

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables

Thème

**Simulation du comportement mécanique d'un réservoir
de véhicule propre pour stockage d'hydrogène**

Devant le jury composé de :

Président : BOULIFA MED ILIASSE

Examineur : GHARBI MED TAHER

Encadreur : MEGDOUD SOUFIANE

Présenté par :

- GHARBI BACHIR

- SALHI ABDERRAHIM

-SEBBAK MED MOUSSA

2019-2020

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements tout d'abord à mon encadreur, Monsieur MEGDOUD, Soufiane . pour son suivi, sa patience, sa disponibilité, son génie qui fait qu'à sa tête ses nombreux conseils et ses critiques constructives pour l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie aussi l'ensemble de mon jury de soutenance, président et examinateur, pour le temps consacré pour lire et examiner mon mémoire, et pour leur disponibilité.

Je remercie encore ma famille, pour son soutien indéfectible, et pour m'avoir appris l'endurance, la ténacité en m'encourageant à ne jamais fléchir.

Je tiens à présenter mes sincères remerciements à travers ces lignes, aux personnes qui m'ont aidé et qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail, synonyme de concrétisation de tous mes efforts
fournis pendant ces années :*

*À mes très chers parents en témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur
dévouement, leur patience et pour tous les sacrifices qu'ils ont consenti à mon
égard, sans eux je serais jamais arrivé s'ils n'avaient pas été là pour moi. Qu'ils
puissent voir en ce mémoire la marque de ma profonde reconnaissance envers eux,
ainsi que tout mon amour.*

*À mes sœurs, que j'aime tant, que je ne remercierai jamais assez pour leurs
soutiens.*

À tous mes proches présents à mes côtés, qui m'ont soutenu lors de mon cursus.

*À la mémoire de ceux qui nous ont quittés ce monde et que j'aurais tant aimé qu'ils
soient auprès de moi dans cette étape de ma vie*

À tous mes enseignants ainsi que mes collègues de la promotion 2019.

*Sans oublier mes très chers amis qui m'ont aidé et soutenu y compris ceux que j'ai
connus durant mes années d'études.*

À tous ceux qui m'aiment et me respectent . . .

Sommaire

Dédicaces	
Remerciement	
Sommaire	
Liste des Figures et Tableaux	
Introduction général.....	1
Chapitre I : Présentation réservoir de stockage d'hydrogène comprimé	
Recherche bibliographique.....	5
I. Les énergies renouvelables.....	7
I.1 L'énergie hydraulique.....	7
I.2 L'énergie solaire.....	7
a. Le photovoltaïque.....	7
b. Chauffe-eau solaire.....	7
c. Centrale solaire à concentration.....	7
I.3 Energie éolienne.....	8
I.4 Energie géothermique.....	8
I.5 Energies de la biomasse.....	8
II. Définition d'un véhicule "propre".....	9
III. Stockage d'hydrogéné.....	12
III.1 la production d'hydrogène.....	12.
III.2 transformation d'énergie fossile.....	13
III.3 transformer l'hydrogène en énergie.....	13
a. combustion interne (ice).....	14
b. pile a combustible.....	15
III.4 les principales formes de stockage.....	14
a. Stockage gazeux.....	16
IV. types des réservoirs des véhicules.....	17
IV.1. Introduction.....	17
IV .2. Définition d'un réservoir de stockage.....	18
IV .3 Types des réservoirs de stockage.....	18
a. Réservoirs sous pression.....	19

Les réservoirs de « type I »	19
Les réservoirs de « type II »	19
Les réservoirs de « type III ».....	20
Les réservoirs de « type IV »	20
V. matériau étudié.....	21
V.1 liner.....	21
V.2 matériau composite.....	22

Chapitre II : les comportements mécaniques

I. la mécanique de la repture.....	23
I.1. Endommagement et repture du réservoir sous pression interne.....	23
I. 2 les module à la repture.....	24
II. les comportements mécaniques.....	25
II.1. Comportement au feu de réservoirs composites.....	25 a.
Interprétation	27
III. J-intégral.....	28
a. Analyse des fissures explicites	29
b. Calcul des paramètres de fracture	29
c. Prédiction et inclusion de la propagation de la fissure	29
III.2 Théorie des intégrales de contour.....	29.
III.3 Conclusion	30

Chapitre III: simulation du réservoir de stockage sous pression interne.

I: Simulation des réservoirs contient des fissurations sous pression interne De l'hydrogène.....	31
I.1. Introduction.....	31
I.2. Description du modèle.....	31
I.3. Caractéristiques des matériaux.....	32
I.3.1 Configuration du système et explication technique.....	32
I.4. Méthode d'analyse.....	32
II. Résultats et interprétations.....	33
II. 1 .La différence entre le réservoir type I. et le réservoir type II. sous l'influence de différentes pressions.....	33

II.2. Méthode J-intégral appliquée.....	37
II.2.1. Description de la fissure.....	37
II.2.2. Conclusion.....	44
Conclusion générale	
Références bibliographiques	
Résumé	

Liste des Figures

<i>Figures</i>	<i>Pages</i>
Chapitre I	
Figure I.1 : véhicule “propre”.....	11
Figure I.2 : Les différents type de production de l’hydrogène.....	12
Figure I.3 :, moteur et stockage cryogénique	13
Figure I.4 : Pile à combustible :	14
Figure I.5 : Capacités volumique et gravimétrique de candidat réel ou potentiel au stockage de l’hydrogène,	15
Figure I.6 : Les réservoirs de « type I »	19
Figure I.7 : Les réservoirs de « type II ».....	19
Figure I.8 : Les réservoirs de « type III ».....	20
Figure I.9 : Les réservoirs de « type IV ».....	20
Figure I.10 : Présentation des types de réservoir de stockage d’hydrogène Comprimé.....	21
Chapitre II	
Figure II.1 : Fissuration transverse observée dans une éprouvette bobinée $\pm 45^\circ$ du matériau après un essai de traction.....	24
Figure II.2 : trois modules à la repture	24
Figure II.3 : de stockage d’hydrogène sous pression.....	26
Figure II.4 : Evolution de la pression interne - Influence de la pression initiale.	27
Figure II.5 : Le débit de charge est de 100 kW / m ²	28
Figure II.6 : : Contour d’intégration.....	30
Chapitre III	
Figure III.1 : plan du liner.....	31
Figure III.2 : plan d’une embase.....	31
Figure III.3 : Liner Métallique avec un renforcement circonférentiel en composites.....	32
Figure III.4 : Le réservoir composite carbone.....	32
Figure III 5 : Résultat de déformations type I. 150 bar	33
Figure III 6 : Résultat de déformations type I. 300 bar	33

Figure III 7 : Résultat de déformations type I . 450 bar	34
Figure III 8 : Résultat de déformations type I . 700 bar.....	34
Figure III.9 : Directionnel Déformation type I (X.Y.Z.) Axis.....	34
Figure III.10: Résultat de déformations type II . 150 bar	35
Figure III.11: Résultat de déformations type II 300 bar	35
Figure III.12: Résultat de déformations type II . 450 bar	36
Figure III.13: Résultat de déformations type II 700 bar.....	36
Figure III.14 : Directionnel Déformation type II (X.Y.Z.) Axis	37
Figure III.15 : Fissure représentée sous forme de segments.....	37
Figure III16 : Crack sur le réservoir.....	38
Figure III.17 : Courbe Maximum Principal Stress.....	38
Figure III.18 : Facteur d'intensité de contrainte k_I au voisinage de la fissure	39
Figure III.19 : Facteur d'intensité de contrainte par rapport au propagation de fissure en Mode 1	40
Figure III.20 : Facteur d'intensité de contrainte par rapport au propagation de fissure en Mode 2.....	40
Figure III.21: Facteur d'intensité de contrainte par rapport au propagation de fissure en Mode 3.....	41
Figure III.22: Courbe de contrainte en fonction de la déformation type 1.....	41
Figure III.23: Courbe de contrainte en fonction de la déformation type 2.....	42

Liste des Tableaux

<i>Tableaux</i>	<i>Pages</i>
<i>Chapitre I</i>	
Tableau I.1 : Les différents types de réservoirs gazeux.....	16
Tableau I.2 : Comparaisons entre stockage solide, stockage gazeux et stockage hybride/solide/gazeux.....	17
Tableau I.3 : Propriétés du liner métallique.....	21
Tableau I.4 : Propriétés du composite	22
<i>Chapitre III</i>	
Tableau III.1 : Propriétés du matériel.....	32
Tableau III.2: Contrainte et Déformation type 1.....	42
Tableau III.3: Contrainte et Déformation type 2.....	43

Introduction générale

Introduction générale

Les véhicules propres :

En pratique, il n'existe aucun véhicule absolument propre. Tous, y compris ceux utilisant la force humaine ou animale (vélo, skate, calèche), émettent des polluants et des gaz à effet de serre lors de leur fabrication, de leur utilisation et de leur fin de vie.

- La fabrication du véhicule lui-même emploie une importante énergie grise et de nombreuses ressources. Par exemple, l'acier des carrosseries et du moteur nécessite une industrie sidérurgique lourde, qui reste parmi les premiers responsables des émissions de CO₂ ; la fabrication de l'aluminium, des céramiques ou de la fibre de carbone consomme une énergie considérable ; les plastiques proviennent essentiellement du pétrole, etc.
- La fabrication des batteries au lithium fait appel à des procédés d'extraction 1 émetteurs de CO₂ et pose des problèmes environnementaux³ : libération de dioxyde de soufre et de chlore⁴ dans les cours d'eau, excavations ou effondrements des surfaces, réquisition de terrains (tels les sites protégés et touristiques des salars d'Uyuni et d'Atacama).
- Les vecteurs énergétiques (électricité, hydrogène, etc.) 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 (population, agriculture, écosystème, etc.).

Cette pollution se manifeste à différents niveaux géographiques: -Local (urbain): émissions de monoxyde de carbone et de composés organiques volatils (dont %40de substances aromatiques comme le benzène), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les molécules Exprimé en fonction de ses différentes parties (PM₁₀, PM_{2.5}, ...). -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]

La sécurité des véhicules propres :



Risques spécifiques :

L'emploi de l'hydrogène, comme tout vecteur énergétique, comporte des risques. Les moyens de prévention et de maîtrise de ces risques dépendront de la configuration concrète de mise en œuvre ou d'emploi de ce gaz : type d'équipements, environnement d'usage, contraintes et sollicitations externes... Le présent guide s'intéresse spécifiquement aux véhicules équipés de pile à hydrogène et aux stations-service délivrant de l'hydrogène. Le volet production d'hydrogène fait l'objet d'un autre guide d'information. En cas de fuite, l'hydrogène présente des risques spécifiques de différents niveaux de criticité. Dans le cadre de déploiement de stations et de flottes de véhicules, on peut considérer des risques de niveaux de criticité élevés (incendie, explosion) et des risques de niveaux de criticité a priori faibles (anoxie, risque acoustique, risque cryogénique). Les fuites peuvent être la conséquence de divers phénomènes : raccords défailants, perméation, dégradation des matériaux sous l'effet de l'hydrogène. Celui-ci peut en effet réagir avec certains matériaux (aciers, polymères) de par sa nature chimique, sa petite taille et son fort coefficient de diffusion qui peuvent conduire à plusieurs phénomènes :

- Diffusion dans les polymères.
- Fragilisation du métal : dissociation du dihydrogène et transport des atomes d'hydrogène par l'intermédiaire de défauts de structure du métal (dislocation) puis recombinaison, mais pas forcément 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 faire des poches de méthane. Toutefois, ces phénomènes sont bien connus et pris en compte par les industriels, qui utilisent de l'aluminium, de l'acier faiblement allié ou inoxydable et des matériaux polymères adaptés pour la distribution et le stockage du gaz. Le cas de la fuite due à une rupture d'un flexible d'hydrogène sous pression est abordé dans le chapitre consacré aux stations de distribution "Les véhicules à hydrogène sont des véhicules homologués à l'instar des véhicules similaires dotés d'un autre mode de propulsion. Il n'y a pas de restriction d'usage par rapport aux autres véhicules, en matière d'accès à la chaussée publique. Un tel véhicule possède une carte grise obtenue en préfecture, et qui mentionne simplement que son carburant est l'hydrogène. De même, ces véhicules sont assurés auprès des compagnies au même titre et dans les mêmes conditions que des véhicules thermiques, hybrides, électriques à batteries. Ils ne sont pas considérés par les assureurs comme des véhicules à risque spécifique".[6]

➤ **Principes généraux dans la conduite de projets de mobilité hydrogène :**

✓ **Prendre en compte la sécurité dès le départ :**

Comme dans toute opération impliquant un objectif de maîtrise des risques, le management par la sécurité doit être exhaustif et cohérent. Il comporte les composantes suivantes :

- la définition du risque acceptable par rapport à l'objectif de sécurité ;
- les textes existants : réglementations, directives, guides de bonnes pratiques et normes ;
- les études à conduire ;
- la formation des personnels ;
- les services d'intervention ;
- la politique de maintenance.

La sécurité d'un équipement s'inscrit dans une démarche de sûreté de fonctionnement tout au long du cycle de vie du système, y compris dans le produit utilisé par l'utilisateur. Cette démarche se fait au travers de différents outils. Elle a pour objectif de contrôler les défaillances. L'essentiel des études de sûreté de fonctionnement sont réalisées pendant la phase de conception du système. Cette partie est de la responsabilité de l'industriel fournissant l'équipement, mais il appartient à l'utilisateur ou maître d'ouvrage d'exiger toutes les preuves de bonne conception. Les constructeurs de véhicules à hydrogène «Lors du remplissage du réservoir à la station de ravitaillement, le système de batterie est arrêté et aucun hydrogène n'est introduit dans le circuit basse pression. L'hydrogène est introduit dans le réservoir par un tube spécifique équipé d'un antagoniste, l'hydrogène ne peut circuler que de la station au réservoir du véhicule. Le remplissage du réservoir peut être arrêté. Automatiquement lorsqu'il est plein par pressostat (capteur de pression) ou par communication entre véhicule et station. Lorsque le réservoir est plein, un signal à l'opérateur indique qu'il peut ouvrir la vanne et retirer la mise à la terre. C'est l'automate de la station qui gère la vitesse de remplissage du réservoir du véhicule selon les protocoles définis. Ces protocoles de remplissage ont été établis afin de maîtriser les phénomènes physiques liés au transport rapide du gaz comprimé. A la fin du remplissage, l'hydrogène restant dans le tuyau de remplissage du pistolet est évacué vers l'orifice de ventilation de la station de remplissage. Sur certains véhicules (Renault Kangoo H2, Hyundai ix35 par exemple) , si la trappe n'est pas fermée correctement, la voiture ne peut pas démarrer. «Les accidents enregistrés dans les stations hydrogène sont peu nombreux à l'heure actuelle, principalement liés à des problèmes organisationnels et humains, et ils n'ont pas eu de conséquences humaines».

***Chapitre I : Présentation
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. 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. 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.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 CO₂.

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.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.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.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).

II. 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 notre 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].

III. Stockage d'hydrogène :

III.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. Ce sont les atomes d'oxygène à l'état de l'eau, nous faisons donc l'électrolyse. Elles sont des 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 principales productrices 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].

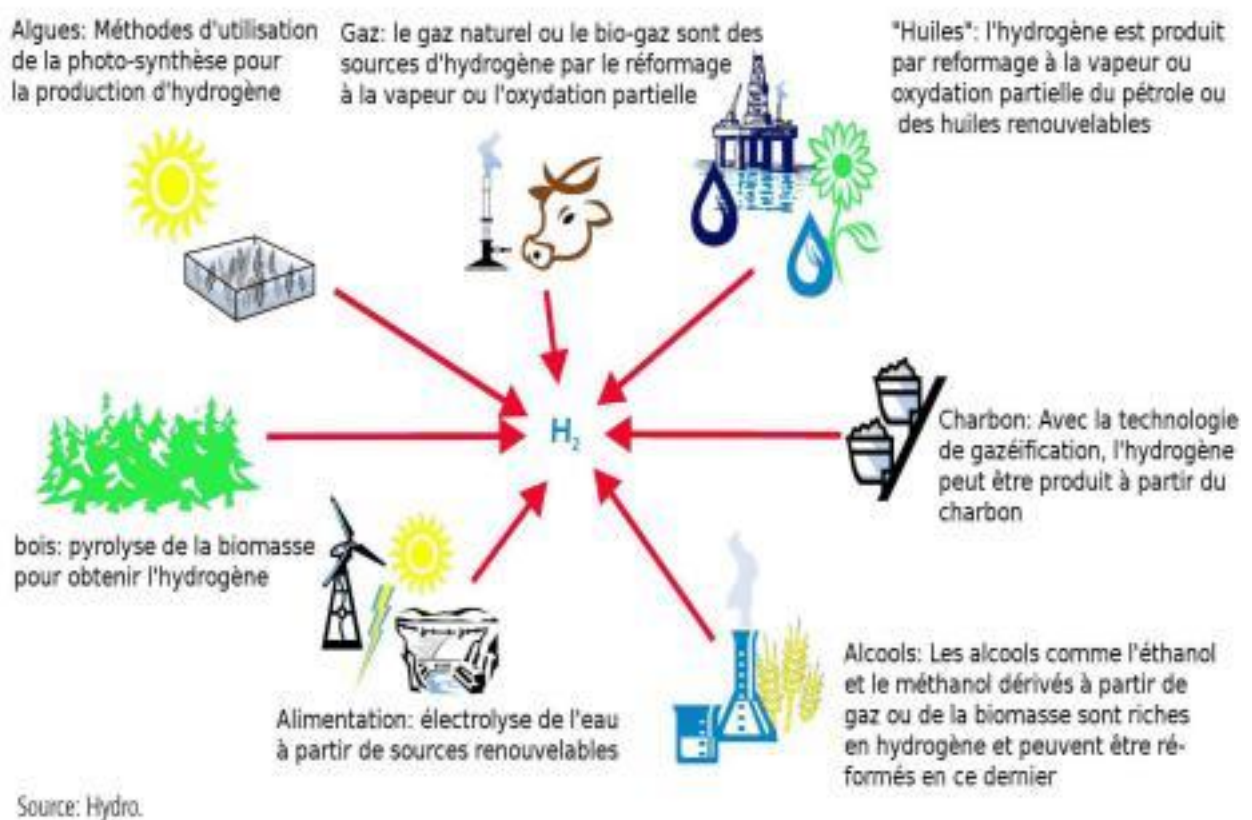


Fig I.2: Les différents types de production d'hydrogène.[1]

III. 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]

III.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)



(a) Ingolstadt, StorHy, Sep. 2006



(b) Implantation d'un stockage cryogénique couplé à un moteur à combustion interne [7]

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 :

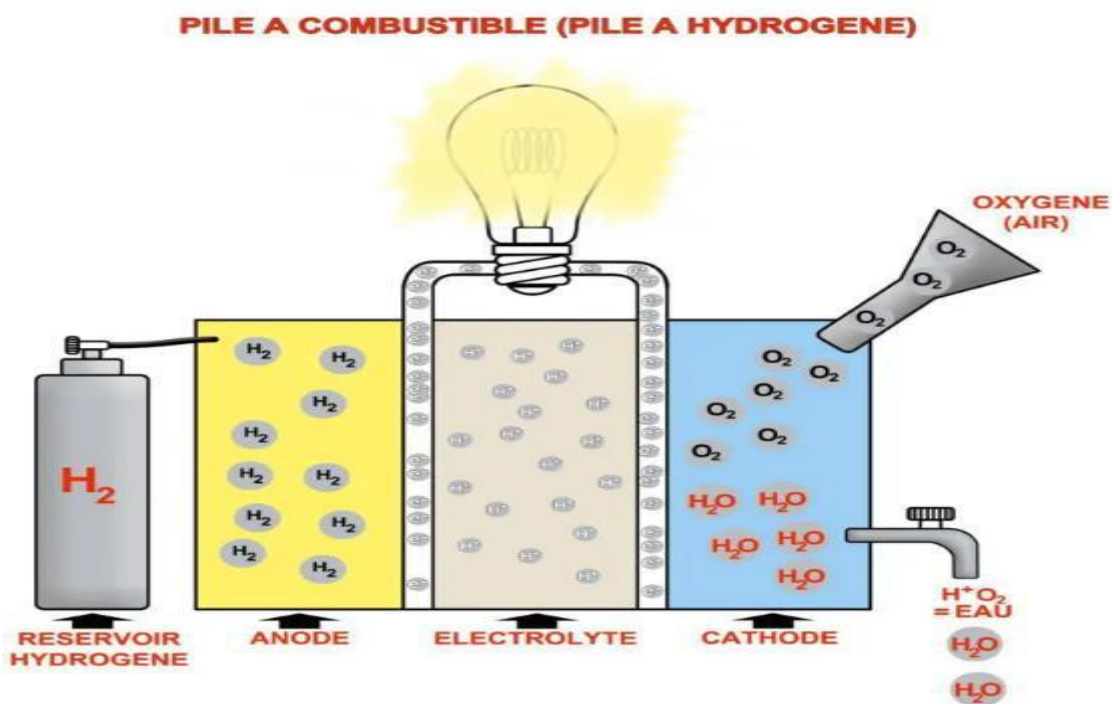


Fig I.4: Pile à combustible [8.9]

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».

III.4 .Les principales forment 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

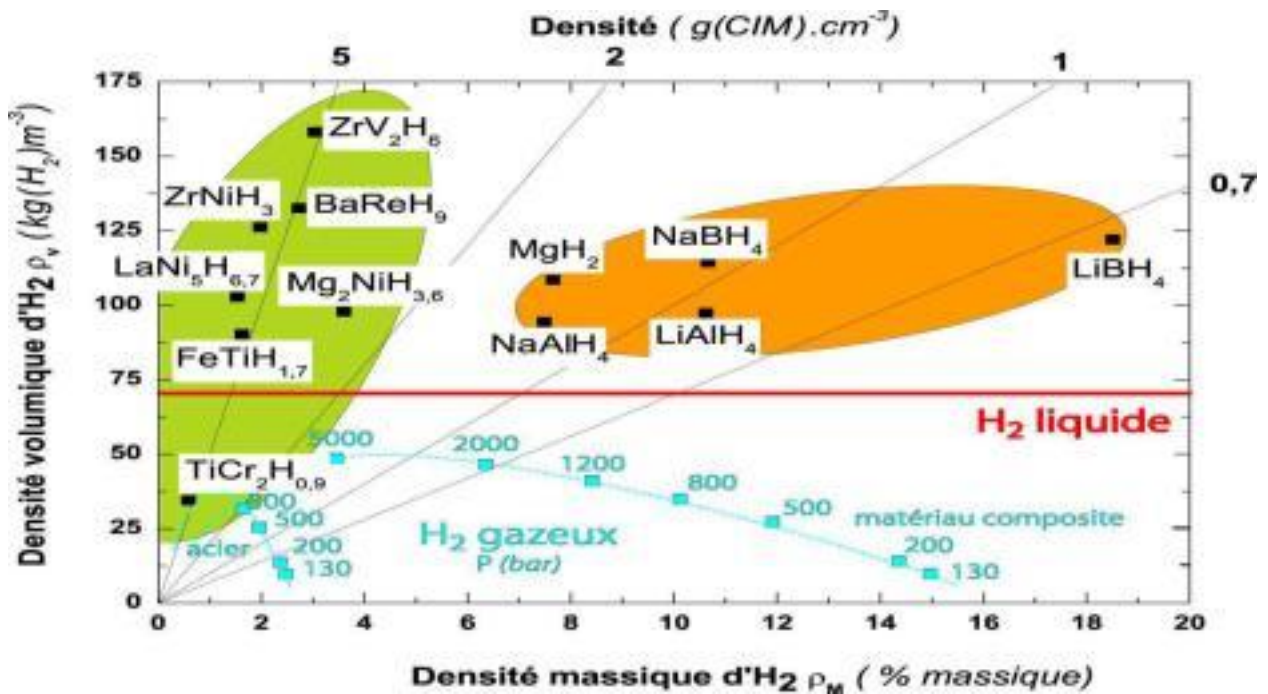


Fig I.5: Capacités volumétriques et gravité du filtre réel Pour stocker l'hydrogène [2]

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 :

Tab I .1: Types de réservoirs d'hydrogène [13].

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			
Type	IV	réservoir constitué d'une enveloppe non métallique pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continue			
Type		I	II	III	IV
Schéma					
Réalisation					

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: La différence entre le stockage solide, le stockage de gaz et le stockage hybride Solide / gaz [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 Egale au réservoir haute pression
Sécurité	Basse pression (<10 bar)	Haute pression (350 bar)	Haute pression (350 bar)

IV. Types des réservoirs des véhicules :

IV.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

IV.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).

IV.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 :

- 1- Réservoirs à toit fixe ;
- 2- Réservoirs à toit flottant externe ;
- 3- Réservoirs à toit flottant interne ;
- 4- Réservoirs à toit flottant externe en forme de dôme ;
- 5- Réservoirs horizontales ;
- 6- Réservoirs sous pression ;
- 7- 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 au-dessus 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 a 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 maxima les de stockage sont limitées à 300 bar [13].

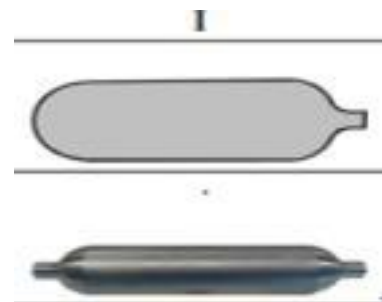


Fig I.6: réservoirs type .

- **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].

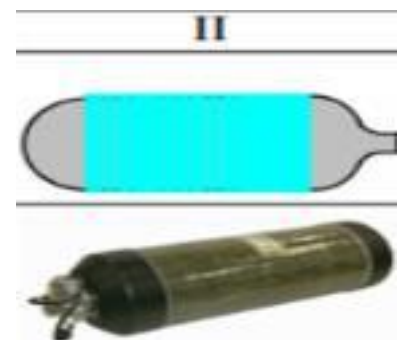


Fig I.7:: réservoirs type

- **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].

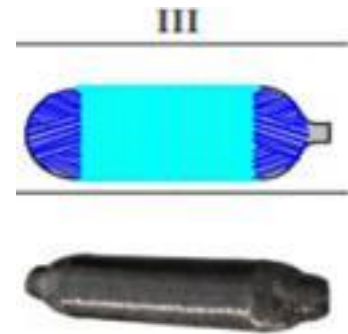


Fig I.8: réservoirs type

- **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 pas 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 avancée



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].

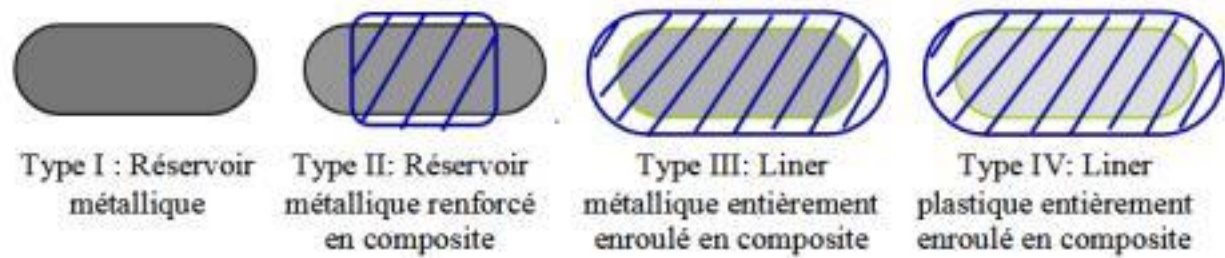


Fig I.10: Présentation des types de réservoir de stockage d'hydrogène comprimé

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.

V. Matériau étudié :

V.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 1.

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

V.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}	ν_{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***

I.LA Mécanique de la repture :

L'objectif de la mécanique de la repture est de caractériser le comportement à la fissuration des structures à l'aide de paramètres quantifiables au sens de l'ingénieur, notamment le champ de contraintes, la taille de la fissure et la résistance à la fissuration du matériau.

Les premiers développements théoriques d'analyse des champs de déplacements, déformations et contraintes au voisinage d'une fissure ont été entrepris par Westerwald vers 1940. L'extension de la discipline a été amorcée par Irwin vers 1960. Depuis cette date, le développement de la mécanique de la repture s'étend aux problèmes non linéaires matériellement et géométriquement, aux problèmes de bifurcation des fissures en modes mixtes et plus récemment aux composites, aux techniques numériques de résolution et à l'état de l'art relatif au dimensionnement de diverses structures complexes. [20]

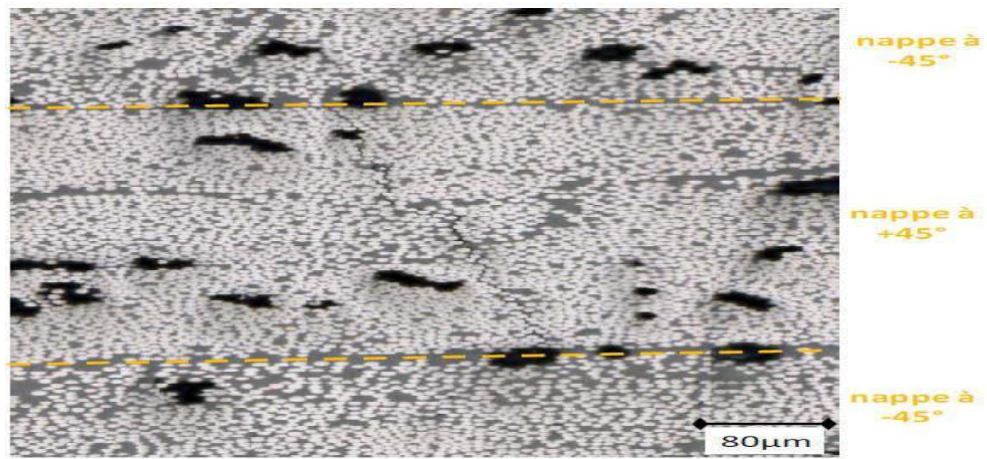
I.1. Endommagement et repture du réservoir sous pression interne :

L'endommagement du réservoir composite a lieu naturellement lors de son chargement sous pression interne. L'hétérogénéité de la structure fait que la morphologie des défauts dépend principalement de l'arrangement des constituants 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

Nous avons pu observer l'ensemble de ces endommagements sur des éprouvettes bobinées réalisées avec le même matériau que celui constituant 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]

I. 2. les modules à la repture:

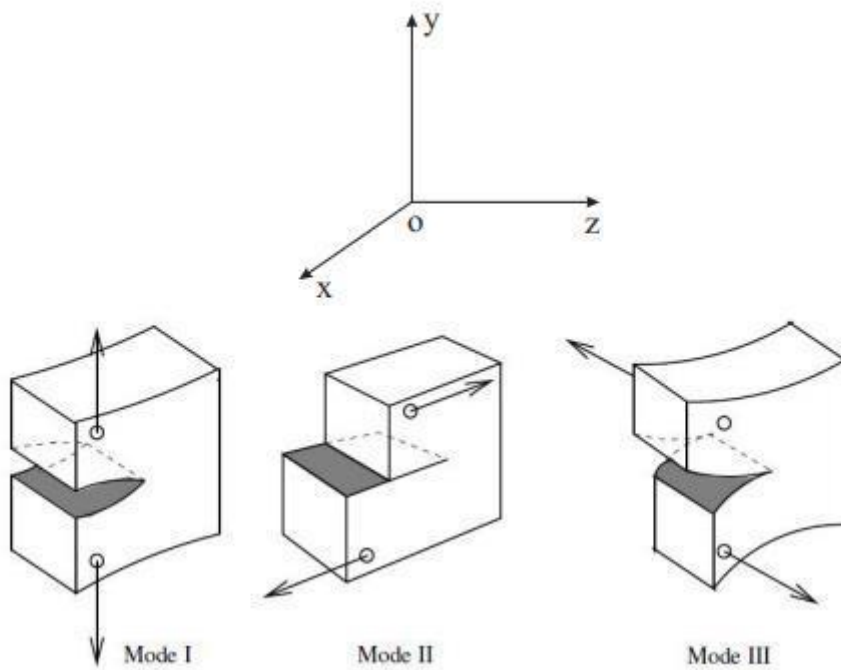


Fig II.2 : trois modules à la repture [14]

- **Mode I** : un déplacement unique suivant Oy correspond à un problème plan particulier, désigné par le mode I. Ce mode est, le plus souvent, le plus dangereux. Il s'apparente au déplacement produit par une dislocation rectiligne coin parallèle au front de la fissure.
- **Mode II** : il est engendré par un cisaillement dans le plan de la fissure et parallèle à l'axe Ox . Il s'apparente au déplacement produit par une dislocation rectiligne coin parallèle au front de la fissure.
- **Mode III** : il est produit par un cisaillement antiplan, situé dans le plan de la fissure Oxz parallèle à l'axe Oz . Il s'apparente au déplacement produit par une dislocation vis parallèle au front de la fissure. Ce dernière mode est résolu par une représentation 3D anti-plane, tandis que les deux précédents sont résolus par une analyse 2D en contrainte ou en déformation plane.

II. Les comportements mécanique :

II. 1. Comportement au feu de réservoirs composites :

de stockage d'hydrogène sous pression L'utilisation de l'hydrogène à grande échelle, et notamment pour les véhicules, nécessite de maîtriser la fiabilité de stockage de ce gaz à très haute pression. 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. Objectifs et méthode L'un des objectifs du projet FireComp était de générer des données expérimentales permettant de comprendre le comportement des bouteilles Composites sous pression lorsqu'elles sont [12]

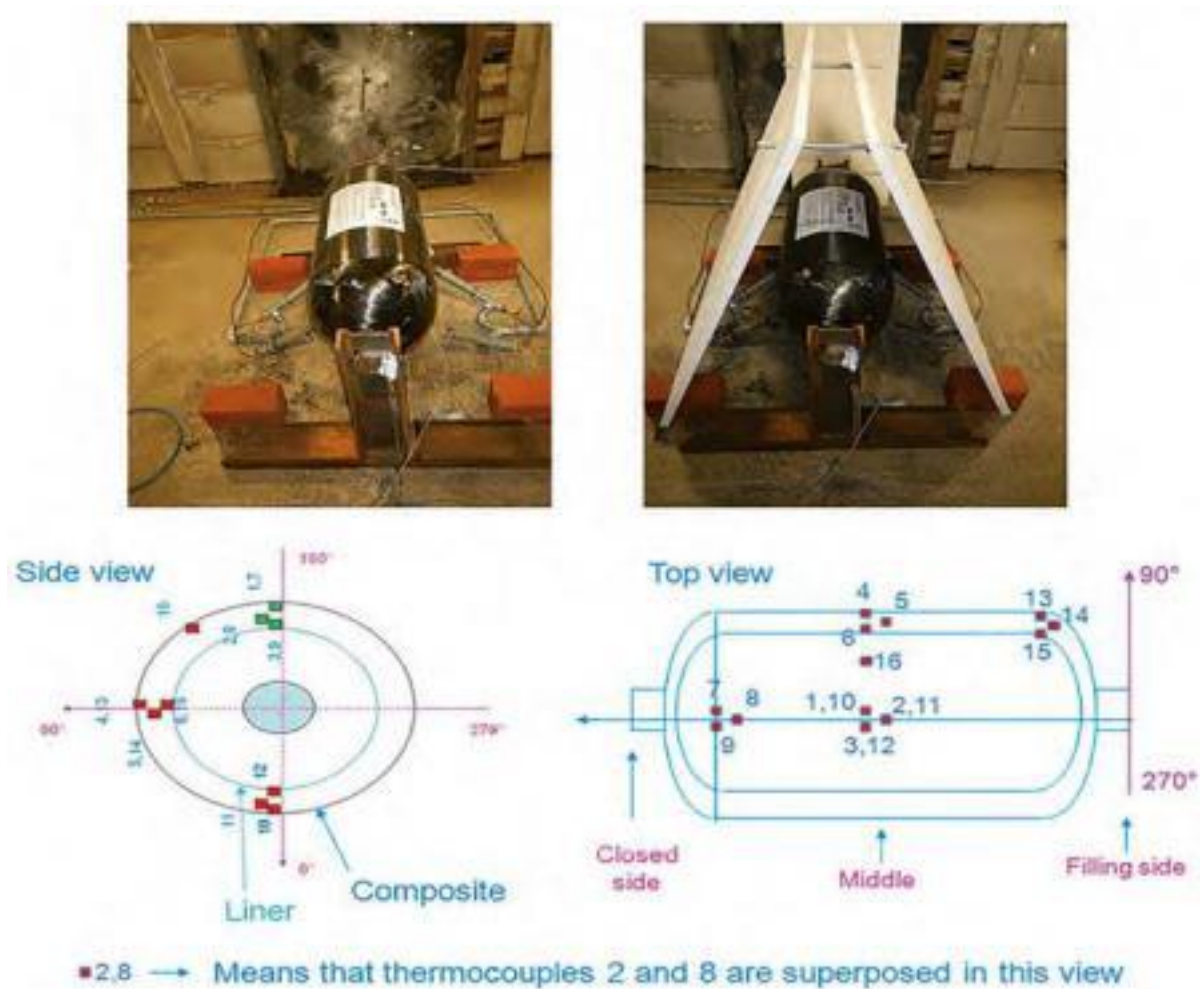


Fig II.3 : de stockage d'hydrogène sous pression

soumises à un incendie et de valider des modèles thermomécaniques développés. À cette fin, l'Ineris a conduit une campagne expérimentale à grande échelle en deux étapes, sur des bouteilles sous pression. La première étape a consisté à déterminer les conditions d'incendie à retenir pour réaliser les tests. Ces conditions doivent être représentatives des situations accidentelles et correspondre aux scénarios les plus défavorables en regard de la vulnérabilité présumée au feu des bouteilles. Ces essais préliminaires ont été réalisés avec un cylindre en acier de mêmes dimensions qu'une bouteille d' H_2 , instrumenté afin de déterminer le flux de chaleur incident et d'enregistrer des données expérimentales utiles à comparer aux résultats de la modélisation. La configuration qui assure une répartition homogène de l'énergie autour de la bouteille a été retenue : utilisation de quatre injecteurs (débit d'hydrogène de 1,5 g/s et débit d'oxygène de 0,5 g/s par injecteur) [12].

a. Interprétation :

Ces tests ont permis de déterminer une stratégie de décompression, qui permettait de maintenir la bouteille sous une pression interne qui ne conduirait pas à une explosion. Pour les essais avec une pression initiale de 700 et 525 bars, l'éclatement se produit après 238 s et 311 s, respectivement. En revanche, aucune explosion n'a été observée dans les essais à basse pression initiale (250 et 100 bars), mais une chute de pression progressive a été mise en évidence (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. Les simulations devraient également être élargies pour inclure de vrais cas 3D afin de traiter des configurations d'incendie spécifiques (effet spot, flux appliqué hétérogène, cylindres partiellement blindés, etc.).

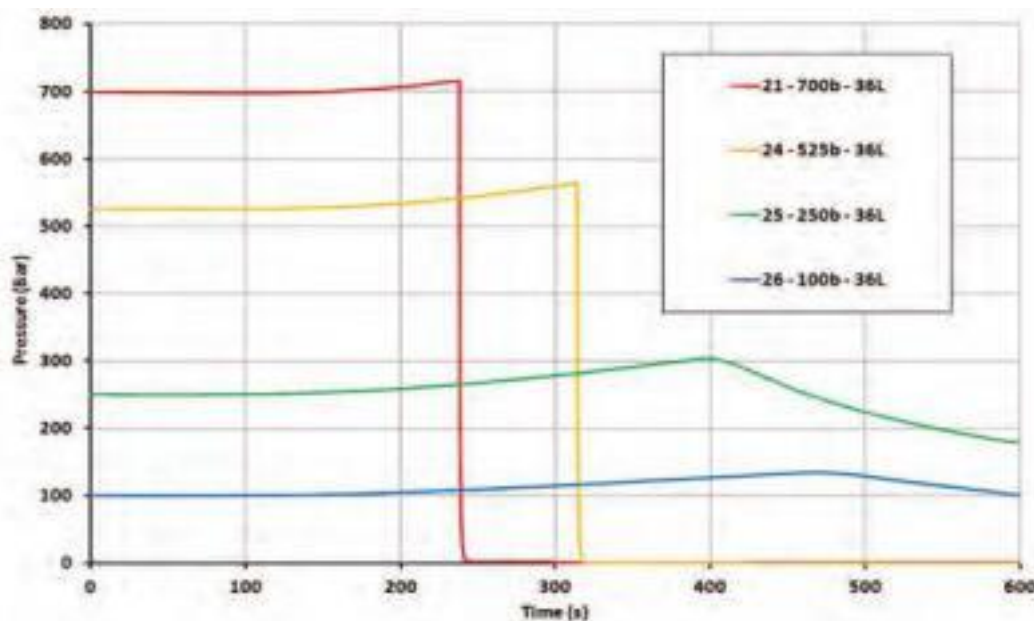


Fig II.4 : Evolution de la pression interne - Influence de la pression initiale. [12]

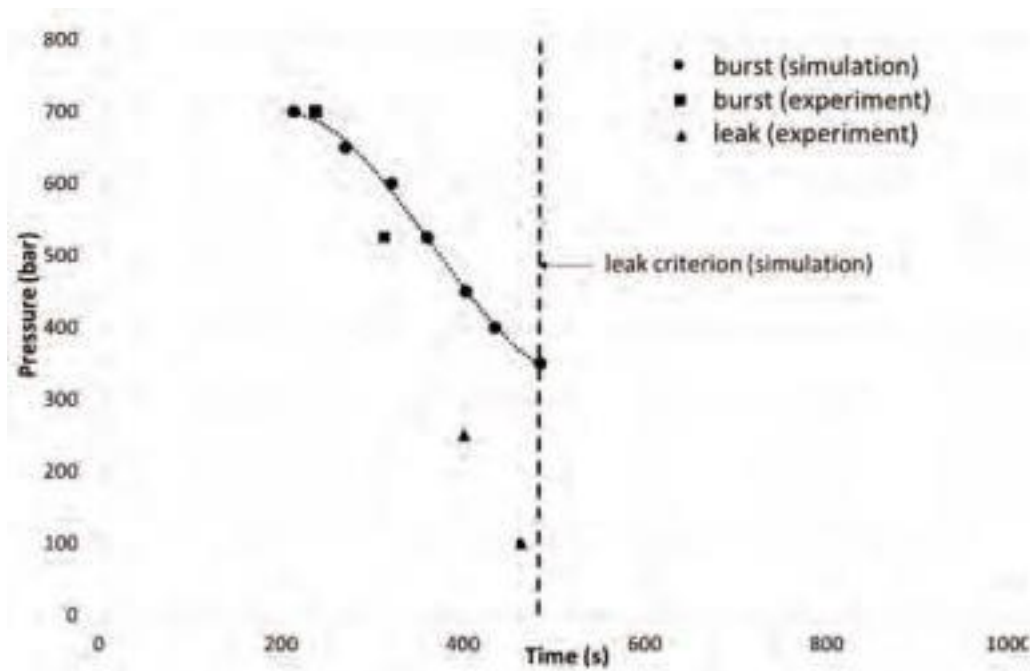


Fig II.5 : Le débit de charge est de 100 kW / m². [12]

III .J-intégral :

III.1. Introduction :

J-Intégral représente une méthode de calcul du taux de libération des contraintes ou de l'énergie de travail (Énergie) par unité de surface de fissure dans le matériau. Le concept théorique de J-Intégral a été développé par G.P. Tcherpanovo Solo dans Ère des années 1960, le total J a été calculé en examinant l'élasticité et la plasticité Séparément et sont exprimés dans les équations suivantes lorsqu'elles sont une somme La croissance de l'incision ductile est inférieure à 10% du ligament primaire restant :

J_e = elastic part of the J-integral

J_p = plastic part of the J-integral

J_{p0} = plastic part of the J-integral without crack growth correction Mais le problème se divise en trois problèmes distincts qui peuvent être résolus indépendamment :

a. Analyse des fissures explicites:

Le premier problème est de développer des méthodes numériques permettant d'évaluer les contraintes et les déplacements autour de fissures explicites.

b. Calcul des paramètres de fracture:

Une fois que l'analyse explicite des fissures est possible, chaque méthode numérique a besoin d'une technique pour évaluer les paramètres clés du fond de fissure tels que l'intégrale J, le taux de libération d'énergie, les facteurs d'intensité de contrainte ou divers autres appuis de fissure locaux

c. Prédiction et inclusion de la propagation de la fissure :

Une fois que les paramètres du fond de fissure sont disponibles, la prochaine question est de prédire quelles conditions sont requises pour la propagation de la fissure et dans quelle direction la fissure se propagera. Ce problème est un problème de science des matériaux et ne dépend pas de la méthode numérique particulière choisie pour l'analyse. Pour qu'une méthode numérique particulière soit efficace, elle doit cependant être capable de modéliser la propagation des fissures dans des directions arbitraires et de poursuivre l'analyse à mesure que la fissure se développe[10]

III.2 Théorie des intégrales de contour :

L'analyse linéaire flexible d'une structure fissurée nous a conduit à présenter les coefficients K. Une autre façon de caractériser l'unicité du champ de contraintes au voisinage de l'extrémité de la fissure est d'étudier des intégrales de contour spécifiques qui peuvent être déduites pour la loi de conservation de l'énergie. On dit souvent que cette méthode de traitement des problèmes de mécanique de la rupture est une méthode indirecte par rapport à l'approche locale présentée après l'agrandissement des fissures. Parmi tous. Les intégrations de contour, les intégrations Rice J et les intégrations Bui I sont les plus connues...

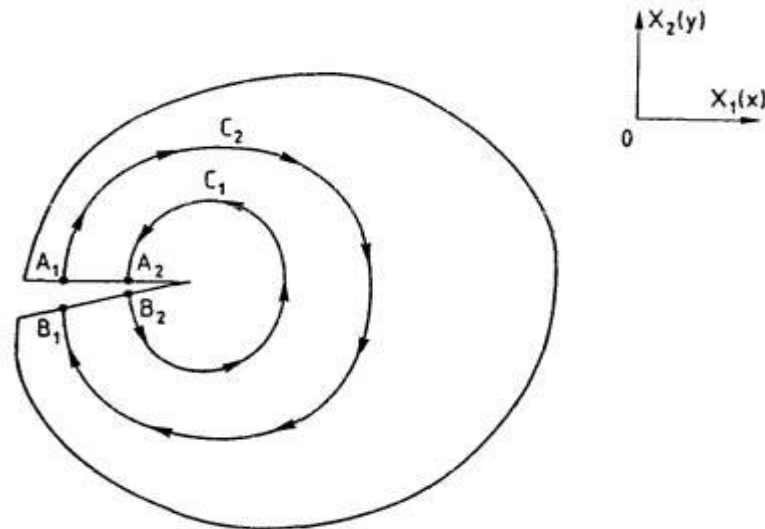


Fig II.6 : Contour d'intégration [11]

III.3 . Conclusion :

, on a établi une expression analytique pour la vitesse de relaxation de l'énergie et on l'a mise sous une forme convenable pour une analyse numérique de configurations de fissures arbitrairement à trois dimensions. La méthode d'extension virtuelle de la fissure est celle qui convient le mieux pour un tel traitement. Cette méthode a été, à l'origine, développée à partir de considérations d'éléments finis et les expressions qui en résultaient ont dès lors été basées sur une formulation de matrice d'éléments finis. Dans le présent mémoire, la dérivation de la vitesse de relaxation de l'énergie conduit à une expression indépendante de toute procédure numérique spécifique. La formulation est applicable au comportement général à la rupture comprenant des ruptures non coplanaires et des lèvres de cisaillement, et s'applique à des matériaux aussi bien élastiques que redevables de la théorie des déformations en plasticité. On tient compte également de l'effet des forces appliquées sur un corps. Dans le cas de problèmes de rupture à trois dimensions, il est avantageux d'utiliser à la fois une forme moyenne et une forme locale de taux de relaxation d'énergie et l'on suggère des définitions pour ces deux formes. Dans le cas de certaines restrictions relatives à la géométrie de la fissure, on montre que le taux de relaxation de l'énergie se ramène à une expression générale à trois dimensions de l'intégrale J.

***Chapitre III: simulation du
réservoir de stockage sous
pression interne.***

I: Simulation des réservoirs contient des fissurations sous pression interne de l'hydrogéné :

I.1. Introduction :

Les réservoirs de stockage sont des éléments de structures industrielles dont les avaries entraînent des risques pour des vies humaines et l'environnement écologique associé à des pertes d'exploitation avec souvent un préjudice financier qui peut être considérable. La présence d'une fissure dans un équipement sous pression nécessite, pour des raisons de sécurité évidentes, de connaître de manière précise son degré de nocivité. Le réservoir de stockage des gaz contenant une fissure longitudinale (mode I de la rupture) est sollicitée à une pression interne. La modélisation numérique par le code commercial Ansys d'un milieu fissuré permet d'une part de caractériser la singularité du champ de contrainte au front de fissure. D'autre part, ce paramètre gouverne la fissuration permettant également de prévoir la révolution de la fissure jusqu'à la ruine de la structure. La réparation des fissures microscopiques par collage de patch en matériau composite a confirmé son efficacité pour diminuer l'intensité des contraintes aux points des fissures. La géométrie dimensionnelle du patch joue un rôle nécessaire dans la distribution des concentrations de contrainte aux voisinages et au front de fissure.

I.2. Description du modèle :

Metallique Type I

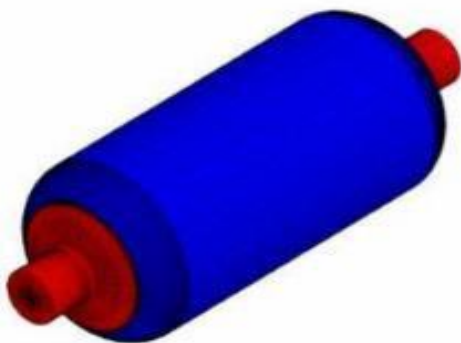


Fig III.1 : plan du liner

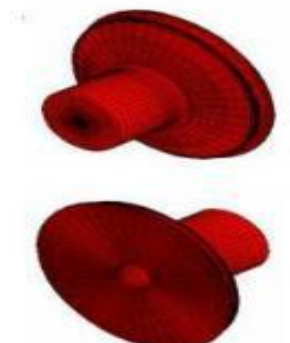


Fig III.2 : plan d'une embase

Métallique avec un renforcement circonférentiel en composites Type II

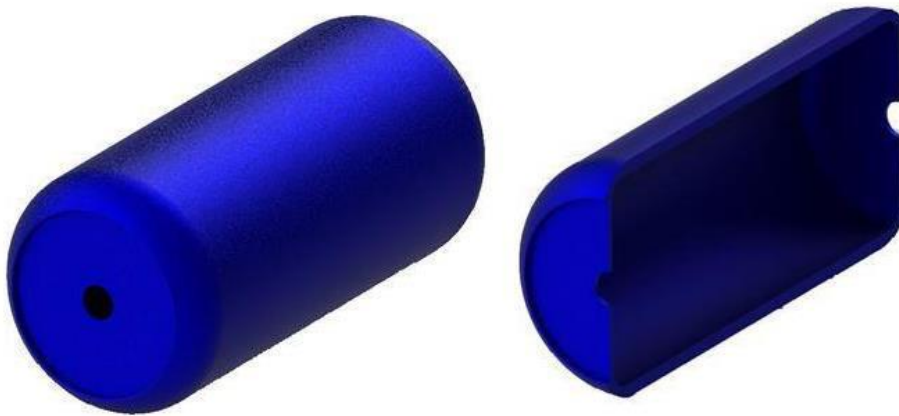


Fig III.3 : Liner Métallique avec un renforcement circonférentiel en composites

I.3. Caractéristiques des matériaux :

Les propriétés physiques sont illustrées dans le tableau suivant :

Tab III .1: Propriétés du matériau

Composite: Carbon-epoxy (T800-epoxy)			
E_1 (GPa)	161.74	E_2, E_3 (GPa)	9.5
ν_{12}, ν_{13}	0.33	ν_{23}	0.43
G_{12}, G_{13} (GPa)	4.57	G_{23} (GPa)	3.1
X_t (MPa)	2579.39	Y_t (MPa)	24.8
S (MPa)	73.13		
Liner: Aluminum (Al6061-T6)			
E (GPa)	68.26	ν	0.33

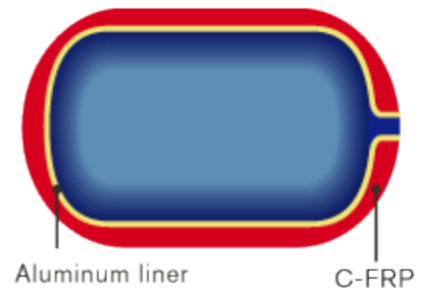


Fig III.4 : Le réservoir composite carbone

I.3.1 Configuration du système et explication technique :

Le réservoir de stockage d'hydrogène haute pression de 70 MPa se compose d'une doublure intérieure en aluminium et d'une couche extérieure en plastique renforcé de fibre de carbone (C-FRP). La couche C-FRP utilise une fibre de carbone haute résistance et haute élasticité avec un motif d'enroulement conçu de manière optimale. Cela permet d'obtenir une résistance suffisante pour résister à une pression élevée de 70 MPa.

I.4. Méthode d'analyse :

Cette analyse est basée sur une formulation conservatrice de la rupture en considérant le matériau comme étant linéairement élastique avec un champ de contraintes à la pointe d'une fissure qui est une discontinuité présentant un rayon nul ou une acuité infinie. Les composants des contraintes peuvent être présentés comme la somme de termes singuliers et réguliers

$$\sigma_{ij} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) + F_{ij}; \quad i,j = x,y,z$$

(r,θ,z) et (x,y,z) ce sont des systèmes de coordonnées polaires et cartésiennes affectés à la pointe de la fissure ; f_{ij} fonction correspond à l'angle θ ; F_{ij} :est la somme des membres réguliers des contraintes de la structure sous l'effet des pressions lointaines. K_1 facteur d'intensité de contraintes.

II. Résultats et interprétations :

II. 1 .La différence entre le réservoir type I. et le réservoir type II. sous l'influence de différentes pressions:

Type I: cuve en acier entièrement en aluminium métallique utilisée pour stocker des liquides et des gaz destinés aux procédés industriels. Peu coûteux à produire, mais lourd.

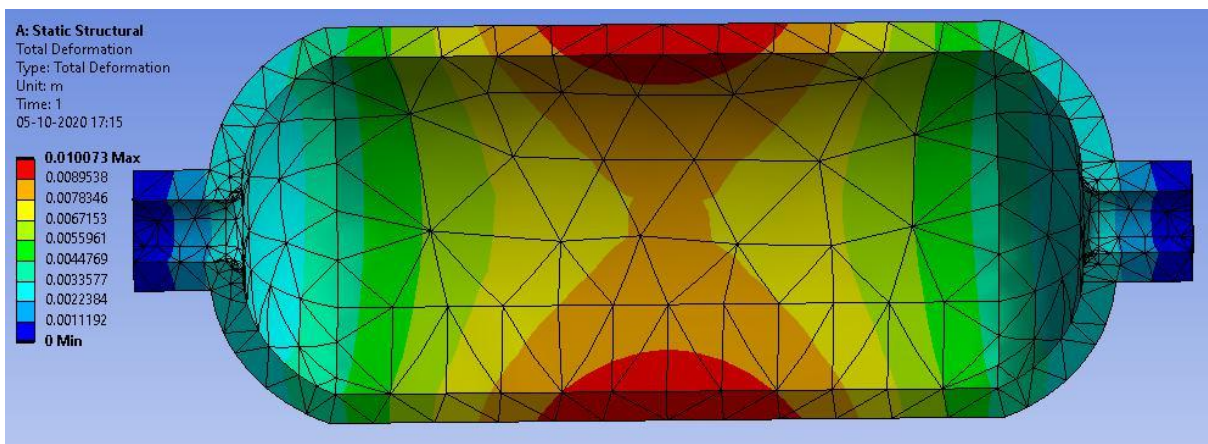


Fig III.5: Résultat de déformations type I. 150 bar .

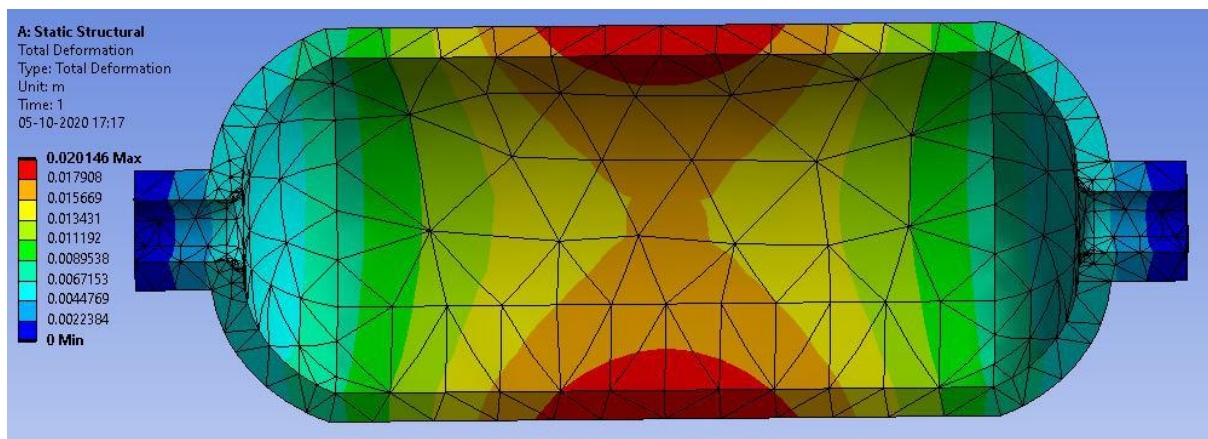


Fig III.6: Résultat de déformations type I . 300 bar.

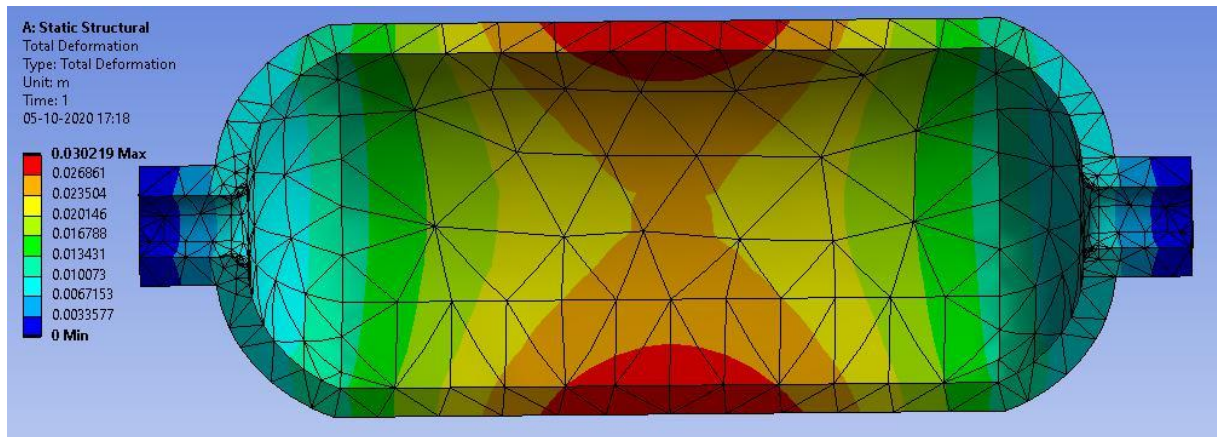


Fig III.7 : Résultat de déformations type I . 450 bar

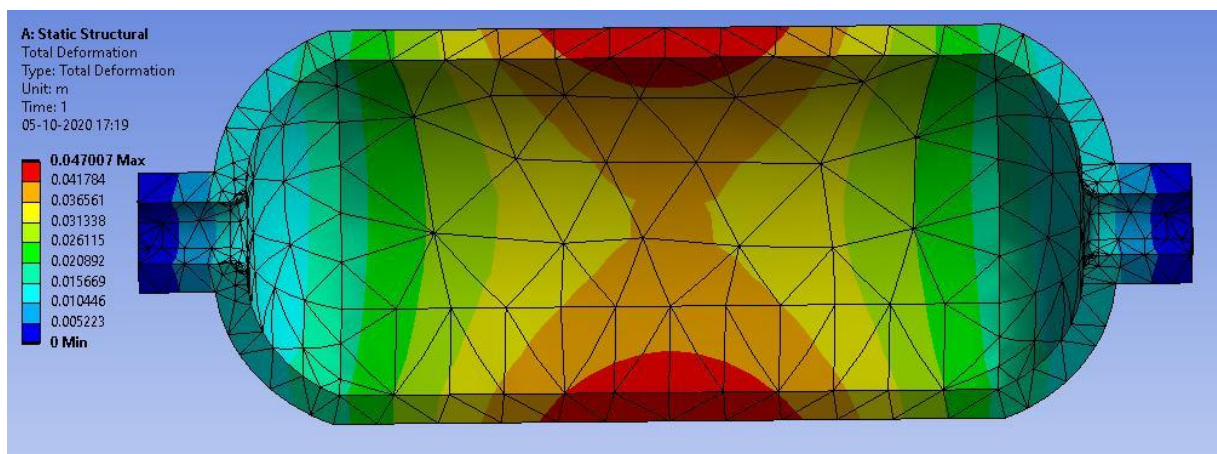


Fig III.8 : Résultat de déformations type I . 700 bar

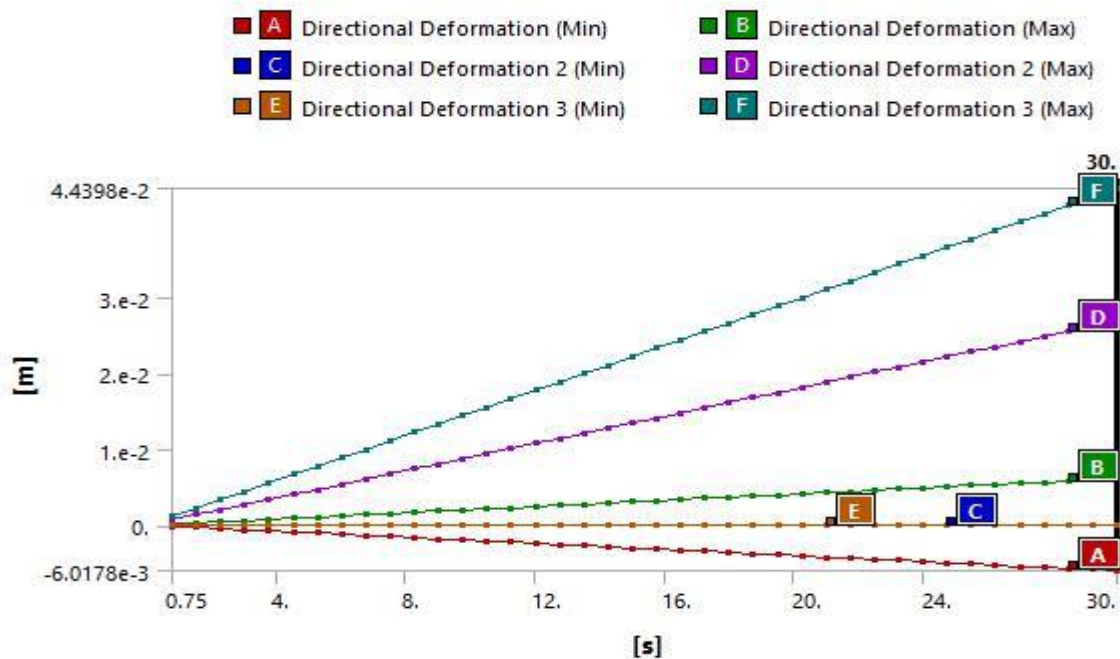


Fig III.9 : Directional Déformation type I (X.Y.Z.) Axis

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 1:

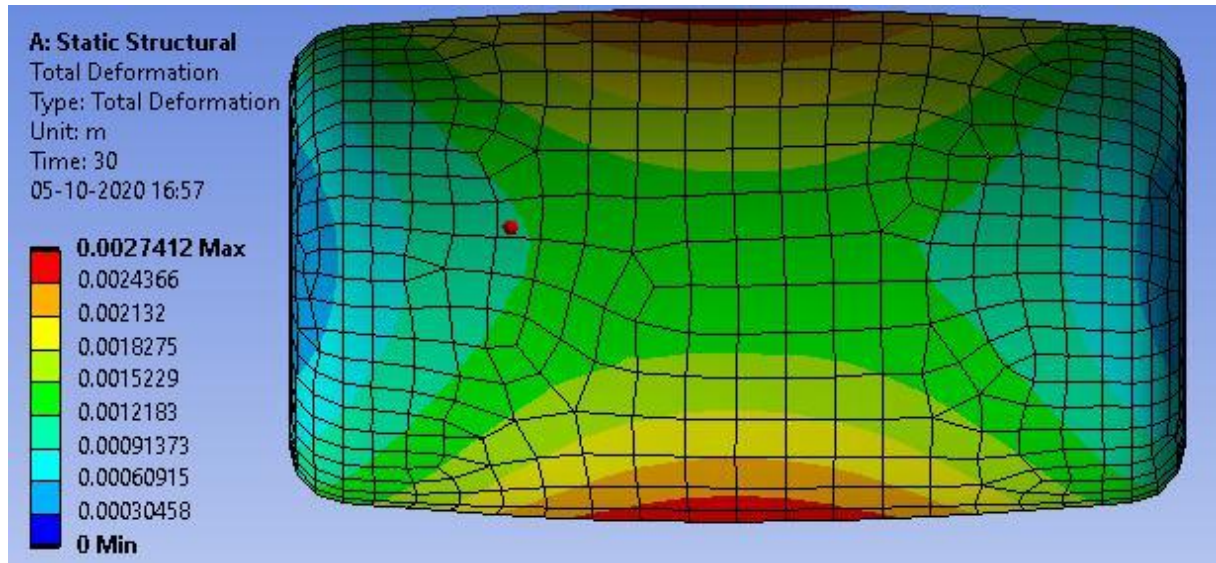


Fig III.10: Résultat de déformations type II . 150 bar

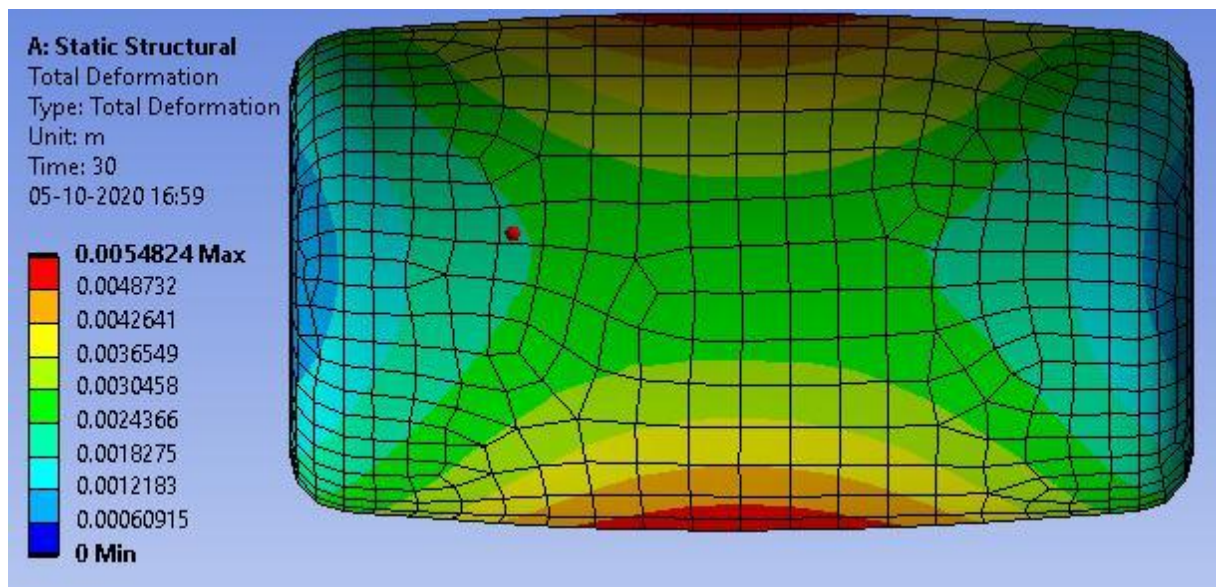


Fig III.11: Résultat de déformations type II . 300 bar .

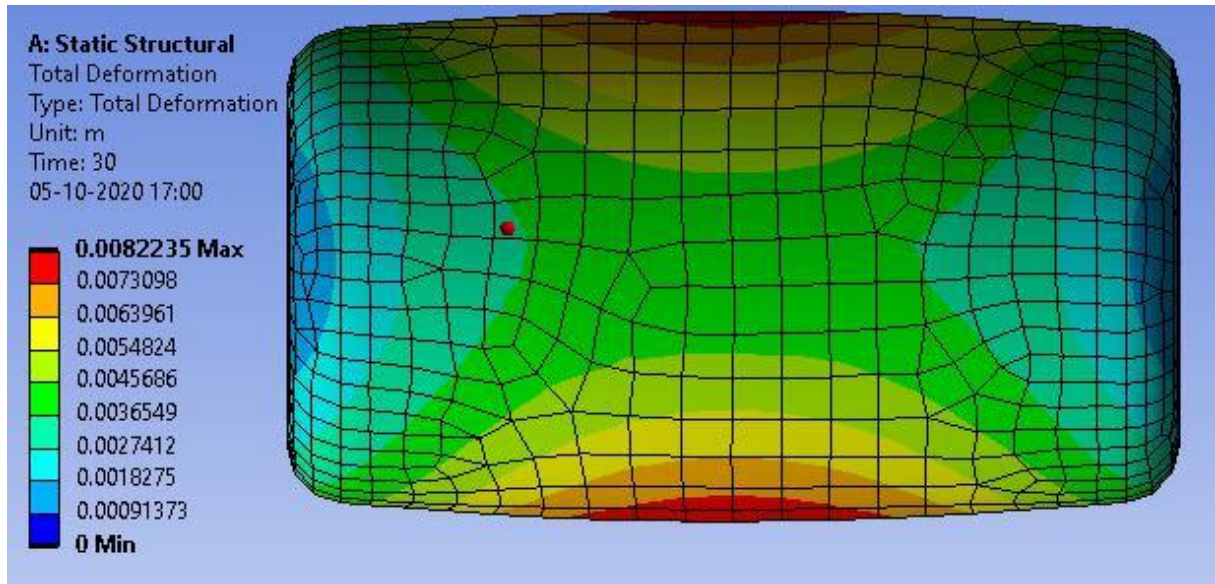


Fig III.12: Résultat de déformations type II . 450 bar.

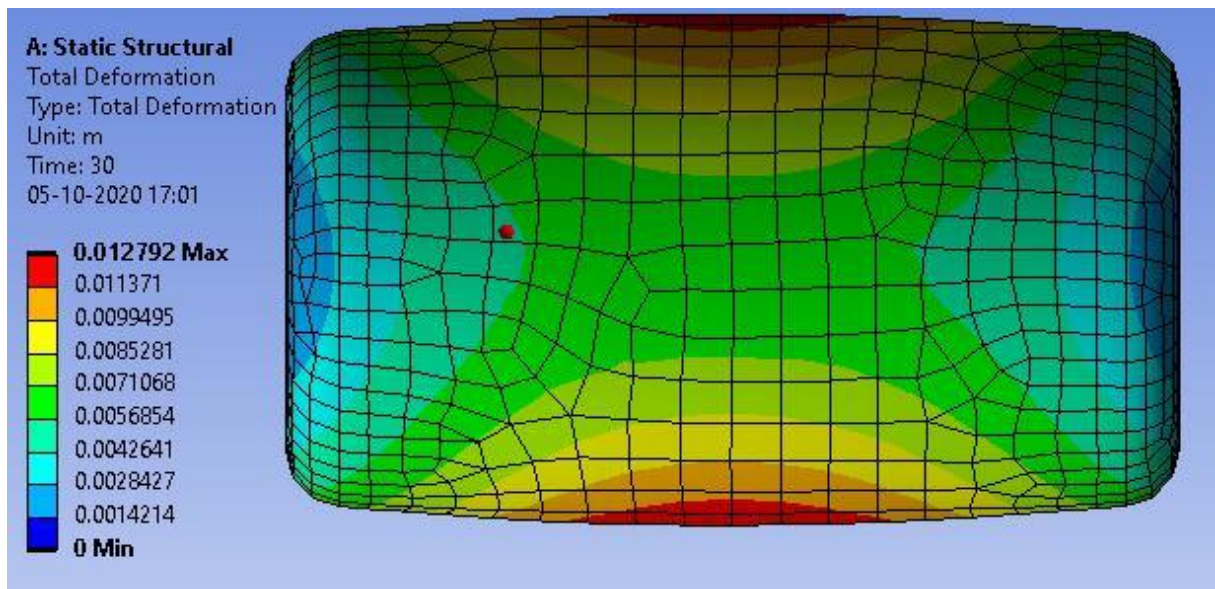


Fig III.13: Résultat de déformations type II . 700 bar

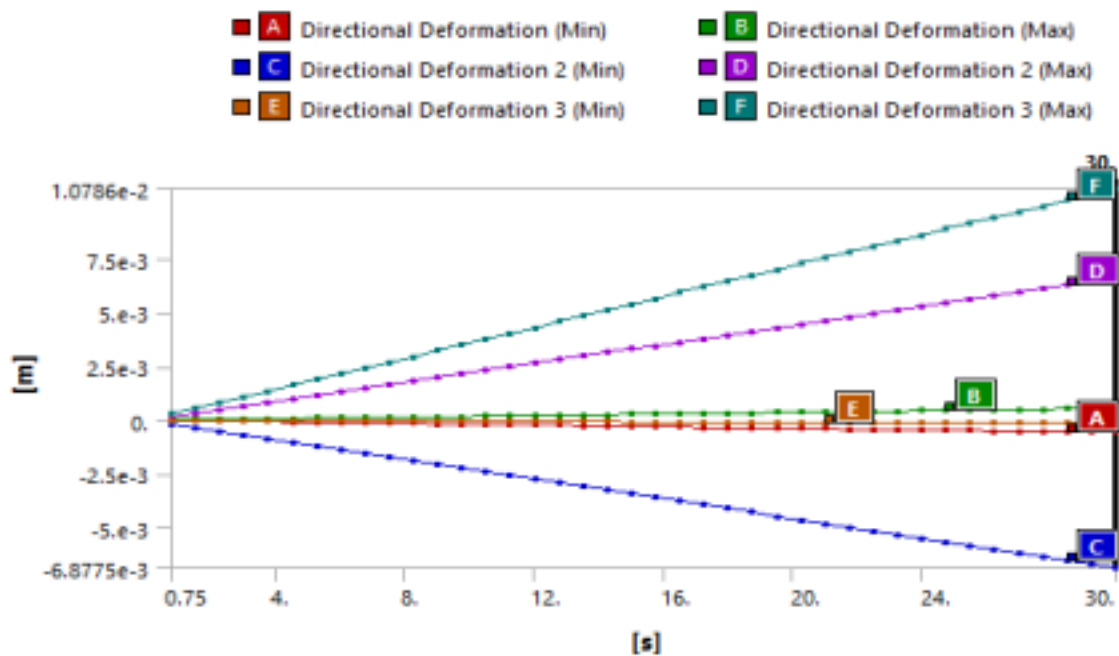


Fig III.14: Directional Déformation type II (X.Y.Z.) Axis

II.2.Méthode J-intégral appliquée :

II.2.1. Description de la fissure :

L'expérience montre qu'en général une fissure présente sur une des peaux de la coque se propage dans un premier temps dans l'épaisseur pour devenir débouchante, puis se propage à l'ensemble de la coque. Pour simplifier l'étude, l'hypothèse de fissure traversante dans l'épaisseur est faite. Ainsi, l'utilisation de segments sur figure (III.8) permet de connaître complètement la position de la fissure. [3].

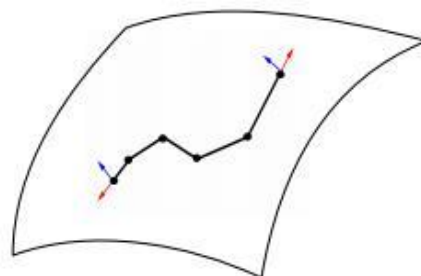


Fig III.15 : Fissure représentée sous forme de segments

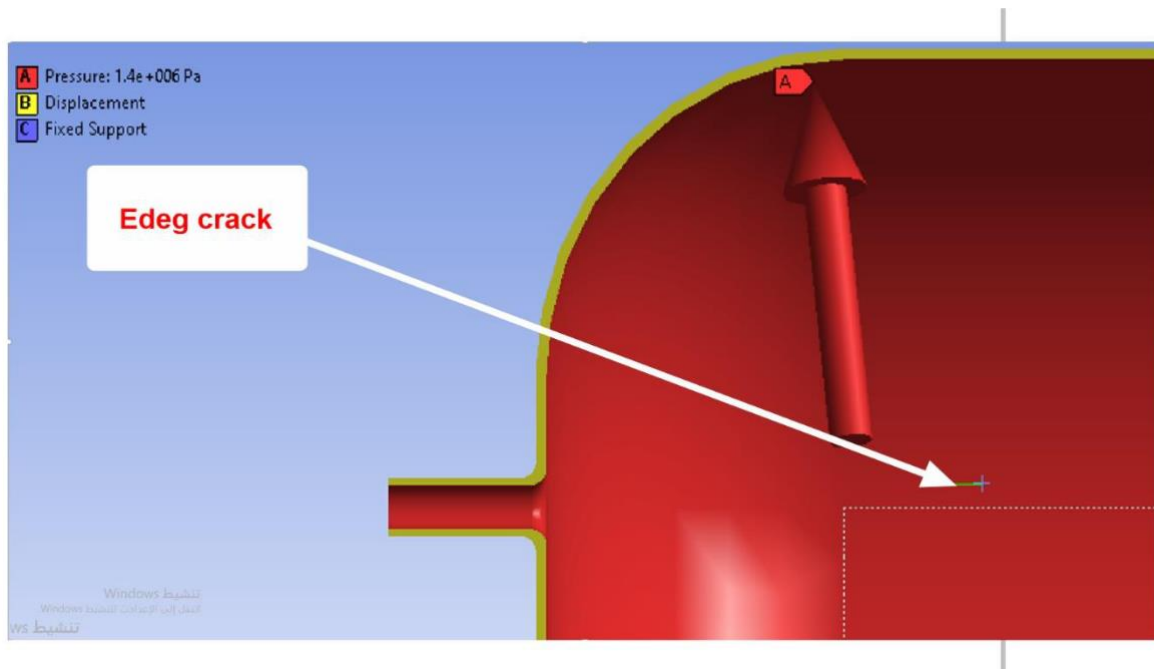


Fig III.16 : Crack sur le réservoir

- Les trois contraintes principales sont classiquement appelées σ_1 , σ_2 et σ_3 . σ_1 est la contrainte principale maximale (la plus à la traction), σ_3 est la contrainte principale minimale (la plus compressive) et σ_2 est la contrainte principale intermédiaire.

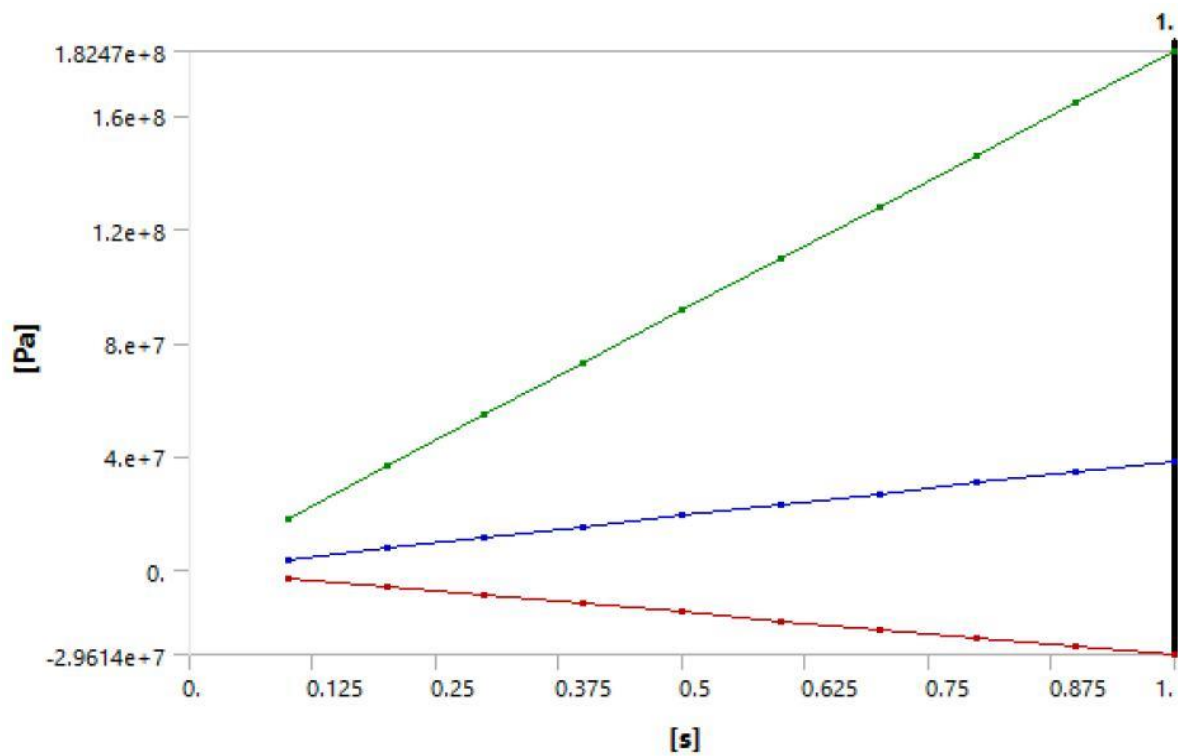


Fig III.17 : courbe Maximum Principal Stress

Zoom sur l'image de la fissure :

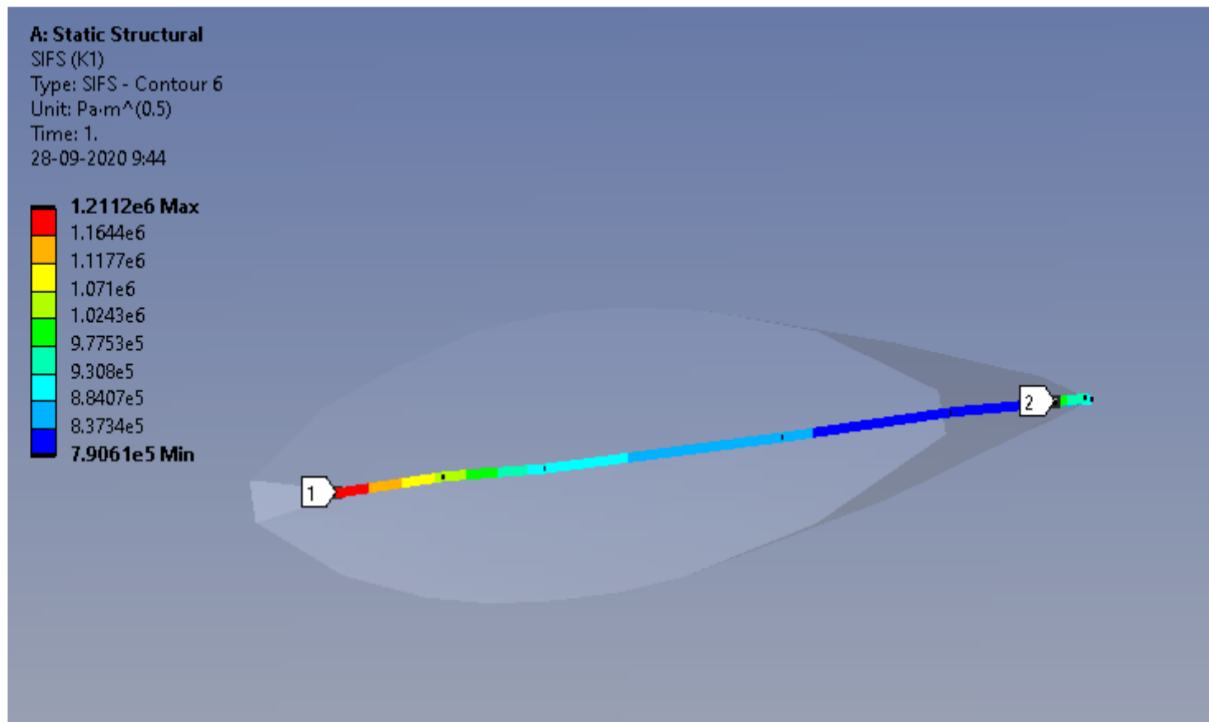


Fig III.18 : Facteur d'intensité de contrainte k_1 au voisinage de la fissure

- Le facteur d'intensité de contrainte augmente lorsque la taille de la fissure augmente. ... Quand le facteur d'intensité de contrainte atteint une valeur critique, les contraintes sont tellement importantes en pointe de fissure qu'il y a rupture brutale. Cette valeur seuil est appelée ténacité.
- Lorsqu'un matériau soumis à une sollicitation mécanique développe une fissure, celle-ci peut se propager selon plusieurs modes distincts : l'ouverture (mode I), le glissement (mode II) ou encore le glissement dévié (mode III) . Le mode le plus étudié parce qu'il est le plus dangereux dans les est le mode par ouverture, pour lequel les contraintes en pointe de fissure,

✓ **Mode I:**

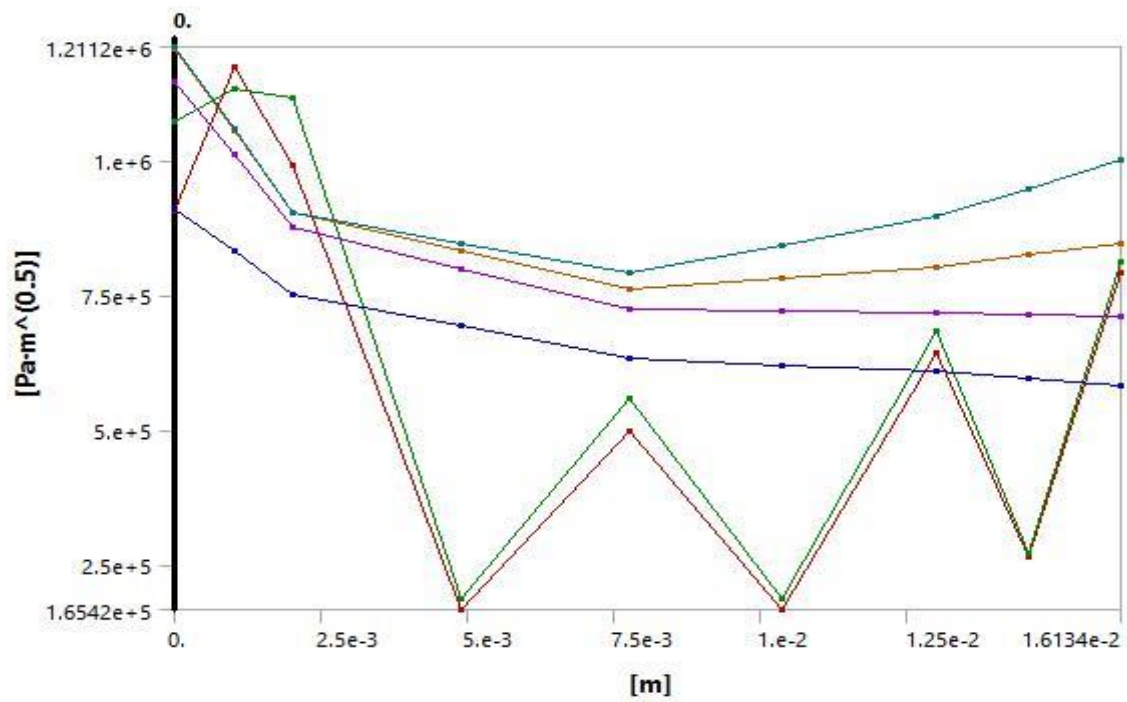


Fig III.19 :Facteur d'intensité de contrainte par rapport au propagation de fissure en mode1

✓ **Mode II:**

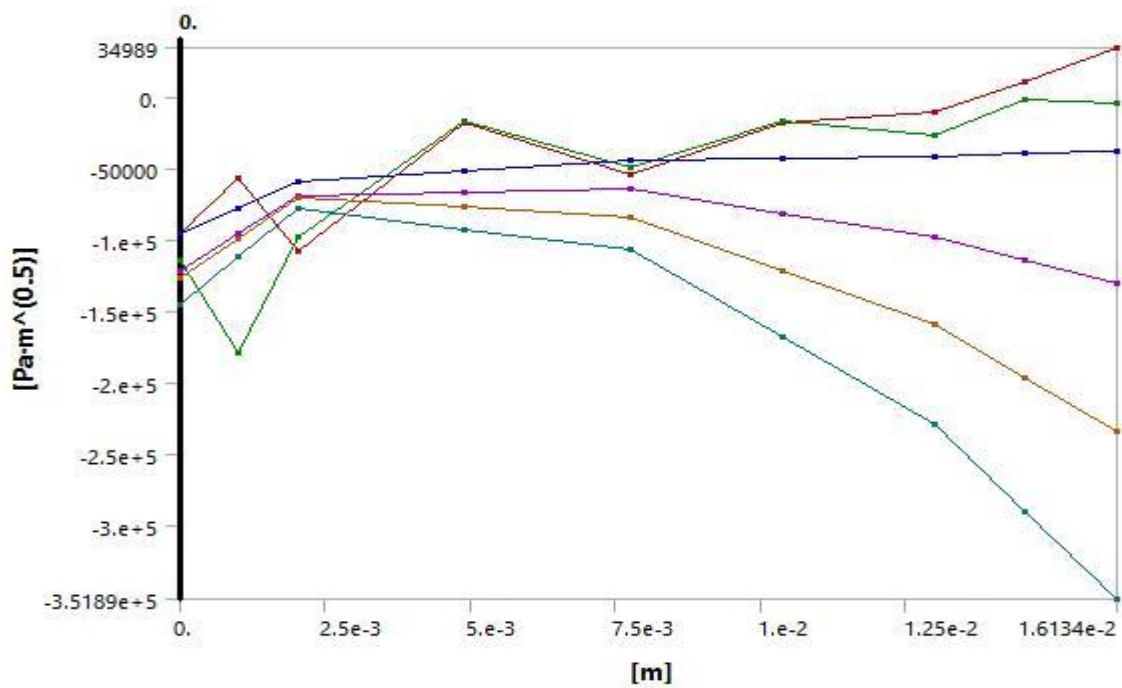


Fig III.20 : Facteur d'intensité de contrainte par rapport au propagation de fissure en mode 2

✓ **Mode III:**

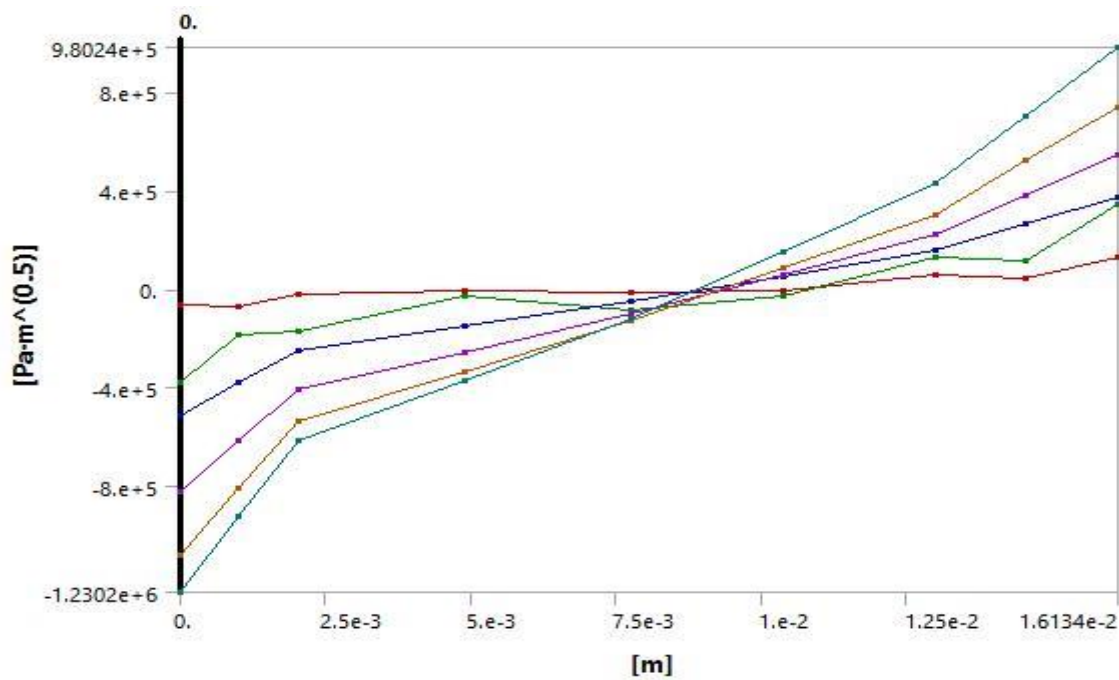


Fig III.21 : Facteur d'intensité de contrainte par rapport au propagation de fissure en mode3.

✚ **Maximum principal stress et strain :**

- courbe de Réservoir type 1:

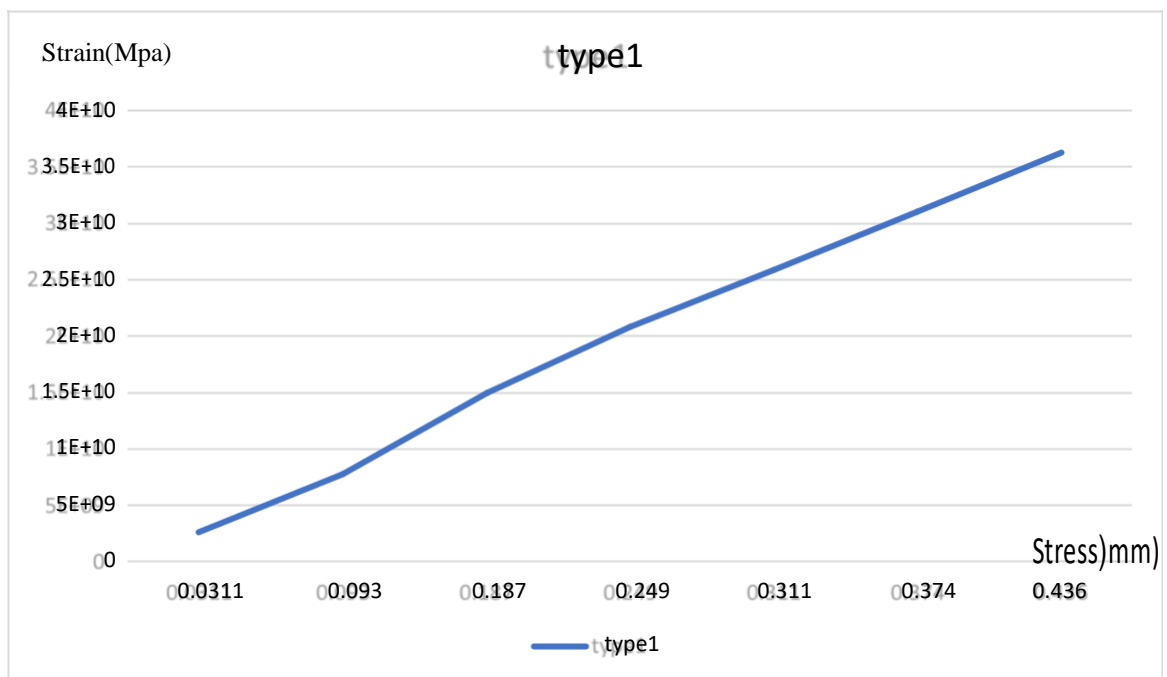


Fig III.22: Courbe de contrainte en fonction de la déformation type 1

- **Interprétation de la courbe :**

Différents types de pressions ont été appliqués à un réservoir de type 1. (150 bar, 300 bar, 700 bar), constitué d'un seul métal, l'aluminium, et nous avons remarqué que lorsque la pression sur le réservoir augmentait, la contrainte augmentait, augmentant ainsi la déformation. Les résultats sont énumérés dans le tableau suivant:

Tab III 2 : Contrainte et Déformation type 1

Pression / (bar)	Déformation/Strain(Mpa)	Contrainte/Stress(mm)
50	0.0311	2.59E+09
150	0.0935	7.79E+09
300	0.187	1.5E+10
400	0.249	2.07E+10
500	0.311	2.59E+10
600	0.374	3.11E+10
700	0.436	3.63E+10

- **courbe de Réservoir type 2:**

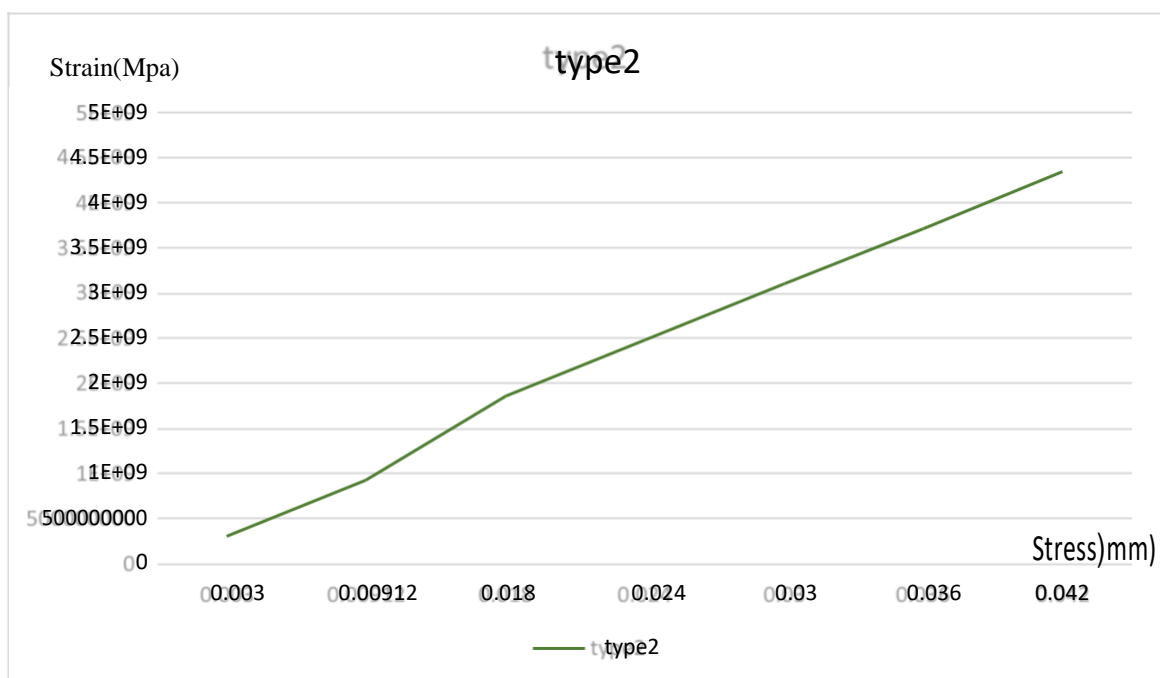


Fig III.23: Courbe de contrainte en fonction de la déformation type 2 .

- **Interprétation de la courbe:**

Nous avons appliqué la même résistance au réservoir de type 2 (150 bar, 300 bar, 700 bar), qui est constitué d'aluminium métallique et est entouré d'une couche de fibre de carbone. Nous avons remarqué que lorsque la pression augmente, la contrainte augmente, donc le taux de déformation augmente, mais relativement meilleur que le réservoir de type 1, mais les résultats sont proches, ce qui signifie qu'il n'y a pas une grande différence, qui a conduit au développement d'autres générations de réservoirs avec de meilleurs résultats

(Type 3 et Type 4)

Tab III .3: Contrainte et Déformation type 2

Pression / (bar)	Déformation/Strain(Mpa)	Contrainte/Stress(mm)
50	0.0030	3.107E+08
150	0.00912	9.32E+08
300	0.018	1.86E+9
400	0.024	2.48E+9
500	0.030	3.107E+9
600	0.036	3.72E+9
700	0.042	4.35E+9

II.2.2. Conclusion :

Cette étude constitue une contribution assez importante à la modélisation des réservoirs de stockage pour l'analyse par éléments finis de l'effet de la contrainte interne sur les fissures, et a trouvé des pics de valeurs de contrainte pour Van Mises au niveau de premier plan. La fissure du côté sphérique est plus grande que la face courbe du réservoir, ce qui explique pourquoi la géométrie de la structure influence grandement le comportement de la fissure. Afin de renforcer la structure, le choix du type de métal, de l'épaisseur et de la longueur du patch composite influe positivement sur les contraintes à proximité de la fissure pour améliorer la durée de vie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude s'inscrivait dans le cadre des travaux de recherche et développement sur l'analyse et la conception de réservoirs composites Pour stocker l'hydrogène.

L'hydrogène existe dans la nature à l'état libre et est extrait de diverses sources. Il est stocké dans des réservoirs à haute pression de plusieurs types, y compris les premier et deuxième types que nous avons mentionnés, et d'autres types comme les troisième et quatrième types. L'objectif était de mettre en évidence une connaissance des matériaux composites en décrivant leurs constitutions, propriétés et structures. Le comportement mécanique et les propriétés physiques du composé ont d'abord été distingués. Les résultats ont montré que:

Le deuxième type, composé d'aluminium et de fibre de carbone, est meilleur et plus résistant que le premier type, qui ne consiste qu'en aluminium. D'autres ont été développés et sont plus solides et plus solides et donnent de meilleurs résultats, comme les troisième et quatrième types.

En fin de compte, nous espérons que ce travail ouvrira une fenêtre et soutiendra d'autres études sur les réservoirs de stockage d'hydrogène.

Références bibliographique

- [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] Jacques Goyette . Materials for hydrogen Storage - materials memoire today september 2003.
- [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] Aceves S. M.; Berry G. D., Rambach G. D. : Insulated pressure vessels for hydrogen storage on vehicles , Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 1, pp. 583-591, 1998.
- [7] Joubert J.-M., Cuevas F., Latroche M., Percheron G. A. : Stockage de l'hydrogène et risques, 15ème 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]:Technique de l'ingénieur édition 2008 l'article [BM6590]et l'article [BM6592].
- [13]:Fiche de Données de Sécurité AL067A relative à l'hydrogène, juillet 2005, AIR LIQUIDE.

- [14]: F.Baala, N. Ouhnane, Matériaux composite, université Ibn zohr-Agadire 24mai 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 Patamaprohm, 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 j 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 reservoir,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.

Résumé :

L'objectif de cette étude est de connaître les comportements mécaniques des citernes de véhicules propres de type 1 et de type 2 Cela dépend du stockage de l'hydrogène, pour cela nous avons fait une simulation basée sur le test du métal à partir duquel le réservoir est fabriqué en augmentant l'intensité de la pression Le pH interne d'une part et le remplacement du métal de l'aluminium par la fibre de carbone. Dans les résultats, nous nous sommes concentrés sur le coefficient L'intensité des contraintes est le paramètre le plus influent pour mesurer la dureté et la durabilité des métaux.

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

Abstract :

The aim of this study is to know the mechanical behaviors of type 1 and type 2 clean vehicle tanks It depends on storing hydrogen, for this we performed a simulation based on testing the metal from which the tank is made by increasing the intensity of pressure The internal pH on the one hand and the replacement of the metal from aluminum to carbon fiber. In the results, we relied on focusing on coefficient The stress intensity is the most influential parameter in measuring the hardness and durability of metals.

Key words: clean cars, simulation, mechanical behavior, clean vehicle tanks, hydrogen storage.

المخلص :

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة السلوكيات الميكانيكية لخزانات السيارات النظيفة من النوع الأول 1 و النوع الثاني تعتمد على تخزين الهيدروجين ، من اجل هذا قمنا بعملية محاكاة أساسها اختبار المعدن المصنوع منه الخزان بزيادة شدة الضغط الداخلي الهيدروجيني من جهة واستبدال المعدن من الالمنيوم الى الياف الكربون . واعتمدنا في النتائج على التركيز على معامل شدة الجهد الذي يعتبر المعامل الاكثر تأثيرا في قياس الصلابة وشدة التحمل للمعادن

كلمات مفتاحية : سيارات نظيفة ، محاكاة ، سلوك ميكانيكي ، خزان مركبات نظيفة ، تخزين الهيدروجين