

621.42/01

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**

Évaluation du comportement mécanique d'un réservoir  
de stockage d'hydrogène des véhicules à piles  
à combustibles

Devant le jury composé de :

Mr. BOULIFA Mohammed Iliasse Président

Mr. BOUKHARI Ali Examineur

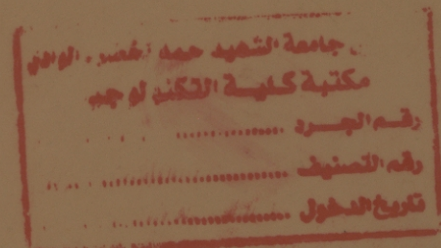
Mr. MEGDOUD Soufiane Encadreur

Présenté par :

- HEMICI Mohammed

- OUNISSI Rami

- MILOUDI Anis



2018/2019

# SOMMAIRE

Remerciements	
Liste des Figures.....	I
Liste des Tableaux.....	II
Introduction générale.....	I
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>I-Les énergies renouvelables.....</b>	<b>3</b>
I-1 Introduction.....	3
I-2 Définition des énergies renouvelables.....	3
I-3 Que sont les sources d'énergie renouvelable.....	3
a- L'énergie solaire.....	3
b- L'énergie éolienne.....	4
c- La biomasse.....	4
d- L'énergie hydraulique.....	4
e- L'énergie géothermique.....	4
<b>II-Les véhicules propres.....</b>	<b>5</b>
II-1 Introduction.....	5
II-2 Définition.....	6
II-3 Les différents types de Véhicule propre.....	6
a- Véhicule à moteur à combustion interne à Hydrogène.....	6
b- Véhicule hybride à pile à combustible.....	7
c- véhicule électrique.....	8
<b>III-Stockage d'hydrogène et types de réservoirs.....</b>	<b>9</b>
a- stockage gazeuse.....	9
b- stockage liquide.....	10
c- stockage solide.....	11
<b>IV-Matériaux d'usinage des réservoirs.....</b>	<b>14</b>
a- aluminium.....	14
b- acier.....	14
c- verre.....	15
d- fibre de carbone.....	15
e- aramide.....	16
f- Le plastique.....	16

## CHAPITRE II

<b>I- la mécanique de rupture.....</b>	<b>18</b>
I-1 Introduction.....	18
I-2 Historique.....	18
I-3 Notions fondamentales de la mécanique de la rupture.....	20
I-4 Généralités sur les ruptures par fissuration.....	20
I-5 Modèles de la fissuration des structures.....	21
a- La mécanique d'Endommagement.....	21
b- La mécanique de la rupture.....	21
I-6 Modes élémentaires de fissuration.....	21
<b>II- Comportement mécanique.....</b>	<b>22</b>
II-1 La contrainte.....	23
a- état des contraintes dans un solide.....	23
b- Tenseur des contraintes.....	24
II-2 La déformation.....	24
a- état des déformations en un point.....	25
II-3 diagramme contrainte – déformation en traction d'une éprouvette en métal.....	25
<b>III- La méthode des éléments finis étendus(x-fem).....</b>	<b>27</b>
III-1 Introduction.....	27
III-2 La formulation X-FEM classique.....	27
III -3Base xfem Concepts.....	28
III-4 Pourquoi utiliser X-FEM.....	29
III-5 Spécificité d'un calcul avec X-FEM.....	30
III-6 Modélisation d'une fissure selon la X-FEM.....	31
a- Les difficultés techniques de mise en œuvre.....	32
b- Description de la fissure.....	32
c- Intégration numérique.....	32

## CHAPITRE III

<b>I - I-Relation entre la densité énergétique et le stockage d'hydrogène.....</b>	<b>34</b>
<b>II- Décrivez les étapes suivies.....</b>	<b>35</b>
<b>III- Analyse des éléments finis.....</b>	<b>35</b>
a- Modélisation du réservoir de stockage à haute pression.....	35
b- Faire une fissure dans l'une des faiblesses.....	37

<i>IV - Simulation et résultat</i> .....	38
<i>a- Le statut de compression égal à 70 MPa</i> .....	38
<i>b- Le statut de compression égal à 100 MPa</i> .....	42
<i>c - Suivi de la croissance des fissures sous pression</i> .....	46
<i>Conclusion générale</i> .....	48



# Liste des Figures

## Chapitre 1

Figure 1 : Définition de « Véhicule propre ».....	6
Figure 2 : Véhicule à moteur à combustion interne à Hydrogène:Shelby Cobra, Réplica..	7
Figure 3 : Tesla Model S.....	9
Figure 4: Externat Tank d'hydrogène.....	11
Figure 5: Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide LINDE.....	11
Figure 6 : plan Famille pour le stockage solide. MT= métaux de transition.....	12
Figure 7: Réservoir de stockage solide développé par le constructeur TOYOTA.....	13
Figure 8: Intégration de 2 réservoirs de stockage utilisant les hydrures métalliques.....	13
Figure 9 : L'aluminium.....	14
Figure 10 : acier.....	15
Figure 11 : verre.....	15
Figure 12 : fibre de carbone.....	15
Figure 13 : fibre de aramide.....	16
Figure 14 : Les plastiques.....	16

## Chapitre 2

Figure 1 : Rupture fragile d'une structure maçonnée.....	19
Figure 2 : Modes de fissuration.....	22
Figure 3 : Solide soumis à un chargement mécanique.....	23
Figure 4 : Solide déformable.....	25
Figure 5 : Courbe contrainte-déformation. Domaine élastique et domaine plastique.....	26
Figure 6 : Présentation du crack.....	28
Figure 7: Fissure placée sur un maillage uniforme.Les noeuds entourés d'un carré sont enrichis par la discontinuité et les noeuds entourés d'un triangle sont enrichis par les bases de fonctions asymptotiques en pointe de fissure.....	30
Figure 8: Intégration numérique prenant en compte une fissure avec la X-FEM.....	31

## Chapitre 3

Figure 1: Densité d'énergie de l'hydrogène liquide et gazeux en fonction de la pression.....	35
Figure 2 : réservoir cylindrique type I en aluminium.....	36
Figure 3 : Les dimensions du réservoir utilisé.....	36

<i>Figure 4 : Forme finale du réservoir avec SolidWorks</i> .....	37
<i>Figure 5 : Section À un angle de 90 degrés</i> .....	37
<i>Figure 6 : Fissure</i> .....	38
<i>Figure 7 : Maillage</i> .....	38
<i>Figure 8 : Application de la pression interne 70 MPa</i> .....	39
<i>Figure 9 : direction déformation sur l'axe X (mm)</i> .....	38
<i>Figure 10 : direction déformation sur l'axe Y (mm)</i> .....	40
<i>Figure 11 : direction déformation sur l'axe) Z (mm)</i> .....	40
<i>Figure 12: Totale Déformation (mm)</i> .....	41
<i>Figure 13: énergie de déformation (mJ)</i> .....	41
<i>Figure 14: stress énergétique (MPa)</i> .....	42
<i>Figure 15 : direction déformation sur l'axe X (mm)</i> .....	42
<i>Figure 16 : direction déformation sur l'axe Y (mm)</i> .....	43
<i>Figure 17 : direction déformation sur l'axe) Z (mm)</i> .....	43
<i>Figure 18 : Totale Déformation (mm)</i> .....	44
<i>Figure 19: énergie de déformation (mJ)</i> .....	44
<i>Figure 20: stress énergétique (MPa)</i> .....	45
<i>Figure 21: Graphique énergie en termes De élément nombre sous pression 70 MPa</i> ....	45
<i>Figure 22: Graphique énergie en termes De élément nombre sous pression 100 MPa</i> ...	46
<i>Figure 23: déplacement axe X de propagation de fissure (mm)</i> .....	46
<i>Figure 24: déplacement axe Z de propagation de fissure (mm)</i> .....	47
<i>Figure 25: propagation de longueur de fissure (mm)</i> .....	47

## Liste des Tableaux

### Chapitre 1

Tableau 1 : Exemples de véhicules à pile à combustible .....8

Tableau 2 : Les types de réservoirs gaze .....9

Tableau 3 : Les différents types de réservoirs gazeux .....10

Tableau 4 : Les différents groupes de stockage solide .....11

Tableau 5 : Les hydrures métalliques type  $A_nB_m$  .....12

### Chapitre 3

Tableau 6 : Matériel prospérité aluminium .....36

عنوان المذكرة: تقييم السلوك الميكانيكي لخزان تخزين الهيدروجين في مركبات خلايا الوقود

ملخص

في هذا العمل نصب اهتمامنا على تحسين المركبات النظيفة (السيارات التي تعمل بغاز الهيدروجين) من حيث المردودية والامان، حيث اعتمدنا في دراستنا على تطبيق ضغط داخلي على مستوى خزان غاز الهيدروجين، باستعمال برنامج محاكاة خاص لمتابعة تأثير الضغط على مستوى شق المتوضع في احدى نقاط الضعف الخاصة بالخزان. تضم هذه المذكرة دراسة متكونة من 3 فصول، النتائج المتحصل عليها بعد اجراء عملية المحاكاة على الجزان كانت كالتالي : تحت ضغط 70 MPa كان اتجاه التشوه على المحور x يتغير من 1088 mm - اقل قيمة و 1184.6mm كأكبر قيمة و كان التشوه على المحور y يتغير من 2.6151 mm - اقل قيمة و 2752.1 mm كأكبر قيمة و على المحور z يتغير من 34.54 mm - اقل قيمة و 3030.3 mm كأكبر قيمة ، وتحت ضغط 100MPa كانت نتائج اتجاه التشوه تتغير من 1554.2mm الى 1692.2mm كأكبر قيمة في المحور x في المحور y كان يساوي 3.7359 mm - كأصغر قيمة و 3931.6 mm كأكبر قيمة في المحور z كان يأخذ 49.343mm - قيمة كبرى و 3931.6 mm كأكبر قيمة ، الفائدة من اجراء هذه المحاكاة هو معرفة مدى تأثير الضغط على خزان تخزين الهيدروجين من اجل تطويره

الكلمات المفتاحية: خزان-هيدروجين-مركبات نظيفة-تخزين-الامان-المردودية-طريقة العناصر الممتدة.

---

**Titre de la mémoire :** Évaluation du comportement mécanique du réservoir de stockage d'hydrogène dans les véhicules à pile à combustible

### Résumé

Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'amélioration des coûts et de la sécurité des véhicules propres (voitures à hydrogène) Dans notre étude, nous avons adopté l'application de la pression interne au niveau du réservoir de gaz hydrogène, en utilisant un programme de simulation spécial pour suivre l'impact de la compression au niveau du segment situé dans l'une des faiblesses. Les résultats obtenus après la simulation sur la lunette sont les suivants: sous une pression de 70 MPa, le sens de la déformation sur l'axe des abscisses est passé de mm1088 à la valeur la plus basse et mm1184,6 en tant que valeur la plus grande et la distorsion sur l'axe des y Il varie de mm2,6151 à la valeur inférieure et mm2752.1 plus grand La valeur sur l'axe des z varie de mm34,54 à la valeur la plus basse et mm3030.3 à la valeur la plus grande. Sous 100 MPa, les résultats de l'évolution des déformations ont varié de -1554,2 mm à 1692,2 mm, la plus grande valeur sur l'axe des abscisses étant égale à 3,7359 mm. 3931,6 mm, la valeur la plus grande sur l'axe z prenant 49,343 mm - valeur élevée et 3931,6 mm comme valeur la plus grande, l'avantage de cette simulation est de connaître l'impact de la pression sur le réservoir de stockage d'hydrogène pour le développement.

**les mots clés:** Réservoir - Hydrogène - Véhicules propres - Stockage - Sécurité - Coût- Xfem

---

**Memory Title:** Evaluation of the Mechanical Behavior of the Hydrogen Storage Tank in Fuel Cell Vehicles

### Summary

In this work, we focused on improving the costs and safety of clean vehicles (hydrogen cars) In our study, we adopted the application of internal pressure at the hydrogen gas reservoir, using a special simulation program to track the impact of compression at the segment level in one of the weaknesses. The results obtained after the simulation on the telescope are as follows: under a pressure of 70 MPa, the direction of the deformation on the abscissa axis went from mm1088 to the lowest value and mm1184.6 as the value la larger and the distortion on the y-axis It varies from mm2,6151 to the lower value and larger mm2752.1 The value on the z-axis varies from mm34.54 to the lowest value and mm3030.3 at the highest value. Under 100 MPa, the results of the evolution of the strains varied from -1554.2 mm to 1692.2 mm, the largest value on the abscissa axis being equal to 3.7359 mm. 3931.6 mm, the largest value on the z axis taking 49.343 mm - high value and 3931.6 mm as the largest value. the advantage of this simulation is to know the impact of the pressure on the reservoir hydrogen storage for development.

**Keywords :** Tank - Hydrogen - Clean vehicles - Storage - Safety - Cost - Xfem



### *Introduction générale :*

Les administrations locales et les opérateurs de transports publics cherchent de plus en plus des solutions de remplacement aux véhicules traditionnels à essence et au diesel [3]. Les véhicules propres sont l'une des solutions les plus importantes que la plupart des pays développés essaient de développer, là où ils voient la bonne solution pour remplacer les véhicules traditionnels.

Les solutions de carburants de remplacement et de transmission représentent l'un des plus grands défis pour le véhicule du futur. En réponse à l'effet de serre, aux coûts croissants et aux sources limitées de combustibles fossiles, de nouvelles options de carburants propres et renouvelables sont à l'étude. Les activités de recherche actuelles sur l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie indiquent que le concept d'économie de l'hydrogène a considérablement gagné en crédibilité au cours des dernières années. L'hydrogène libère de l'énergie par une réaction chimique avec l'oxygène. Cette énergie peut être utilisée pour alimenter des véhicules, soit dans une pile à combustible fournissant une sortie d'électricité, soit dans une centrale électrique interne. moteur à combustion similaire aux véhicules actuels. Néanmoins, l'un des principaux obstacles technologiques à l'introduction de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie sont les systèmes de stockage [1].

Pour accroître l'utilisation mondiale des véhicules à piles à combustible à hydrogène, la sécurité des réservoirs de stockage d'hydrogène à haute pression doit être garantie [2].

Le but de cette étude est de chercher à développer des réservoirs de stockage d'hydrogène à haute pression afin d'accroître la sécurité des véhicules propres.

Dans cette étude, nous évaluons le comportement des fissures dans une cuve à hydrogène à haute pression de type I, en utilisant une méthode de simulation présentée par la méthode des éléments finis étendus [2].

Ce mémoire contient trois chapitres :

- Le chapitre I: est consacré à la recherche au tour des énergies renouvelables, des véhicules propres, Stockage d'hydrogène et types de réservoirs, Matériaux d'usinage des réservoirs
- Le chapitre II: est consacré à la recherche sur la mécanique de rupture, le comportement mécanique, et méthode des éléments finis étendus(x-fem)
- Le chapitre III: Simulation par logiciel ANSYS, en utilisant une méthode de simulation par la méthode des éléments finis étendus

## *1- Les énergies renouvelables*

### *1-1 Introduction :*

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...). Ces énergies de l'avenir ne couvrent pourtant que 22% de la consommation mondiale d'électricité avec l'importance de l'hydroélectricité qui représente les trois quarts de l'électricité issue des ER[3].

Les principaux intérêts des énergies renouvelables sont leur non épuisement et leurs émissions très limitées de gaz à effet de serre (GES) comme en témoigne l'analyse du cycle de vie de leur exploitation. Évaluation des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie pour les grandes catégories de technologies de production d'électricité par[3] :

- Hydraulique (Eau : turbines).
- Biomasse (bois CO<sub>2</sub> de combustion = CO<sub>2</sub> de la croissance des arbres: photosynthèse).
- Energie géothermique.
- Solaire (thermique et photovoltaïque)- Eolienne (Vent) [3].

### *1-2 Définition des énergies renouvelables :*

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (photovoltaïque), le vent (éolien), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) [3].

Aujourd'hui, nous assimilons souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres [3].

### *1-3 les sources d'énergie renouvelable :*

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain ! Les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse [4].

#### *a- L'énergie solaire :*

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les

technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement[4].

#### ***b- L'énergie éolienne :***

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante[4].

#### ***c- La biomasse :***

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz[4].

#### ***d- L'énergie hydraulique :***

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité[4].

#### ***e- L'énergie géothermique :***

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple[4].

## *II- Les véhicules propres*

### *II-1 Introduction :*

Les combustibles fossiles font partie des plus gros pollueurs. Le monde cherche donc des véhicules moins nocifs pour l'environnement, qu'ils soient directement détenus ou exploités par des filiales ou d'autres sociétés privées fournissant des services publics (tels que les transports publics ou la collecte des déchets). Les véhicules hybrides, entièrement électriques, fonctionnant au gaz ou aux biocarburants, par exemple, sont envisagés pour diverses raisons [5] :

- ***Changement climatique***

La section des transports est responsable de 25% des émissions totales de gaz à effet de serre. 1 Pour atteindre les objectifs de réduction de CO<sub>2</sub>, les gouvernements locaux doivent réduire les émissions des parcs de véhicules publics

- ***qualité de l'air :***

Les véhicules ont également un impact majeur sur la qualité de l'air local dans les villes d'Europe: ils émettent des quantités importantes de NO<sub>x</sub>, de NMHC et de particules qui ont été liées à divers problèmes de santé et d'environnement. En 2012, 11 États membres ont dépassé les limites fixées par la directive sur les plafonds d'émissions nationaux - le polluant le plus courant étant les NO<sub>x</sub>, neuf États membres dépassant les niveaux définis<sup>2</sup>. Au niveau municipal, les NO<sub>x</sub> sont à plusieurs reprises cités comme un problème de pollution atmosphérique locale.

- ***Créer un marché pour les véhicules à carburant alternatif :***

Les décideurs politiques aux niveaux européen et national reconnaissent l'importance de la demande du secteur public pour aider à stimuler le marché des véhicules plus propres et économes en énergie. Au niveau européen, la directive sur les véhicules propres (CVD) 3 a été introduite pour encourager la mise sur le marché de véhicules plus respectueux de l'environnement. Il oblige les pouvoirs publics à prendre en compte certains facteurs environnementaux lors de l'achat de véhicules routiers.

- ***Exemple de réglage :***

Les pouvoirs publics jouent un rôle important en donnant l'exemple aux particuliers et aux entreprises. L'utilisation de véhicules alimentés en carburant de remplacement pour les transports en commun et d'autres services publics très visibles peut aider d'autres personnes à envisager cette option.

- ***Sécurité énergétique :***

La dépendance européenne vis-à-vis des importations de pétrole suscite de plus en plus d'inquiétude et le secteur des véhicules automobiles est l'un des plus dépendants. La recherche d'alternatives à grande échelle à l'essence et au diesel est une priorité politique.

**II-2 Définition :**

Est considéré comme un véhicule propre un véhicule dont l'impact sur l'environnement est peu important. Deux notions en particulier permettent de cibler les véhicules propres : la quantité d'émissions polluantes produites et le processus de fabrication du véhicule jusqu'à son recyclage. À tort, seule la première de ces deux notions est souvent retenue pour parler de véhicules propres. Or, un véhicule même peu polluant fait appel à des matières premières et aux énergies polluantes pour sa construction, et utilise au cours de sa vie des éléments polluants (pneus, batteries, etc.) [6].

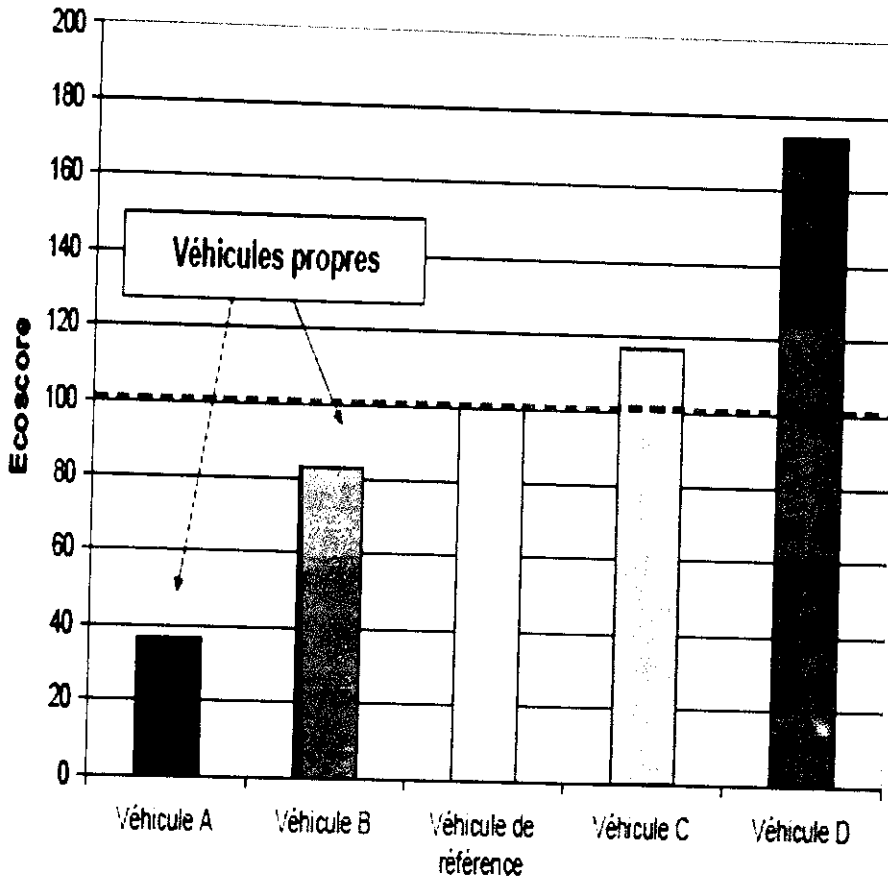


Figure 1 : Définition de « Véhicule propre »

**II-3 Les différents types de Véhicule propre :**

**a- Véhicule à moteur à combustion interne à Hydrogène :**

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans les moteurs à combustion interne offre plusieurs avantages [7] :

- Son utilisation ne connaît pas les mêmes problèmes que ceux des carburants liquides, tels que le bouchon de vapeur (vapor lock), la vaporisation insuffisante, le mélange pauvre, ... etc.
- Lorsque il est brûlé, son principal produit de combustion est l'eau, de ce fait il ne génère pas de produits toxiques tel que les hydrocarbures, le monoxyde de carbone ou le dioxyde de carbone, l'oxyde de soufre et les acides organiques.
- Il a un très large domaine d'inflammabilité (de 4 à 75% en volume) et peut donc être brûlé avec une large gamme de mélanges air-carburant. De ce fait, le fonctionnement en mélange pauvre est possible, ce qui offre une économie de carburant, une réaction de combustion plus complète ainsi qu'une température de combustion finale plus faible. La quantité de polluants émis dans les gaz d'échappement tels que les oxydes d'azote est ainsi réduite.
- Il a une énergie d'allumage (énergie minimale d'inflammation) très faible, ce qui permet d'enflammer les mélanges pauvres et assurer un allumage rapide.

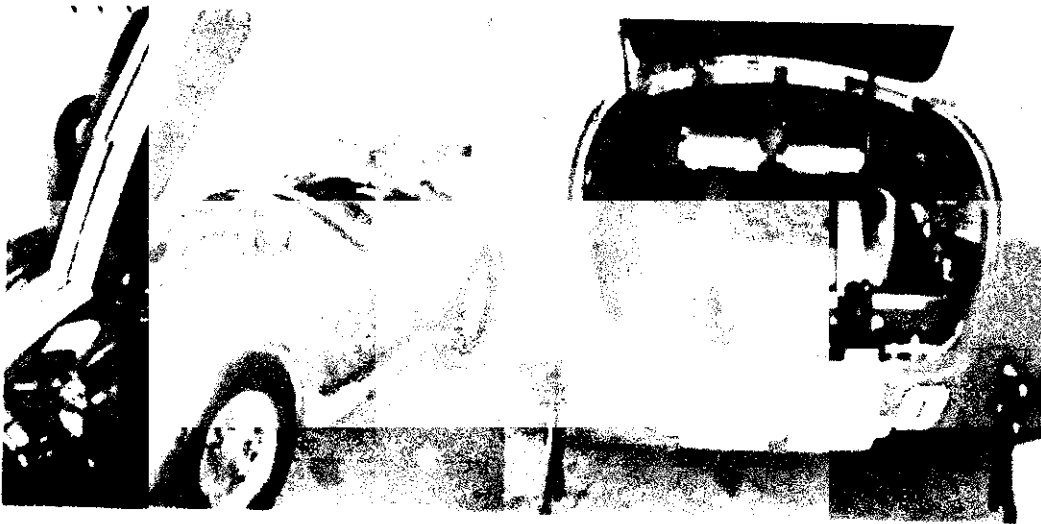


Figure 2 : Véhicule à moteur à combustion interne à Hydrogène : Shelby Cobra, Réplique du modèle de 1965.

#### **b- Véhicule hybride à pile à combustible :**

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, c'est la source de puissance qui est hybride, la motorisation restant entièrement électrique. Un véhicule à pile à combustible hybride utilise donc une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance (fonctionnement en charge et en décharge)[8].






Constructeur	Véhicule	Pile à combustible	Source secondaire d'énergie	Stockage de l'hydrogène	Auto-nomie	Motorisation
Honda	FCX 	86 kW (Honda)	Super-condensateurs	Réservoir haute pression (156,6 l, 350 bar)	430 km	80 kW
Toyota	Highlander FCHV* 	90 kW (Toyota)	Batteries Ni-MH	Version 3: Hydrure métallique Version 4: Réservoir haute Pression Version 5: Reformeur	300 km 250 km -	80 kW
Nissan	X-Trail FCHV* 	90 kW (Nissan)	Batterie Li-ion	Réservoir haute pression (700 bar)	500 km	90 kW

Tableau 1 : Exemples de véhicules à pile à combustible.

**c- véhicule électrique**

Un véhicule qui fonctionne à l'électricité, Les types de véhicules électriques[9] :

- Les tout électriques (Leaf, iMiev, Focus EV, Spark EV, Smart EV, Tesla, BMW i3, KIA Soul EV, etc);
- Les électriques à autonomie prolongée (Chevrolet Volt, BMW i3 REX, BMW i8);
- Les hybrides enfichables (Prius branchable, Ford Cmax Energy, Ford Energy, etc).

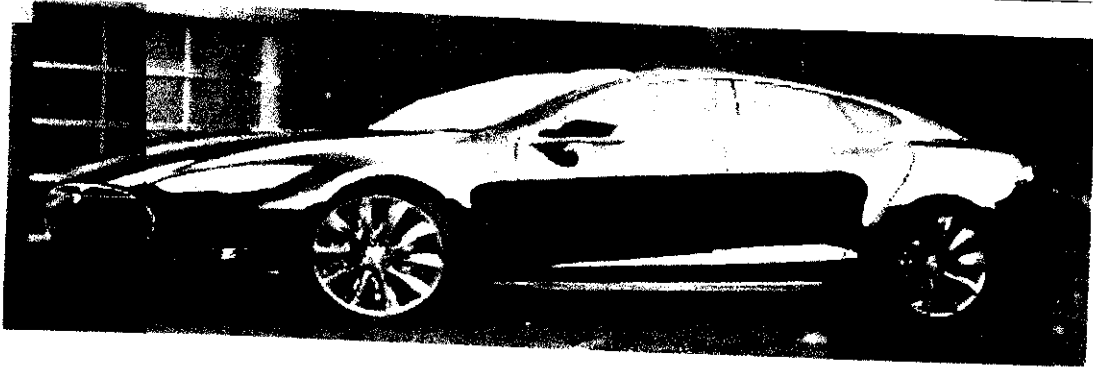


Figure 3 : Tesla Model S

### III- Stockage d'hydrogène et types de réservoirs

Trois grandes familles se distinguent pour le stockage de l'hydrogène : les voies solide, liquide, et gazeuse.

#### a- stockage gazeuse :


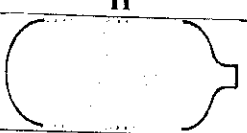


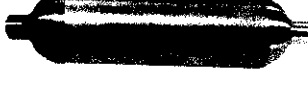



La voie gazeuse est la plus simple et la plus répandue des technologies de stockage. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs sous pression. Plus la pression est élevée, plus la quantité d'hydrogène stocké est grande. Les réservoirs actuellement développés fonctionnent avec des pressions maximales aux alentours de 300-350 bar (30-35 MPa) voir 480 bar. Le travail actuel consiste à créer des réservoirs gazeux sous 700 bar afin d'améliorer la capacité volumique, principal défaut de cette technologie [10].

Pour leur conception, les réservoirs gazeux sont regroupés sous 4 types :

Tableau 2 : Les types de réservoirs gaze

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

Tableau 3 : Les différents types de réservoirs gazeux

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 l'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 [10].

**b- stockage liquide :**

Ce mode de stockage nécessite le maintien de l'hydrogène à sa température de liquéfaction, soit - 253°C. Pour remplir cette condition, il est fait appel à une évaporation contrôlée de l'hydrogène lui-même, évaporation dont la vitesse correspond à une perte de 0,5 à 1 % par jour dans les conditions les plus favorables.

Dans le cas où l'on voudrait stocker 10 kg d'hydrogène, la perte serait au minimum de 50 g par jour, soit 600 l de gaz environ. Un tel stockage ne peut donc être réalisé que dans des endroits bien ventilés[9]. A cet inconvénient, s'ajoute le coût de la liquéfaction de l'hydrogène, qui comprend trois étapes distinctes : la purification, la transformation ortho-para et la liquéfaction proprement dite.

L'hydrogène est livré normalement sous un degré de pureté voisin de 99,8 à 99,9 %. Les impuretés sont essentiellement l'oxygène et l'azote, qui se condensent avant l'hydrogène au cours de l'opération de liquéfaction[11].

L'hydrogène existe sous deux formes isomères, dites ortho et para. A la température ambiante, l'hydrogène gazeux consiste en un mélange des deux formes qui contient 75 % O-H<sub>2</sub>. A l'état liquide, à - 253°C, il ne contient que 0,2 % H<sub>2</sub>O. La transformation ortho-para est fortement exothermique, ce qui signifie que, au cours de la liquéfaction, il faut éliminer cette chaleur de transformation en plus de la chaleur latente de liquéfaction. La liquéfaction de l'hydrogène nécessite théoriquement une quantité totale d'énergie de 3,88 kWh/kg H<sub>2</sub>. Compte tenu du rendement thermodynamique des installations de liquéfaction, l'énergie qui est réellement nécessaire s'élève à 14 kWh/kgH<sub>2</sub>[11].

Grâce à des améliorations d'ordre technologique, cette valeur pourrait être abaissée à 10 kWh/kg, soit encore 30 % du contenu énergétique de l'hydrogène (34 kWh/kg) [7].

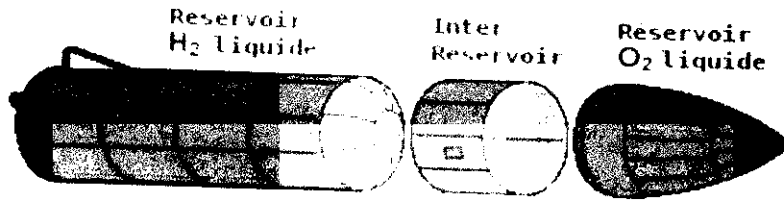


Figure 4: Réservoir externe

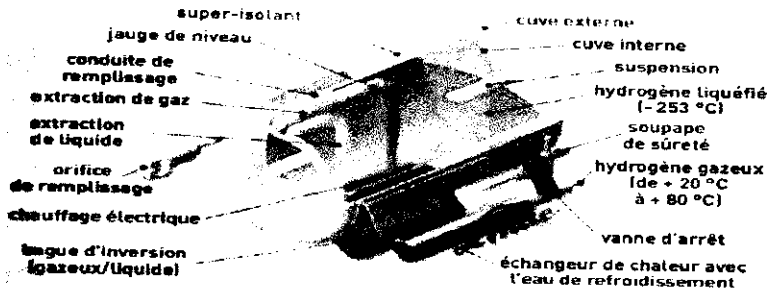


Figure 5: Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide LINDE

**c- stockage solide**

Le stockage solide semble être la voie la plus prometteuse pour l'avenir. Les capacités volumiques sont très intéressantes puisque supérieures à celles du stockage liquide[10].

de stockage solide fonctionnent dans les conditions standard de température et de pression. Le stockage solide se présente sous plusieurs formes. La Fig. 5 les classe sous forme d'organigramme Le tableau tab4 présente 4 grandes classes[10].

Tableau 4: Les différents groupes de stockage solide

Stockage par adsorption	Hydrures chimiques (réactif avec l'eau)	Hydrures réversibles	Hydrures chimiques (thermique)
- charbon actif - nanotubes - nanofibre de graphite - MOFs, Zéolites, ...	- NaH encapsulé - LiH et MgH <sub>2</sub> - CaH <sub>2</sub> , LiAlH <sub>4</sub> , ...	- Alliages et composés intermétalliques - Nanocristaux - Hydrures complexes	- Borozane d'ammoniac - Hydrure d'aluminium

La figure 6 représente un plan des éléments les plus importants dans lesquels l'hydrogène peut être stocké à l'état solide, dans lequel on distingue deux types de matériaux : les alliages et les hydrures complexes. Le tableau 5 des hydrures métalliques type  $A_n B_m$ .

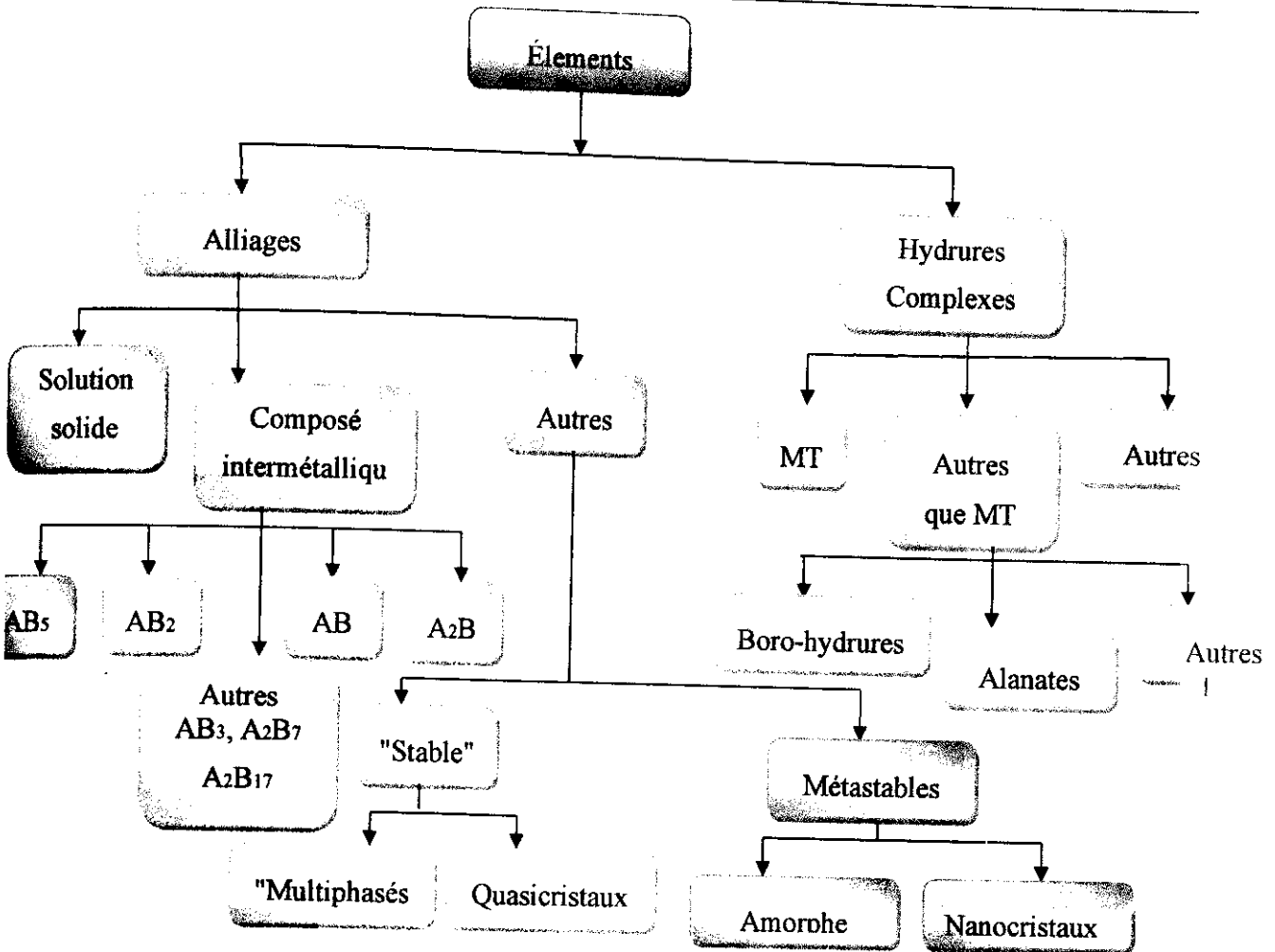


Figure 6 : plan Famille pour le stockage solide. MT= métaux de transition[10].

Tableau 5 : Les hydrures métalliques type  $A_nB_m$

Composé intermétallique	Prototype	Structure
$AB_5$	$LaNi_5$	Haucke phases, hexagonal
$AB_2$	$ZrV_2, ZrMn_2, TiMn_2$	Laves phase, hexagonal or cubic
$AB_3$	$CeNi_3, YFe_3$	hexagonal, $PuNi_3$ -typ
$A_2B_7$	$Y_2Ni_7, Th_2Fe_7$	hexagonal, $Ce_2Ni_7$ , -typ
$AB$	$TiFe, ZrNi$	cubic, CsCl- or CrB-typ
$A_2B$	$Mg_2Ni, Ti_2Ni$	cubic, $MoSi_2$ - or , $Ti_2Ni$ -typ

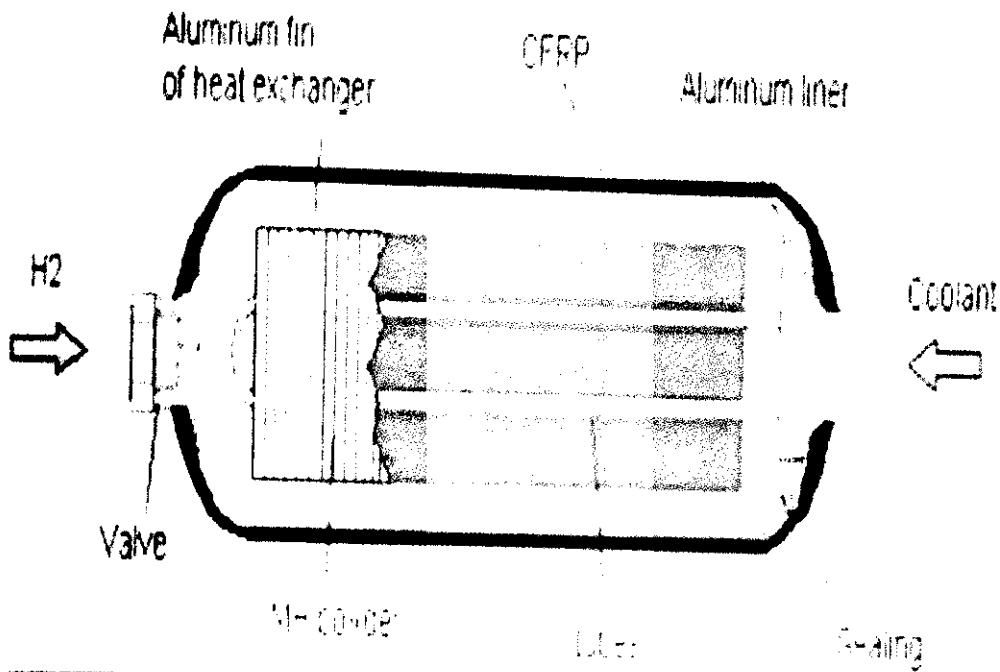


Figure 7: Réservoir de stockage solide développé par le constructeur automobile TOYOTA. L'hydruure employé est de type TiCrMn

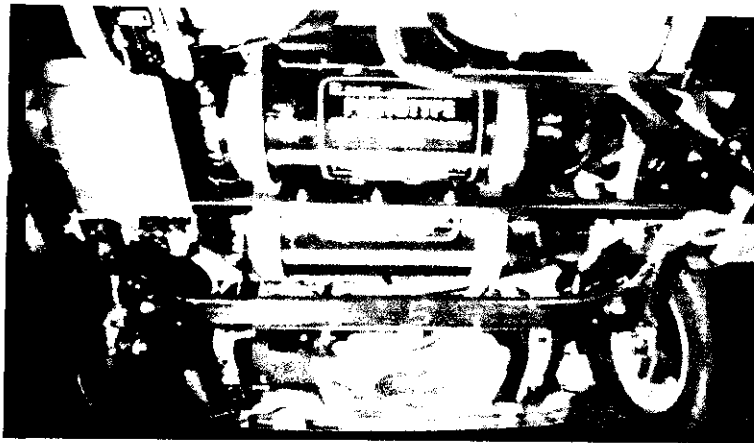


Figure 8: Intégration de 2 réservoirs de stockage utilisant les hydrures métalliques développés par la société Ovonic disposés dans le châssis d'une TOYOTA Prius



#### IV- Matériaux d'usinage des réservoirs

##### a- aluminium :

La présence d'aluminium dans l'environnement est naturelle et anthropique. L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre.

L'aluminium est l'élément métallique naturel le plus abondant de l'écorce terrestre dont il est le 3e élément constitutif le plus important, il représente environ 8%. Il n'y est présent que combiné avec l'oxygène, le silicium, le fluor ou autres éléments. On le trouve sous forme [12]:

- d'alumine  $Al_2O_3$  (corindon  $\alpha$   $Al_2O_3$ , émeri, rubis, saphir, émeraude, etc.),
- Ou hydratée (hydrargillite ou Gibbsite  $\gamma$   $Al(OH)_3$ , boehmite  $\gamma$   $AlO(OH)$ , diaspore  $\alpha$   $AlO(OH)$ ).

La bauxite qui constitue le principal minerai contient de 40 à 60% d'alumine (oxyde d'aluminium). De la famille des Latérites, la Bauxite est une roche sédimentaire principalement composée d'hydroxydes d'aluminium (Gibbsite, Boehmite, Diaspore), associés à des oxydes de fer et des impuretés (Silice, Calcite). Elle ressemble à de l'argile dure mais qui ne fait pas de pâte avec l'eau[12]

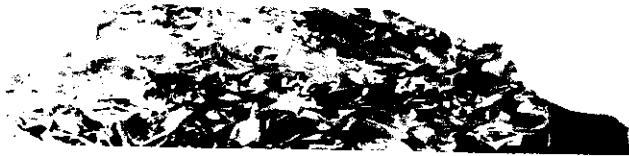


Figure 9 : L'aluminium

##### b- acier :

L'acier (% C < 1,8) est obtenu en décarburant la fonte (% C = 2÷4), et éliminant le plus possible le soufre et le phosphore tout en modifiant la teneur des autres éléments (Si, Mn).

Les procédés pratiques d'élaboration de l'acier sont[12] :

- l'affinage liquide, qui fournit la quasi-totalité de l'acier employé, le métal restant liquide à la fin de l'opération,
- l'affinage solide, qui donne un produit à l'état pâteux à la fin de l'opération.



Figure 10 : acier

**c- verre :**

Au sens commun, le verre est un matériau dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de Silicium (Silice  $\text{SiO}_2$ , le constituant principal du sable). Les verres silicatés transparents sont les plus répandus, par exemple pour les fenêtres, les bouteilles ou les verres à boire. Il existe cependant d'autres types de verre organiques ou métalliques[13].

Figure 11 : verre

**d- fibre de carbone :**

a fibre de carbone est un matériau se composant de fibres extrêmement fines, de 5 à 15 micromètres de diamètre, et composé principalement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques qui sont alignés plus ou moins parallèlement à l'axe long de la fibre. L'alignement des cristaux rend la fibre extrêmement résistante pour sa taille. Plusieurs milliers de fibres de carbone sont enroulées ensemble pour former un fil, qui peut être employé tel quel ou tissé[14].

Les fibres de carbone sont caractérisées par leur faible densité (1,7 à 1,9), leur résistance élevée à la traction et à la compression, leur flexibilité, leurs bonnes conductivités électrique et thermique, leur tenue en température et leur inertie chimique (sauf à l'oxydation)[14].

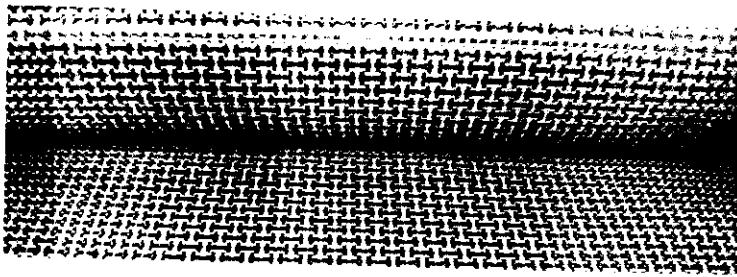


Figure 12 : fibre de carbone

*e- aramide*

Les polyamides aromatiques, ou aramides, sont une classe de matériaux résistant à la chaleur et/ou présentant de bonnes propriétés mécaniques. Ils ne peuvent être utilisés que comme fibres, qui servent surtout à la fabrication de matériaux composites, en renfort de matrices[14].

Les fibres sont obtenues par filage (étirage au travers d'une filière) à partir d'une dissolution. Les chaînes moléculaires sont fortement orientées dans le sens de l'axe de la fibre, de sorte que les forces des interactions moléculaires peuvent être exploitées pour la résistance thermique et/ou mécanique[14].



*Figure 13 : fibre de aramide*

*f- Le plastique*

Les plastiques sont des matériaux déformables : ils peuvent être moulés ou modelés facilement, en général à chaud et sous pression. Leur facilité de mise en forme, résistance aux chocs, aux variations de température, à l'humidité, aux détergents,... les rendent utiles dans tous les domaines : emballage, bâtiment, automobile, électricité, etc[15].

Il existe un grand nombre de plastiques aux propriétés différentes, on les classe en trois grandes catégories: les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères[15].



*Figure 14 : Les plastiques*

## *I- la mécanique de rupture*

### **I-1 Introduction :**

La rupture des matériaux est un problème important en science des matériaux et en ingénierie. La capacité portante d'une structure et sa durée de vie y sont fortement liées. Ce deuxième chapitre a pour but de présenter les notions essentielles de la rupture linéaire et les critères de propagation de fissures adaptés aux matériaux fragiles. On y discute certains points de la caractérisation expérimentale des matériaux ainsi que les méthodes numériques les plus utilisées dans l'analyse de structures vis à vis de la rupture[16].

### **I-2 Historique :**

Durant la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, l'usage de l'acier et d'autres alliages métalliques se développa considérablement. Avec cet essor se multiplièrent aussi les accidents dus à l'utilisation inadéquate de ces matériaux, à des faiblesses de conception et dimensionnement. Certains de ces accidents, de part leur soudaineté et leur brutalité, défrayèrent à raison la chronique[16].

L'un des premiers incidents enregistré sur une structure importante fut la rupture d'une chaîne du pont suspendu Montrose en mars 1830 en Grande Bretagne. Depuis, il y a eu un nombre important d'effondrements de ponts, dont le King's Bridge à Melbourne (1962) ou encore le point pleasant pridge en virginie (1967). Les accidents ferroviaires dus à une rupture brutale des essieux, des roues ou encore des rails ont également été très nombreux. Entre 1860 et 1870, le nombre de personnes victimes d'accidents de train en Grande Bretagne s'élevait environ à 200 par an. De nombreux accidents intervinrent également sur des pipelines, ou encore sur des avions. En janvier 1919, un énorme réservoir de molasse, de 27 mètres de diamètre et 15 mètres de hauteur se déchira soudainement, répandant 7, 5 millions de litres de molasse dans les rues de Boston (USA). Douze personnes trouvèrent la mort et une quarantaine furent blessées dans cet accident. Dans les années 30 et 40, plusieurs ponts franchissant le canal Albert, en Belgique, furent victimes de rupture. De nombreux autres accidents ont été rapportés, ce ne fut qu'au cours de la seconde guerre mondiale que l'on commença à sérieusement considérer le problème de la rupture[16].

Les débuts de l'étude de la rupture des matériaux fragiles (qui se déforment peu avant de se rompre) remontent aux années 1920, avec les travaux précurseurs de Griffith [42], ses études réalisées dans un milieu élastique fissuré, d'un point de vue énergétique. Il a ainsi mis en évidence une variable (appelée plus tard taux de restitution d'énergie) caractérisant la rupture, et dont la valeur critique est une caractéristique du matériau. Mais ces travaux sont tombés dans un oubli relatif avant d'être exhumés dans les années 1950–1960, lorsque la discipline a réellement pris son essor (travaux d'Irwin et de Rice). Ces études ont donné la définition des facteurs d'intensité de contraintes, caractérisant l'état de sollicitation de la région dans laquelle la rupture se produit[16].

Entre 1960 et 1980, la mécanique de la rupture connaît un grand succès scientifique, avec notamment l'apparition de la mécanique non linéaire de la rupture qui a permis de mieux prendre en compte le comportement plastique des matériaux. De nombreux travaux sont publiés à cette période ; on peut citer par exemple Rice et Bui qui introduisent la notion d'intégrales indépendantes du contour telles que l'intégrale  $J$ , dont les propriétés ont permis de caractériser la ténacité d'un matériau lorsque la plasticité n'est plus confinée à la pointe de fissure. Tous les développements théoriques réalisés à cette époque ont permis de déterminer la forme exacte de la singularité, et des champs asymptotiques en pointe de fissure nécessaires à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux. De plus, ils représentent une solution précise à de nombreux problèmes de géométries simples, et peuvent donc être utilisés comme solutions approchées pour des problèmes plus complexes[16].

Le domaine d'application de cette théorie ne se limite pas aux structures métalliques. Elle s'applique également aux roches, aux bétons, aux céramiques et aux polymères (dans une certaine gamme de température). Les échelles d'application sont également très diverses puisqu'elles vont des microsystemes (Silicium) à la géomécanique de l'écorce terrestre (création et propagation de failles). La Figure 1 présente la rupture fragile d'une structure en maçonnerie[10].



*Figure 1 : Rupture fragile d'une structure maçonnée.*

### *1-3 Notions fondamentales de la mécanique de la rupture*

La rupture des structures ou des composants de systèmes a, en effet, des conséquences colossales en termes de coût. Tous les matériaux contiennent des défauts. Certains de ces défauts perturbent le champ des contraintes et créent des concentrations de contraintes qui favorisent la formation des fissures. Les matériaux fragiles sont particulièrement sensibles à la présence des défauts [16].

La mécanique de la rupture permet de prévoir les conditions de la rupture des matériaux et des structures, lorsqu'ils contiennent une fissure. La mécanique de la rupture est l'étude des fissures macroscopiques. Elle permet de déterminer les champs de contraintes et de déformations et d'exprimer les conditions de propagation des fissures. Elle propose des relations entre les contraintes et la longueur des fissures macroscopiques en fonction des caractéristiques du matériau. La longueur et la position de la fissure au sein du solide ou de la structure doivent être préalablement connues [16].

La mécanique linéaire de la rupture par fissuration est fondée sur une analyse élastique du champ des contraintes en petites déformations. L'analyse des contraintes et des déformations au voisinage des pointes ou fronts de fissures constitue une base nécessaire pour étudier le comportement des fissures [16].

### *1-4 Généralités sur les ruptures par fissuration*

Hormis les processus chimiques de ruine des matériaux et structures, il existe plusieurs processus essentiellement mécaniques de rupture[17] :

- Le flambage,
- La rupture ductile par surcharge,
- La rupture fragile sous des contraintes généralisées inférieures à la limite élastique,
- La rupture par fatigue à grand nombre de cycles,
- La rupture par fluage à haute température...

La rupture par fissuration est la création de la surface de discontinuité. L'échelle dimensionnelle de cette discontinuité surfacique dépend, en fait, directement du moyen de mesure utilisé, et bien entendu, de la nature de l'approche recherchée. La mécanique des solides aborde les problèmes de calcul de structure où l'on parle d'un élément de volume dont les dimensions de 1 mm, et de structure pour 10 mm à  $10^3$  mm. Dans ce domaine, on traite de problème la 'rupture par fissuration' [17].

La fissuration prend en compte l'existence de défauts comme des inclusions ou des vides dans le matériau ou encore des zones d'endommagement à partir desquels des fissures vont s'initier puis se propager pour parvenir à une taille provoquant la ruine de la structure. En général, on distingue deux types de fissuration [17]:



1- La fissuration stable qui comprend,

- la fissuration quasi-statique sous une charge constante,
- la fissuration par fatigue sous une charge répétée (cyclique),
- la fissuration dynamique lorsqu'une charge est appliquée soudainement.

2- La fissuration instable est-elle instantanée et à laquelle peut conduire la fissuration stable.

### ***1-5 Modèles de la fissuration des structures***

Il y a principalement deux modèles pour décrire la fissuration des structures, la mécanique d'Endommagement et mécanique de la rupture.

Lorsqu'une pièce est soumise à des efforts d'origines variées, il existe des limites, en contraintes ou en déformations, qu'elle ne doit pas dépasser, sous peine d'endommager le matériau et de provoquer sa rupture. Suivant que l'on s'intéresse à la dégradation du matériau d'un point de vue micro-mécanique ou macro-mécanique, deux approches peuvent être utilisées[17]:

#### ***a- La mécanique d'Endommagement :***

propose de décrire continûment la dégradation progressive du matériau due à l'apparition, à la croissance, puis à la coalescence de micro-fissures ou de micro-cavités présentes dans le matériau. Cette approche, initialement introduite par Kachanov, a été reprise et développée par de nombreux auteurs tels que Chaboche, Lemaitre, Bui en 1981, Ehlacher, Gurson, Tvergaard, Needleman, Rousselier, etc... Lorsque les microfissures, les microcavités créées par croissance ou par coalescence des défauts sont de taille assez grande, cette façon d'aborder le problème n'est plus valable, et il faut alors utiliser la mécanique de la rupture.

#### ***b- La mécanique de la rupture :***

pour objet l'étude du comportement mécanique d'un matériau en présence de fissures macroscopiques. Cela revient notamment à déterminer le champ des contraintes et des déformations au voisinage de la pointe d'une fissure. L'étude de ces champs mécaniques permettant ensuite de juger de la stabilité ou non d'une fissure. Il est également possible, comme nous le verrons par la suite, d'aborder la mécanique de la rupture à travers une étude énergétique du solide fissuré

### ***1-6 Modes élémentaires de fissuration :***

D'un point de vu macroscopique, on distingue deux modes principaux de rupture : *la rupture plate* correspond à une surface de rupture globalement perpendiculaire à la direction de la contrainte principale maximale, et *la rupture inclinée* qui est inclinée

dans le sens transversal par rapport à la direction de propagation s'accompagne souvent de grandes déformations[17].

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants[17]:

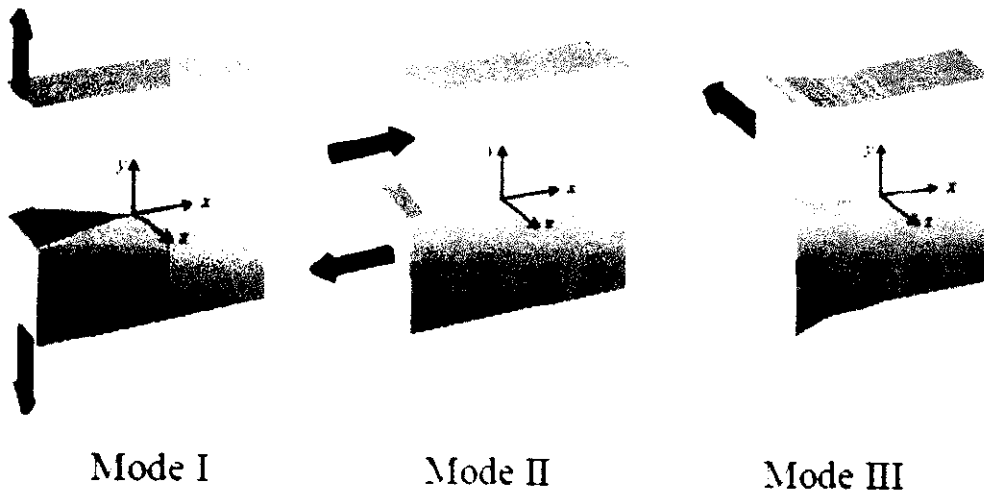


Figure 2 : Modes de fissuration

- **Mode I :** *mode d'ouverture de la fissure*, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont perpendiculaires à la direction de propagation.
- **Mode II :** *mode de cisaillement dans le plan*, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de propagation.
- **Mode III :** *mode de cisaillement hors du plan (anti-plan)*, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles fond de la fissure.

## II- Comportement mécanique :

L'effet des forces sur différents matériaux est expliqué par Robert HOOKE (1635-1703), de façon empirique à l'échelle macroscopique : un matériau à l'état solide ne résiste à une force appliquée qu'en se déformant sous l'action de cette force. Les matériaux sont élastiques. Il établit une règle, la loi de HOOKE, selon laquelle l'allongement est toujours

proportionnelle à la force appliquée. Cette loi n'est rigoureusement vraie que pour les céramiques, le verre, la plupart des minéraux et les métaux les plus durs[18].

Mais, dans quelle mesure le comportement d'une structure dépend de son matériau constitutif plutôt que de ses dimensions et de sa forme ? Nous avons besoin de standards objectifs de comparaison qui soient indépendants de la taille et de la forme du matériau[12].

La considération des conditions qui règnent en chaque point d'un matériau soumis à des forces mécaniques conduit aux notions de contrainte et de déformation. La définition claire et utilisable de ces deux notions est due à Augustin CAUCHY (1789-1857). Quand on soumet un corps à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent par réaction, à l'intérieur de ce corps. À ces contraintes sont associées des déformations[18].

Pour s'affranchir de la dépendance des dimensions du matériau, les paramètres contrainte et déformation sont utilisés[18].

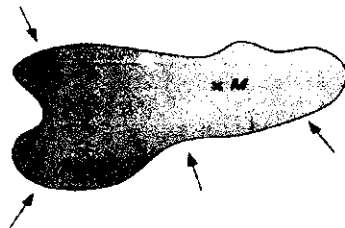
### **II-1 La contrainte :**

La contrainte détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés les uns des autres ou comprimés les uns sur les autres. Cette contrainte est, pour une traction simple, la force qui agit sur une unité de surface du matériau, Elle se mesure en Pascal (Pa) [18].

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

#### **a- état des contraintes dans un solide :**

L'état des contraintes en un point  $M$  d'un solide soumis à un chargement mécanique (figure 3) permet de caractériser les actions mécaniques exercées sur la matière en ce point[19].



*Figure 3 : Solide soumis à un chargement mécanique.*

## b- Tenseur des contraintes

En tout point  $M$  d'un milieu continu, l'état des contraintes est entièrement déterminé par la connaissance du *tenseur des contraintes*, noté  $\sigma(M)$ . Ce tenseur est un tenseur de rang 2, symétrique, représenté par la matrice[19] :

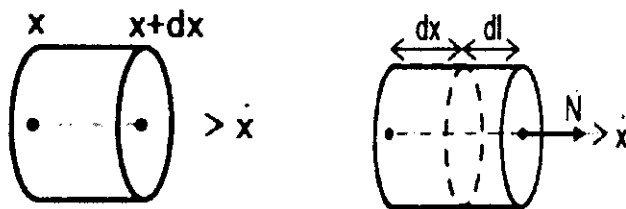
$$\sigma(M) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2)$$

avec

$$\sigma_{21} = \sigma_{12}, \sigma_{31} = \sigma_{13}, \sigma_{32} = \sigma_{23}. \quad (3)$$

## II-2 La déformation :

La déformation indique dans quelles proportions les liaisons inter atomiques (a l'échelle microscopique) et la structure elle-même (l'objet, a l'échelle macroscopique) ont été déformées. La déformation, pour une traction simple, est le rapport de l'allongement a la longueur initiale[18].



$$\epsilon_{x(X)} = \frac{dl}{dx} \quad (4)$$

*a-état des déformations en un point*

Soit un solide ( $S$ ) déformable (figure 4). Dans son état non déformé, la position d'un point  $M$  quelconque du solide ( $S$ ) est définie, dans un repère  $(^0/\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ , par le vecteur position[19].

$$\overrightarrow{OM} = x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2 + x_3 \vec{e}_3 \quad (5)$$

Sous l'effet d'actions mécaniques extérieures, le solide se déforme, et les points du solide se déplacent : le point  $M$  vient en  $M'$ . La position du point  $M$  dans l'état déformé est définie par:

$$\overrightarrow{OM'} = \overrightarrow{OM} + \overrightarrow{MM'} \quad (6)$$

Le vecteur déplacement  $\overrightarrow{MM'}$  est une fonction du point  $M$ , généralement notée  $\vec{u}(M)$ . Ce déplacement varie d'une manière continue à l'intérieur du solide[19].

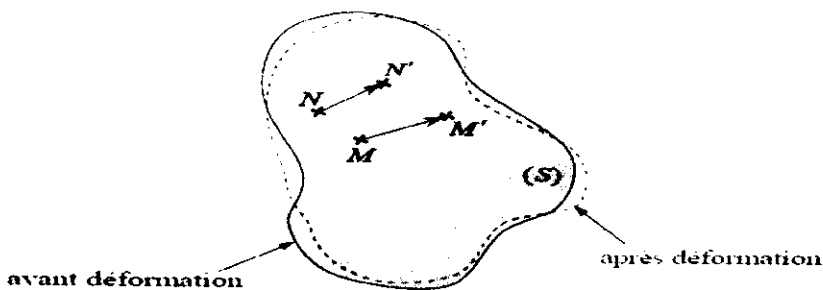


Figure 4 : Solide déformable

### II-3 diagramme contrainte – déformation en traction d'une éprouvette en métal

L'application d'une force provoque initialement une déformation élastique de l'éprouvette. Cela se traduit sur le diagramme par une droite car la déformation est proportionnelle, pour un métal, à la contrainte (loi de HOOKE) [18].

Cette déformation élastique est réversible. Si la contrainte est annulée, l'éprouvette revient instantanément à sa forme initiale. Cette déformation élastique est suivie d'une déformation irréversible (permanente) appelée déformation plastique, qui se traduit sur le diagramme par une courbe qui se termine au moment de la rupture de l'éprouvette.

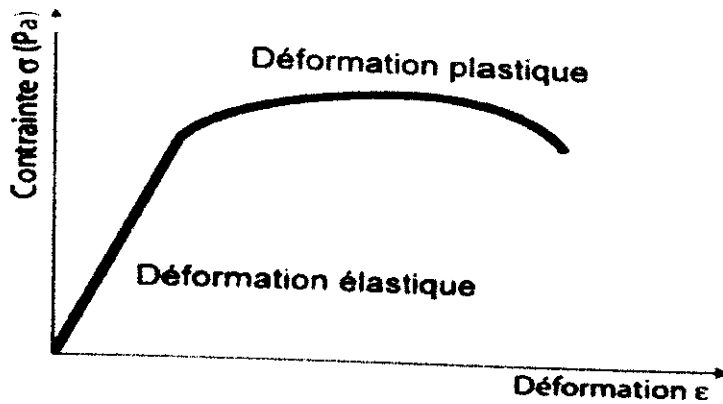


Figure 5 : Courbe contrainte-déformation. Domaine élastique et domaine plastique

### III- La méthode des éléments finis étendus(x-fem)

#### III-1 Introduction :

La méthode des éléments finis étendus développée au début des années 2000 par Moës *et al.* commence à avoir une certaine maturité et apparaît peu à peu dans les codes de calcul utilisés dans l'industrie. Ce modèle basé sur la partition de l'unité consiste à enrichir la base polynomiale d'approximation de manière à rendre possible la prise en compte d'une discontinuité au sein d'un élément. De nombreux travaux ont été menés pour traiter des cas de propagation de fissure en dynamique rapide sur des modèles 2D plans ou 3D volumiques. Cependant, le maillage doit être relativement fin pour décrire correctement les différents champs dans le voisinage de la fissure pour ensuite être utilisés dans un critère de propagation. Mener de tels calculs à l'échelle d'une structure navale dans un contexte de bureau d'étude paraît délicat. Ces structures étant élancées (assemblages de plaques et de coques), il est pertinent d'utiliser des modèles coques qui permettent de diminuer considérablement le nombre de degrés de liberté d'un modèle et de gagner en temps de calcul [20].

#### III-2 La formulation X-FEM classique :

L'idée des méthodes de partition de l'unité (PUM) (Babuska *et al.*, 1997) est d'enrichir un champ d'approximation provenant des éléments finis classiques avec des fonctions qui sont capables de décrire un comportement particulier que les éléments finis classiques peinent à représenter correctement[21].

III -3 Basic XFEM Concepts :

- is an extension of the conventional finite element method based on the concept of partition of unity[22].
- allows the presence of discontinuities in an element by enriching degrees of freedom with special displacement functions[22].

Vecteurs de déplacement nodal    fonction de saut    Fonctions asymptotiques

Vecteur de déplacement    ↓    ↓    ↓

$$u = \sum_{I=1}^N N_I(x) [u_I + H(x)a_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha}] \quad (7)$$

Fonctions de forme    ↑    Nodal enriched degree of freedom v

Nodal enriched degree of freedom vector    ↗

S'applique aux nœuds dont le support de fonction de forme est coupé par le fond de fissure

$$u = \sum_{I=1}^N N_I(x) [u_I + H(x)a_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha}] \quad (8)$$

S'applique à tous les nœuds du modèle le mode

S'applique aux nœuds dont le support de fonction de forme est coupé par l'intérieur de la fissure

**Méthode du level set**

- ✓ une technique numérique permettant de décrire une fissure et de suivre son mouvement [16].
- ✓ Couples naturellement avec XFEM et permet la modélisation de fissure 3D arbitraire. croissance sans remodelage
- ✓ Nécessite deux jeux de niveaux pour une fissure:

- Le premier décrit la surface de la fissure, ( $\phi$ )

- La seconde,  $\Psi$  ( $\psi$ ), est construite de manière à ce que l'intersection de  $t$  ou soit telle que l'intersection de deux ensembles de niveaux donne le front de fissure.

- ✓ Utilise des fonctions de distance signées pour décrire la géométrie de la fissure.
- ✓ Aucune représentation explicite de la fissure n'est nécessaire et la fissure est entièrement Décrite par données nodales[22].



Figure 19 : Présentation du crack

#### III-4 Pourquoi utiliser X-FEM :

La méthode X-FEM est une simple extension de la méthode des éléments finis. Elle autorise un maillage indépendant de la géométrie du problème. Frontières, trous, fissures deviennent des entités que l'on peut insérer, déplacer, propager, sans avoir à modifier le maillage. Un maillage simple et unique remplace ainsi plusieurs maillages complexes. Pour représenter une discontinuité ou une singularité au sein des éléments finis, la base des fonctions de forme est enrichie, en utilisant les propriétés de la partition de l'unité. En fissuration, la discontinuité de déplacement due à la fissure est introduite par une fonction Heaviside généralisée et l'ajout des champs asymptotiques en bout de fissure améliore la précision en mécanique de la rupture élastique. De plus, la méthode des « level sets » s'avère particulièrement pratique pour représenter des fissures 3D et efficace pour la phase de propagation, l'idée principale étant de considérer l'interface comme l'iso-zéro d'une fonction distance[23].

On peut utiliser X-FEM pour[23] :

- représenter une fissure (discontinuité des déplacements),
- représenter une interface entre deux solides disjoints (discontinuité des déplacements),
- représenter un trou ou un vide (sous-épaisseur par exemple),
- représenter l'interface entre deux matériaux (discontinuités des contraintes).



Représentation d'une fissure

En mécanique de la rupture, une fissure comporte deux lèvres et un fond de fissure. Les lèvres sont initialement confondues, sinon, on parle d'entaille. Le champ de déplacement (ou de température) est discontinu au travers des lèvres de la fissure, et le champ de contrainte est singulier en fond de fissure.

Représentation d'une interface entre deux solides disjoints

Les deux solides sont séparés par une interface (exemples : une faille géologique entre deux couches, l'écrasement d'un lopin sur un bâti fixe, deux solides thermiquement isolés). Le champ de déplacement ou de température est discontinu au travers de l'interface. Les matériaux de part et d'autre de l'interface peuvent être différents, mais ont la même loi de comportement. Du contact est éventuellement défini sur l'interface.

Représentation d'un trou ou d'un vide

C'est un cas particulier du cas précédent où un des solides est du vide. Pour cela, aucune condition de contact n'est définie sur l'interface. Si aucun chargement n'est appliqué sur le solide correspondant au vide (sauf le blocage des modes rigides) il n'intervient pas dans le calcul, et joue le rôle de « vide ».

Représentation d'une interface dans un matériau

Dans un matériau, les deux matériaux sont « collés », le déplacement au travers de l'interface entre les deux matériaux est continu, mais les contraintes sont discontinues.

**III-5 Spécificité d'un calcul avec X-FEM**

- définition de la fissure : la fissure n'étant pas contenue dans le maillage, il faut la définir d'une autre manière, [23].
- modification du modèle : certains éléments doivent être enrichis afin de représenter une discontinuité de déplacement ou de la température au travers de la fissure et la singularité de contrainte en fond de fissure, .
- post-traitement de visualisation : afin de visualiser l'ouverture de la fissure ou la discontinuité du champ de température, il est nécessaire de créer un maillage de visualisation et les champs de résultat associés. [23].

**III-6 Modélisation d'une fissure selon la X-FEM**

Pour représenter une fissure, deux types de fonctions d'enrichissement sont utilisés pour modéliser d'une part la discontinuité du déplacement le long de la fissure et d'autre part, la solution en pointe de fissure[17].

Le champ de déplacement  $U$  est alors cherché sous la forme [11] :

$$U(x) = \sum_{i \in N} N_i(x) u_i + \sum_{i \in N_d} N_i(x) H(x) a_i + \sum_{i \in N_p} N_i(x) \left[ \sum_{j=1}^4 F_j(x) b_i^j \right] \quad (9)$$

Où :

$N$  est l'ensemble des noeuds du maillage ;

$N_i(x)$  sont les fonctions de forme éléments finis classique associée au noeud  $i$  ;

$N_d \subset N$  est l'ensemble des noeuds enrichis par la discontinuité et les coefficients  $a_i$  sont les degrés de liberté (vectoriels) correspondants. Un noeud appartient à  $N_d$  si son support est coupé par la fissure mais ne contient aucune de ses pointes. Ces noeuds sont entourés d'un carré sur la figure 14

$N_p \subset N$  est l'ensemble des noeuds à enrichir pour modéliser le fond de fissure et les coefficients  $b_i$  sont les degrés de liberté (vectoriels) correspondants. Un noeud appartient à  $N_p$  si son support contient la pointe de fissure. Ces noeuds sont entourés d'un triangle sur la figure 14

Les fonctions  $F_j$  permettent de représenter les solutions asymptotiques en pointe de fissure. Elles valent en élasticité [17].

$$\{F_j(x)\} = \left\{ \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta \right\} \quad (10)$$

Où :

$(r, \theta)$  sont les coordonnées polaires dans les axes locaux en fond de fissure On remarquera que, parmi ces fonctions  $F_j$ , seule la fonction  $\sqrt{r} \sin \theta / 2$  est discontinue.

$$H(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x \text{ est au dessus de la fissure} \\ +1 & \text{si } x \text{ est au dessous de la fissure} \end{cases}$$

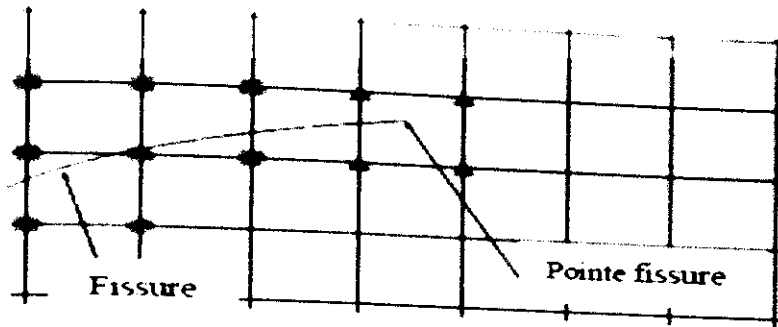


Figure 20: Fissure placée sur un maillage uniforme. Les noeuds entourés d'un carré sont enrichis par la discontinuité et les noeuds entourés d'un triangle sont enrichis par les bases de fonctions asymptotiques en pointe de fissure[11].

#### a- Les difficultés techniques de mise en œuvre :

Les méthodes d'enrichissement basées sur la PUM donnent lieu à plusieurs difficultés en ce qui concerne leur implémentation. La grande flexibilité offerte par la X-FEM (le maillage n'a pas besoin de respecter la position de la fissure) a un prix qui se paie dans sa mise en œuvre[17].

#### b- Description de la fissure :

Dans une approche éléments finis classique, la position des fissures est décrite par un ensemble de faces d'éléments. Dans l'approche X-FEM, elle est indépendante de la topologie du maillage et doit donc être fournie à part. En 2D, une fissure peut être représentée par une succession de segments de droite. Il faut noter que la seule opération où la représentation de la fissure intervient dans la X-FEM est l'évaluation des fonctions d'enrichissement  $\{F_j(x)\}$  et  $H(x)$ . En un point d'intégration, il faut savoir si l'on se trouve d'un côté ou de l'autre de la fissure et connaître les coordonnées polaires  $(r, \theta)$  de ce point dans les axes locaux en pointe de fissure. Ces évaluations peuvent se révéler ardues à implémenter et lentes si la géométrie de la fissure est complexe[17].

#### c- Intégration numérique :

Sur les éléments finis coupés par une fissure, des fonctions discontinues doivent être intégrées. Afin de permettre l'intégration de part et d'autre de la fissure, on peut proposer un découpage de ces éléments en sous-éléments (triangles en 2D et tétraèdres en 3D). La figure 15 montre un exemple d'une telle décomposition en 2D. Sur les sous triangles, en 2D, 3 points de Gauss sont utilisés. Insistons sur le fait que ces sous-éléments créés n'apportent aucun nouveau degré de liberté. Leur seule raison d'être est l'intégration[17].

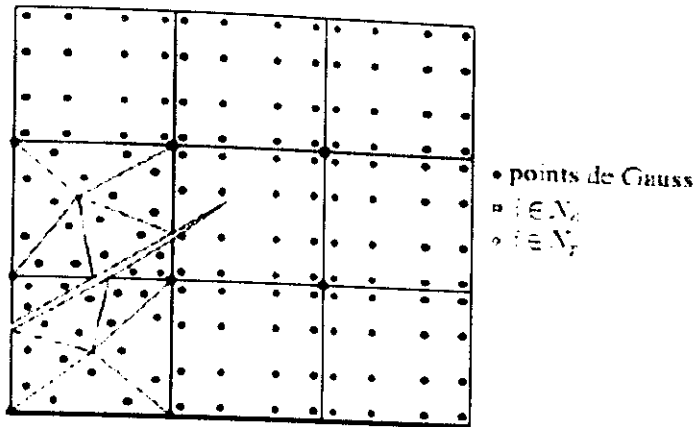


Figure 21: Intégration numérique prenant en compte une fissure avec la X-FEM[11].

Les éléments coupés par la fissure sont décomposés en sous-triangles sur lesquels une intégration à 3 points de Gauss est utilisée. Pour les éléments quadrangulaires qui ne sont pas coupés par la fissure mais dont au moins un des degrés de liberté est enrichi par les fonctions asymptotiques ( $i \in N_p$ ), une intégration à 16 points est effectuée[17].

Sur les éléments qui ne sont pas coupés par la fissure mais dont au moins un des degrés de liberté est enrichi par les fonctions asymptotiques  $F_j$  en fond de fissure présentant la singularité en  $\sqrt{r}$ , un nombre élevé de points de Gauss est utilisé : 12 pour les triangles, 16 pour les quadrilatères[17].

Enfin, sur les éléments non coupés par la fissure et pour lesquels tous les degrés de liberté sont classiques, le nombre de points de Gauss utilisé est standard : pour des éléments du premier degré, on prend 1 point pour les triangles, 4 pour les quadrilatères[17].

# Chapitre III

## Analyse et simulation des réservoirs de stockage d'hydrogène

### *1-Relation entre la densité énergétique et le stockage d'hydrogène*

Remplacer l'essence et le diesel par de l'hydrogène, c'est une des solutions pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> sur la route. Un projet européen est en cours pour encourager le développement de cette technologie.

L'idée que l'hydrogène pourrait être utilisé comme un combustible propre pour remplacer les carburants actuels et qu'il pourrait éventuellement former la base d'un état équilibré, d'économie durable et de sauver l'environnement a été développé.

Ce moteur à combustion interne fonctionne sur le même principe que les moteurs à explosion. Il produit de l'énergie de propulsion à partir de la combustion du dihydrogène avec le dioxygène contenu dans l'air. L'utilisation du moteur à hydrogène sur un véhicule compact pose toutefois des problèmes quant à la production, au transport et au stockage de l'hydrogène.

Les fabricants de véhicules propres font face à plusieurs obstacles en matière de stockage d'hydrogène, car ils cherchent à créer un système de stockage sûr et efficace, les fournisseurs et les instituts de recherche étudient technologies permettant de stocker l'hydrogène sous forme de gaz comprimé, de liquide cryogénique ou des solides matériaux.

Aucune de ces technologies ne satisfait toutes les caractéristiques de stockage d'hydrogène recherchées par les fabricants et les utilisateurs finaux. Comparé à d'autres technologies, les avantages du liquide l'hydrogène sont la densité d'énergie élevée à basse pression, comme indiqué à la FIGURE 1 et caractéristiques de transport favorables. Pour obtenir la même densité d'énergie que avec de l'hydrogène liquide à une pression de service de 0,5 MPa, l'hydrogène gazeux doit être comprimé jusqu'à environ 200 MPa. Par conséquent, la basse pression permet des géométries autres que sphères ou cylindres et facilite une meilleure intégration de la cuve de stockage dans le véhicule.

L'inconvénient des systèmes de stockage d'hydrogène liquide est l'évaporation due au fini chaleur inleak au conteneur isolé. Par conséquent, les études de systèmes de refroidissement avancés proposer une augmentation du temps avant que les pertes par évaporation ne se produisent à plus de 12 jours.

Les voitures représentent le marché ultime pour les fabricants de systèmes de stockage d'hydrogène aux quantités impliquées dans le monde entier. Ils posent également certains des plus grands défis à relever commercialisation, y compris leur taille relativement petite, la vaste infrastructure de ravitaillement requis, et les habitudes d'entretien incohérentes du grand public. En outre, les attentes en matière de performances et de fiabilité sont élevées. Les problèmes de coûts seront traités par sélection des technologies de production automatisées et des effets d'échelle dans la production en série

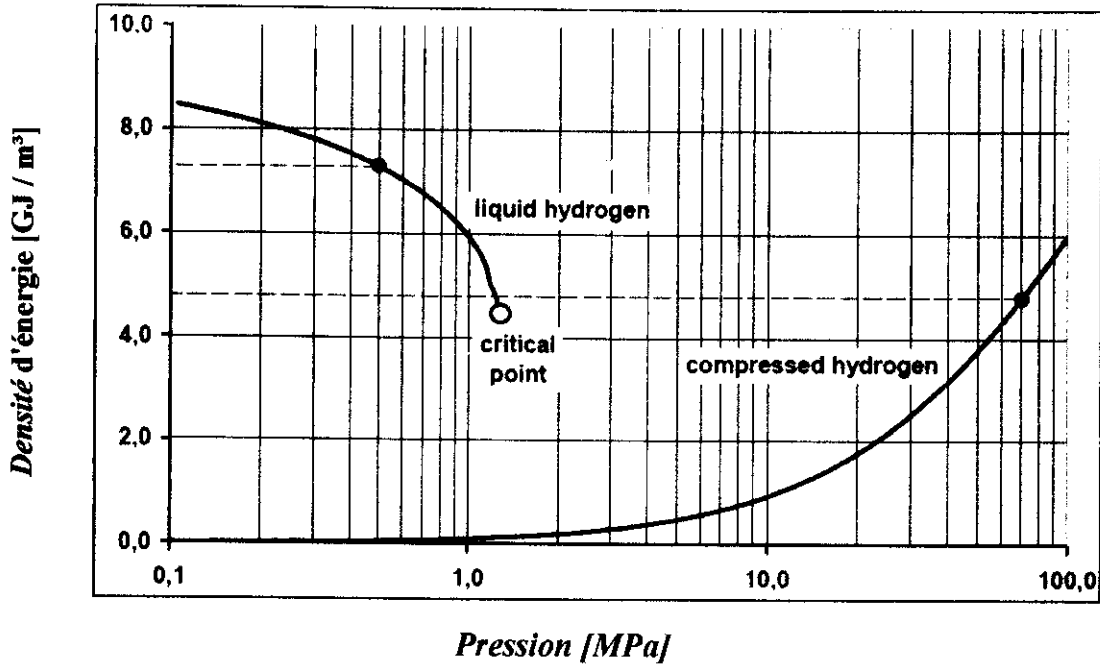


Figure 1 : Densité d'énergie de l'hydrogène liquide et gazeux en fonction de la pression

## II - Décrivez les étapes suivies :

Cette étude a été réalisée sur les réservoirs de stockage d'hydrogène de type I Une section a été prélevée dans le réservoir de stockage de l'hydrogène, puis une fente dans l'une des faiblesses particulières du réservoir, après quoi une pression a été appliquée dans la partie interne du réservoir. Deux pressions différentes ont été appliquées, 70 et 100 MPa.

## III- Analyse des éléments finis :

### a- Simulation du réservoir de stockage à haute pression

Dans cette étude, nous avons utilisé un navire de stockage de type I avec une pression de 70 MPa Et pression 100 MPa, Le réservoir est en aluminium (Al6061-T6) Les propriétés des matériaux sont indiquées dans le tableau 1.

Où la figure 2 montre le réservoir cylindrique de type 1 en aluminium utilisé dans la simulation.

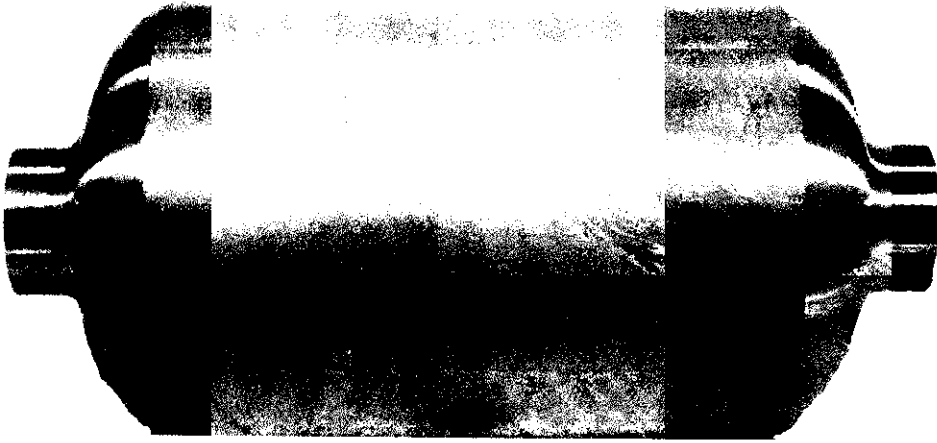


Figure 2 : réservoir cylindrique type I en aluminium

Table 1 : Matériel propriété aluminium

E (GPa) module de yong	68.26
$\nu$ coefficient de poisson	0.33

Les dimensions du réservoir utilisé dans cette étude sont indiquées sur la Figure 3. Son épaisseur est de 6 mm, Longueur du bord extérieur 504.50 mm, Longueur de l'intérieur 845 mm, Diamètre 458 mm

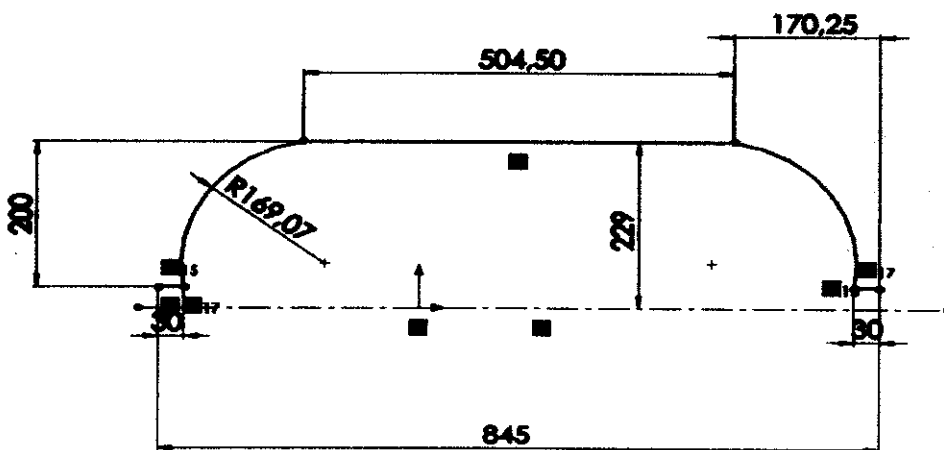
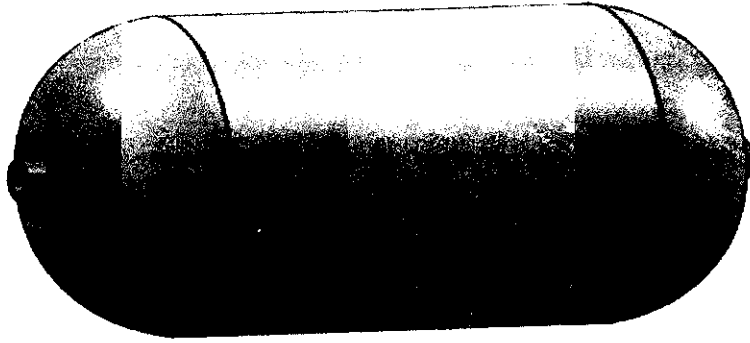


Figure 3 : Les dimensions du réservoir utilisé

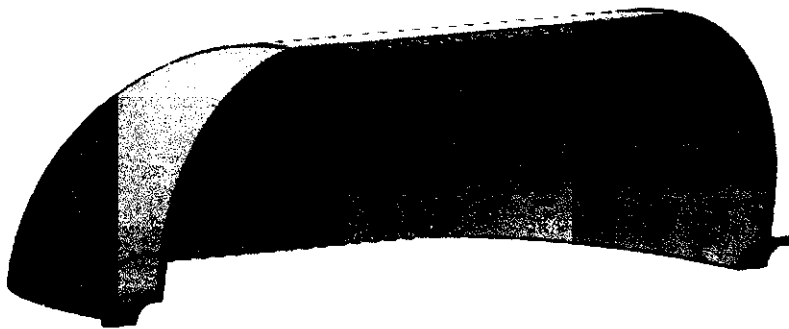




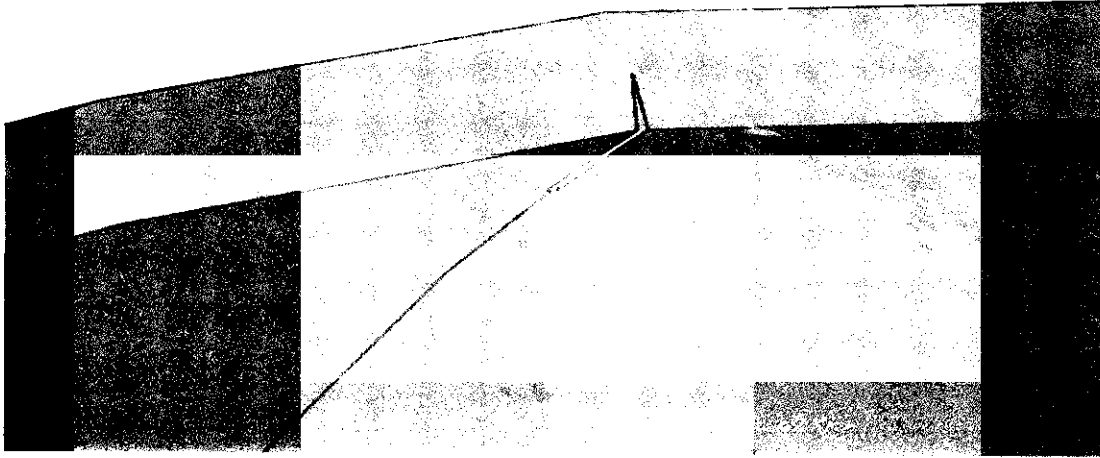
*Figure 4 : Forme finale du réservoir avec SolidWorks*

***b- Faire une fissure dans l'une des faiblesses :***

Nous prenons une partie du char à un angle de 90 degrés, Comme indiqué dans Figure 5  
Ensuite, nous faisons une fissure dans la partie supérieure à droite et la forme est placée dans  
Figure 6

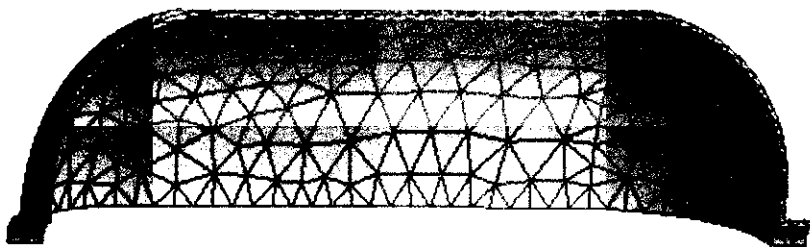


*Figure 5 : Section À un angle de 90 degrés*



*IV - Simulation et résultat*

*a- Le statut de compression gazeuse à 34°C*



*Figure 7 : maillage*

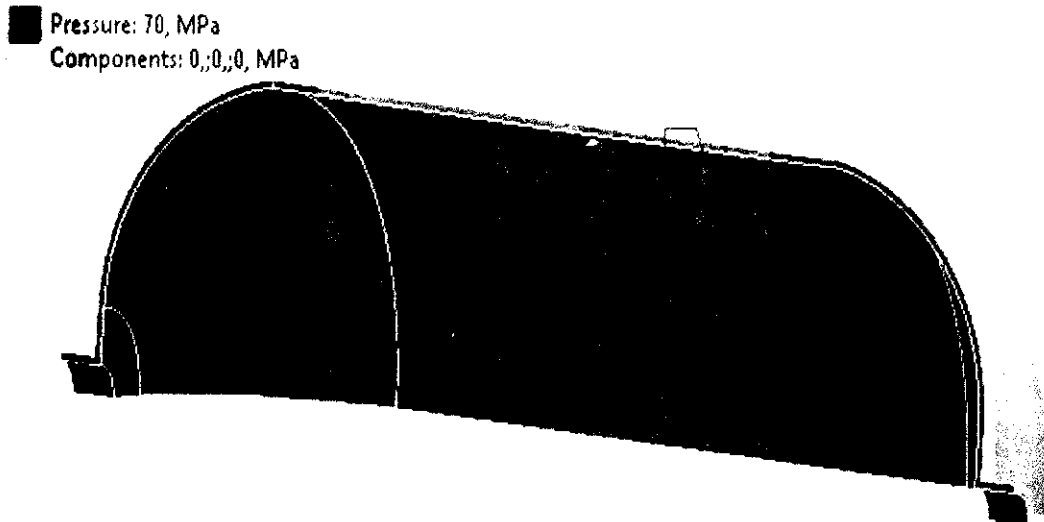


Figure 8 : Application de la pression interne 70 MPa

- Les résultats les plus importants

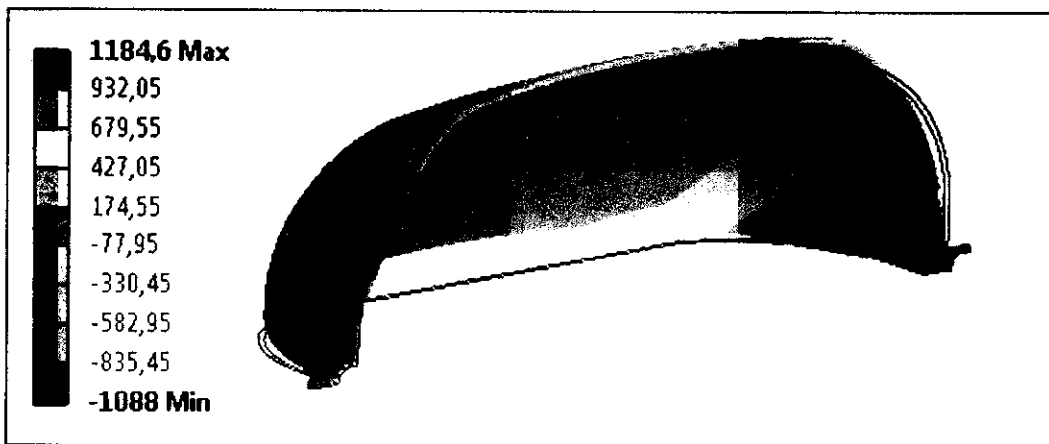


Figure 9 : direction déformation sur l'axe X (mm)

Notez que la valeur de la direction de distorsion sur l'axe X prend une valeur – 1088 mm La valeur la plus basse possible commence alors à augmenter jusqu'à atteindre la valeur 1184.6 mm Dans la mesure du possible

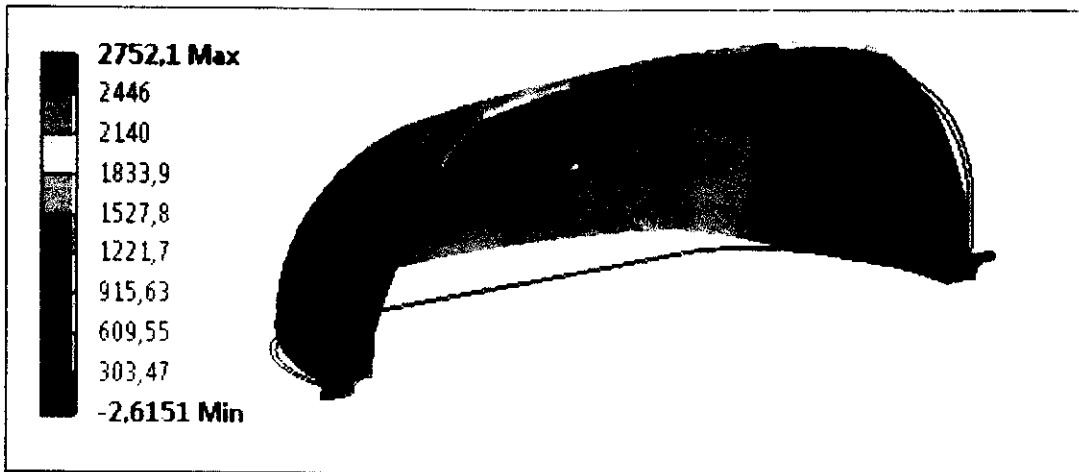


Figure 10: direction déformation sur l'axe Y (mm)

Notez que la valeur de la direction de distorsion sur l'axe Y prend une valeur  $-2.6151$  mm. La valeur la plus basse possible commence alors à augmenter jusqu'à atteindre la valeur  $2752.1$  mm. Dans la mesure du possible.

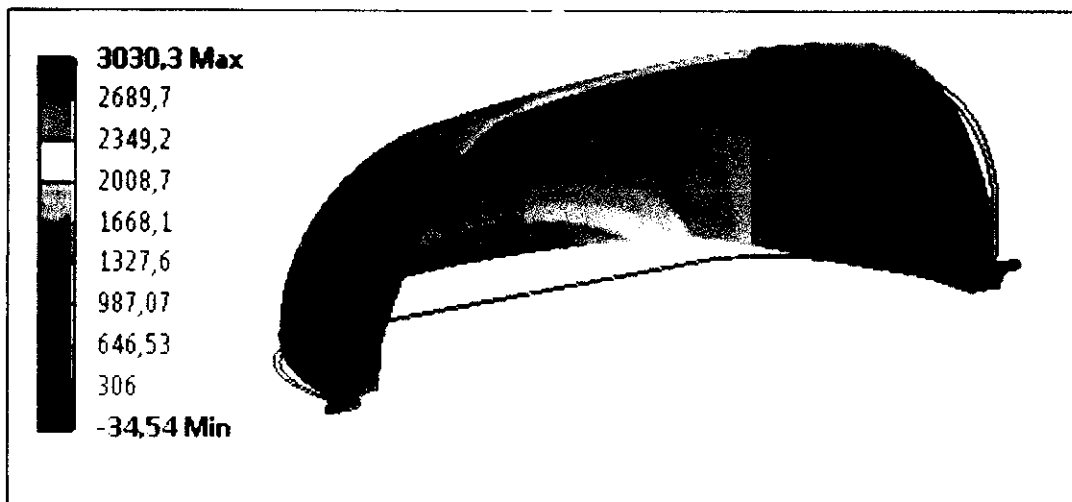


Figure 11: direction déformation sur l'axe Z (mm)

Notez que la valeur de la direction de distorsion sur l'axe Z prend une valeur  $-34.54$  mm. La valeur la plus basse possible commence alors à augmenter jusqu'à atteindre la valeur  $3030.3$  mm. Dans la mesure du possible.



Figure 12: Total déformation (mm)

Notez que la déformation totale est 0 mm Sur l'axe des X, Sur les axes Y, Z la valeur de déformation augmentera pour atteindre la valeur maximale 3459,7 mm

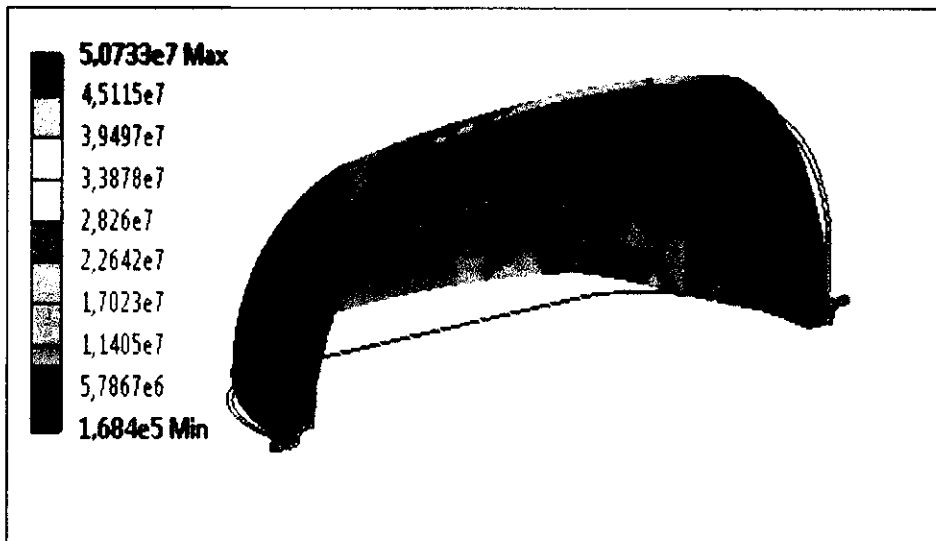


Figure 13: énergie de déformation (MJ)

Notez que la plus grande valeur d'énergie de déformation est dans la zone de sortie de gaz où il est égal  $5.0733 \times 10^7$  Mj.

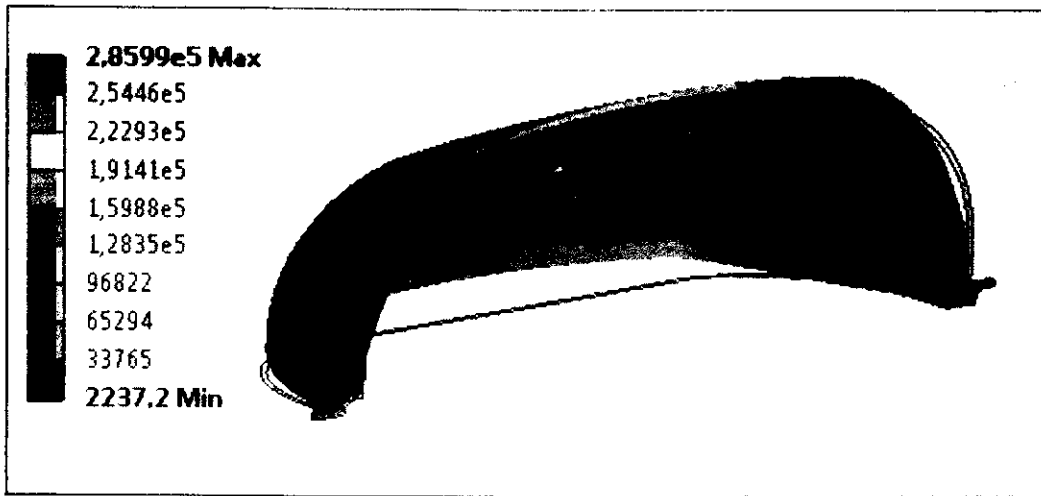


Figure 14: stress énergétique (MPa)

Notez que la valeur de la contrainte équivalente est 2237.2 MPa La plus petite valeur,  $2,8599 \times 10^5$  MPa La plus grande valeur .

**b- Le statut de compression égal à 100 MPa**

- Les résultats les plus importants

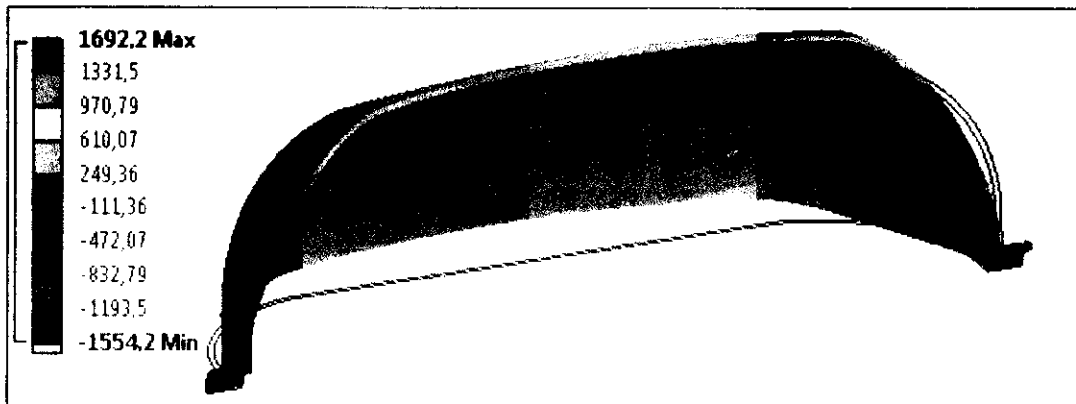


Figure 15 : direction déformation sur l'axe X (mm)

Notez que la valeur de la direction de distorsion sur l'axe X prend une valeur - 1554.2 mm La valeur la plus basse possible commence alors à augmenter jusqu'à atteindre la valeur 1692.2 mm Dans la mesure du possible

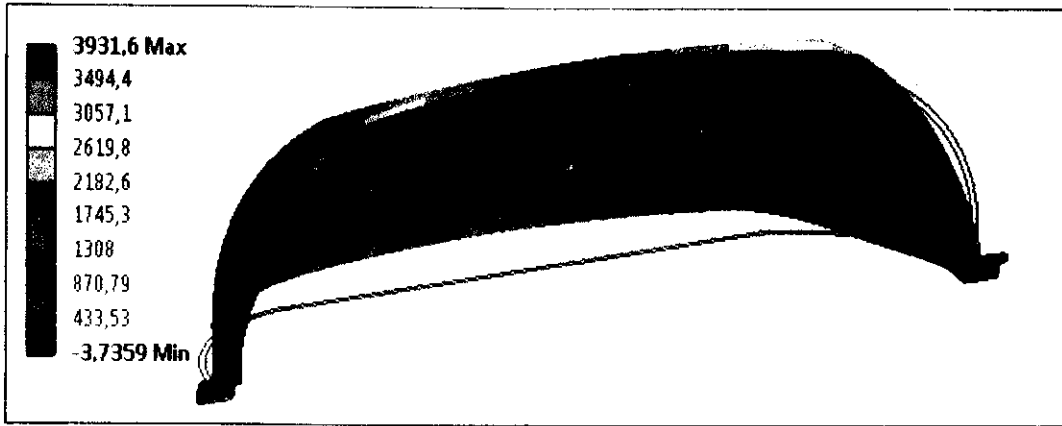


Figure 16 : direction déformation sur l'axe Y (mm)

Notez que la valeur de la direction de distorsion sur l'axe Y prend une valeur  $-3.7359$  mm La valeur la plus basse possible commence alors à augmenter jusqu'à atteindre la valeur  $3931.6$  mm Dans la mesure du possible

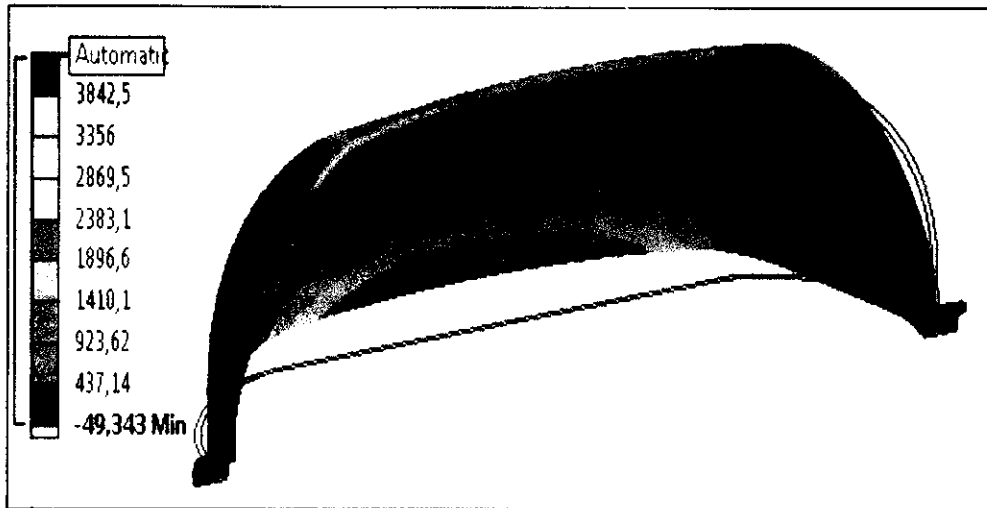


Figure 17 : direction déformation sur l'axe Z (mm)

Notez que la valeur de la direction de distorsion sur l'axe Z prend une valeur  $-49.343$  mm La valeur la plus basse possible commence alors à augmenter jusqu'à atteindre la valeur  $3931.6$  mm Dans la mesure du possible

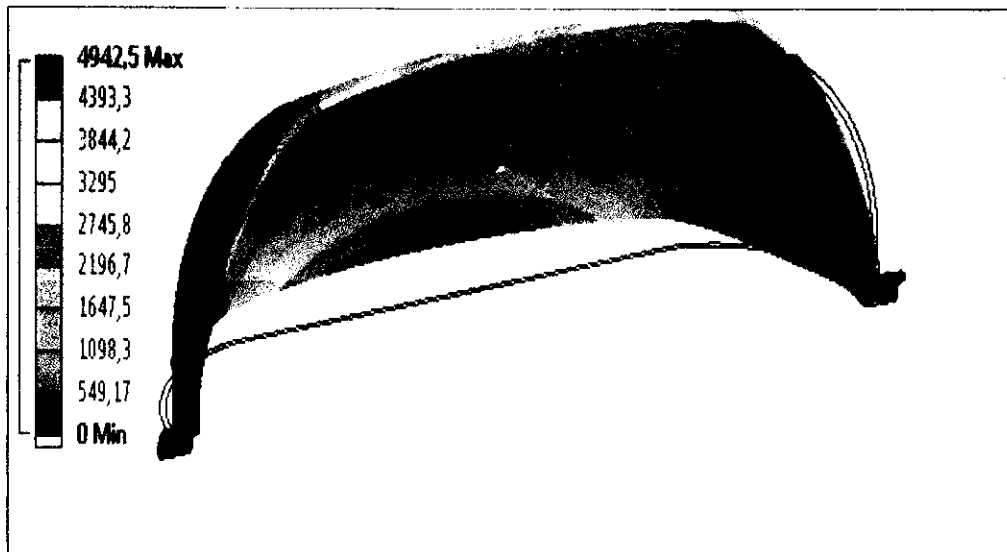


Figure 18 : Total déformation (mm)

Notez que la déformation totale est 0 mm Sur l'axe des X, Sur les axes Y, Z la valeur de déformation augmentera pour atteindre la valeur maximale 4942.5 mm

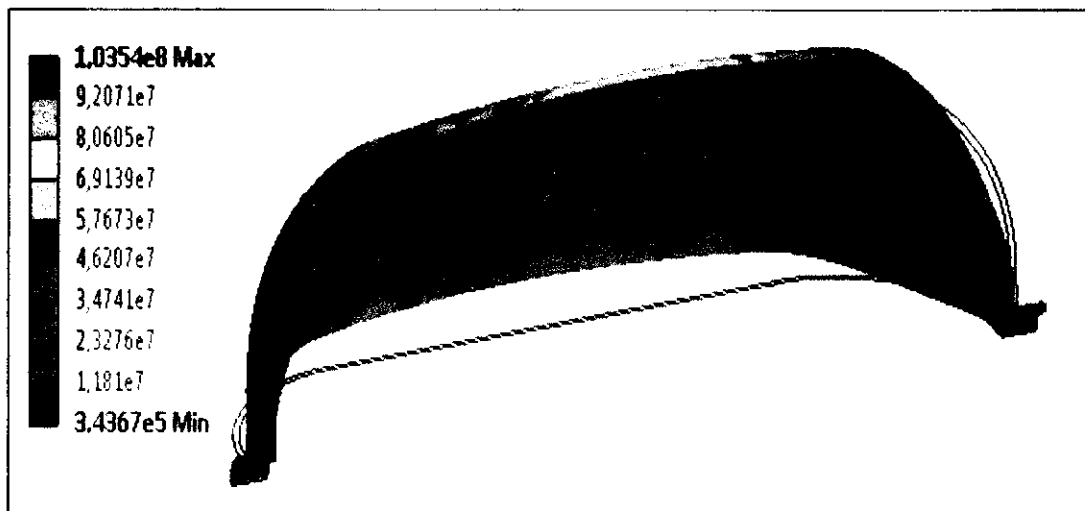


Figure 19 : énergie de déformation (MJ)

Notez que la plus grande valeur d'énergie de déformation est dans la zone de sortie de gaz où il est égal  $1.0354 \times 10^8$  MJ.



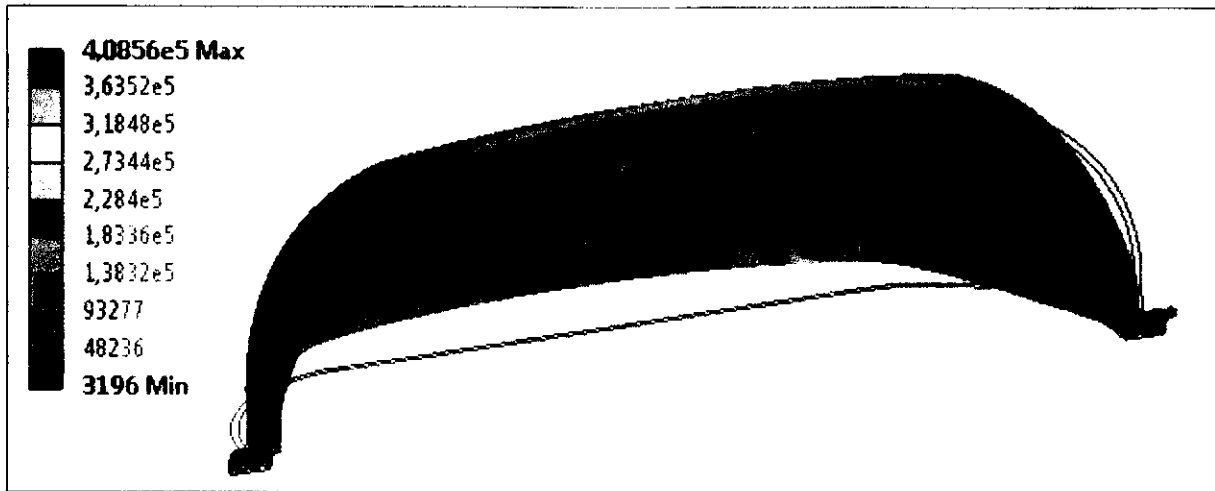


Figure 20 : stress énergétique (MPa)

Notez que la valeur de la contrainte équivalente est 3196 MPa La plus petite valeur,  $4.0856 \times 10^5$  MPa La plus grande valeur

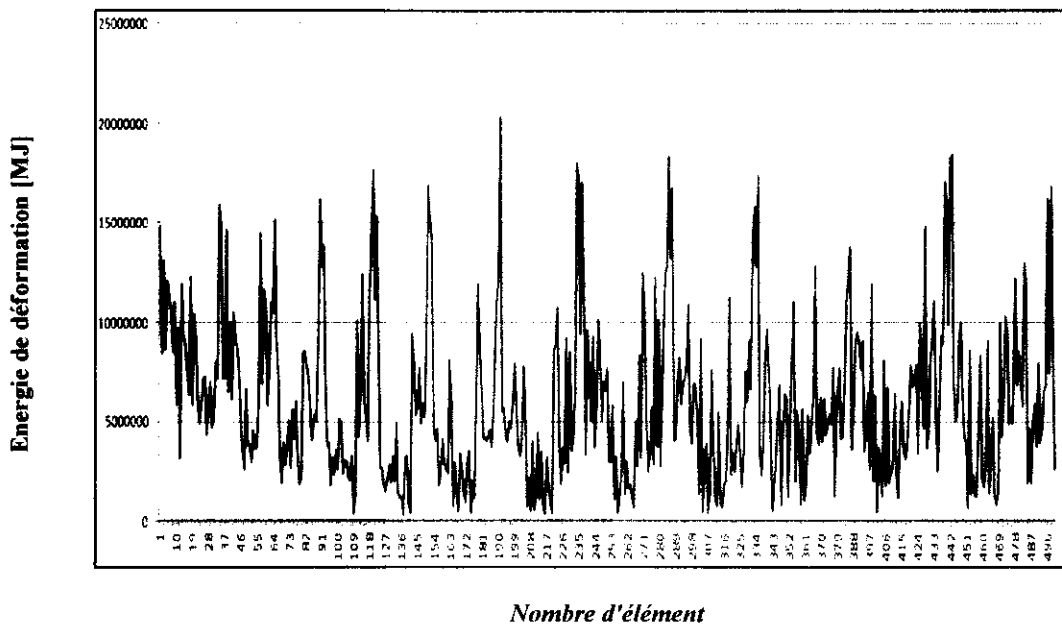


Figure 21 : Graphique énergie En Termes De élément nombre sous pression 70 MPa

Notez l'instabilité de la contrainte d'énergie avec la différence du nombre d'éléments où elle atteint la valeur maximale lorsque le nombre 190

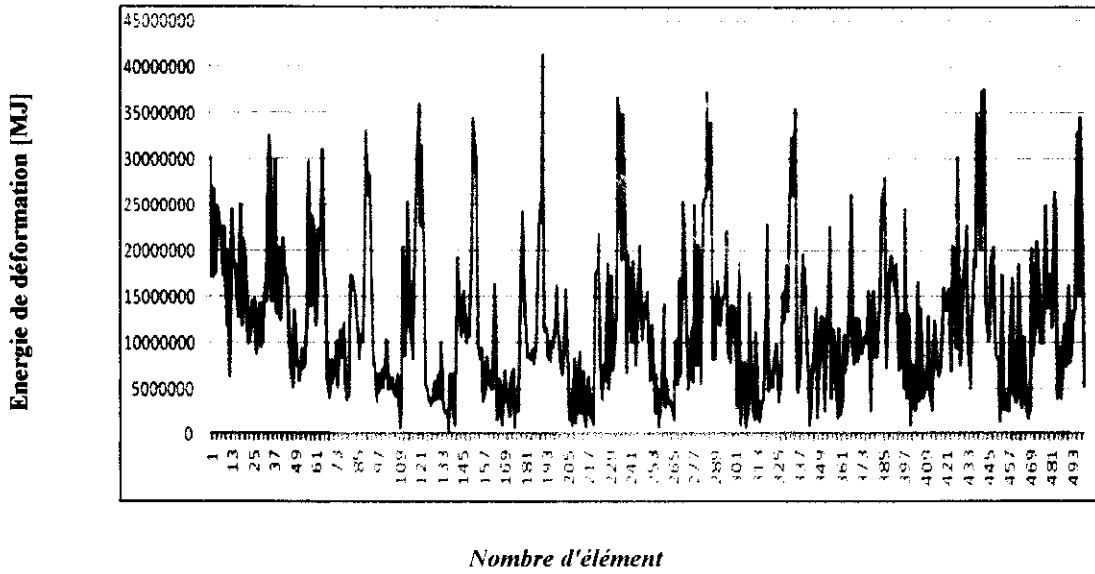


Figure 22 : Graphique énergie En Termes De élément nombre sous pression 100 MPa

Notez l'instabilité de la contrainte d'énergie avec la différence du nombre d'éléments où elle atteint la valeur maximale lorsque le nombre 193

*c - Suivi de la croissance des fissures sous pression*

Longueur de la fissure 3 mm largeur 0.5 mm

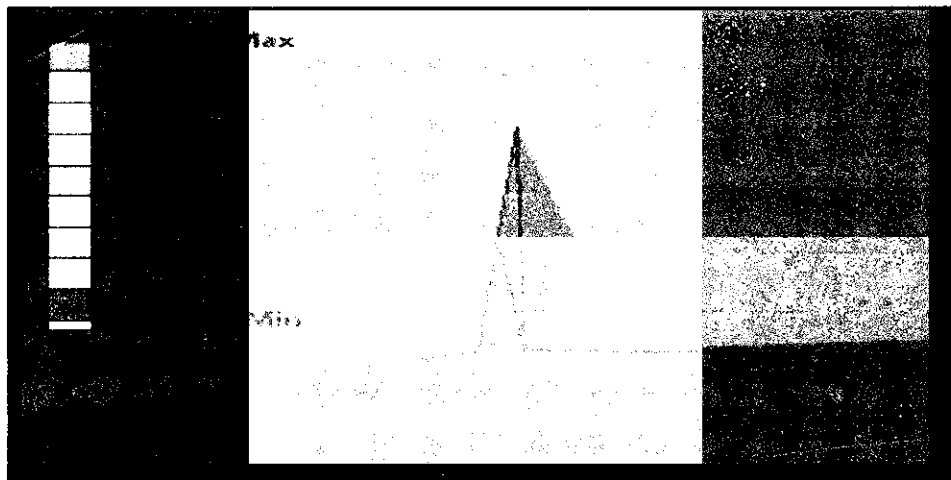


Figure 23 : déplacement axe X de propagation de fissure (mm)

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Moyenne [mm]
0.1	-331.49	2.8603	-163.24

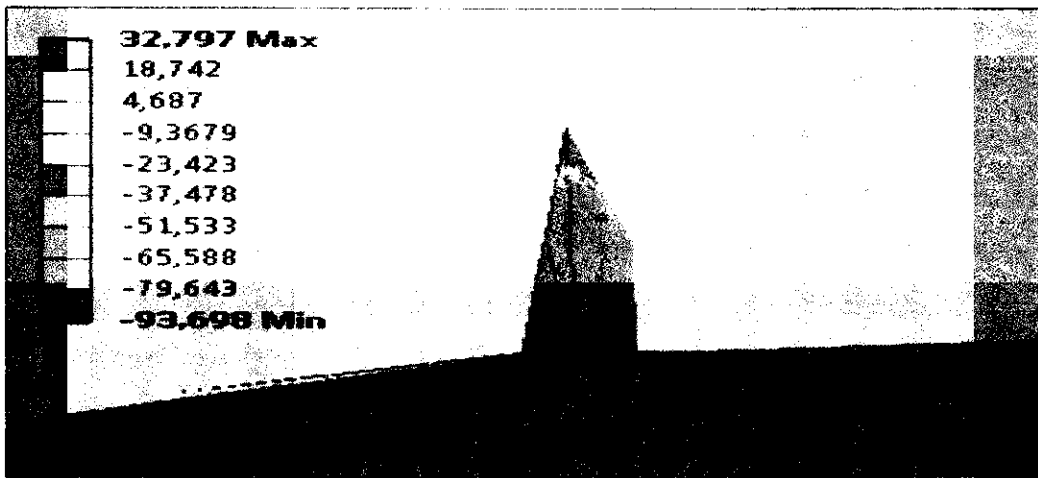


Figure 24 : déplacement axe Z de propagation de fissure (mm)

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]	Average [mm]
0.1	-93.698	32.797	-32.196

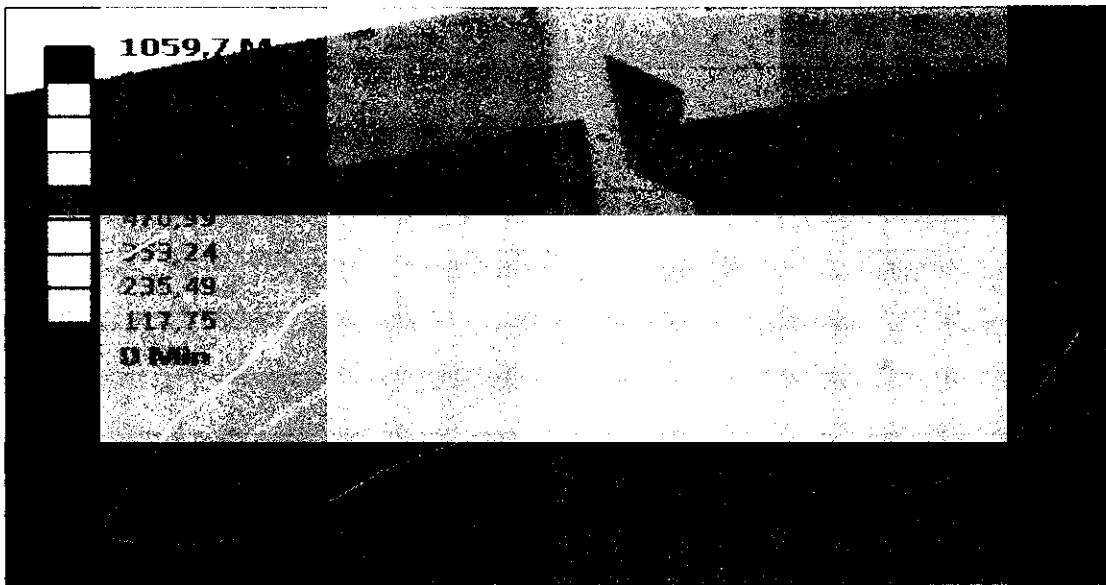


Figure 25 : propagation de longueur de fissure (mm)

## *Conclusion générale*

---

### *Conclusion générale :*

Avec le début du déclin des principales sources de combustibles fossiles dont dépendent les véhicules en particulier et de la propagation de la pollution environnementale causée par les carburants classiques, le monde envisage de produire des véhicules propres, économes en carburant et respectueux de l'environnement. L'hydrogène est l'une des meilleures options, car ses résidus ne polluent pas l'environnement. Est considéré comme l'une des sources renouvelables.

La tentative de développement de véhicules propres est un problème majeur, en particulier en ce qui concerne le stockage de l'hydrogène gazeux, qui est le carburant de base de ces composés, que les scientifiques cherchent à développer pour créer des réservoirs de stockage d'hydrogène.

Dans cette mémoire le comportement mécanique d'un réservoir d'hydrogène du premier type a été évalué.

En plus de parler des types de réservoirs pour le stockage de l'hydrogène dans le premier chapitre de la partie théorique, nous avons expliqué dans le deuxième chapitre de la même partie le concept de rupture mécanique en plus du comportement mécanique des métaux avec la définition de x fem.

L'étude des valeurs est basée sur un processus de simulation à travers un programme spécial (ANSYS), Les résultats de la simulation du réservoir d'hydrogène des composés propres sont enregistrés sous l'influence de deux pressions différentes où les résultats ont été comme suit :

Distorsion dans l'axe x ,y,z où les résultats étaient variables avec le changement d'axe dans les deux cas de pression différents, L'énergie nécessaire pour déformer ce réservoir se situait entre  $1.684 \times 10^5$  mj Valeur la plus basse et  $15.0733 \times 10^7$  mj Si pressé 70MPa Au cas où 100 MPa La valeur énergétique nécessaire à la déformation était  $3.436710^5$  mj Valeur la plus basse et  $1.0354 \times 10^8$  mj, Les résultats du stress énergétique étaient égaux  $2237.2$  MPa La plus petite valeur et  $2.8599 \times 10^5$  MPa La plus grande valeur lorsque pressé 70 MPa et quand pressé 100 MPa Stress énergétique c'était 3196 MPa La plus petite valeur et  $4.0856 \times 10^5$  MPa La plus grande valeur.

À travers les résultats précédents, nous concluons :

- Notez que la quantité d'hydrogène stockée dans le réservoir est faible car le gaz était à l'état gazeux. Lorsque la pression exercée dans le réservoir provoquait une déformation importante, la solution proposée consistait à augmenter les dimensions du réservoir mais de manière peu pratique, et le stockage de l'hydrogène sous forme liquide nécessitait la fourniture de basses températures. Très difficile à fournir reste la meilleure solution est de stocker l'hydrogène à l'état solide.
- Les réservoirs de première génération ne suffisent pas pour obtenir les meilleurs résultats.
- Pour obtenir les meilleurs résultats en termes de sécurité et de rentabilité, les réservoirs de première génération doivent être développés en supportant une coque externe constituée de matériaux composites (fibre de carbone, aramide).

## Bibliographie

---

- [1] G. Krainz et al., "Development of automotive liquid hydrogen storage systems," in AIP Conference Proceedings, 2004, vol. 710, no. 1, pp. 35-40: AIP.
- [2] W. R. Park, N. F. Fatoni, O. H. J. J. o. M. S. Kwon, and Technology, "Evaluation of stress and crack behavior using the extended finite element method in the composite layer of a type III hydrogen storage vessel," vol. 32, no. 5, pp. 1995-2002, 2018.
- [3] M.E. Sadi et Z. Hamlat, L'impact des énergies renouvelables sur le réseau électrique ouest algérien 220 kV, Mémoire de Master, Université de Saïda, 2014.
- [4] Sawin, Janet L., Sverrisson, Freyr et al, Renewables 2014 : Global status report, REN21, 2014, 214 p.
- [5] [www.clean-fleets.eu](http://www.clean-fleets.eu).
- [6] [www.afhypac.org](http://www.afhypac.org).
- [7] F. Amrouche, Les Moteurs à Combustion interne à l'Hydrogène, Bulletin des Energies Renouvelables, CDER, Algérie, N°19, 2011
- [8] J. Bernard, "Véhicules hybrides à pile à combustible: dimensionnement et stratégies de commande," Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007.
- [9] [www.aveq.ca](http://www.aveq.ca).
- [10] G. Gondor, "Pour le stockage de l'hydrogène : analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir," Besançon, 2008.
- [11] R. Schmitt et P. Jonville, "Le stockage de l'hydrogène et les problèmes qui s'y rattachent," Battelle Memorial Inst, Congrès national de la S.E.E, Biarritz, France, 1975.
- [12] F. Ghomari , Science des matériaux de construction, Université de Tlemcen , 2014.
- [13] [www.positiveimpakt.eu](http://www.positiveimpakt.eu)
- [14] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).
- [15] [www.septiemecontinent.com](http://www.septiemecontinent.com)
- [16] B. D. LE, "Modélisation discrète en mécanique de la rupture des matériaux fragiles," Université de Lorraine, 2013.
- [17] S. Megdoud, Analyse et calcul par éléments finis étendus (X-FEM) des matériaux fissurés ,Mémoire de Magister ,Université de Boumerdès, 2012.
- [18] B. Jacquot, Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2010.

في هذا العمل نصب اهتمامنا على تحسين المركبات النظيفة (السيارات التي تعمل بغاز الهيدروجين) من حيث المردودية والامان، حيث اعتمدنا في دراستنا على تطبيق ضغط داخلي على مستوى خزان غاز الهيدروجين، باستعمال برنامج محاكاة خاص لمتابعة تأثير الضغط على مستوى شق المتوضع في احدى نقاط الضعف الخاصة بالخزان. تضم هذه المذكرة دراسة متكونة من 3 فصول، النتائج المتحصل عليها بعد اجراء عملية المحاكاة على الجزان كانت كالتالي : تحت ضغط 70 MPa كان اتجاه التشوه على المحور x يتغير من 1088 mm - اقل قيمة و 1184.6mm كأكبر قيمة و كان التشوه على المحور y يتغير من 2.6151 mm - اقل قيمة و 2752.1 mm كأكبر قيمة و على المحور z يتغير من 34.54 mm - اقل قيمة و 3030.3 mm كأكبر قيمة ، وتحت ضغط 100 MPa كانت نتائج اتجاه التشوه تتغير من 1554.2mm - الى 1692.2mm كأكبر قيمة في المحور x في المحور y كان يساوي 3.7359 mm - كأصغر قيمة و 3931.6 mm كأكبر قيمة في المحور z كان يأخذ 49.343mm - قيمة كبرى و 3931.6 mm كأكبر قيمة ، الفائدة من اجراء هذه المحاكاة هو معرفة مدي تأثير الضغط على خزان تخزين الهيدروجين من اجل تطويره

الكلمات المفتاحية: خزان-هيدروجين-مركبات نظيفة-تخزين-الامان-المردودية-طريقة العناصر الممتدة

---

**Titre de la mémoire :** Évaluation du comportement mécanique du réservoir de stockage d'hydrogène dans les véhicules à pile à combustible

## Résumé

Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'amélioration des coûts et de la sécurité des véhicules propres (voitures à hydrogène) Dans notre étude, nous avons adopté l'application de la pression interne au niveau du réservoir de gaz hydrogène, en utilisant un programme de simulation spécial pour suivre l'impact de la compression au niveau du segment situé dans l'une des faiblesses. Les résultats obtenus après la simulation sur la lunette sont les suivants: sous une pression de 70 MPa, le sens de la déformation sur l'axe des abscisses est passé de mm1088 à la valeur la plus basse et mm1184,6 en tant que valeur la plus grande et la distorsion sur l'axe des y Il varie de mm2,6151 à la valeur inférieure et mm2752.1 plus grand La valeur sur l'axe des z varie de mm34,54 à la valeur la plus basse et mm3030.3 à la valeur la plus grande. Sous 100 MPa, les résultats de l'évolution des déformations ont varié de -1554,2 mm à 1692,2 mm, la plus grande valeur sur l'axe des abscisses étant égale à 3,7359 mm. 3931,6 mm, la valeur la plus grande sur l'axe z prenant 49,343 mm - valeur élevée et 3931,6 mm comme valeur la plus grande, l'avantage de cette simulation est de connaître l'impact de la pression sur le réservoir de stockage d'hydrogène pour le développement.

**les mots clés:** Réservoir - Hydrogène - Véhicules propres - Stockage - Sécurité – Coût- Xfem

---

**Memory Title:** Evaluation of the Mechanical Behavior of the Hydrogen Storage Tank in Fuel Cell Vehicles

## Summary

In this work, we focused on improving the costs and safety of clean vehicles (hydrogen cars) In our study, we adopted the application of internal pressure at the hydrogen gas reservoir, using a special simulation program to track the impact of compression at the segment level in one of the weaknesses. The results obtained after the simulation on the telescope are as follows: under a pressure of 70 MPa, the direction of the deformation on the abscissa axis went from mm1088 to the lowest value and mm1184.6 as the value la larger and the distortion on the y-axis It varies from mm2,6151 to the lower value and larger mm2752.1 The value on the z-axis varies from mm34,54 to the lowest value and mm3030.3 at the highest value. Under 100 MPa, the results of the evolution of the strains varied from -1554.2 mm to 1692.2 mm, the largest value on the abscissa axis being equal to 3.7359 mm. 3931.6 mm, the largest value on the z axis taking 49.343 mm - high value and 3931.6 mm as the largest value, the advantage of this simulation is to know the impact of the pressure on the reservoir hydrogen storage for development.

**Keywords :** Tank - Hydrogen - Clean vehicles - Storage - Safety - Cost - Xfem