la propriété de déplacer des particules ionisées directement d'une électrode à une autre et de bloquer les électrons en les forçant à traverser le circuit externe de la cellule où son énergie électrique peut être exploitée. La pompe à chaleur est alimentée par injection continue de carburant dans l'anode, d'hydrogène en général, et dans la cathode, généralement du dioxyde (oxygène dans le langage courant) de l'air ou de l'air lui-même. Ensuite, une alimentation électrique continue est fournie aux bornes de la batterie.

Dans le langage courant, les piles à combustible qui utilisent de l'hydrogène ou de l'hydrogène sont appelées «piles à hydrogène».



Fig I.4: Pile à combustible [8.9]

I.3.4. Les principales formes de stockage :

Trois types de stockage d'hydrogène se distinguent: les méthodes solides, liquides et gazeuses. Il présente un tableau (Fig.1.5) répertoriant certaines solutions technologiques en fonction de leur taille et de leurs capacités de gravité. Le bleu est utilisé pour stocker le gaz et le rouge pour stocker le liquide. Plusieurs couleurs de stockage solides sont utilisées pour distinguer le vert des hydrures conventionnels, l'orange par l'hydrure composé. L'objectif est d'obtenir, à court et long terme, des moyens efficaces de stockage mobile ou fixe. Le problème est compliqué par le nombre de limitations à prendre en compte: capacité gravitationnelle, capacité volumétrique, coût, cycle de vie, pression maximale / minimale délivrée, temps de remplissage, température de fonctionnement, fuites .

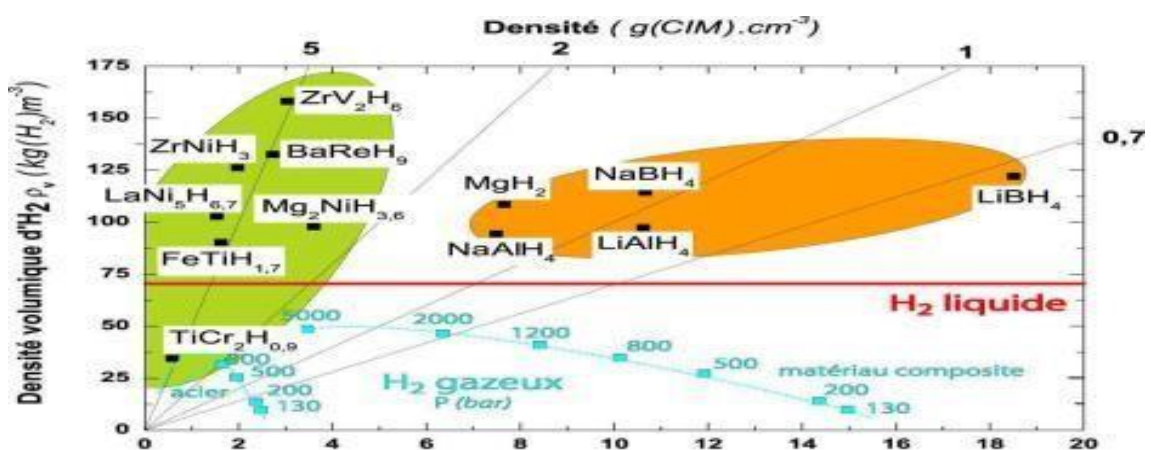


Fig I.5: Capacités volumétriques et gravité du filtre réel Pour stocker l'hydrogène [2].

a. Stockage gazeux :

Pour réduire le volume de stockage de gaz, sa pression doit être augmentée. Par exemple, des cuves de moyenne pression (30 bar, soit 30 fois la pression atmosphérique) mais aussi maîtrisées haute pression, 700 bar. Le processus de fabrication est basé sur la technologie d'enroulement de filament d'hydrogène. Nous renforçons un liner plastique contenant de l'hydrogène sous forme gazeuse avec des fibres de matériaux composites (principalement en fibre de carbone). Ces fibres permettront à la doublure de résister à des contraintes plus importantes, en particulier une pression plus élevée. Pour leur conception, les réservoirs gazeux sont regroupés sous 4 types :

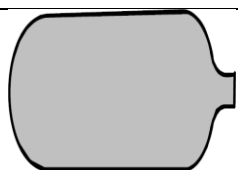
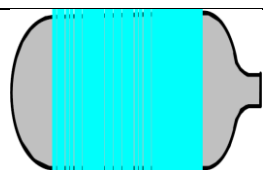
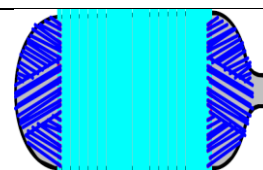
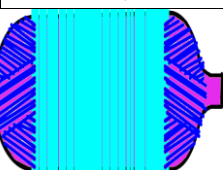




Type I : réservoir cylindrique en métal

Type II : réservoir contenant une enveloppe de métal pour la tenue mécanique, frettée par des fibres continues imprégnées de résine.

Type III: réservoir constitué d'une enveloppe de métal pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.

Type IV: réservoir constitué d'une enveloppe non métallique pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.

Tab.I.1: Les différents types de réservoirs gazeux [13]

Type	I	II	II	IV
Schéma				
Réalisatin				

Pour chaque type de réservoir, le choix de l'enveloppe (liner) en contact avec l'hydrogène est de première importance. Dans le cas du Type I, les contraintes mécaniques sont directement reprises par le liner ; un matériau à grande limite élastique sera donc privilégié (Acier). En revanche, dans le cas des réservoirs de type III et IV, le liner sert de barrière à hydrogène . Un matériau peu perméable à l'hydrogène sera alors préféré (Aluminium dans le cas de type III).

Tab. I-2: Comparaisons entre stockage solide, stockage gazeux et stockage hybride solide/gazeux [18]

Réservoir	MH Basse Pression	Haute Pression	MH Haute Pression
Capacité de stockage d'hydrogène	3.5 Kg/120 L	3Kg/180 L	7.3 Kg/180 L
Poids du réservoir	300 Kg	<100 Kg	420 Kg
Rapport massique	1.16 %	<3 %	1.74 %
Temps de Remplissage	30 min-1 h avec un système de refroidissement externe	5-10 min	5 min/ 80% Egale au réservoir haute pression sans système de refroidissement
Restitution de l'hydrogène à basse température	Impossible à basse température	Possible	Possible même à 243 K
Régulation	Difficulté en accélération	Bonne	Bonne Égale au réservoir haute pression
Sécurité	Basse pression (<10 bar)	Haute pression (350 bar)	Haute pression (350 bar)

I.4.Types des réservoirs des véhicules :

I.4.1.Introduction :

Les réservoirs de stockage ont été largement utilisés dans de nombreux industriels établis en particulier dans l'usine de transformation comme la raffinerie de pétrole et l'industrie pétrochimique. Ils sont utilisés pour stocker une multitude de produits différents. Ils viennent dans une gamme de tailles petite à vraiment gigantesque. Les réservoirs de stockage à température ambiante constituent la presque totalité des capacités qui forment les parcs de stockage, car, à l'évidence, elles représentent la solution logique et naturelle pour stocker les liquides. Dans cette situation et en fonction de leur degré de volatilité, aucune pression effective n'existe dans l'enceinte de stockage et on peut alors mettre en oeuvre des réservoirs atmosphériques. Si, au contraire, cette pression de vapeur est supérieure de la pression atmosphérique, la capacité de stockage est soumise à une pression interne. C'est toujours le cas pour les liquides dont la température au point normal d'ébullition est inférieure à la température ambiante. Pour ces produits il est alors nécessaire de s'orienter vers des réservoirs sous pression, étudiés et conçus pour résister à cette contrainte. Il ya une grande variété de réservoirs de stockage, ils peuvent être construits au dessus du sol, dans le sol et sous-sol. En forme, ils peuvent être de forme cylindrique, sphérique ou rectangulaire

horizontal, vertical cylindrique, mais les cylindriques verticaux sont les plus habituellement utilisés.

I.4.2. Définition d'un réservoir de stockage :

Un réservoir de stockage est un récipient, généralement pour contenir des liquides, parfois pour les gaz comprimés (réservoir de gaz sous pression).

I.4.3. Types des réservoirs de stockage :

Les bacs de stockage contenant des liquides et des vapeurs organiques et non organiques peuvent être trouvés dans de nombreuses industries, y compris :

- La production de pétrole et de raffinage ;
- Pétrochimique et fabrication de produits chimiques ;
- Le stockage en vrac, et les opérations de transfert ;
- Autres industries consommant ou produisant des liquides et des vapeurs.

Sept types de réservoirs sont utilisés pour stocker des liquides organiques :

- Réservoirs à toit fixe ;
- Réservoirs à toit flottant externe ;
- Réservoirs à toit flottant interne ;
- Réservoirs à toit flottant externe en forme de dôme ;
- Réservoirs horizontales ;
- Réservoirs sous pression ;
- Réservoirs variables spatiales.

Les quatre premiers types de réservoir sont de forme cylindrique avec l'axe orienté perpendiculairement à la base. Ces réservoirs sont presque exclusivement au-dessus du sol. Les réservoirs horizontaux (c'est à dire avec l'axe parallèle à la base) peuvent être utilisés audessus du sol et sous-sol.

Les réservoirs sous pression sont souvent orientés horizontalement de forme sphérique pour maintenir l'intégrité structurale à des pressions élevées. Ils sont situés au-dessus du sol. [7].

a. Réservoirs sous pression :

L'hydrogène à été stocké et distribué sous pression il y a plusieurs années, avec des bouteilles ou assemblages de bouteilles cylindriques, en acier, gonflées à 20 ou 25 M Pa (types I et II).

L'inconvénient le poids qui résulte de l'utilisation d'aciers à bas niveaux de contraintes pour éviter les problèmes de fragilisation par l'hydrogène. La situation a radicalement changé avec l'apparition de la technologie des réservoirs composites dits de type III ou IV. Leur principe de base est de séparer les deux fonctions essentielles que sont l'étanchéité et la tenue mécanique pour les gérer l'une indépendamment de l'autre. Dans ce type de réservoir on associe une vessie en résine (thermodurcissable ou thermoplastique) à une structure de renforcement constituée de fibres (verre, aramide, carbone) permettent de travailler à des pressions beaucoup plus élevées tout en réduisant la masse et en évitant les risques de rupture explosive en cas d'agressions externes sévères. C'est ainsi que 70 M Pa est pratiquement devenu le standard actuel. Du fait des lois de compressibilité, cette valeur semble être une limite, même si des réservoirs de pression nominale égale ou supérieure à 100 M Pa ont été réalisés à titre expérimental. Les réservoirs de stockage gazeux hyperbare peuvent être classés en quatre catégories selon leurs matériaux constitutifs.

❖ Les réservoirs de « type I »

Sont entièrement métalliques. Ces réservoirs présentent l'inconvénient d'avoir une masse importante et ainsi des densités de stockage faibles (de l'ordre de 1.2%). Par ailleurs les pressions maximales de stockage sont limitées à 300 bar [13].

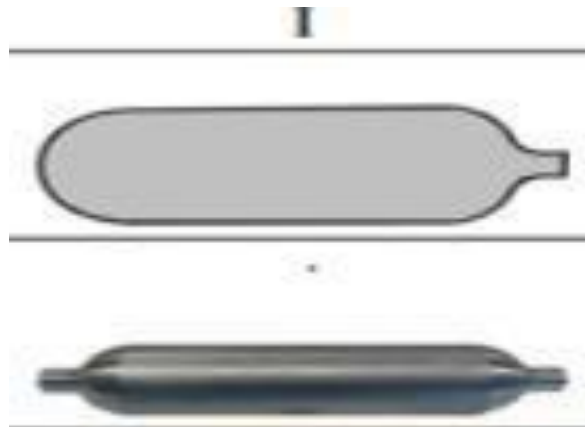


Fig I.6: Réservoirs type I .

❖ Les réservoirs de « type II »

Sont métalliques avec un frettage en partie cylindrique. Ces réservoirs présentent néanmoins les mêmes inconvénients que ceux de type I. En dépit d'une densité de stockage supérieure (1.4%) grâce à une diminution de masse, l'augmentation de pression de stockage reste mineure [13].

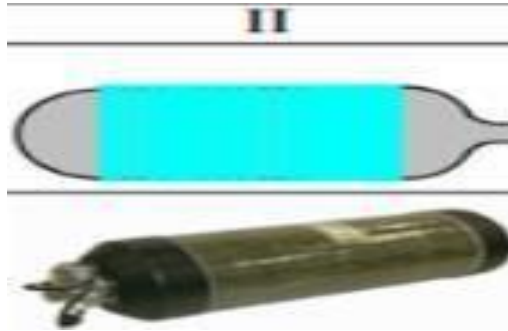


Fig I.7: Réservoirs type II

❖ Les réservoirs de « type III »

Sont en matériaux composites avec un liner (revêtement interne) métallique. Cette combinaison permet d'atteindre des pressions plus élevées (jusqu'à 700 bar). Les principaux inconvénients se situent au niveau de la résistance à la fatigue qui reste encore faible tandis que la masse de l'ensemble demeure encore élevée[13]..

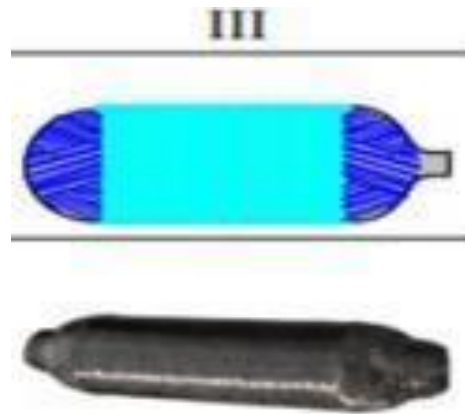


Fig I.8: Réservoirs type III

❖ Les réservoirs de « type IV »

Sont des réservoirs en composites (principalement en fibres de carbone) avec un liner en polymère (thermoplastique ou thermodurcissable). Dans ce cas, le liner ne supporte par la charge, il assure seulement l'étanchéité à l'hydrogène. Les propriétés particulières des polymères permettent d'allonger considérablement la durée de vie en fatigue du réservoir et leur faible densité permet de diminuer la masse totale de l'ensemble. Cette combinaison permet d'atteindre des niveaux de pression élevés comparables à ceux des réservoirs de type III (700 bar). Le stockage de l'hydrogène de type IV est à l'heure actuelle la technologie la plus avancé.



Fig I.9: Réservoirs type IV

Pour chaque type de réservoir, le choix de l'enveloppe (liner) en contact avec l'hydrogène est de première importance. Dans le cas du Type I, les contraintes mécaniques sont directement Reprises par le liner ; un matériau à grande limite élastique sera donc privilégié (Acier). En revanche, dans le cas des réservoirs de type III et IV, le liner sert de barrière à hydrogène. Un matériau peu perméable à l'hydrogène sera alors préféré (Aluminium dans le cas de type III). Largeur des fibres, motifs, angles d'enroulement et nombre de passes font partie des critères à optimiser pour l'enroulement filamentaire[5].

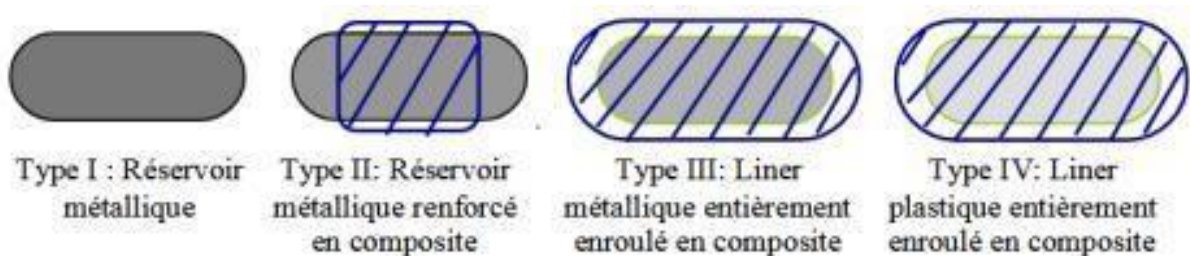


Fig I.10: Présentation des types de réservoir de stockage d'hydrogène comprimé

Nous créons des réservoirs sous pression légers et hautement résistants en utilisant la technique du bobinage filamentaire humide, associée à des procédés de tressage et moulage par transfert de résine pour les géométries plus complexes. Nos réservoirs sous pression en plastique renforcé de fibres de carbone de type 4 peuvent être utilisés jusqu'à 30 ans sans avoir besoin d'être remplacés, soit deux fois l'espérance de vie des réservoirs de type 1 et de type 2

Nos réservoirs sous pression de type 4 présentent une pression de travail nominale de 350 bar, 500 bar et 700 bar [11]

- Les réservoirs sous pression de 500 bar offrent une capacité utile de H₂ de 6,2 kg
- Les réservoirs de 350 bar et 700 bar peuvent être livrés dans différentes dimensions.

I.5. Matériau étudié :

I.5.1. Liner :

Le liner étudié est un tube en aluminium 6061 ayant subi un traitement thermique, de diamètre 60 mm et de longueur environ 300 mm. Les propriétés mécaniques de cet alliage sont rappelées dans le tableau I.3.

Tab I.3: Propriétés du liner métallique

Propriétés	Valeur
Module de Young [GPa]	72
Coefficient de Poisson	0.25
Limite élastique [Mpa]	200
Limite à la rupture [Mpa]	250
Coefficient de dilatation thermique ($10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0.09

I.5.2. Matériau composite :

Le liner en aluminium est recouvert par des filaments en composite. On sait que pour les composites la nature des constituants, leur proportions et l'orientation des fibres sont prépondérantes. Un changement de l'un de ces paramètres peut changer totalement le comportement mécanique et physique de ce genre de matériau. Les fibres de carbones utilisées sont de type T700 SC12K 50C imprégnées dans la résine époxy de type M10 (désignation fabricant Hexcel) avec un taux de 30%, le tableau 2 présente les caractéristiques de ce matériau.

La fibre composite est caractérisée par une largeur de 2.7 mm et 0.27 mm d'épaisseur

Tab I.4: Propriétés du composite [16]

	E_x	E_y	G_{xy}	V_{yx}	σ_{LU}	σ'_{LU}	σ_{TU}	σ'_{TU}	σ_{TLU}
C/E	141	10.7	3.88	0.33	1500	1500	50	250	70

Chapitre II:

Les comportements mécaniques

II.1.LA Mécanique de la repture :

L'objectif de la mécanique de la rupture est de définir le comportement de fissuration des structures à l'aide de caractéristiques quantifiables au sens de l'ingénieur, telles que le champ de contraintes, la taille des fissures et la résistance des matériaux à la fissuration.

Vers 1940, Westerwald a fait les premières avancées théoriques dans l'analyse des champs de déplacement, de déformation et de contrainte dans la zone d'une fissure. Irwin a été le fer de lance de l'expansion de la discipline dans les années 1960. Depuis lors, la mécanique de la rupture a progressé pour inclure des problèmes non linéaires de manière significative. et géométriquement, pour fissurer la bifurcation dans les modes mixtes, les composites, les techniques de résolution numérique et l'état de l'art par rapport à la taille de diverses structures compliquées. [20]

II.1.1. Endommagement et repture du réservoir sous pression interne :

Les dommages au réservoir composite se produisent en raison de la pression interne pendant le chargement. En raison de la variabilité de la structure, la morphologie des défauts est largement déterminée par la disposition des pièces du composite.

Les endommagements classiquement rencontrés dans les structures composites à fibres longues se caractérisent :

- A l'échelle microscopique, par des décohésions fibres/matrice à l'interface entre les deux constituants et des ruptures de fibres,
- A l'échelle mésoscopique, les décohésions coalescent jusqu'à former des fissures transverses s'étendant sur toute l'épaisseur du pli. Les extrémités de celles-ci peuvent à leur tour être à l'origine de micro-délaminages, c'est-à-dire de décollements entre les plis. Modèle de comportement de la structure bobinée épaisse et hétérogène 139

Tous ces défauts ont été observés sur des spécimens enroulés fabriqués à partir du même matériau qui constituait le réservoir [13].

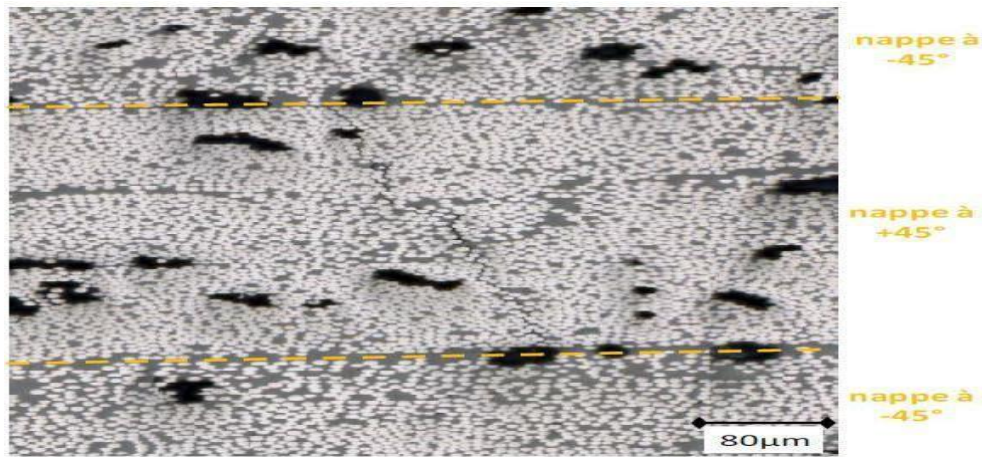


Fig II.1: Fissuration transverse observée dans une éprouvette bobinée à $\pm 45^\circ$ du matériau après un essai de traction [19]

II.1.2. les module à la repture:

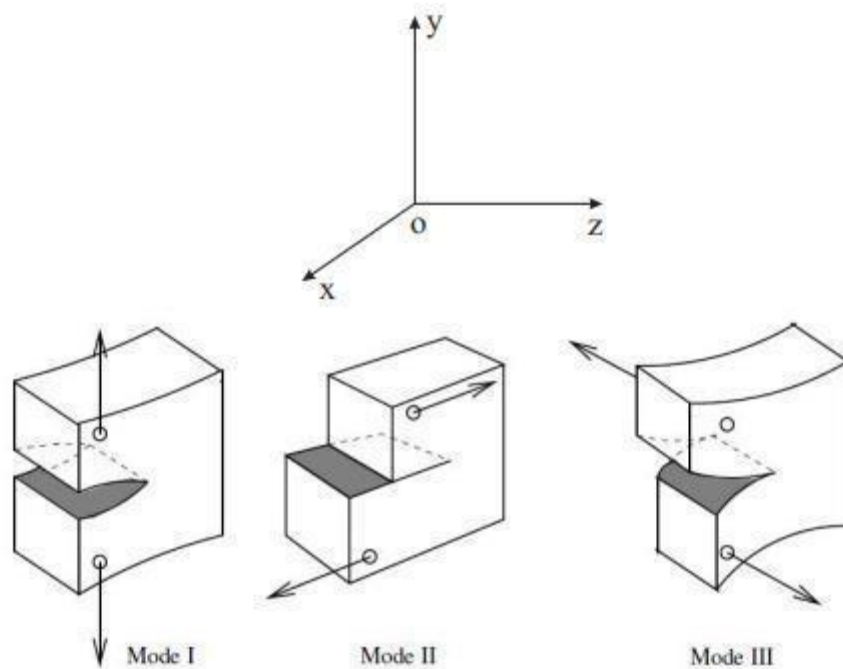


Fig II.2 : Trois modules à la repture [14]

- **Mode I** : un seul déplacement dans la direction de Oy concerne un problème plan spécifique. Le mode I est ce qu'il s'appelle. C'est généralement le mode le plus meurtrier. Un coin de dislocation rectiligne parallèle au front de fracture produit un déplacement comparable à celui-ci.

- **Mode II** : Elle est provoquée par un cisaillement dans le plan de la fissure, parallèle à l'axe Ox. Un coin de dislocation rectiligne parallèle au front de fracture produit un déplacement comparable à celui-ci .
- **Mode III** : Elle est causée par un cisaillement antiplan parallèle à l'axe Oz dans le plan de la fissure Oxz. Il s'agit d'une dislocation de vis parallèle à la face de la fissure provoquant un déplacement. Le dernier mode est résolu à l'aide d'une représentation 3D anti-plan, tandis que les deux premiers sont résolus à l'aide d'une analyse de contrainte ou de déformation plane 2D .

II.2. Les comportements mécanique :

II.2.1. Comportement de feu de char composite :

stockage de l'hydrogène comprimé La généralisation de l'utilisation de l'hydrogène, notamment pour les voitures, nécessite de maîtriser la fiabilité du stockage de l'hydrogène à des pressions extrêmement élevées. Les réservoirs de type IV onstitués d'une coque composite enroulée sur un revêtement en polymère, sont aujourd'hui considérés comme une technologie mature. Afin de mieux caractériser les onditions à éviter pour observer une défaillance de ce type de stockage dans des conditions accidentelles, en particulier un incendie, le projet FireComp (projet de recherche pré-normatif de trois ans) vise à caractériser le comportement thermomécanique de ce type de stockage. Méthode et objectifs L'un des objectifs du projet FireComp était de collecter des données expérimentales qui nous aideraient à mieux comprendre le comportement des cylindres composites sous pression. [12]

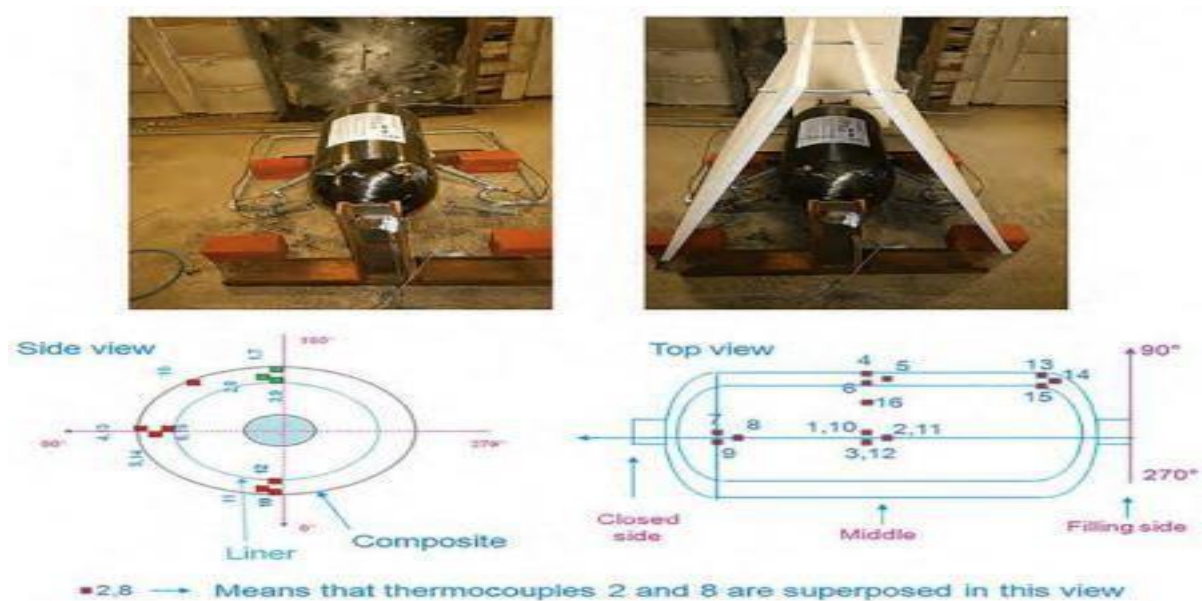


Fig II.3 : Stockage d'hydrogène sous pression

Le feu a été utilisé pour tester les modèles hermomécaniques qui avaient été construits. L'Ineris a mené un programme expérimental à grande échelle sur des bouteilles sous pression en deux étapes pour atteindre cet objectif. L'étape initiale consistait à déterminer les conditions d'incendie qui seront utilisées dans les essais... Ces réglages doivent refléter des scénarios d'accidents et se rapporter aux pires scénarios en termes de risque d'incendie des bouteilles. Ces expériences préliminaires ont été réalisées sur un cylindre en acier de la même taille qu'un cylindre H₂, instrumenté pour évaluer le flux de chaleur incident et collecter des données expérimentales utiles pour la comparaison avec les résultats de la modélisation. La disposition suivante a été utilisée pour fournir une répartition uniforme de l'énergie autour de la bouteille : Quatre injecteurs (chacun avec un débit d'hydrogène de 1,5 g/s et un débit d'hydrogène de 0,5 g/s). s débit d'oxygène) ont été utilisées. [12].

a. Interprétation :

Ces tests ont permis de développer une méthode de décompression qui permet de maintenir la bouteille à une pression interne n'entraînant pas d'explosion. Des pressions initiales de 700 et 525 bars ont été utilisées dans les essais., Après 238 et 311 secondes, respectivement, l'éclatement se produit. Dans les premiers essais à basse pression (250 et 100 bars), cependant, aucune explosion n'a été enregistrée, bien qu'une chute de pression progressive ait été observée (après 400 s et 490 s, respectivement).

Parallèlement aux tests, un modèle a été développé à partir de données d'entrée simples (géométrie axiale symétrique, flux homogène, rupture dans les premières fibres, critère de fuite basé sur la température à l'interface). Ce modèle permet de prédire de manière satisfaisante par rapport aux résultats expérimentaux, à la fois le temps avant l'explosion à différentes pressions internes, et le temps avant la fuite des pressions inférieures. La simulation de pivot fournit des résultats fiables très rapides pour les incendies ambiants. Ce modèle est capable de prédire l'éclatement ou la fuite des bouteilles, il permet de limiter les essais et de concevoir des dispositifs de décompression capables d'équiper des réservoirs d'hydrogène pour s'assurer que la pression est toujours dans la zone de sécurité Afin de traiter des scénarios d'incendie spécifiques, les simulations devraient également être étendues à de véritables instances 3D (effet de tache, flux appliqué hétérogène, cylindres partiellement blindés, etc.).

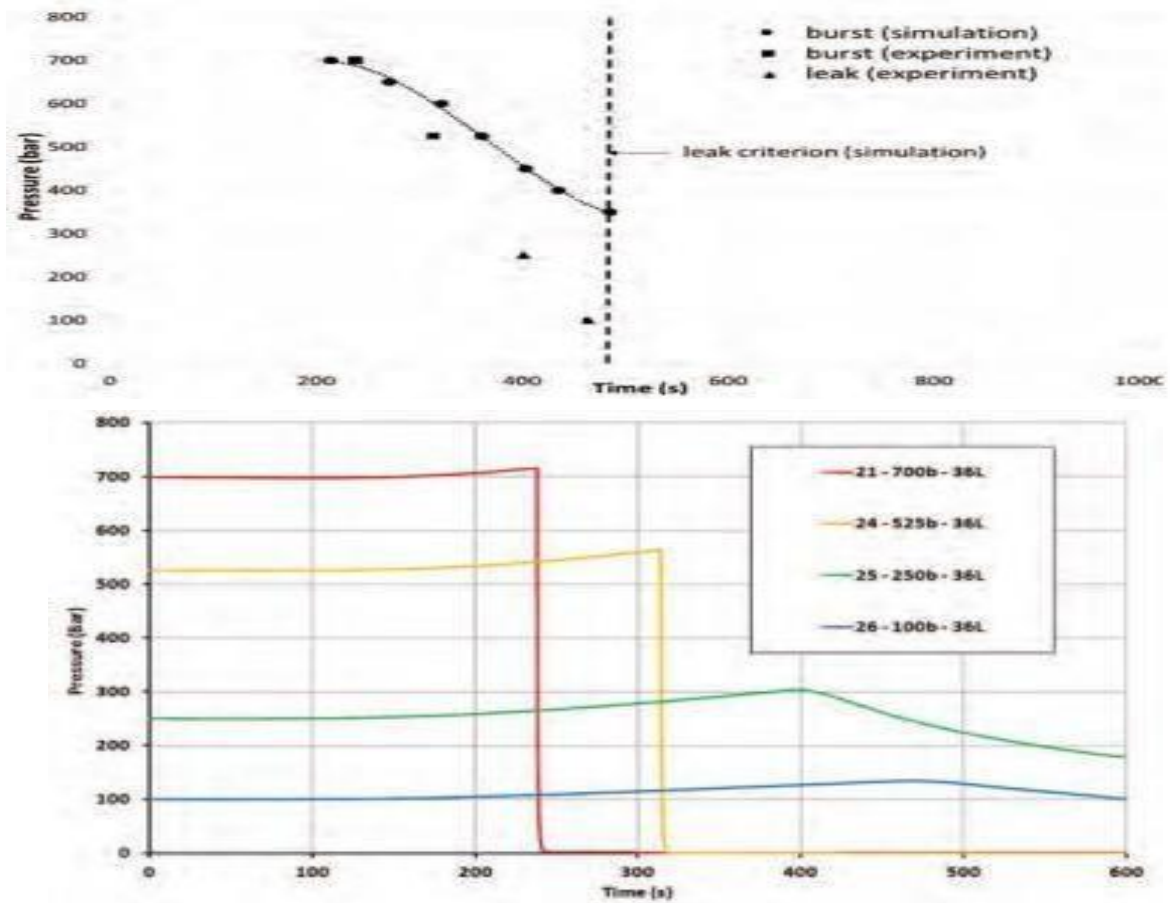


Fig II.4 : Evolution de la pression interne - Influence de la pression initiale. [12]

Chapitre III

**Simulation des réservoirs
contient des fissurations sous
l'effet de pression interne**

III.1. Simulation des réservoirs contenant des fissurations sous pression interne de l'hydrogène

III.1.1. Introduction

On va présenter des calculs (les contraintes, les déformations et les déplacements) sur le réservoir type 4 en utilisant la fonction «Simulation» du logiciel « Ansys », ce qui permet et de construire une maquette virtuelle pour illustrer et vérifier les solutions proposées de la conception préalable de ce réservoir. Après avoir présenté les résultats, nous pouvons apprendre les facteurs de fabrication d'un réservoir en matériaux composites: l'orientation des fibres; le nombre des plis; l'épaisseur totale des plis (l'épaisseur des stratifiés); les matériaux composites utilisés.

III.1.2. ANSYS

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation géométrique, le maillage, la résolution, le traitement des résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits [20]

III.1.3. Methodology

III.1.3.1. Modélisation de réservoir de type IV

Cette section traite de la procédure de conception du réservoir de type IV à enroulement filamentaire dans lequel la fibre agit comme un élément porteur majeur et la matrice la maintient dans un emplacement et une orientation spécifiques. Pour cela, la fibre de carbone T700S (CF) a été considérée comme ayant une résistance à la traction définie par le fabricant de 4900 MPa et combinant une résistance composite de 2550 MPa. Le polyéthylène haute densité (PEHD) était considéré comme un matériau de revêtement agissant comme une barrière pour le gaz. Le tableau 1 présente la spécification du réservoir de type IV et les paramètres essentiels pour la conception du réservoir.

La technique de modélisation était basée sur l'hypothèse que la fibre et la matrice ont la même contrainte et déformation pendant les charges de traction et de compression, la fibre est continue et droite, la structure obéit à la loi de Hooke et la contribution de la matrice dans la charge est négligeable. Les dômes métalliques pour injecteur ont également été négligés.

La figure 1 illustre l'approche de modélisation complète du réservoir de type IV. La figure 1A,B montre la géométrie avec sa dimension et une couche interne du réservoir appelée

doublure, en polymère haute densité qui vient directement au contact du gaz comprimé. La figure 1C montre les couches de composite fibre de carbone/matrice sur la partie extérieure du cylindre appelée empilement ou stratifié. Le stratifié de fibre de carbone/matrice se compose de 10 couches avec une séquence d'empilement [+45 /90]d'angle d'enroulement avec une épaisseur égale, comme le montre la figure 1D. Les couches ont été enroulées le long de la surface du réservoir dans le sens du cercle et de l'hélice pour fournir la résistance requise au stratifié composite. La vue rapprochée du motif d'enroulement de la fibre de carbone est illustrée à la figure 1E.

III.1.4. Analyse de compensation

Le réservoir composé de couches de fibres hélicoïdales et cerceaux. La rupture de la structure est définie comme la rupture de la première couche de la fibre. Le réseau de fibres placé autour de la partie cylindrique et du dôme du réservoir pour fournir une résistance adéquate à la structure. Pour cela, une analyse de compensation a été

Tab III.1 : Spécification and des ign parameters of type IV tank

Paramètres	Valeurs
Longueur (mm)	827
Diamètre (interne) (mm)	230
Épaisseur (mm)	39
Facteur de sécurité	2.25
Pression de service nominale (MPa)	70
Pression d'éclatement (MPa)	175

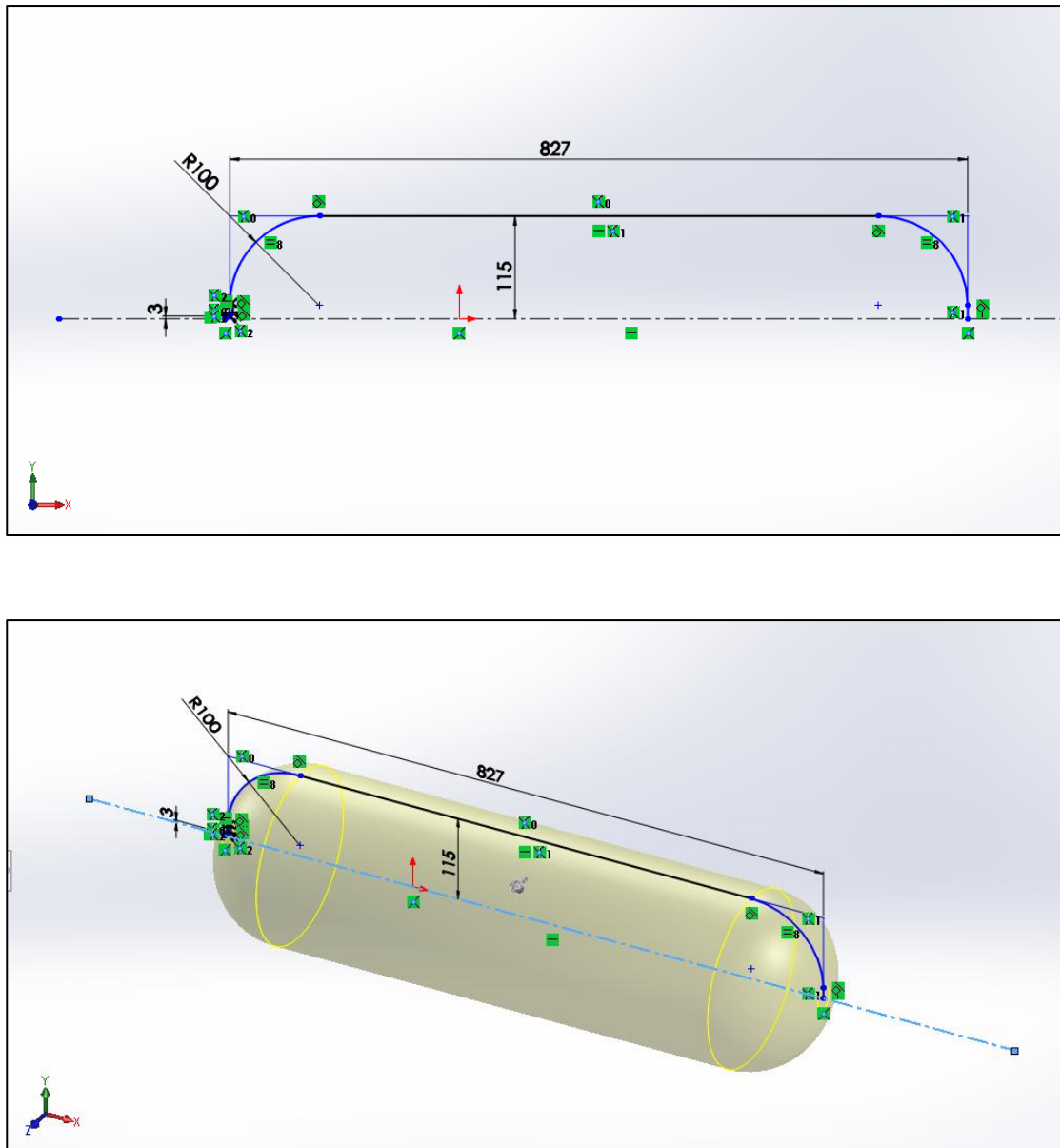


Fig III.1: Modélisation d'un réservoir de type IV. A, vue 2D avec cotes ; B, vue en couches ; C, épaisseur des couches ; D, pile séquence de plis ;et E, enroulement de fibre

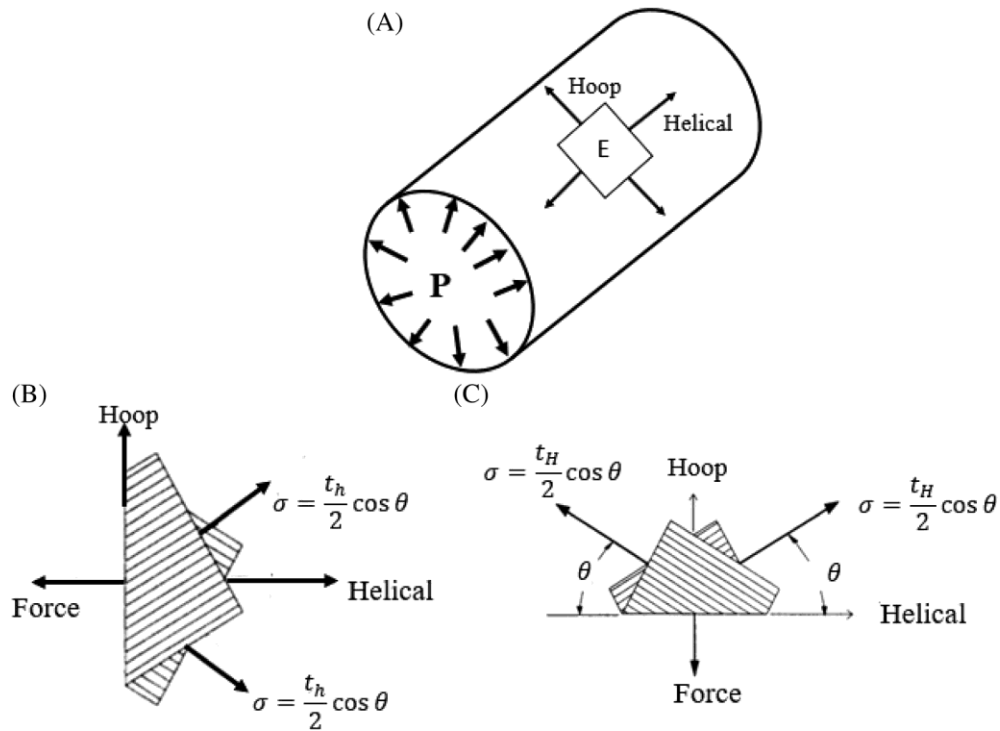


Fig III.2 : A, Réservoir soumis à une pression interne ; B, hélicoïdal ; et C direction de la couche de cerceau le long du cylindre portion

mis en œuvre pour définir l'épaisseur requise des couches hélicoïdales et circulaires pour résister aux charges cycliques pendant le ravitaillement.^{23,37} L'analyse des filets suppose que seule la fibre peut fournir la rigidité et la résistance requises pour le réservoir. La contribution portante de la matrice a été négligée en raison de sa faible rigidité par rapport au renforcement. Sur la base de la résistance ultime de la fibre de carbone, l'épaisseur de la couche a été évaluée. La figure 2 représente la partie cylindrique du réservoir soumise à une pression interne et à une contrainte composante sur l'arceau et la couche hélicoïdale de l'élément. La contrainte dans les couches hélicoïdales et circulaires est donnée par les équations (1) et (2). L'épaisseur totale du stratifié est la somme de l'épaisseur de l'hélice et du cercle.

$$t_h = \frac{PR}{2\sigma \cos^2 \theta} \quad (\text{III.1})$$

$$t_w = \frac{PR}{2\sigma \cos} 2 - \tan^2 \theta \quad (\text{III.2})$$

où

t: l'épaisseur de la fibre de carbone

σ :l'angle d'enroulement

P: pression de service nominale

R: le rayon du réservoir et est la résistance ultime de la fibre de carbone

III.1.5.Modèle par éléments finis (EF) du réservoir et conditions de chargement

L'analyse par éléments finis comprend le développement du modèle EF, le maillage, la définition des conditions aux limites et les calculs de paramètres basés sur le modèle physique à l'aide du logiciel ANSYS.44 Le modèle EF se concentre principalement sur le développement d'une structure composite multicouche avec un raffinement de maillage de haute qualité pour une meilleure résultats. Le modèle comprend 27 512 éléments en liner avec 54 960 nœuds et 55 229 éléments avec 110 193 nœuds en couche composite de renfort en fibre de carbone. La liaison parfaite entre la doublure haute densité et la fibre de carbone a été supposée. La figure 3 représente le modèle FE du réservoir de type IV montrant les parties internes et externes du réservoir. La figure 4 illustre les charges appliquées à la surface interne du réservoir. L'amplitude de la pression interne varie avec les taux de remplissage d'hydrogène comprimé et elle est appliquée dans toutes les directions du réservoir. Le support fixe est prévu aux deux extrémités sur le dôme du réservoir. Le déplacement radial est pris sur la partie cylindrique du réservoir tandis que le déplacement axial est pris le long des extrémités du réservoir ou le long du dôme du réservoir.

III.1.6.Ravitaillement du réservoir de type IV

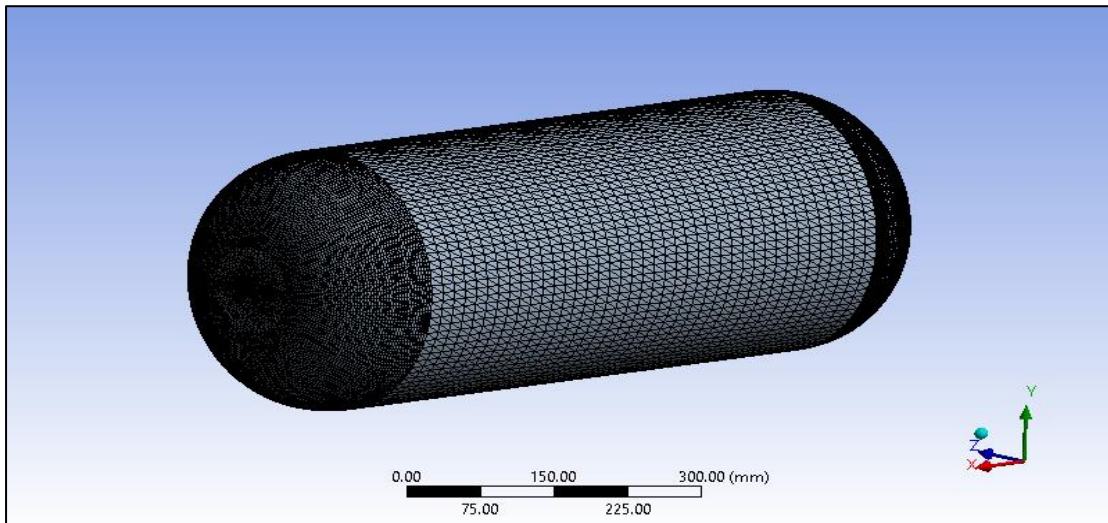
Cet article considère les données de simulation de ravitaillement rapide du réservoir de type IV comme indiqué dans les références 45 et 46.

Le pour étudier l'élévation de la pression et de la température. La température et la pression maximales en fin de ravitaillement ont été obtenues à des taux de ravitaillement allant de 2 à 10 g/s pour un temps de remplissage de 200 secondes et une température d'alimentation de -40 C, -20 C, 0 C et 15 C selon SAE J2601. La plage de pression et de température à différents les conditions de remplissage sont présentées dans le tableau III.2.

Tab III.2 : Plage des paramètres de ravitaillement

Taux de remplissage (g/s)	Plage de pression (MPa)
2–10	70–87.5

(A)



(B)

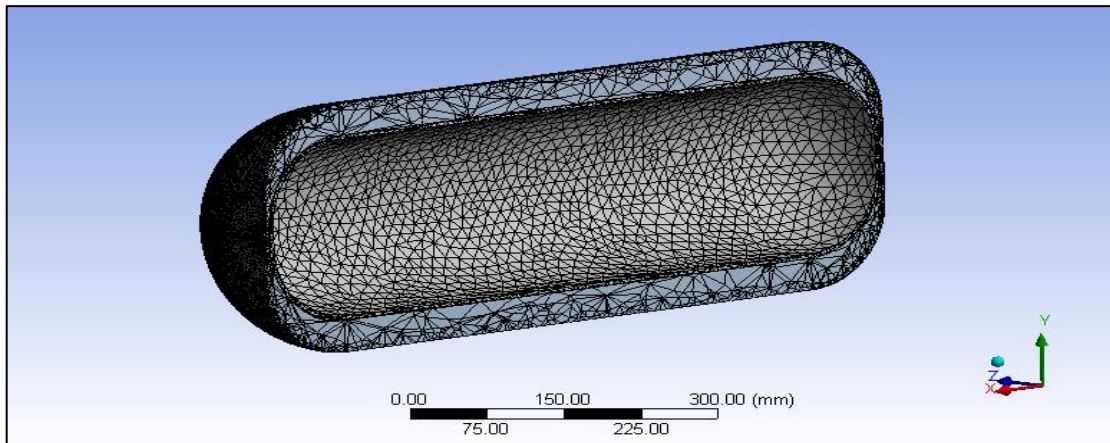


Fig III.3: Modèle éléments finis de réservoir de type IV. A, vue en coupe et B ; pleinevue du réservoir

III.1.7. Analyse des défaillances

Cette analyse inclut les différentes théories de rupture telles que la contrainte principale maximale, la théorie des contraintes équivalentes, l'élasticité principale maximale et la théorie des déformations équivalentes pour évaluer la rupture des stratifiés composites. La théorie de la contrainte et de la déformation maximales considère généralement la résistance à la traction pendant la plastification. La rupture apparaît lorsque la contrainte maximale dans une direction atteint la limite d'élasticité ultime des matériaux. Le critère de rupture est donné par les équations (3) et (4).

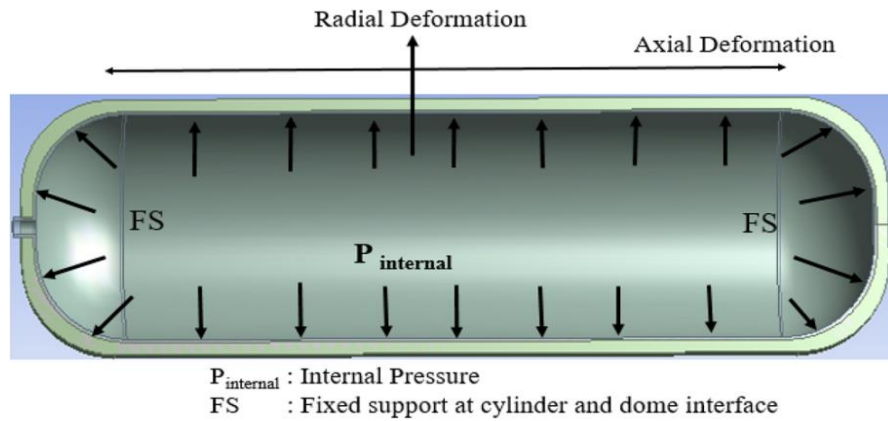


Fig III.4: Conditions de chargement en citerne de type IV

où σ_1 et σ_2 sont des contraintes dans deux directions différentes et σ_Y est la limite d'élasticité. De même, la plastification se produira lorsque la déformation principale maximale dépasse juste la déformation à la limite d'élasticité en traction en traction simple ou en compression. Le critère de rupture est défini par les équations (5) et (6). La théorie de la contrainte et de la déformation équivalente utilisée pour prédire la contrainte et la déformation dans des conditions de charge critiques pour considère généralement la limite d'élasticité en traction où σ_1 et σ_2 sont des contraintes dans deux directions différentes ϵ_1 et ϵ_2 se déforment dans la direction correspondante.

III.2.RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.2.1.Simulation sans fissure

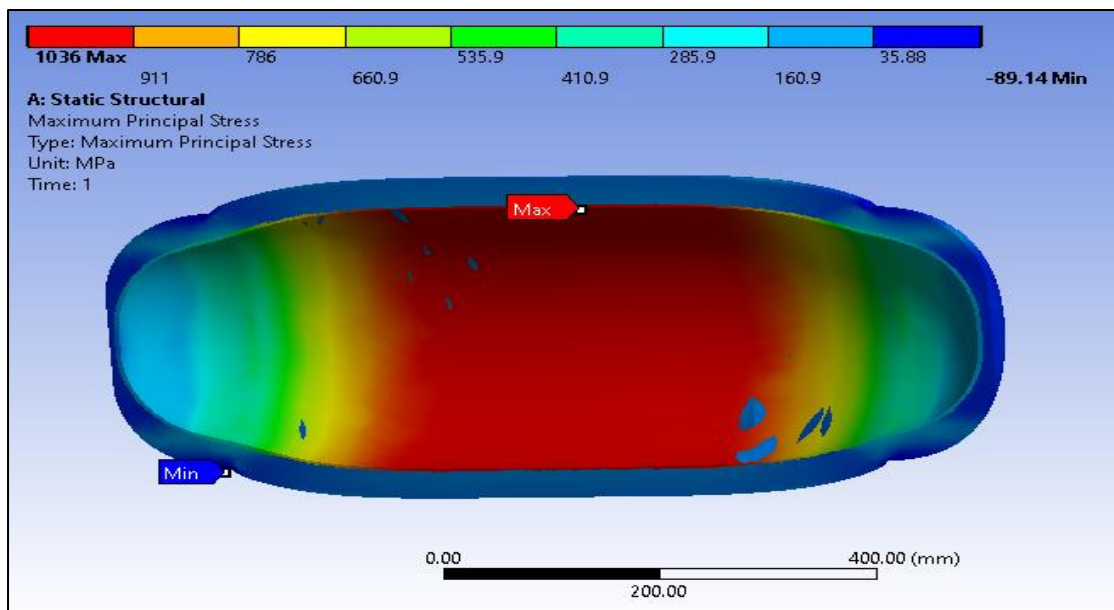
La figure III.5 montre la répartition des contraintes sur la surface du revêtement à une pression de service nominale de 70 MPa et 15 C. À ce pression, la contrainte maximale a été observée au niveau de la partie cylindrique du réservoir. Il montre que la contrainte peut affecter la partie cylindrique du réservoir si elle dépasse le 25MPa qui est la résistance ultime du HDPE. La contrainte au-delà peut endommager le réservoir de la partie cylindrique. Cependant, il serait considéré comme une explosion sûre, comme indiqué dans les travaux expérimentaux publiés de la référence 34.

Les contraintes maximales obtenues à l'aide des critères de rupture sous contrainte principale et équivalente sont limitées à 1036 et 980.48 MPa, respectivement. Les deux valeurs de contrainte inférieures à la limite d'élasticité du revêtement en PEHD à la pression de fonctionnement nominale et à la température de ravitaillement. La figure III.6 A,B montre la déformation produite à 70 MPa et 15 C en utilisant les critères de déformation élastique principale et de rupture de déformation équivalente. La contrainte maximale est observée au niveau de la partie cylindrique du réservoir car la contrainte est également maximale dans

cette partie, ce qui montre la possibilité d'une déformation de la partie cylindrique, appelée déformation radiale.

Bien que la contrainte maximale à la pression de service nominale soit inférieure à la valeur ultime, elle augmente au fur et à mesure du remplissage en raison d'une augmentation inégale de la pression et de la température. La figure III.7 A,B montre la variation de contrainte et de déformation obtenue par deux critères de rupture à différentes pressions. sûr atteint dans le réservoir de type IV pour différents taux de remplissage.

(A)



(B)

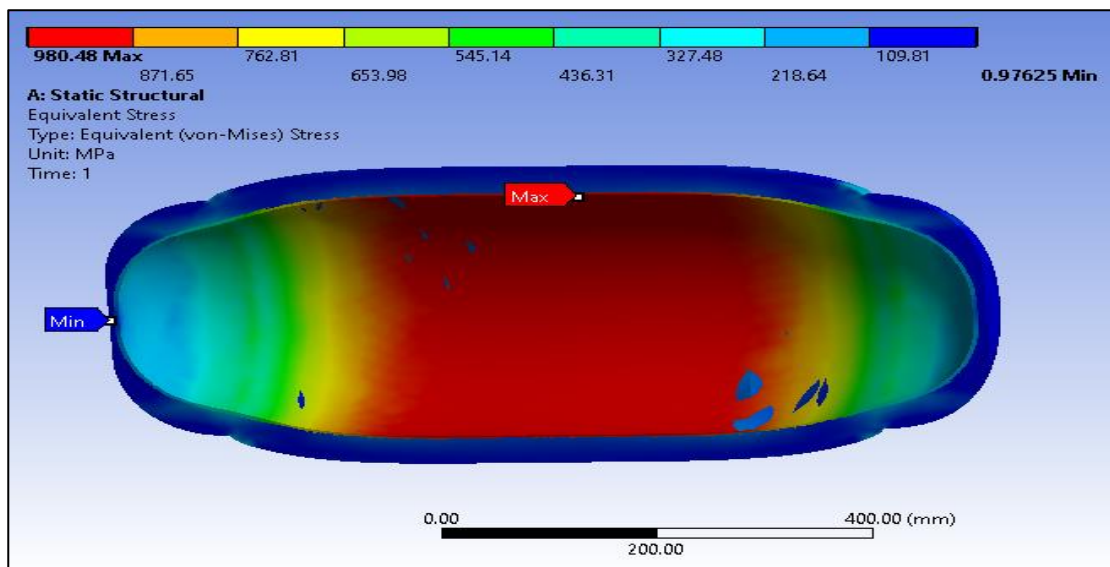
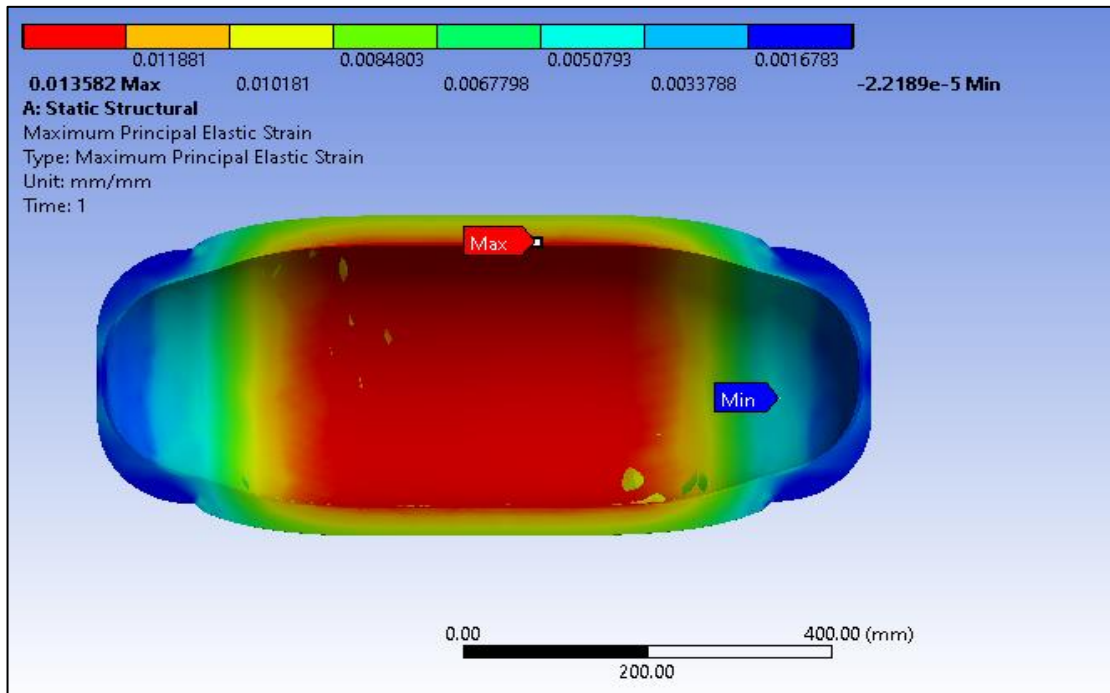


Fig III.5: Répartition des contraintes sur liner de type Réservoir IV à une pression nominale de service de 70 MPa et une température de 15 C en utilisant A, théorie des contraintes principales maximales et B, théorie des contraintes équivalentes (Von-Mises)

(A)



(B)

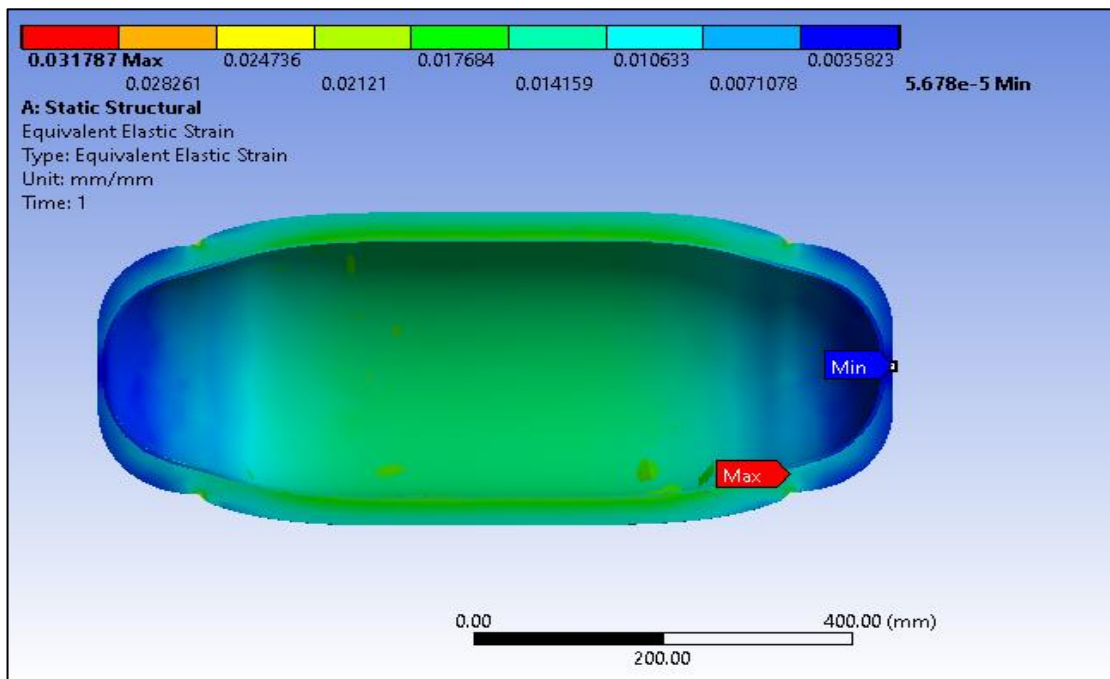


Fig III.6: Répartition des déformations sur le revêtement d'un réservoir de type IV à une pression de service nominale de 70 MPa et une température de 15 C en utilisant A, théorie de déformation élastique principale maximale et B, équivalent théorie de la déformation élastique (Von-Mises)

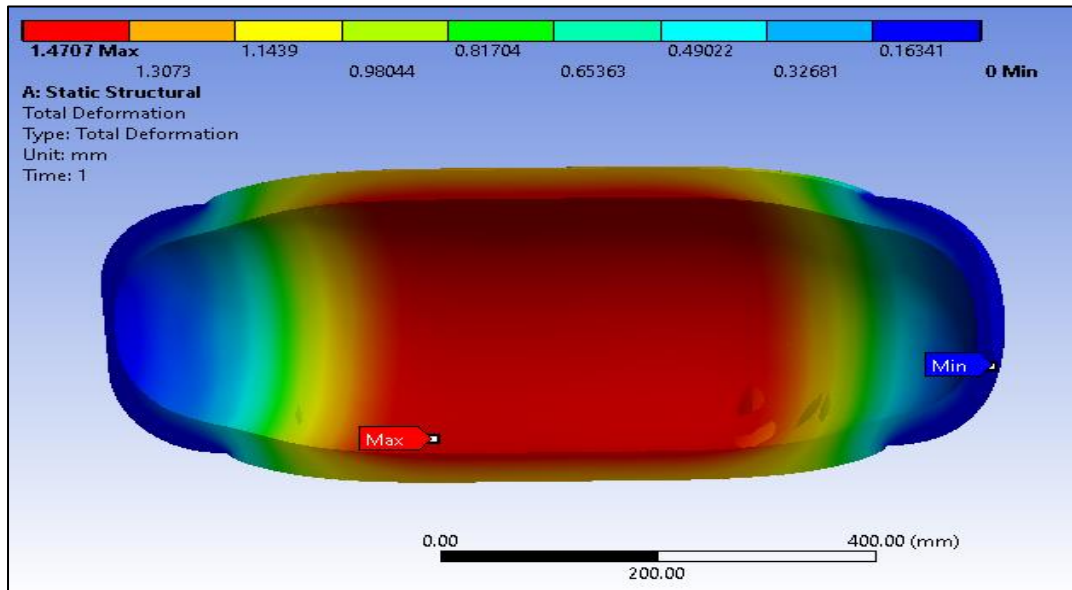
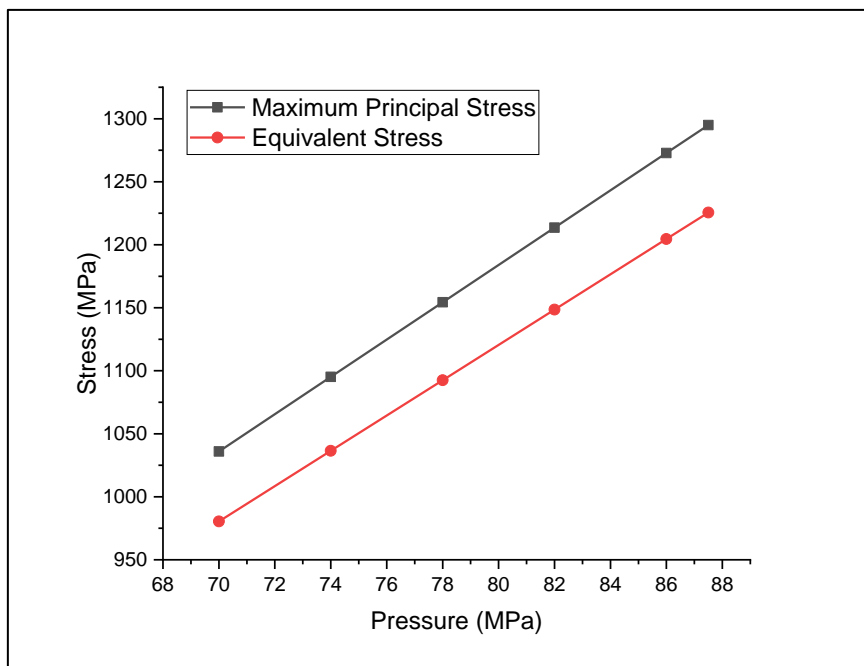


Fig III.7: Résultat de Deformation type IV

(A)



(B)

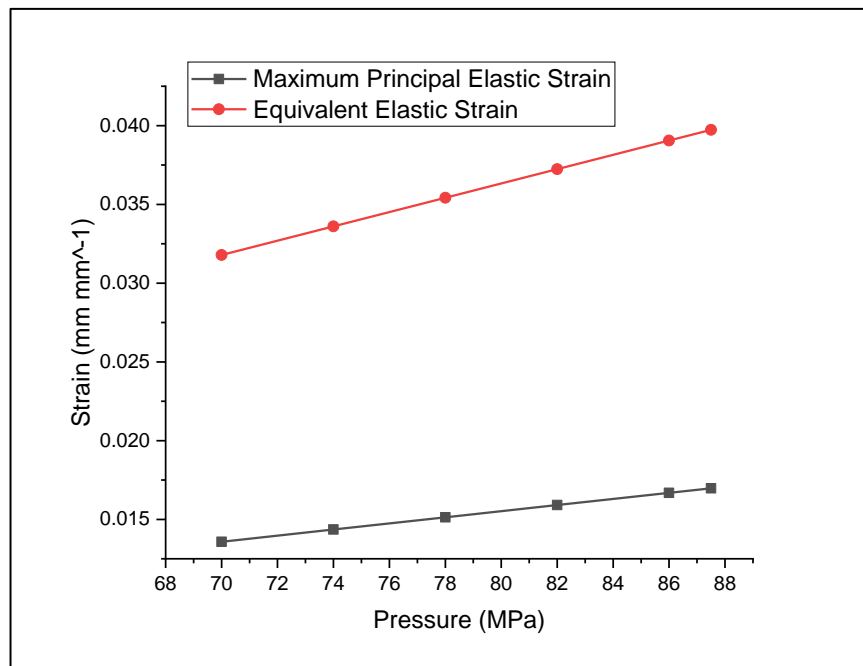


Fig III.8: A, Contrainte et B, déformation, produites sur la chemise à différentes pressions de ravitaillement

La contrainte à la pression maximale admissible de 87 MPa est 1286.25 MPa et 1048.75 MPa en utilisant respectivement la théorie de la contrainte maximale et la théorie équivalente (Von-Mises). La contrainte maximale dépasse la valeur ultime de 25 MPa par la théorie des contraintes maximales. Sur la figure III.7 A, un autre critère de défaillance suggère que la contrainte se situe dans la plage. Les critères de Von-Mises prédisent la plastification en considérant non seulement la contrainte de traction mais aussi la contrainte de compression. Le polymère a généralement une contrainte de compression supérieure à celle de traction. Par conséquent, la contrainte maximale obtenue par les critères de Von-Mises était inférieure aux critères de contrainte maximale. Cependant, la théorie du stress maximal donne plus de valeur réelle au stress que la théorie du stress équivalent qui mesure théoriquement le stress.⁴⁷

De même, la figure III.7 B montre la déformation à différentes pressions en utilisant deux critères de défaillance différents. La déformation montre également une relation linéaire avec la contrainte.

Ainsi, on peut conclure que la déformation apparaît sur le liner où la contrainte est maximale. Le HDPE a une résistance à la traction et à la compression élevée même à haute pression.^{48,49} Par conséquent, une très petite déformation était attendue sur le revêtement. De même, l'influence des températures générées pendant le ravitaillement a été limitée par la rigidité élevée du PEHD.^{50,51} La déformation du revêtement dépendait également de l'enroulement de fibre de carbone enveloppé à haute résistance. Par conséquent, le

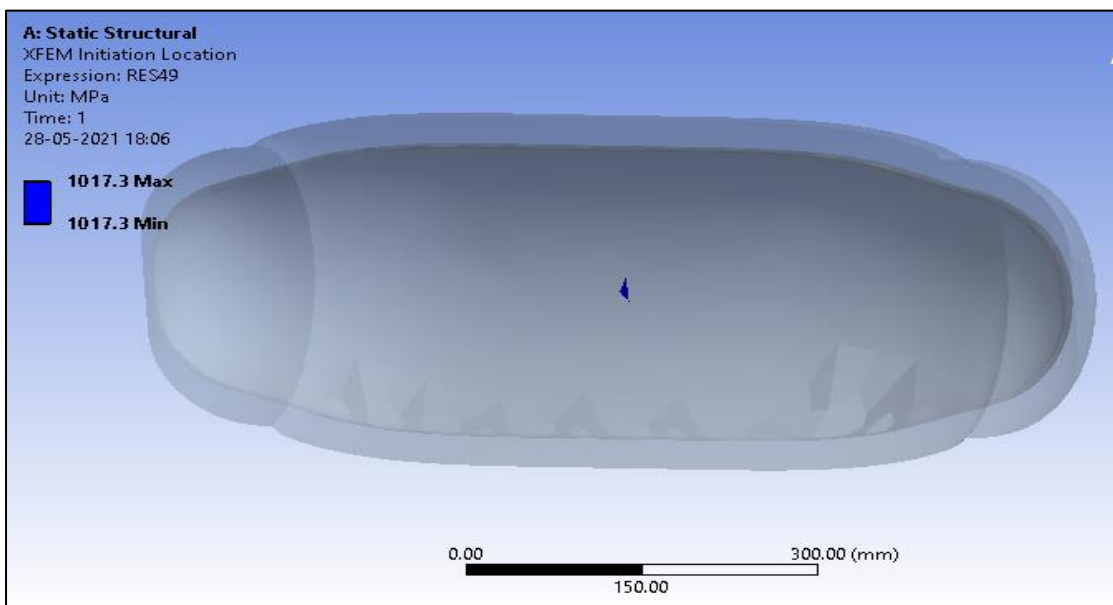
comportement du CFRP devait être examiné avant de définir la défaillance du revêtement en PEHD dans le réservoir de type IV.

III.2.2.Simulation avec fissure

La figure III.5 montre la fissuration de la surface du revêtement à une pression de service nominale de 70 MPa et 15 °C à ce

Pression maximale, contrainte maximale est observée dans la partie cylindrique du réservoir. Il montre que la pression peut affecter la partie cylindrique du réservoir si elle dépasse 25MPa qui est la force absolue du HDPE. Des contraintes peuvent alors endommager le réservoir de la pièce cylindrique. Cependant, considérez qu'il s'agit d'une explosion, comme indiqué dans les travaux expérimentaux publiés dans la réf.

(A)



(B)

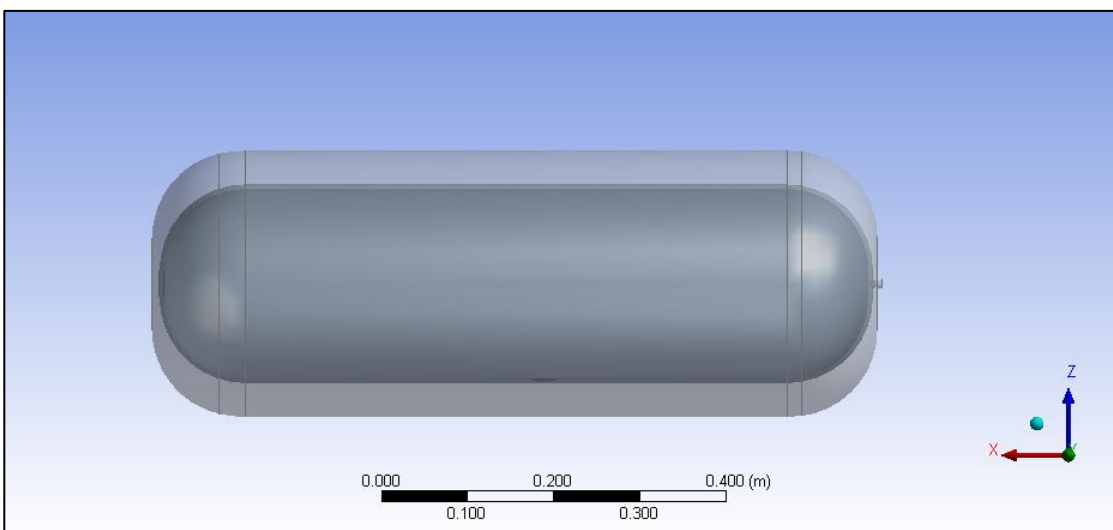


Fig III.9: A et B Représente l'emplacement de la fissure

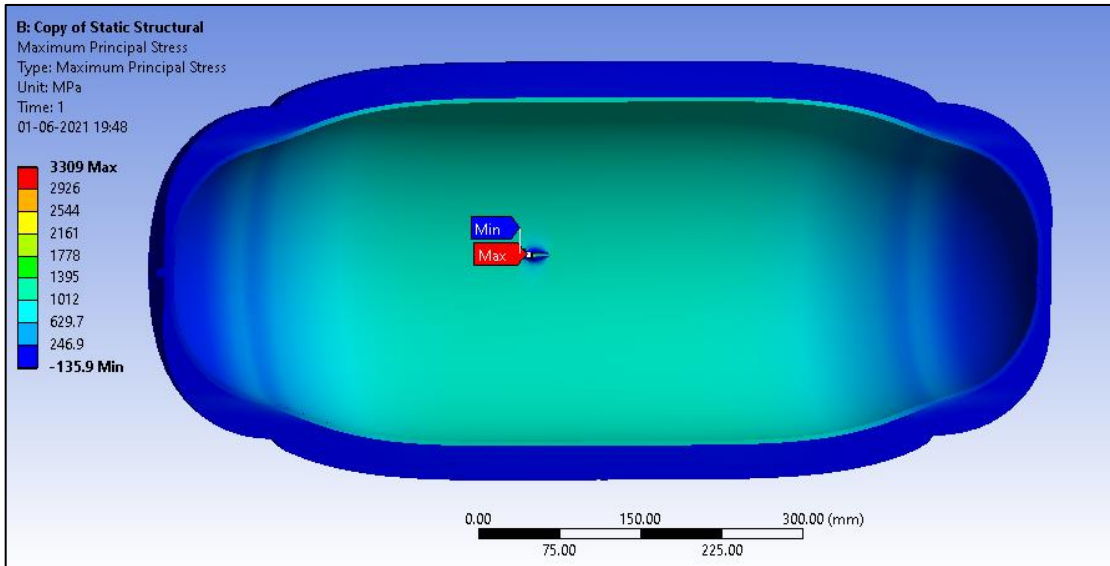


Fig III.10: Résultat de Maximum principal Stress

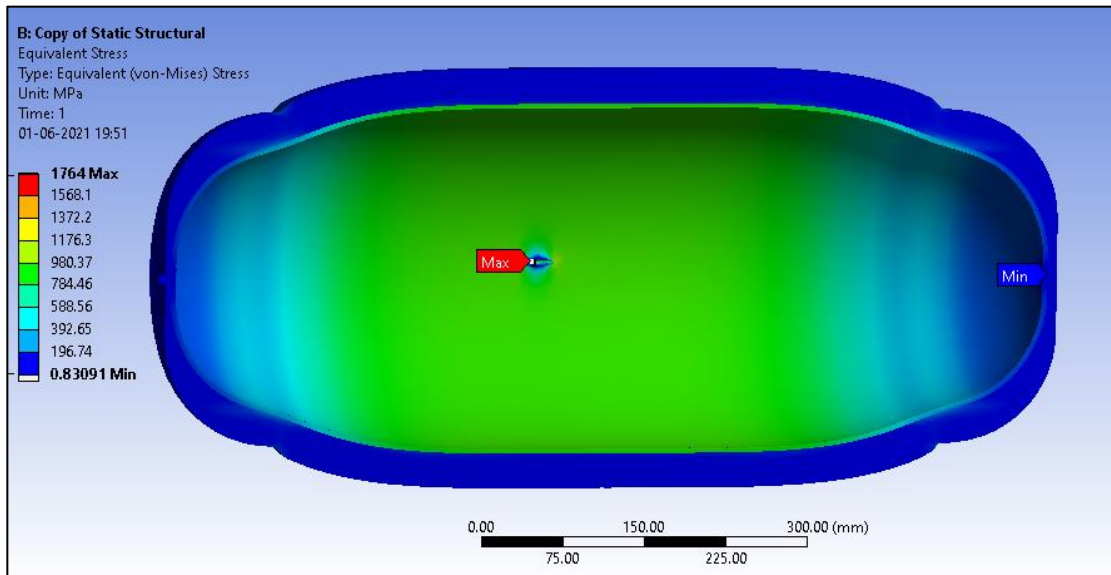


Fig III.11: Résultat de Equivalent de Von Mises

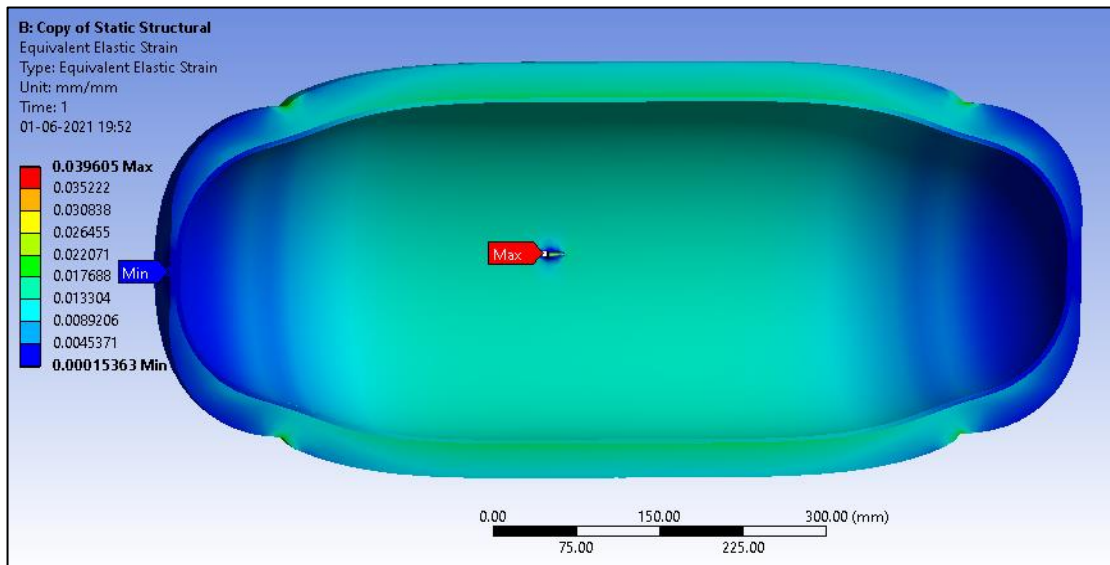


Fig III.12: Résultat de Equivalent Elastic Strain

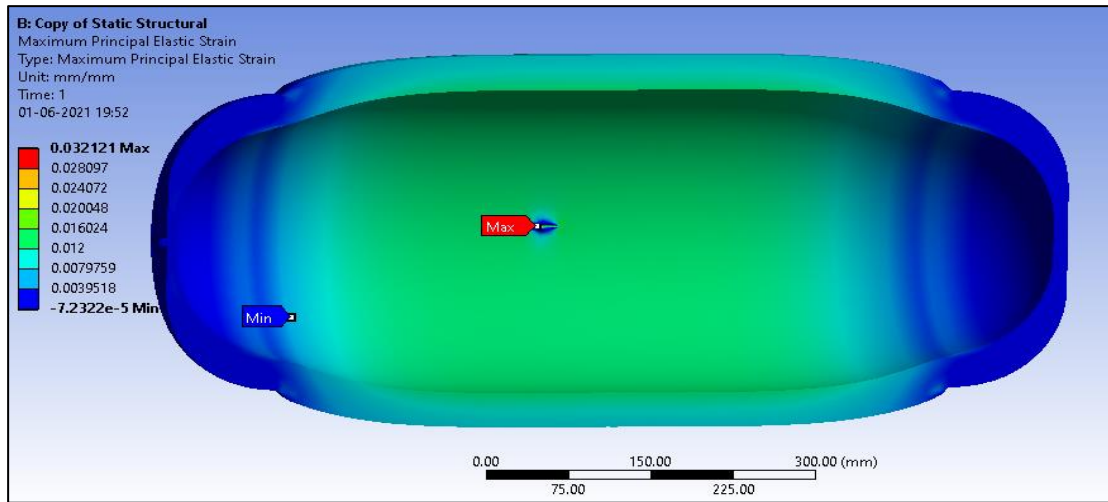


Fig III.13: Résultat de Maximum principal Elastic Strain

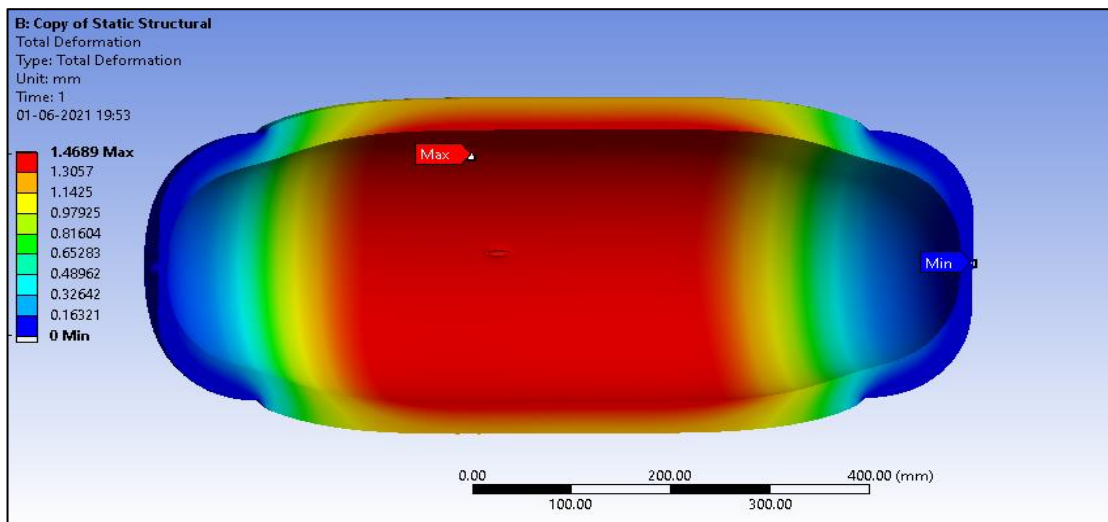


Fig III.14: Résultat de Deformation

❖ Fracture Tool

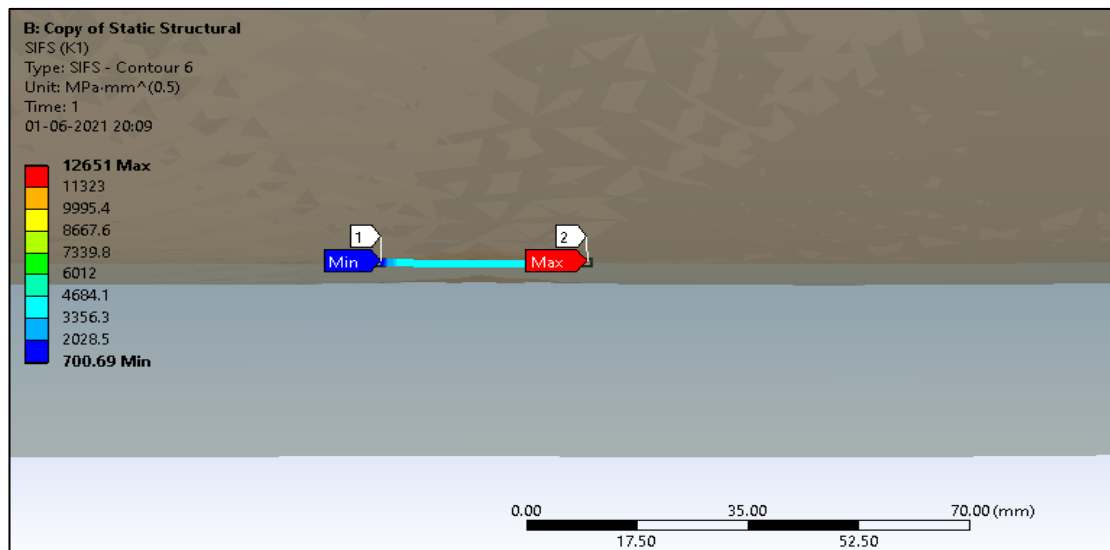


Fig III.15: Résultat desifs(k1)

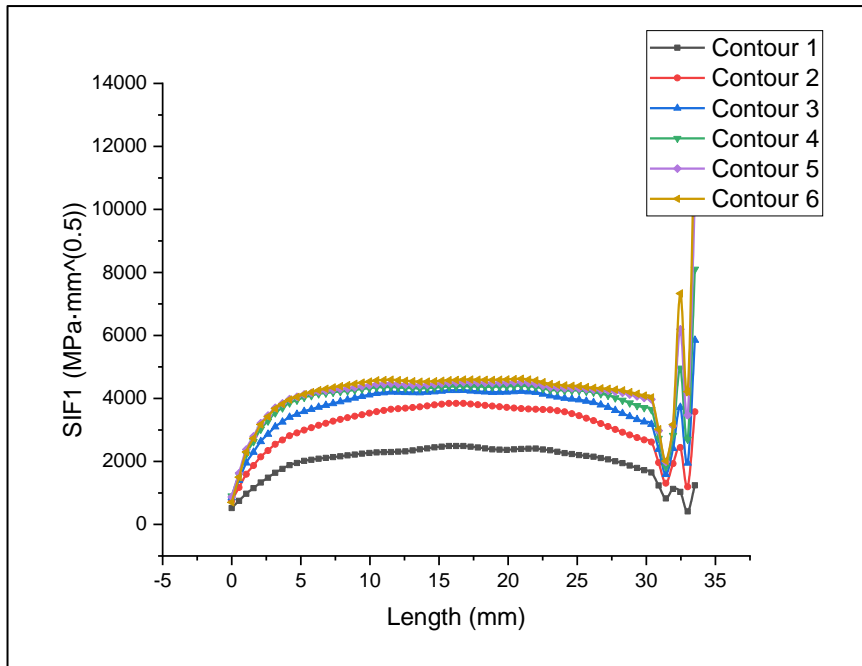


Fig III.16: Fracture de l'intensité de contrainte par rapport à la propagation de fissure

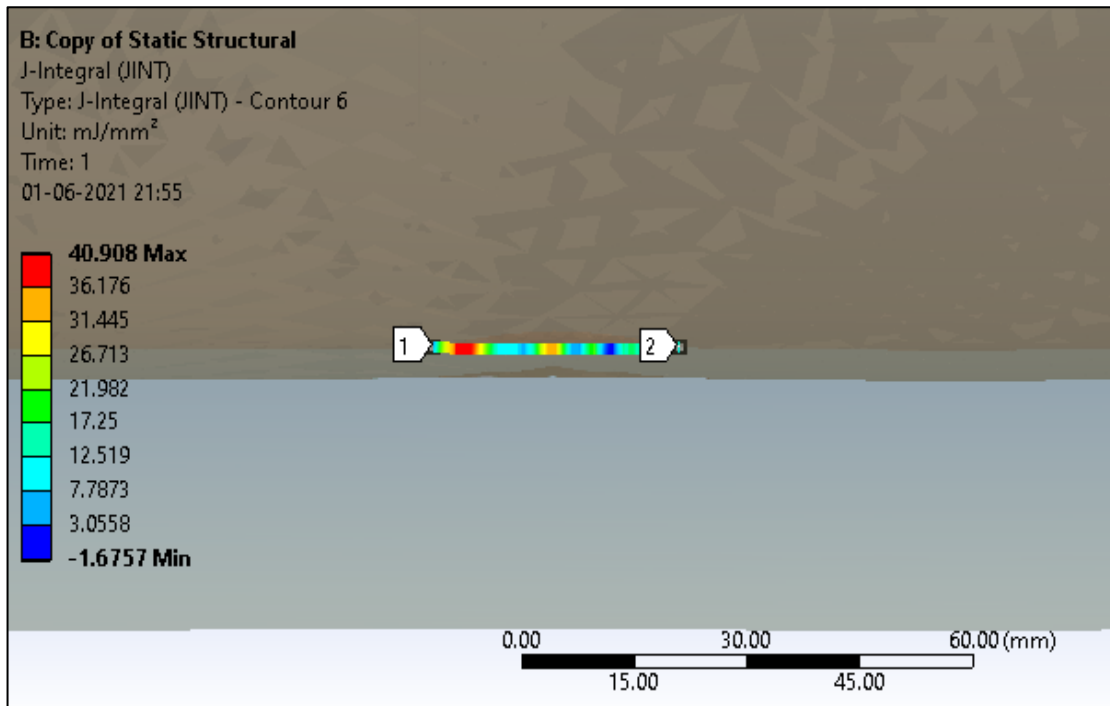


Fig III.17: Résultat de l'Integral (JINT)

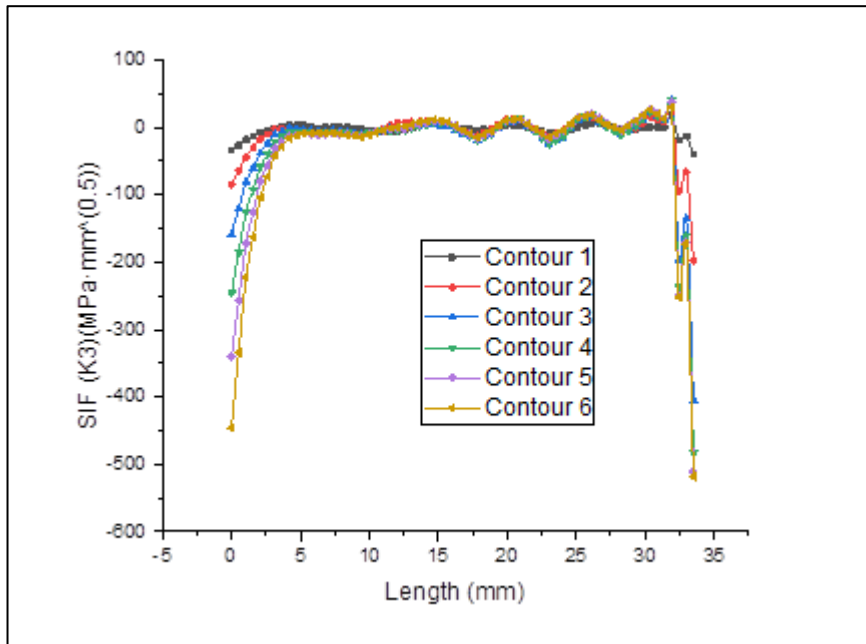


Fig III.18: Facture de d'intensité de contrainte par rapport au propagation de fissure

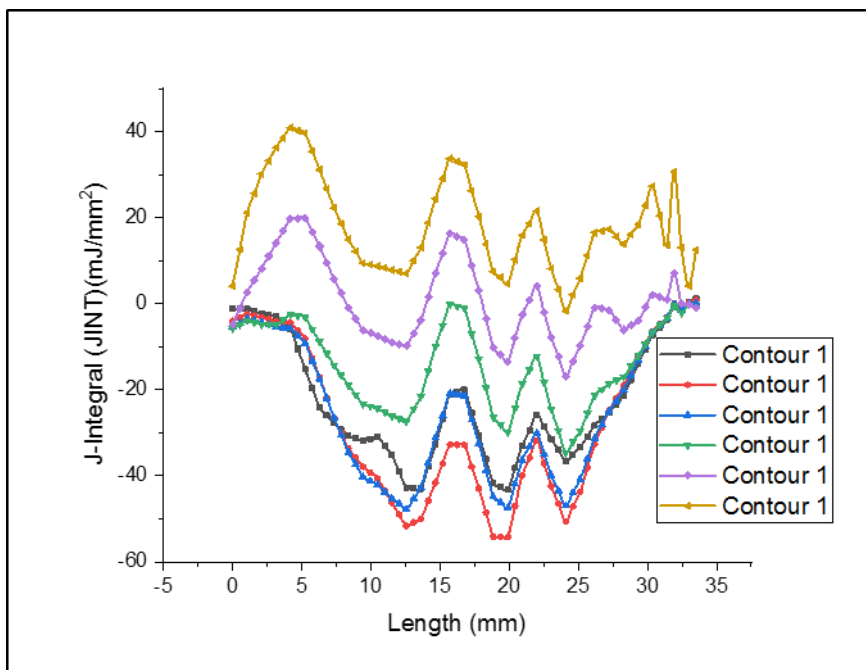


Fig III.19: Facture de J-Integral en terme de fissure Comparaison avec fente et sans fente

III.3.Conclusion

Ce chapitre avait pour objet d'une analyse numérique du réservoir de stockage de type IV, soumis à un chargement de pression interne. Les résultats obtenus par l'utilisation des différents empilements de composites dans la conception des réservoirs ont montré l'influence de l'orientation des fibres, le nombre de plis, l'épaisseur du stratifié et les matériaux composites utilisés sur le comportement mécanique du réservoir type IV.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ces recherches ont été menées dans le cadre de l'effort de recherche et développement sur l'analyse et la conception de réservoirs composites de stockage d'hydrogène.

L'hydrogène se trouve dans la nature à l'état libre, et il est extrait de diverses sources et stocké dans une variété de réservoirs à haute pression, y compris les premier et deuxième types que nous avons plus tôt. Il existe de nombreuses autres variétés, telles que les troisième et quatrième types. L'objectif était de démontrer la connaissance des matériaux composites en détaillant leurs compositions, caractéristiques et architectures. Le comportement mécanique et les propriétés physiques du composé ont d'abord été distingués. Les résultats ont révélé que

Le deuxième type, qui est construit en aluminium et en fibre de carbone, est supérieur au premier type, qui est entièrement construit en aluminium. D'autres, comme le troisième, ont été développés et deviennent plus forts et plus efficaces. Types trois et quatre Enfin, nous espérons que ces travaux serviront de tremplin pour de nouvelles recherches sur les réservoirs de stockage d'hydrogène.

Bibliographie

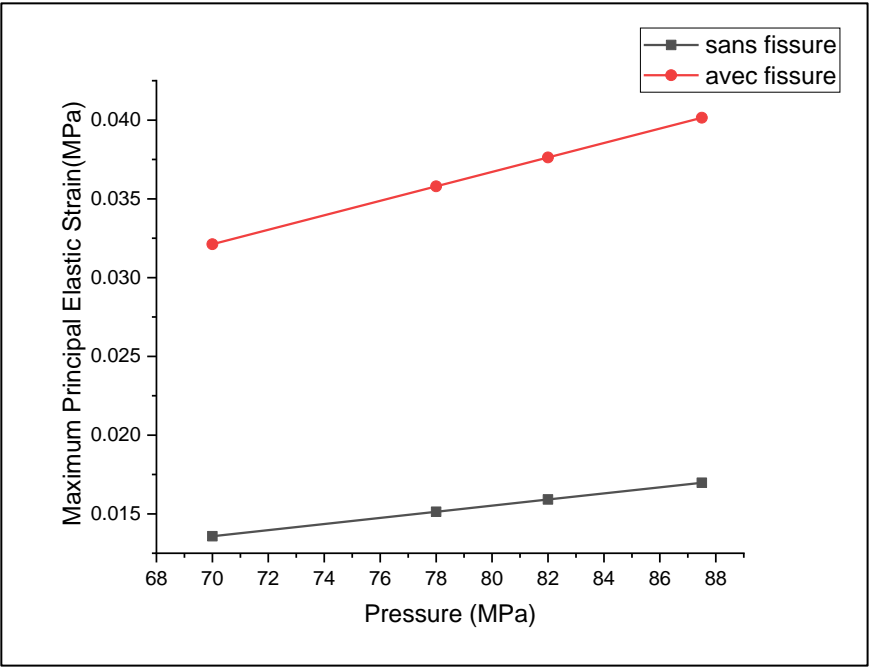
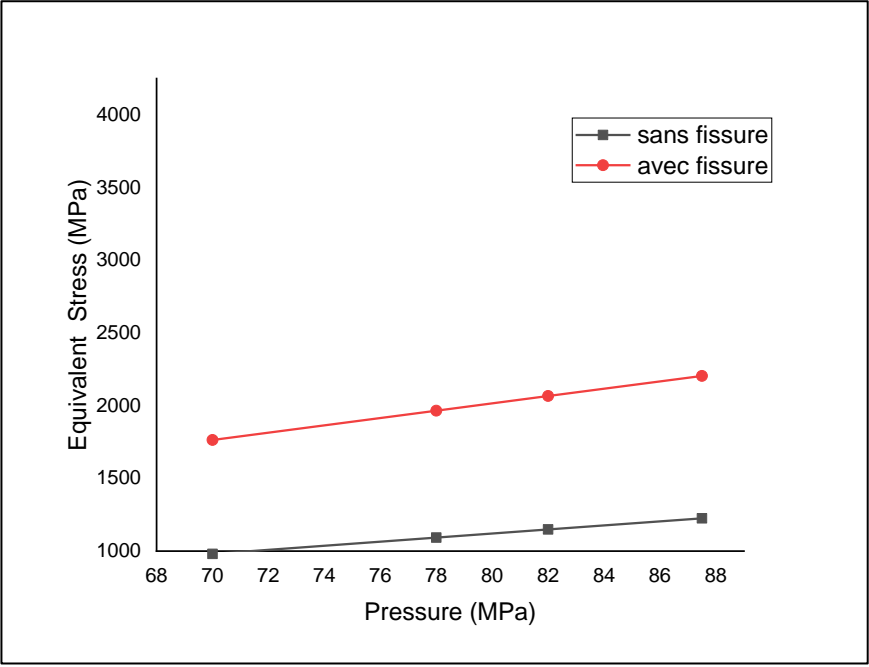
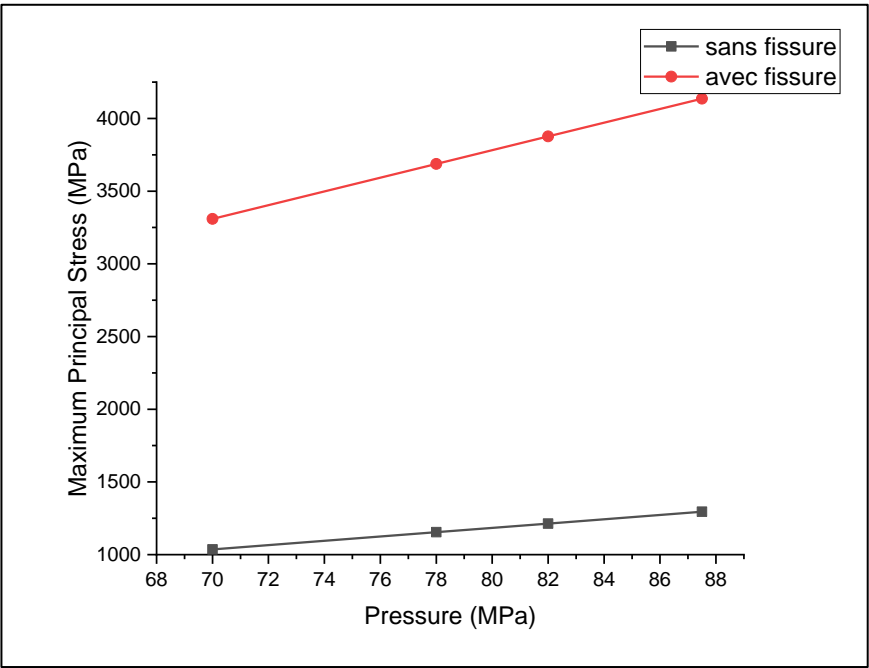
Bibliographie

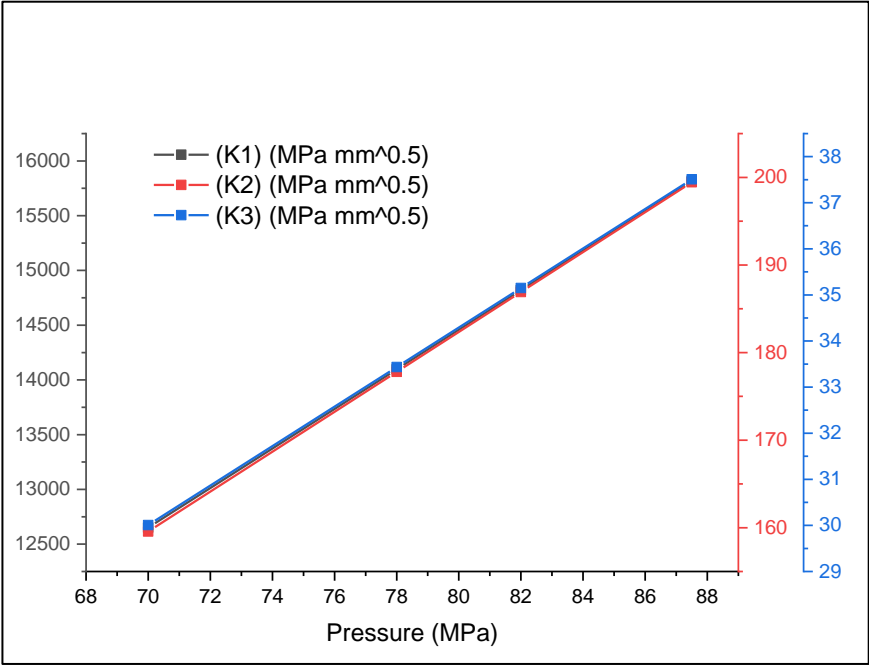
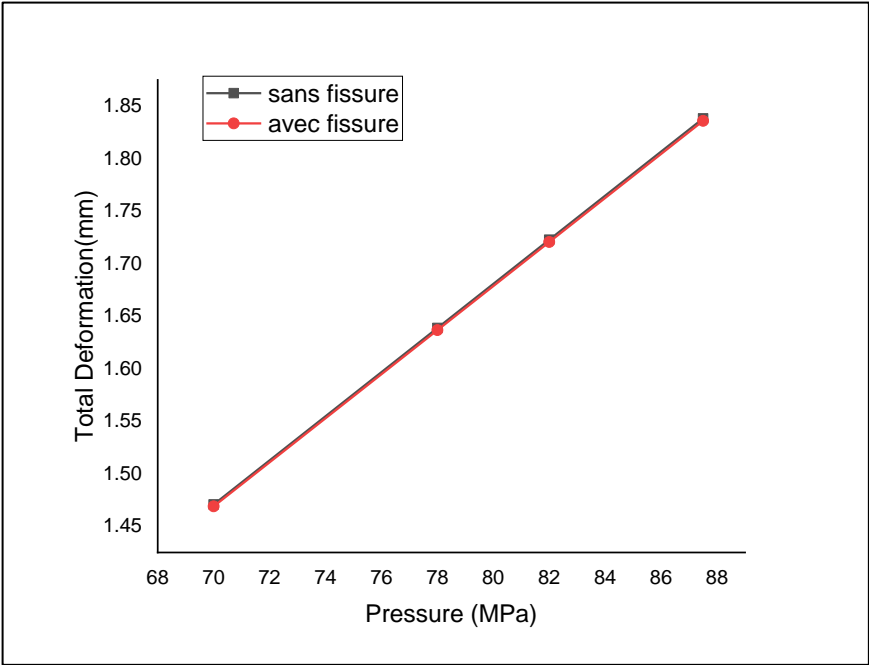
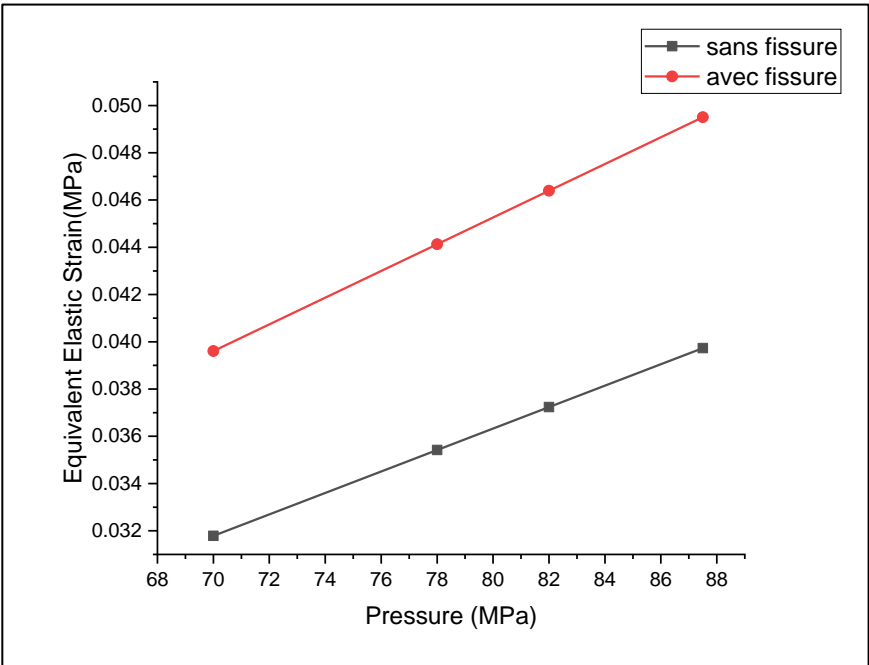
- [1] Patricia De RANGO, Jean-Louis BOBET, Dominique PERREUX>>Étude de l'influence d'éléments d'addition sur les propriétés de stockage de l'hydrogène Thèse Doctorat , l'université paris-estsoutenu le 22 septembre 2016
- [2] Crivello J.C. : Contribution à l'étude des propriétés thermodynamiques et électroniques d'hydrures de composés de Haucke. Thèse de doctorat, Université Paris Sud - Paris XI, 2005.
- [3] Said Hariri, Mansour Afzali & Haïdar Jaffal « NOCIVITE DES DEFAUTS ET PROPAGATION DE FISSURES DANS LES EQUIPEMENTS SOUS PRESSION ». Ecole des Mines de Douai 2007
- [4] Seth D.: Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System, World Watch, Paper 157, World watch Institute, Washington, article. August 2001.
- [5] Clefs CEA, 44 (2000-2001).
- [6] Germain Gondor, Pour le stockage de l'hydrogène : analyse thermodynamique de la formation d'hydrogène métallique optimisation du remplissage d'un réservoir, université de franche-comté 2008
- [7] Joubert J.-M., Cuevas F., Latroche M., Percheron G. A. : Stockage de l'hydrogène et risques, 15^{ème} Journée du CUEPE, Colloque du cycle de formation du CUEPE, L'hydrogène, futur vecteur énergétique, Genève le 13 mai 2005.
- [8] Hocine A.: Analyse et Modélisation d'une solution hybride de stockage d'hydrogène haute pression. Thèse de doctorat Juin 2008.
- [9] M M. Robert Galley et Claude Gatignol ; « Rapport sur les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible », 3 juillet 2003.
- [10] Challet, S., Stockage de L'hydrogène Dans Les Hydrures Métalliques Pour L'alimentation En Hydrogène de Véhicules À Pile À Combustible ., 2005.
- [11] Moës N. Dolbow J. Belytschko T. « A finite element method for crack growth without remeshing », IJNME 46:133- 150, 1999 .
- [12] Copyright NPROXX 2019, Réservoirs sous pression de type 4
[https://www.nproxx.com / fr / capacites / reservoirs-sous-pression-de-type-4/](https://www.nproxx.com/fr/capacites/reservoirs-sous-pression-de-type-4/)
- [13] Technique de l'ingénieur édition 2008 l'article [BM6590] et l'article [BM6592] : Baramee Patamaprohm, Conception et durabilité de réservoirs en composites destinés au stockage de l'hydrogène. L'École nationale supérieure des mines de Paris 2014.
- [14] F. Baala, N. Ouhane, Matériaux composite, université Ibn zohr-Agadir 24 mai 2018

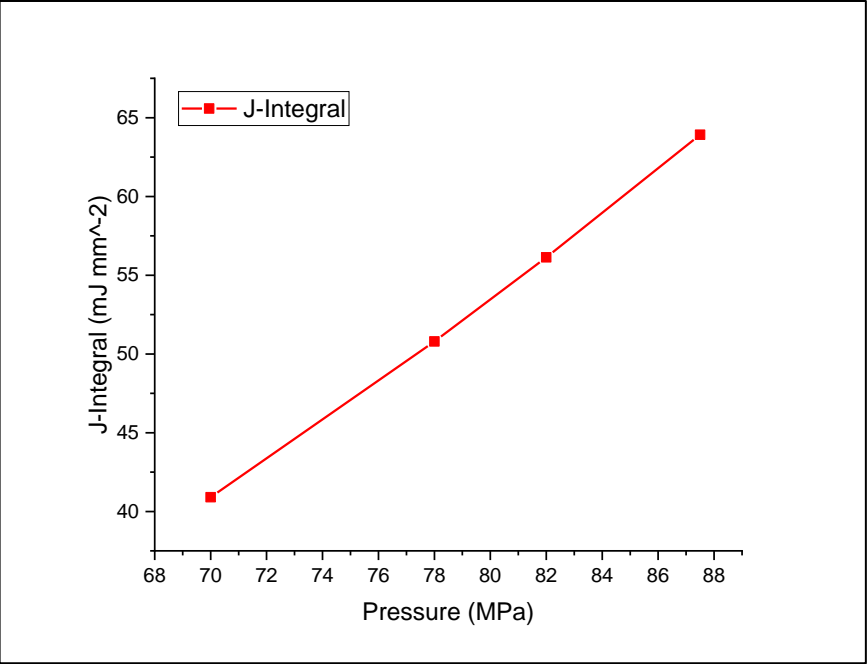
- [15] A. Cherifi, M. Cherifi, Etude technologique d'un réservoir de stockage type IV en matériaux composites université de Blida 1 2015 /2016
- [16] Commission européenne, Green Paper – Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply, 2002.
- [17] ADEME, Visions Énergie Climat 2030/2050 : Quels Modes de Vie Pour Demain ?, 2014.
- [18] CEA, L'énergie 2002, 4.
- [19] Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, Repères - Chiffres Clés de L'énergie, 2011.
- [20] Baramee Patamaprom, Conception et durabilité de réservoirs en composites destinés au stockage de l'hydrogène. L'École nationale supérieure des mines de Paris 2014.
- [21] Alleau T. : Pourquoi l'hydrogène ? In Pollutec, journal Paris, 30 novembre 2005
- [22] Germain Gondor, Pour le stockage de l'hydrogène : analyse thermodynamique de la formation d'hydrogène métallique optimisation du remplissage d'un réservoir, article. université de Franche-Comté 2008
- [23] Mori D. et Hirose K. : Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles. In Proceedings World Hydrogen Technologies Convention, Thèse .2007
- [24] Hocine A.: Analyse et Modélisation d'une solution hybride de stockage d'hydrogène haute pression. Thèse de doctorat Juin 2008.
- [25] Halm Damien; Fouillen Fabien; Laine Éric ; Gueguen Mikael; Bertheau Denis ; Van Eekelen Tom. Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and burst simulation. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (31) : p. 20056-20070
- [26] VARNA J., JOFFE R., BERGLUND L. A. , LUNDSTRÖM T. S. Effect of voids on failure mechanisms in RTM laminates. Composites Science and Technology, Vol. 53, N° 2, 02663538 (ISSN), 1995, pp. 241-249.



Annexe







الملخص
résumé
Abstract

Résumé

Le but de cette étude est de connaître les comportements mécaniques des réservoirs de voitures propres du premier type qui dépendent du stockage d'hydrogène. Le coefficient d'intensité de contrainte, qui est considéré comme le paramètre le plus influent dans la mesure de la dureté et de l'endurance des métaux.

Mots clés : véhicule propre, simulation, comportement mécanique, réservoirs de véhicules propres, stockage d'hydrogène.

Abstract

The purpose of this study is to know the mechanical behaviors of clean car tanks of the first type that depend on hydrogen storage. The stress intensity coefficient, which is considered to be the most influential parameter in the measurement of hardness and endurance of metals.

Keywords: clean vehicle, simulation, mechanical behavior, clean vehicle tanks, hydrogen storage.

الملخص

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة السلوكيات الميكانيكية لخزانات السيارات النظيفة من النوع الأول التي تعتمد على تخزين الهيدروجين، من اجل هذا سنحاول القيام بعملية محاكاة أساسها اختبار المعدن المصنوع منه الخزان بزيادة شدة الضغط الداخلي الهيدروجيني من جهة واستبدال المعدن من الالمنيوم الى الياف الكربون وسنركز في النتائج على معامل شدة الاجهاد الذي يعتبر المعامل الأكثر تأثيرا في قياس الصلابة وشدة التحمل للمعادن.

الكلمات المفتاحية: سيارات نظيفة ، محاكاة ، سلك ميكانيكي ، خزان مركبات نظيفة ، تخزين الهيدروجين