



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

OTMANE Baya Takia

Le : mardi 11 juin 2024

Modélisation numérique des conséquences d'explosion

Jury :

Dr. Lakhder SEDIRA	Pr	Université de Biskra	Président
Dr. Hefaidh HADEF	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. Salah GUERBAAI	MCA	Université de Biskra	Examineur

من قال أنا لها "نالها "

لم تكن الرحلة قصيرة ولم يكن الحلم قريبا ولا الطريق كان محفوفا بالتسهيلات

لكني فعلتها رغما عنها اتيت بهاو نلتها.

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا، الذي بفضلها ها أنا اليوم أنظر إلى حلما طال انتظاره وأصبح واقعا أفتخر به .

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار إلى من أحمل أسمه بكل افتخار إلى ملاكي الطاهر، وقوتي بعد الله من

دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل

"أبي"

أهديك هذا الإنجاز الذي لولا تضحياتك لما كان له وجود يا خير سند.

إلى من حملتني في بطنها تسعة أشهر

" .أمي "

إلى من قيل فيهم: سَنَشُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ "أخي اسماعيل , أحمد , أمين"

أدامكم الله ضلعا ثابتا لي

.إلى من آمنو بقدراتي "أختاي رفيده , ريحانة " .

إلى من تذكروني بقوتي وتقف خلفي كظلي "أخوتي الصغار أفرح الجنة , سلمى , رهف «.

إلى داعمتي التي وقفت معي اغلب اوقاتي الصعبة ولم تتعب من تشجيعي "خالتي الصغيرة".

والجددي وجدتي (من الأب) رحمهم الله وجدي وجدتي (من الأم) أدام الله عمرهما إلخالي وخالتي عمي

وعمتي وجميع عائلتي فردا فردا.

إلى صديقاتي "... "

Otmane Baya Takia

Au terme de cet humble travail, je remercie Dieu Tout-Puissant parce qu'il m'a donné la volonté et le courage pour terminer ce travail, ainsi que l'audace de surmonter toutes les difficultés.

Tout d'abord, je tiens à remercier mes parents pour leur patience et leurs encouragements qui m'ont été très utiles tout au long de mes études et ma chère famille pour leur soutien moral et financier.

Ma gratitude va particulièrement à :

Mon encadreur, **Dr. Hefaidh HADEF**, pour sa patience, sa volonté et surtout sa sagesse et pour leurs conseils qui ont alimenté ma réflexion. Mes remerciements sont également attendus aux membres estimés du jury, **Dr Salah GUERBAAI** et **Pr. Lakhder SEDIRA**, pour accepter d'évaluer ce travail.

Mes remerciements à tous les enseignants de la faculté des Sciences et Technologie de l'université de Biskra et, en particulier, aux enseignants du département du génie mécanique. Qui ont contribué directement ou indirectement à ma formation. Surtout, **Dr. MOUMMI Abdelhafid** et **Dr. ZELLOUF Miloud**, et le chef département **Pr. GUERIRA BELHI**.

Et notre père de l'énergétique, **Dr. Salah GUERBAAI**.

Enfin, sans oublier de remercier toutes les personnes qui ont directement ou indirectement contribué à la réalisation de ce travail.

☺Merci beaucoup☺

Dédicace	II
Remerciements	III
Table des matières	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Résumé	VII
Introduction générale	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE MODELISATION DES EXPLOSIONS	
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 A PROPOS DE L'HYDROGÈNE	3
1.2.1 Inflammabilité	4
1.2.2 Energie d'inflammation	4
1.2.3 Explosivité	5
1.3 FONDAMENTAUX DE L'EXPLOSION DE L'HYDROGENE	7
1.3.1 Incidents liés à l'hydrogène	8
1.3.2 Incidents liés à la sécurité de l'hydrogène : comprendre la formation et l'expansion des jets	11
1.3.3 Approches d'analyse des risques	12
1.3.3.1 Approche déterministe	12
1.3.3.2 Approche probabiliste	12
1.3.4 Types explosion d'hydrogène	13
1.3.4.1 Expansion de l'hydrogène et déflagration	13
1.3.4.2 Éclatement d'un récipient sous pression (ERSP)	14
1.3.4.3 Explosion de vapeur en expansion de liquide bouillant/ BLEVE (BoilingLiquidExpandingVapor Explosions)	15
1.3.4.4 Déflagration d'un nuage d'hydrogène et d'air	16
1.3.4.5 Transition déflagration-détonation (TDD)	17
1.4 METHODES D'ANALYSE D'EXPLOSION D'HYDROGENE	19
1.4.1 Tests expérimentaux	19
1.4.2 Modélisation numérique	21
1.4.3 Méthodes empiriques et les méthodes théorique	22
1.4.3.1 Modèle TNO (ToegepastNatuurwetenschappelijkOnderzoek)	23
1.4.3.2 Modèle de BAKER-STREHLOW	23
1.4.3.3 Modèle de l'équivalent TNT (trinitrotoluène)	24
1.5 FACTEURS INFLUENÇANT L'EXPLOSION DE L'HYDROGENE	24
1.5.1 Taille et hétérogénéité des nuages hydrogène-air	25
1.5.2 Intensité et localisation de l'inflammation	26
1.5.3 Température et pression ambiances	27
1.5.4 Matériaux/structures anti-explosion	28
1.6 CONCLUSION	29
CHAPITRE II : METHODOLOGIE D'EVALUATION DE LA SURPRESSION DES EXPLOSIONS DU RESERVOIR D'HYDROGENE SOUS PRESSION	
2.1 INTRODUCTION	31
2.2 MECANISME D'EXPLOSION D'UN RESERVOIR D'HYDROGENE A HAUTE PRESSION DANS DES SCENARIOS D'INCENDIE	31
2.2.1 Phase I : explosion physique	31

2.2.2 Phase II : Ignition (Allumage/ inflammation)	32
2.2.3 Phase III : Déflagration hydrogène-air	32
2.3 METHODOLOGIE D'EVALUATION DE LA SURPRESSION DES EXPLOSIONS DU RESERVOIR D'HYDROGENE HAUTES PRESSIONS	32
2.3.1 Modélisation de l'explosion physique par l'analyse thermo-structurale dans ANSYS	33
2.3.1.1 Analyses thermiques	34
2.3.1.2 Analyse structurelle	34
2.3.2 Évaluation des effets de surpression d'explosion d'un réservoir d'hydrogène à haute pression	35
2.3.2.1 Calcul de l'énergie total	35
a) Calcul de l'énergie mécanique	35
b) Calcul de l'énergie chimique	36
2.3.2.2 Évaluation de la surpression des ondes de souffle	37
a) Modèle TNO-Multi-Energie	37
b) Modèle équivalent TNT	41
2.4 CONCLUSION	42
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	
3.1 INTRODUCTION	44
3.2 MODELISATION NUMERIQUE DE L'EXPLOSION PHYSIQUE	44
3.2.1 Modélisation Ansys-Fluent de réservoir d'hydrogène sous pression de type III	44
3.2.1.1 Caractéristiques de l'enceinte sous pression de gaz d'hydrogène	44
3.2.1.2 Hypothèse de modélisation	44
3.2.1.3 Géométrie	44
3.2.1.4 Maillage	45
3.2.1.5 Résultats et discussions	45
3.2.2 Partie analyse thermo-structurel	49
3.2.2.1 Géométrie	49
3.2.2.2 Insérer les matériaux	50
3.2.2.3 Maillage du récipient sous pression	50
3.2.2.4 Analyse thermique	50
3.2.2.5 Analyse structurelle	52
3.3 ÉVALUATION DE L'ENERGIE EXPLOSIVE DES RESERVOIRS DE STOCKAGE HAUTE PRESSION	55
3.3.1 Calcul de l'énergie de l'explosion	55
3.3.1.1 Calcul de l'énergie mécanique de l'explosion	55
3.3.1.2 Calcul de l'énergie chimique	55
3.3.1.3 Calcul de l'énergie total	57
3.3.2 Calcul des effets de surpression	57
3.3.2.1 Application de la méthode équivalente TNT	57
3.4 CONCLUSION	59
Conclusion Générale	59
Références bibliographique	61

Fig.I.1 : LIE et LSE des mélanges H ₂ /O ₂ en fonction de la pression et température	5
Fig.I.2 : Domaine d'explosivité de l'hydrogène du propane et du méthane	6
Fig.I.3 : Statistiques sur les incidents liés à l'hydrogène. (a) Lieu de l'incident, (b) Équipement de l'incident, (c) Causes probables, (d) Dommages et blessures	11
Fig.I.4 : scénarios d'accidents causés par l'éclatement d'un récipient d'hydrogène sous pression (ERSP)	14
Fig.I.5 : processus de d'hydrogène Explosion de vapeur en expansion de liquide bouillant	15
Fig.I.6 : les étapes de phénomène de déflagration d'un nuage d'hydrogène et d'air	17
Fig. I.7 : les étapes de la Transition déflagration-détonation (TDD)	18
Fig.I.8 : déflagration d'hydrogène dans un garage : a) avant l'explosion b) pendant l'essai	26
Fig.I.9 : Historiques de pression de souffle (bar), (a) avec des pressions différentes (b) avec des températures différentes	27
Fig.I.10 :matériaux antidéflagrants : (a) alliages d'aluminium en treillis, (b) mousse de polyuréthane, (c) billes sphériques non métalliques	28
Fig.II.1 : processus d'explosion des réservoirs d'hydrogène sous-pression.	31
Fig.II.2 : les étapes méthodologiques et l'approche proposée.	33
Fig.II.3 : les deux systèmes ANSYS connectés.	34
Fig.II.4 : Surpression en fonction de la distance d'échelle.	39
Fig.III.1 : Géométrie de l'enceinte à simuler	45
Fig. III.2 : Maillage de la géométrie	45
Fig. III.3 : représente les conditions limites de température	45
Fig. III.4 : Résultats d'approximation obtenus pour les différents résidus	46
Fig.III.5 : Contours de variation de la vitesse de remplissage	46
Fig.III.6 : Contours d'évolution de de température de remplissage issue ANSYS	47
Fig. III.7 : Evolution de de température	48
Fig.III.8 : Evolution de la pression en fonction de temps de remplissage	48
Fig.III.9 : Evolution de tendances de pression en fonction des temps de remplissage	49
Fig.III.10 : Géométrie 3D de l'enceinte d'hydrogène sous pression de type III	49
Fig.III.11 : maillage mécanique de l'enceinte sous pression	50
Fig. III.12 : Conditions limites pour le modèle thermique	51
Fig.III. 13 : Distribution de la température sur les parois de l'enceinte	51
Fig.III.14 : Distribution du flux de chaleur sur les parois de l'enceinte	52
Fig.III.15 : Modèle d'analyse thermo-structurelle	52
Fig.III.16 : Déformation totale due aux contraintes thermiques	53
Fig.III.17 : contrainte équivalente de von Mises due aux contraintes thermique	54
Fig.III.18 : Tracé de déplacement pour la direction x (U _x)	54
Fig.III.19 :Déformation élastique équivalente	55
Fig.III.20 : Evolution de la surpression en fonction de distance d'effet	57

Chapitre I

<i>Tab.I.1 : limites d'inflammabilité de l'hydrogène et de combustibles courants.</i>	4
<i>Tab.I.2 : Inflammation de l'hydrogène et de combustibles courants.</i>	5
<i>Tab.I.3 : Caractéristiques d'explosivité de l'hydrogène et du propane dans l'air à pression et température ambiantes.</i>	7
<i>Tab.I.4 : Résumé des études expérimentales sur les explosions d'hydrogène.</i>	19

Chapitre II

<i>Tab.II.1 : la correspondance entre les indices de sévérité et les niveaux de surpression maximale.</i>	38
<i>Tab.II.2 : Principes de Kinsella (1993) concernant la sélection du nombre de classes</i>	40

Chapitre III

<i>Tab.III.1 : caractéristiques des matériaux de l'enceinte multi couches</i>	44
<i>Tab.III.2 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus</i>	55

Résumé

Pour garantir la sécurité des procédés industriels et des applications de stockage d'hydrogène, il est impératif de comprendre en profondeur les mécanismes des explosions d'hydrogène sous pression. Cela nécessite l'utilisation de modèles analytiques et numériques afin d'évaluer précisément les risques et de concevoir des mesures de sécurité adéquates.

La méthodologie proposée dans cette étude vise à combiner ces deux approches pour mieux appréhender et prévenir les dangers liés aux explosions d'hydrogène stocké sous pression des enceintes multicouches de type III. En développant des modèles numériques pour simuler les explosions d'hydrogène gazeux et des modèles analytiques pour évaluer les effets de surpression, cette recherche offre une perspective multidimensionnelle pour aborder ces problématiques complexes. Cette recherche vise à fournir des informations précieuses pour promouvoir l'utilisation sûre et efficace de l'hydrogène comme source d'énergie, contribuant ainsi à la transition vers un avenir énergétique plus durable et sécurisé.

Mots clés : Sécurité, Hydrogène, effets de surpression, Détonation, enceinte sous pression

ملخص :

لضمان سلامة العمليات الصناعية وتطبيقات تخزين الهيدروجين، لا بد من فهم دقيق لآليات انفجارات الهيدروجين المضغوط. ويتطلب ذلك استخدام النماذج التحليلية والعديدية لتقييم المخاطر بدقة وتصميم التدابير الأمنية المناسبة. تهدف المنهجية المقترحة في هذه الدراسة إلى الجمع بين هذين النهجين لفهم أفضل ومنع المخاطر المرتبطة بانفجارات الهيدروجين المخزن تحت الضغط في حاويات متعددة الطبقات من النوع الثالث. ومن خلال تطوير نماذج عددية لمحاكاة انفجارات غاز الهيدروجين ونماذج تحليلية لتقييم تأثيرات الضغط الزائد، يوفر هذا البحث منظورًا متعدد الأبعاد لمعالجة هذه المشكلات المعقدة.

ويهدف هذا البحث إلى توفير معلومات قيمة لتعزيز الاستخدام الآمن والفعال للهيدروجين كمصدر للطاقة، وبالتالي المساهمة في الانتقال إلى مستقبل طاقة أكثر استدامة وأمانًا.

الكلمات المفتاحية: السلامة، الهيدروجين، تأثيرات الضغط الزائد، التفجير، أوعية الضغط،

Summary

To ensure the safety of industrial processes and hydrogen storage applications, it is imperative to deeply understand the mechanisms of hydrogen explosions under pressure. This requires the use of analytical and numerical models to precisely assess risks and design adequate safety measures. The methodology proposed in this study aims to combine these two approaches to better apprehend and prevent the dangers associated with hydrogen explosions stored under pressure in type III multilayer enclosures. By developing numerical models to simulate gaseous hydrogen explosions and analytical models to evaluate overpressure effects, this research offers a multidimensional perspective to address these complex issues. This research aims to provide valuable information to promote the safe and effective use of hydrogen as an energy source, thereby contributing to the transition towards a more sustainable and secure energy future.

Keywords: Safety, Hydrogen, Overpressure effects, Detonation, Pressure vessel

Introduction Général

L'augmentation de la demande pour des sources d'énergie propres a propulsé l'hydrogène en tant qu'alternative prometteuse aux combustibles fossiles. Néanmoins, le risque d'explosion d'hydrogène engendre des problèmes de sécurité majeurs, notamment dans les situations nécessitant un stockage à haute pression. Pour la sécurité des procédés industriels, le risque d'explosion est un risque majeur en raison de ses conséquences potentiellement graves, même si sa probabilité d'occurrence est faible. Afin de faire face à ces préoccupations, les chercheurs sont couramment à la recherche de progrès dans les méthodes de modélisation des explosions, afin d'améliorer les évaluations de sécurité et de réduire les risques potentiels. Dans ce contexte, une évaluation quantitative a une importance capitale. On utilise fréquemment des simulations numériques pour étudier les explosions, en particulier celles qui impliquent de l'hydrogène sous pression, telles que les codes de dynamique des fluides (CFD). Deux principales approches sont utilisées pour modéliser les explosions d'hydrogène sous pression : les approches empiriques, basées sur des données expérimentales, qui conviennent généralement aux estimations préliminaires, et les approches numériques, qui utilisent des codes de calcul pour résoudre les équations de la mécanique des fluides et de la thermodynamique. Bien que ces dernières offrent une précision accrue, elles sont également plus complexes et plus coûteuses.

Il est essentiel de saisir les nuances des explosions d'hydrogène dans des conditions de pression afin d'assurer une manipulation et un stockage sécurisés de cette source d'énergie. Il est essentiel d'examiner en détail le processus d'explosion, comprenant l'allumage initial, la propagation ultérieure de la flamme et la production d'ondes de souffle qui en découle. En outre, il est essentiel d'évaluer les effets de surpression, notamment les localisations où ces effets deviennent dangereux, afin de définir des directives opérationnelles sécurisées et de concevoir des mesures de protection efficaces.

Donc, nous nous interrogeons sur la question fondamentale suivante : Comment peut-on faire usage de ces modèles (analytique et numérique) afin de mieux appréhender et prévenir les dangers liés aux explosions d'hydrogène sous pression dans les enceintes de type III (trois couches) ?

L'objectif de cette étude est de proposer une méthodologie qui intègre à la fois des modèles numériques pour décrire le phénomène d'explosion d'hydrogène sous pression dans les enceintes

type III. Et de faire appel aux modèles analytiques pour représenter l'effet de surpression provoqué par ce genre d'explosion.

L'objectif de cette recherche est de faire face aux difficultés liées aux explosions d'hydrogène dans les systèmes de stockage sous pression en utilisant une approche multidimensionnelle. Les principaux objectifs sont doubles :

- Modélisation numérique des explosions d'hydrogène gazeux : Un modèle numérique (analyse thermo-structurel) complet sera développé pour capturer les phénomènes physiques régissant les explosions d'hydrogène gazeux afin de simuler avec précision le processus d'explosion.
- Modélisation analytique des effets de surpression : Un modèle analytique sera appliqué afin d'évaluer les surpressions causées par l'explosion de gaz d'hydrogène. La théorie des ondes de souffle et les corrélations empiriques seront utilisées dans ce modèle (équivalent TNT, TNO Multi énergie) afin de prédire les distances auxquelles les niveaux de surpression dépassent les seuils de sécurité recommandés.

En atteignant ces objectifs, cette étude fournira des informations précieuses sur le comportement des explosions d'hydrogène sous pression, permettant le développement d'évaluations de sécurité plus robustes et de stratégies améliorées d'atténuation des risques pour les applications de stockage d'hydrogène.

Afin d'atteindre le but principal de cette étude la mémoire est organisée en trois chapitres séparés:

- Chapitre 1 : nous examinons en détail l'importance de l'hydrogène en tant que source d'énergie alternative prometteuse, tout en tenant compte des risques inhérents liés à sa production, son stockage et usage. Il offre une vision globale des scénarios d'explosion potentiels impliquant de l'hydrogène sous pression et propose une analyse critique des travaux de recherche précédents consacrés à la modélisation de ces explosions.
- Le chapitre 2 décrit la méthodologie proposée, fournissant une description détaillée de le modèle utilisée pour la simulation d'explosion et les modèles analytiques utilisées pour la modélisation des effets d'explosion.
- Le chapitre 3 constitue le point culminant de la recherche, présentant une discussion approfondie des résultats obtenus. Un exemple illustratif a été pour valider l'applicabilité de l'approche proposée, mettant en évidence son efficacité pour saisir les subtilités des explosions d'hydrogène.

Chapitre I : Etude bibliographique de modélisation des explosions

Chapitre I : Etude bibliographique de modélisation des explosions.....	3
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 A PROPOS DE L'HYDROGÈNE	3
1.2.1 Inflammabilité.....	4
1.2.2 Energie d'inflammation	4
1.2.3 Explosivité	5
1.3 FONDAMENTAUX DE L'EXPLOSION DE L'HYDROGENE.....	7
1.3.1 Incidents liés à l'hydrogène	8
1.3.2 Incidents liés à la sécurité de l'hydrogène : comprendre la formation et l'expansion des jets	11
1.3.3 Approches d'analyse des risques	12
1.3.3.1 Approche déterministe	12
1.3.3.2 Approche probabiliste	12
1.3.4 Types explosion d'hydrogène	13
1.3.4.1 Expansion de l'hydrogène et déflagration.....	13
1.3.4.2 Éclatement d'un récipient sous pression (ERSP)	14
1.3.4.3 Explosion de vapeur en expansion de liquide bouillant/ BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions) 15	
1.3.4.4 Déflagration d'un nuage d'hydrogène et d'air	16
1.3.4.5 Transition déflagration-détonation (TDD)	17
1.4 METHODES D'ANALYSE D'EXPLOSION D'HYDROGENE.....	19
1.4.1 Tests expérimentaux	19
1.4.2 Modélisation numérique	21
1.4.3 Méthodes empiriques et les méthodes théorique	22
1.4.3.1 Modèle TNO (Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek).....	23
1.4.3.2 Modèle de BAKER-STREHLOW	24
1.4.3.3 Modèle de l'équivalent TNT (trinitrotoluène).....	24
1.5 FACTEURS INFLUENÇANT L'EXPLOSION DE L'HYDROGENE	25
1.5.1 Taille et hétérogénéité des nuages hydrogène-air.....	25
1.5.2 Intensité et localisation de l'inflammation.....	26
1.5.3 Température et pression ambiances	27
1.5.4 Matériaux/structures anti-explosion.....	28
1.6 CONCLUSION	29

Chapitre I : Etude bibliographique de modélisation des explosions

1.1 Introduction

L'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable et réactif. Il brûle avec une flamme légèrement bleue qui devient pratiquement invisible à haute température. Il forme des mélanges explosifs avec l'air dans des limites très larges (4 à 75-77 % en volume). En outre, il peut exploser spontanément sous l'effet d'une élévation de température ou de pression (notamment en cas de fuite à plusieurs dizaines de bars). Son énergie minimale d'inflammation (EMI) est très faible (17 μJ), ce qui le rend sensible et réactif. La réactivité de l'hydrogène vis-à-vis de certains éléments ou composés peut également être source d'incendies ou d'explosions (voir § « Propriétés chimiques »).

1.2 A propos de l'hydrogène

Il est indéniable que l'émergence du moteur à explosion et de l'électricité marque le XIXe siècle. Les changements économiques et sociaux observés à l'échelle mondiale marquent ainsi le commencement de l'ère industrielle et le commencement de la civilisation. De l'industrie automobile ». L'énergie a joué un rôle essentiel dans ce développement et elle continue de le faire encore aujourd'hui. C'est la raison pour laquelle les ressources naturelles de la planète sont exploitées sans restriction : houille, pétrole, gaz naturel (les combustibles fossiles), hydraulique, ainsi que l'énergie nucléaire. Il est indéniable que cette surexploitation peut entraîner des répercussions telles que l'épuisement des ressources fossiles, l'accumulation de déchets nucléaires, la pollution atmosphérique qui met en danger la santé publique et l'effet de serre supplémentaire qui réchauffe la planète. D'autres éléments tels que la croissance démographique mondiale et l'augmentation du poids des pays. [1]

L'hydrogène, en tant que nouveau vecteur énergétique propre, Il s'agit d'un gaz sans danger et extrêmement énergétique qui peut générer de la chaleur et faire fonctionner des moteurs à combustion directe (moteurs à combustion interne) en utilisant de l'eau pure comme résidu. La nature ne contient de l'hydrogène qu'à l'état combiné, principalement dans l'eau et les hydrocarbures. Ainsi, il faut le fabriquer et, tout comme l'électricité, il n'est pas une énergie, mais un vecteur d'énergie. Différentes façons de générer de l'hydrogène existent. Cette production est possible grâce à trois principales sources d'énergie primaire : les énergies fossiles (gaz naturel...), le nucléaire (électrolyse et craquage de l'eau...) et les énergies

renouvelables (biomasse, solaire, éolien, hydraulique). Adopter l'hydrogène comme source d'énergie nécessite de le faire Produire, le stocker (notamment à bord des bateaux) [1] De distribuer les véhicules et de garantir la sécurité de leur utilisation. Il est nécessaire d'envisager une mise en œuvre majeure qui repose sur des technologies innovantes, des investissements importants et surtout une volonté politique. Récupérer de l'énergie à partir du dihydrogène renouvelable ou bas-carbone préalablement stocké se fait de deux façons :

- Soit sous forme de chaleur *via sa combustion directe avec le dioxygène* ;
 - Soit sous forme d'électricité *via une pile à combustible (PaC)*.
- Dans les deux cas la réaction globale ne produit que de l'eau et l'énergie produite peut être diversement valorisée. L'hydrogène se voit assigner trois objectifs essentiels pour réussir la transition énergétique.

1.2.1 Inflammabilité

La particularité de l'hydrogène est d'être un gaz hautement réactif et, de ce fait présente, une très large plage d'inflammation comme le montre le Tableau I.1 qui suit :

Table I.1-limites d'inflammabilité de l'hydrogène et de combustibles courants

	LII	LSI
Hydrogène	4 %	75 %
Méthane	5 %	14 %
Propane	3 %	10 %
Butane	2%	9 %

1.2.2 Energie d'inflammation

La concentration en hydrogène et en oxygène influence la concentration minimale d'inflammation. Lorsque la concentration stoechiométrique est de 29.5 % (pour chaque molécule d'hydrogène, il y a une demi-molécule d'oxygène), sa valeur est de 17 $\mu\text{J}/\text{mole}$. Un faible niveau d'énergie par rapport aux combustibles courants, comme le montre le Tableau I.2 ci-dessous. Il est également démontré dans le tableau que l'hydrogène a une grande chaleur de combustion et une température de flamme similaire à celle des autres combustibles.

Table I.2 -Inflammation de l'hydrogène et de combustibles courants

Gaz	Energie minimale d'inflammation [mJ/mole]	Chaleur de combustion [KJ/g]	Température de flamme °C	Température d'auto inflammation °C
H_2	0,017	120	2045	585-858
CH_4	0,29	50	1875	540
Propane	0,26	50	1920	760
Essence	0,24	44,5	2200	228-501

L'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable en raison de ces propriétés. Son énergie d'inflammation extrêmement faible correspond à des valeurs qui peuvent être obtenues à partir de décharges électrostatiques d'origine humaine. Il est donc nécessaire de prendre de nombreuses précautions lors de la mise en place de ce gaz. Dans l'oxygène pur, cette énergie d'inflammation minimale est de seulement 3 μ J/mole, ce qui est crucial pour assurer la sécurité des électrolyseurs.

Si aucune source de flamme n'est présente, le mélange hydrogène-air, dans les limites d'inflammabilité, peut s'enflammer par lui-même à une température donnée : la température d'auto-inflammation, également connue sous le nom de température d'auto-ignition ou d'auto-combustion. La température varie en fonction de la pression et se trouve dans la plage de 585 à 858°C, au-dessus de la plupart des autres gaz inflammables (tableau I.2).

1.2.3 Explosivité

Ces limites déterminent la plage d'explosivité qui est incluse dans la plage d'inflammabilité. Dans le cas de l'hydrogène à pression et température ambiantes, ces limites sont confondues¹ et vont de 4 à 75%². Plus généralement l'étendue de la plage d'explosivité dans l'air est fonction de la température et de la pression. A pression constante, elle croît avec la température. Sinon, elle suit les variations de la pression pour des mélanges (H_2 , O_2) (cf. Fig. I. 1).

¹ De ce fait, domaine d'explosivité est le terme réglementaire, néanmoins on trouve parfois celui de « domaine D'inflammation

² 4 En fait, à la concentration minimale de 4%, il n'y a guère d'explosion mais seulement inflammation.

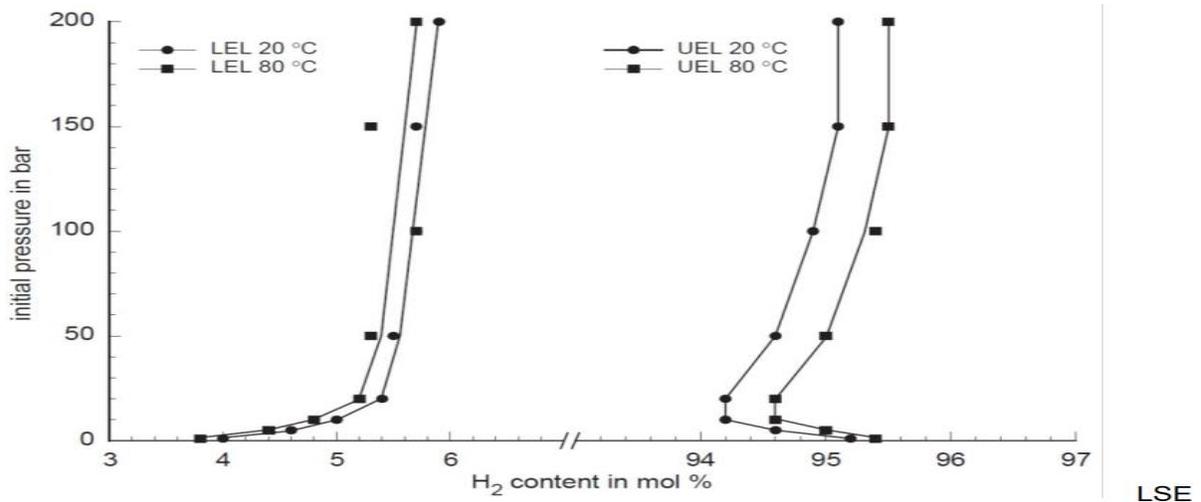


Fig.I.1 - LIE et LSE des mélanges H₂/O₂ en fonction de la pression et température³

La figure I.2 qui suit met en évidence la largeur du domaine d'explosivité de l'hydrogène devant celui de deux hydrocarbures combustibles courants le méthane et le propane.

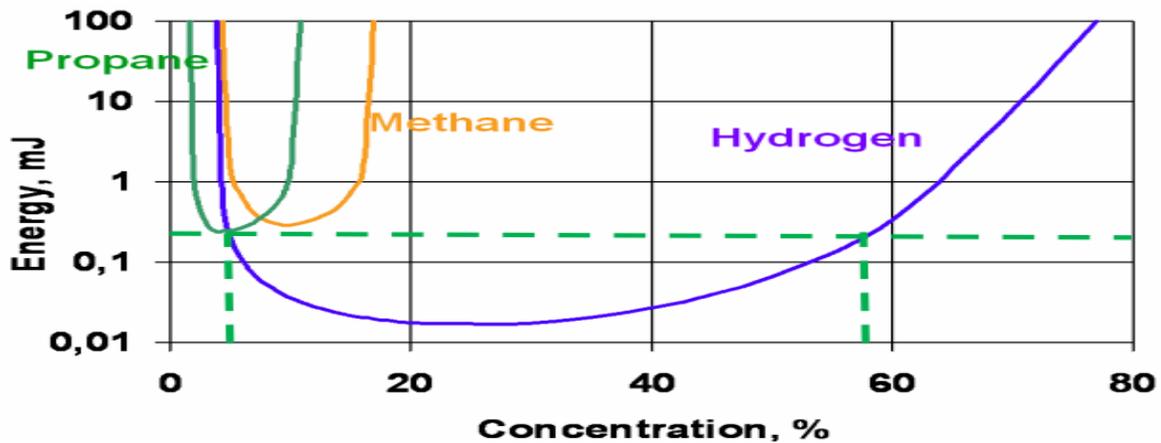


Fig. I. 2 - Domaine d'explosivité de l'hydrogène du propane et du méthane

Le tableau I.3 qui suit donne les vitesses de combustion et les énergies d'explosion comparées de l'hydrogène et du méthane.

³ V. Schröder, B. Emonts, H. Janßen, H.-P. Schulze: Explosionsgrenzen von Wasserstoff/Sauerstoff-Gemischen bei Drücken bis 200 bar, ChemieIngenieur Technik (75), 7/2003, S. 914-918

Table I.3 - Caractéristiques d'explosivité de l'hydrogène et du propane dans l'air à pression et température ambiantes⁴.

Propriétés	Unité	Hydrogène	Propane
Domaine d'explosivité	% vol	4 - 75	2,1 – 9,5
Vitesse de combustion	Cm/s	265 – 325	30 – 40
Energie d'explosion	g TNT/g produit	24	10
	Kg TNT/m ³ gaz (à PE)	2,02	20,3

Le mode d'explosion est principalement influencé par la quantité de combustible présente dans le comburant. Le régime de « flash-fire » se produit pour des concentrations allant de 4 à 8% d'hydrogène dans l'air. La déflagration, quant à elle, peut survenir dès 8 % et la détonation dans certaines configurations dès 11 %. De nombreux autres paramètres sont ajoutés aux valeurs théoriques. L'explosion peut passer de la déflagration à la détonation lorsque son état est amorcé. Ce qui influence cette transition sont les éléments qui influencent la vitesse du front de flamme, c'est-à-dire :

- La présence d'obstacles favorise l'accélération du front de flamme, ce qui entraîne une turbulence.
- Plusieurs mécanismes tels que les perturbations acoustiques, les forces d'Archimède et les gradients de pression.

Dans le cas d'une explosion, la vaste plage de détonation de l'hydrogène et les nombreux phénomènes de turbulences inhérents au nuage laissent présager un régime ou une déflagration rapide ou une détonation.

1.3 Fondamentaux de l'explosion de l'hydrogène

Pour comprendre les scénarios potentiels d'explosion de l'hydrogène à chaque étape de son utilisation, il est crucial de comprendre les fondamentaux de l'explosion de ce gaz. Voici quelques-uns des principaux éléments à considérer :

Pour comprendre les bases de l'allumage et de l'explosion de l'hydrogène, examinons quelques-unes de ses propriétés fondamentales liées à la combustion et à l'explosion :

⁴ (Sources : - Commission of the European Communities and the Government of Québec, novembre 1993 - ISO/PDTR 1 5916 Considérations fondamentales pour la sécurité des systèmes à hydrogène)

- a) Inflammabilité : L'hydrogène est extrêmement inflammable, ce qui implique qu'il peut prendre feu facilement en présence d'une source d'allumage adéquate, comme une étincelle ou une flamme nue. Une explosion d'hydrogène peut se produire lorsqu'il est mélangé avec de l'oxygène dans l'air dans une plage de concentrations spécifique, généralement comprise entre 4% et 75% d'hydrogène dans l'air [4].
- b) Rapidité de propagation : Les flammes générées par la combustion de l'hydrogène se propagent à une vitesse extrêmement élevée. En raison de sa faible masse moléculaire, l'hydrogène permet aux flammes de se propager plus rapidement que dans de nombreux autres gaz. Par conséquent, les explosions d'hydrogène peuvent se produire et se propager rapidement, accroissant ainsi les dangers pour les individus et les biens environnants. [5]
- c) Pression de déflagration : l'explosion d'hydrogène peut générer des ondes de choc et des pressions de déflagration importantes. La libération de chaleur due à la combustion de l'hydrogène peut entraîner une augmentation de la pression à l'intérieur d'un espace confiné, pouvant déclencher une explosion. Ces contraintes peuvent endommager les structures avoisinantes et causer des blessures graves. [6]

Pour résumer, l'hydrogène est un gaz hautement inflammable présentant une faible énergie d'allumage, une propagation rapide des flammes et la capacité de produire des pressions de déflagration élevées lors de sa combustion. Il est donc essentiel de prendre des mesures de sécurité appropriées lors de la manipulation, du stockage, du transport et de l'utilisation de l'hydrogène afin de prévenir les risques d'explosion et de garantir la sécurité des personnes et des biens.

1.3.1 Incidents liés à l'hydrogène

L'hydrogène, malgré son potentiel en tant que source d'énergie propre, présente des risques inhérents pour la sécurité qui doivent être gérés avec soin. Pour mieux comprendre ces risques, les chercheurs ont analysé 120 incidents liés à l'hydrogène survenus entre 1999 et 2019. Les résultats ont révélé que les laboratoires sont les plus sujets aux accidents liés à l'hydrogène, représentant 38,3 % des incidents. Les stations-service en hydrogène et les installations commerciales d'hydrogène suivent de près, représentant respectivement 10,6 % et 9,0 % des incidents.

L'erreur humaine et les pannes d'équipement sont apparues comme les principales causes d'incidents en laboratoire. Un exemple notable concerne un incident de laboratoire lors de l'opération de chargement de carburant liquide synthétique. Un remplissage accidentel d'air au lieu d'hydrogène a conduit à un mélange hautement explosif de 40 % d'hydrogène et 60 % d'air dans le cylindre. Lorsque deux ingénieurs ont tenté de libérer le gaz, une explosion s'est produite en raison de la chaleur générée par la compression adiabatique, entraînant deux morts [17].

Cet incident met en évidence l'importance de protocoles de sécurité stricts, d'une formation approfondie et d'un entretien approprié des équipements pour prévenir les accidents liés à l'hydrogène. De plus, les enquêtes sur les incidents et l'analyse des données jouent un rôle crucial dans l'identification des facteurs de risque et la mise en œuvre de stratégies d'atténuation efficaces.

Une analyse plus approfondie des composants impliqués dans les 120 incidents liés à l'hydrogène a révélé les équipements les plus susceptibles de tomber en panne. Comme le montre la figure 3b, les pipelines/raccords/vannes, les dispositifs de stockage, les véhicules à pile à combustible et les systèmes de ravitaillement sont apparus comme les principaux facteurs de troubles. Les ruptures de pipelines et les défaillances de raccords/vannes étaient des manifestations particulièrement fréquentes des incidents liés à l'hydrogène.

En approfondissant les mécanismes sous-jacents, la fragilisation par l'hydrogène et la fatigue des équipements ont été identifiées comme les principales causes de ces incidents. Les pannes des équipements de stockage ont été attribuées à deux facteurs principaux : les dommages aux sorties des bouteilles d'hydrogène dus à des vannes telles que les régulateurs et la défaillance des sangles de fixation retenant la bouteille d'hydrogène.

Une enquête approfondie sur les causes probables des 120 incidents liés à l'hydrogène a révélé une tendance claire, comme le montre la figure 3c. Les pannes d'équipement sont apparues comme le facteur prédominant, représentant 35,78 % des incidents. Ces pannes englobent les fuites d'hydrogène résultant de ruptures de pipelines, de dysfonctionnements de raccords et de défauts de vannes.

Cependant, le rôle de l'erreur humaine et des défauts de conception ne peut être négligé, puisqu'ils contribuent respectivement à 14,22 % et 12,07 % des incidents. L'erreur

humaine se manifeste principalement par un démontage, un assemblage, un mouvement et un remplacement inappropriés dus à des erreurs inconscientes ou involontaires. Les défauts de conception, en revanche, peuvent prendre diverses formes, telles que des alarmes de capteurs défectueuses, une durée de vie réduite des équipements et un retrait prématuré des équipements.

Une analyse des dommages et blessures résultant des 120 incidents liés à l'hydrogène a révélé une tendance distincte, comme l'illustre la figure 3d. Les dommages matériels sont apparus comme la principale conséquence, représentant 41,83 % de tous les incidents. Cela englobe les dommages aux équipements, aux infrastructures et aux bâtiments environnants.

Même si les dégâts matériels ont constitué le résultat le plus fréquent, des blessures humaines et des décès ont également eu lieu. Des blessures humaines, résultant d'une exposition à l'hydrogène ou d'explosions associées, ont été signalées dans 10,27 % des incidents. Tragiquement, 5,32 % des incidents ont entraîné des décès.

En comparant ces chiffres au taux de blessures de 10,87 % et au taux de mortalité de 2,65 % pour les incidents liés au gaz naturel, un contraste frappant apparaît. Même si les taux de blessures étaient relativement comparables, le taux de mortalité lié aux incidents liés à l'hydrogène était presque le double de celui des incidents liés au gaz naturel. Cela met en évidence le potentiel de conséquences plus graves associées aux accidents liés à l'hydrogène.

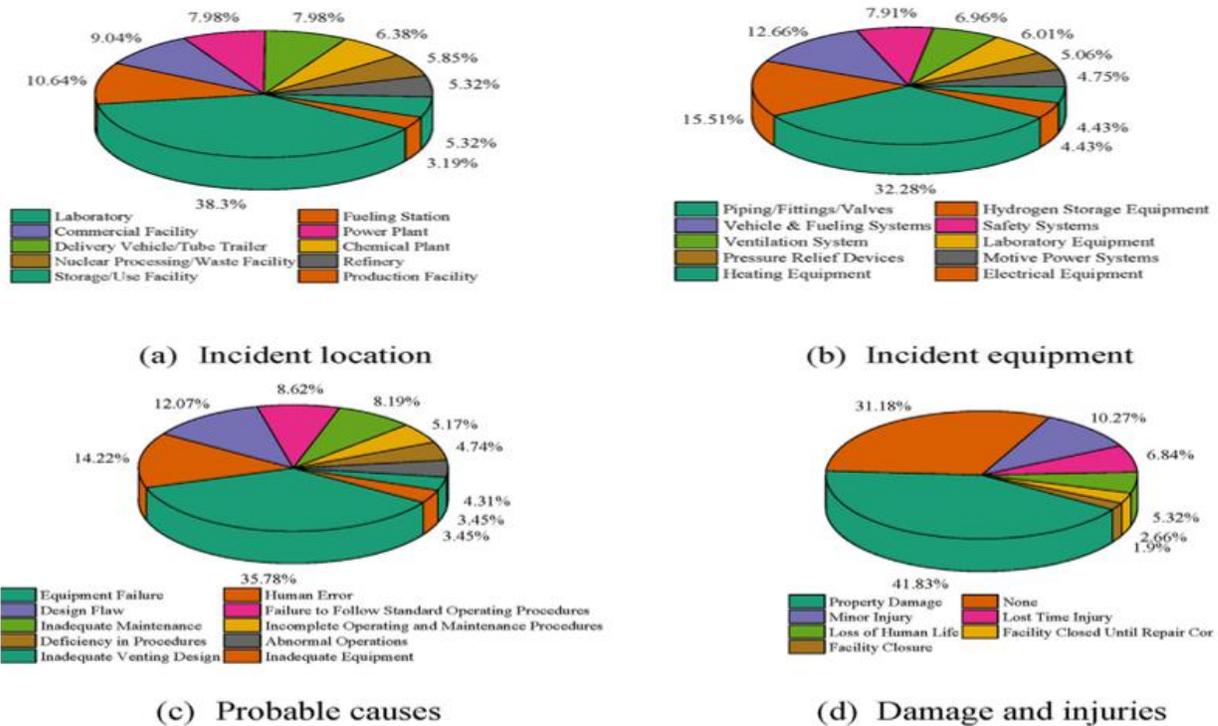


Fig.1.3. Statistiques sur les incidents liés à l'hydrogène. (a) Lieu de l'incident, (b) Équipement de l'incident, (c) Causes probables, (d) Dommages et blessures

1.3.2 Incidents liés à la sécurité de l'hydrogène : comprendre la formation et l'expansion des jets

La première indication d'un incident de sécurité impliquant l'utilisation de l'hydrogène est généralement une fuite et sa dispersion ultérieure. Lorsque de l'hydrogène à haute pression s'échappe dans l'air ambiant, la fuite se manifeste initialement sous la forme d'un jet d'hydrogène. Les caractéristiques d'écoulement de ce jet dépendent du rapport de pression entre la source de gaz et l'atmosphère ambiante. Trois états d'écoulement distincts peuvent se produire à la sortie de la fuite :

- Jet subsonique : Le flux de gaz est complètement détendu à la sortie, ce qui donne lieu à un jet subsonique.
- Jet à débit critique : la vitesse de sortie atteint la vitesse sonique locale, créant un jet à débit critique.
- Jet sous-expansé : le flux de gaz se dilate et s'accélère encore après être entré dans l'environnement atmosphérique, formant un jet sous-expansé.

Pour l'hydrogène, la pression critique pour la transition d'un jet subsonique à un jet sous-expansé est de 0,2 MPa (NPT). Cependant, dans les systèmes à hydrogène des véhicules à

pile à combustible, la pression dans la canalisation avant la première étape de décompression dépasse souvent 0,2 MPa. De même, dans les stations-service en hydrogène et les véhicules de transport d'hydrogène, les pressions des pipelines peuvent atteindre des valeurs supérieures à 20 MPa. Ces pressions élevées conduisent à la formation de jets sous-expansés en cas de fuite.

1.3.3 Approches d'analyse des risques

1.3.3.1 Approche déterministe

L'approche déterministe adopte une approche basée sur des scénarios, se concentrant souvent sur les pires scénarios tels que des ruptures catastrophiques de pipelines. Ces scénarios peuvent être dérivés de techniques de brainstorming telles que HAZOP ou l'analyse What-if, ou ils peuvent être mandatés par les autorités réglementaires. La méthode déterministe excelle dans l'estimation des conséquences potentielles de ces scénarios sur diverses cibles, notamment les individus, l'environnement et les infrastructures. Cependant, la concentration sur les événements extrêmes peut conduire à une surestimation du risque global et ne pas refléter avec précision la probabilité de tels événements.

1.3.3.2 Approche probabiliste

Contrairement à l'approche déterministe, l'approche probabiliste donne la priorité à la probabilité des dangers potentiels. Cette méthode utilise des techniques de brainstorming pour identifier un large éventail de scénarios, puis attribue une probabilité à chaque scénario en fonction de sa probabilité d'occurrence. Seuls les scénarios jugés suffisamment probables et représentant une menace significative sont analysés plus en détail. Même si cette approche s'aligne plus étroitement sur les pratiques réelles de gestion des risques, le fait qu'elle s'appuie sur des estimations de probabilité peut rendre difficile la communication des résultats à un public non spécialisé.

Les approches déterministes et probabilistes partagent un fil conducteur : elles comportent trois étapes fondamentales : l'identification, l'évaluation et le classement des scénarios. Traditionnellement, les industries ont développé leurs propres méthodes de gestion des risques adaptées à leurs caractéristiques spécifiques et à leurs normes culturelles. Par exemple, la méthode HAZOP a été développée pour l'industrie chimique, tandis que les méthodes basées

sur les arbres de défaillances ont trouvé des applications dans le secteur aérospatial. Ces diverses approches constituent des outils précieux pour orienter les efforts d'évaluation des risques.

Comme constat, on peut dire qu'une gestion efficace des risques exige une approche holistique (intégrale) qui transcende les limites des méthodologies individuelles. En exploitant les atouts des approches déterministes et probabilistes, combinés aux enseignements tirés des méthodes spécifiques à l'industrie, nous pouvons parvenir à une compréhension plus complète des risques.

1.3.4 Types explosion d'hydrogène

L'explosion d'hydrogène peut être divisée en différents types selon les conditions dans lesquelles elle se produit et les effets qui en résultent. Des types d'explosions d'hydrogène principaux sont les suivants :

1.3.4.1 Expansion de l'hydrogène et déflagration

- Expansion de l'hydrogène (explosion moins destructrice) : comme connue sous le nom de combustion non confinée de l'hydrogène, se produit lorsqu'une poche d'hydrogène gazeux non confiné s'enflamme. Dans ce scénario, une petite quantité d'hydrogène est présente dans un espace ouvert et entre en contact avec une source d'inflammation telle qu'une étincelle ou une flamme nue. Lors de l'allumage, l'hydrogène brûle rapidement, produisant de la chaleur et de l'eau. Cette combustion libère de l'énergie, provoquant une expansion rapide de l'hydrogène, pouvant conduire à une explosion ou à un effet de souffle. Cependant, cette explosion est généralement moins puissante que celle d'une détonation déflagration confinée d'hydrogène. [7]
- Déflagration (une combustion puissante dans des espaces confinés) : la déflagration d'hydrogène se produit lorsque l'hydrogène gazeux s'enflamme dans un espace confiné ou semi-confiné. Dans ce scénario, une quantité importante d'hydrogène est piégée dans une zone limitée, telle qu'un réservoir, une enceinte ou un tuyau. Lorsque l'hydrogène s'enflamme, la réaction de combustion génère une onde de choc qui se propage rapidement dans le mélange hydrogène-air. Cette onde de choc produit une pression importante dans l'espace confiné, conduisant à une violente explosion. La déflagration d'hydrogène sont souvent caractérisées par des pressions de déflagration

élevées et des conséquences destructrices importantes pour les structures environnantes.

1.3.4.2 Éclatement d'un récipient sous pression (ERSP)

Rupture de réservoir : la rupture d'un récipient sous pression contenant de l'hydrogène peut provoquer une explosion. Cela est cependant souvent lié à des conditions particulières. Il existe plusieurs types d'explosions d'hydrogène associées à la rupture d'un récipient sous pression par la **Fig. I.4**[8] :

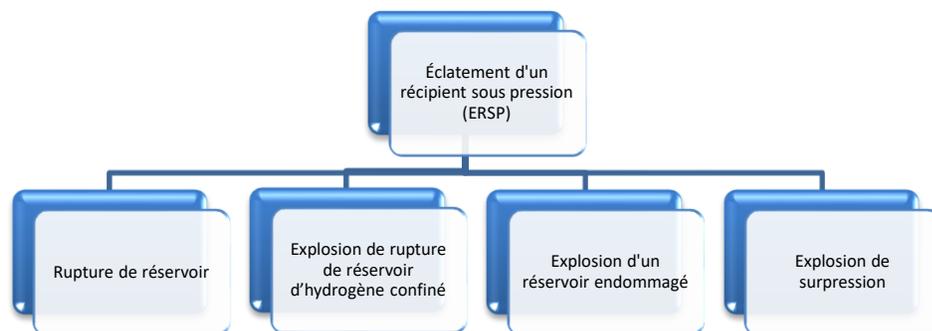


Fig. I.4: scénarios d'accidents causés par l'éclatement d'un récipient d'hydrogène sous pression (ERSP)

- **Rupture de réservoir** : un réservoir sous pression contenant de l'hydrogène peut se rompre lorsque la pression est élevée, ce qui entraîne une libération soudaine du gaz. Lorsque cette libération est assez forte, elle peut être suivie d'une détonation ou d'une déflagration, entraînant une explosion.
- **Explosion de rupture de réservoir d'hydrogène confiné** : une explosion par rupture de réservoir d'hydrogène sous pression confiné se produit due à une perte de confinement à cause de fatigue, corrosion... etc, libérant son contenu dans l'environnement. La libération soudaine d'hydrogène gazeux à haute pression, combinée à l'énergie du réservoir rompu, génère une onde de choc qui se propage vers l'extérieur. Cette onde de choc peut causer des dommages importants aux structures voisines et constituer un grave danger pour la sécurité des personnes se trouvant à proximité [9].
- **Explosion de récipient déformé** : lorsqu'un réservoir sous pression est déformé ou endommagé, comme par suite d'une surpression ou d'un impact, cela peut causer une

détérioration de sa structure. En cas de pression accrue, le réservoir peut se briser de manière imprévue, provoquant une explosion.

- **Explosion d'un réservoir endommagé** : les réservoirs sous pression utilisés pour stocker de l'hydrogène doivent être conçus selon des normes strictes afin de s'assurer de leur intégrité structurelle. Un réservoir qui présente des défauts de fabrication ou des matériaux de mauvaise qualité peut être plus susceptible de se rompre sous pression, ce qui peut entraîner une explosion.
- **Explosion de surpression** : l'explosion de surpression peut survenir lorsque l'hydrogène stocké dans un réservoir sous pression est soumis à des conditions telles que la chaleur excessive ou la réaction chimique. Dans le cas où le réservoir n'est pas prévu pour supporter de telles pressions, il peut se rompre, entraînant une explosion [8].

1.3.4.3 Explosion de vapeur en expansion de liquide bouillant/ BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions)

L'explosion de vapeur en expansion de liquide bouillant est une explosion qui peut se produire lorsqu'un liquide, comme l'hydrogène liquide, est vaporisé de manière soudaine et que la vapeur produite génère une pression excessive. Il est possible que cela se produise avec de l'hydrogène selon le processus présenté par **la Fig. I.5 [10]** :

1/ Vaporisation Flash : une transition de phase rapide

- La vaporisation soudaine, se produit lorsque l'hydrogène liquide est rapidement chauffé ou soumis à une chute de pression, déclenchant une transition rapide de son état liquide à un état gazeux. Ce phénomène peut être observé dans des situations telles qu'une augmentation brutale de la température ambiante ou une diminution de la pression atmosphérique.

2/ Expansion rapide de la vapeur : une augmentation du volume

- L'expansion rapide de la vapeur accompagne la transition du liquide vers un gaz. À mesure que le liquide bout et se vaporise, son volume augmente considérablement. Cette expansion rapide entraîne une augmentation de la pression à l'intérieur du récipient, pouvant potentiellement provoquer sa rupture ou sa défaillance.

3/ Explosion de vapeur : une violente libération de pression

- Lorsque la pression à l'intérieur du récipient dépasse son intégrité structurelle, celui-ci peut exploser ou se rompre, libérant la vapeur confinée sous une immense pression. Cette explosion peut projeter des débris et des fragments à grande vitesse, ce qui constitue une menace grave pour la sécurité des personnes et des biens à proximité.

Fig. I.5 : Processus de d'hydrogène Explosion de vapeur en expansion de liquide bouillant

Lorsqu'il s'agit de liquides inflammables comme l'hydrogène, les explosions de vapeur en expansion de liquide bouillant peuvent être particulièrement dangereuses, car elles peuvent provoquer des incendies ou des explosions supplémentaires si une source d'allumage est présente.

1.3.4.4 Déflagration d'un nuage d'hydrogène et d'air

La déflagration d'un nuage d'hydrogène et d'air est une forme d'explosion qui peut survenir lorsque des concentrations adéquates d'hydrogène et d'oxygène sont mélangées dans l'air et sont enflammées. La **Fig. I. 6** représente les étapes de ce phénomène [4-11-12].



Fig. I.6 : les étapes de phénomène de déflagration d'un nuage d'hydrogène et d'air

Les déflagrations de nuages d'hydrogène et d'air peuvent être extrêmement dangereuses en raison de la rapidité avec laquelle elles se propagent et de la force de l'onde de choc associée. La prévention de telles explosions implique la mise en œuvre de mesures de sécurité rigoureuses pour prévenir les fuites de gaz d'hydrogène, contrôler les concentrations dans l'air, éliminer les sources d'allumage et mettre en œuvre des systèmes de détection d'incendie et d'explosion pour une intervention rapide en cas d'urgence.

1.3.4.5 Transition déflagration-détonation (TDD)

L'explosion devient de plus en plus grave en termes de surpression résultante. En général, l'inflammation dans un mélange explosif ne provoque pas une détonation directe. Le régime de déflagration rapide nécessite un processus d'accélération de la flamme (FA) qui est le précurseur du déclenchement potentiel d'une détonation. L'ensemble du processus de FA et le début ultérieur de la détonation sont appelés transition déflagration-détonation (DDT). Si une transition vers la détonation se produit, il faut s'attendre à des dommages catastrophiques.

Un degré élevé de confinement soutient le DDT. Les géométries de type tube ou canal sans ouvertures latérales sont donc plus sujettes au DDT, en particulier si un rapport d'aspect élevé

(rapport longueur/diamètre/largeur) et une congestion supplémentaire sont fournis. L'importance de telles géométries dans l'industrie est évidente : tubes, tunnels, salles très encombrées par des installations et chaînes de salles connectées sont omniprésentes. De plus, connecter des tubes entre des volumes plus importants peut présenter un risque accru de DDT. Une détonation formée dans un tel tube de liaison peut émerger dans un volume plus grand et, dans des conditions appropriées, être entretenue. La Fig. I.7 représente la séquence des étapes qui réagis cette transition [13-14-15]

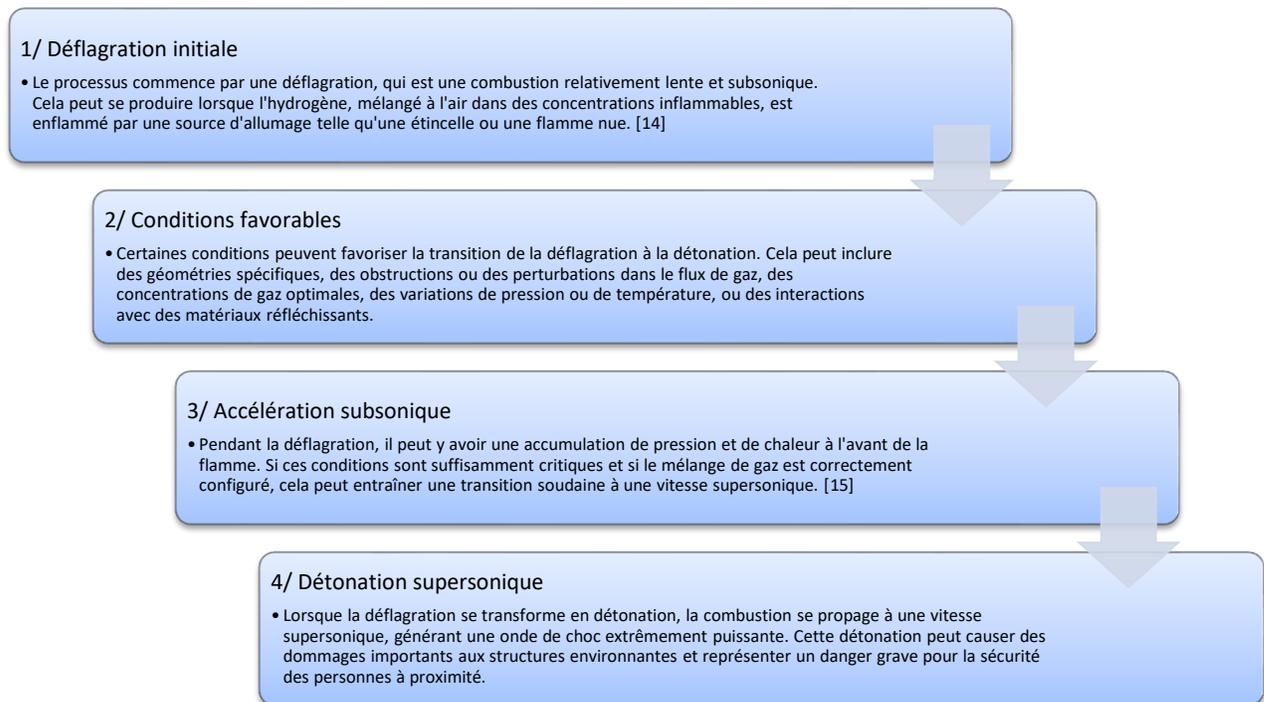


Fig. I.7 : les étapes de la Transition déflagration-détonation (TDD)

La transition de déflagration à détonation est un phénomène complexe qui dépend de nombreux facteurs, y compris les caractéristiques du mélange de gaz, les conditions environnementales et les interactions avec les structures environnantes. Bien que relativement rares, ces événements peuvent être extrêmement dangereux et nécessitent une compréhension approfondie pour la prévention et la gestion des risques associés. Les mesures de sécurité appropriées, telles que la ventilation adéquate, le contrôle des sources d'allumage et la conception sécurisée des installations, sont essentielles pour minimiser les risques de transition de déflagration à détonation.

La transition déflagration-détonation (DDT) est influencée par divers facteurs, notamment les propriétés du mélange gazeux, les conditions environnementales et les interactions avec les structures environnantes.

Bien que les événements liés au DDT soient relativement rares, ils peuvent être extrêmement dangereux en raison de l'augmentation soudaine et significative de la vitesse et de la pression de combustion. La libération rapide d'énergie peut causer de graves dommages aux structures, générer des ondes de choc intenses et présenter un risque important pour le personnel à proximité.

1.4 Méthodes d'analyse d'explosion d'hydrogène

Il est primordial d'analyser les explosions d'hydrogène afin d'évaluer les risques, élaborer des mesures de sécurité adéquates et prévenir les incidents. Voici quelques-unes des méthodes d'analyse les plus couramment employées pour l'étude des explosions d'hydrogène :

1.4.1 Tests expérimentaux

Les tests expérimentaux sont des essais en laboratoire ou sur le terrain qui permettent d'analyser le comportement des explosions d'hydrogène dans des conditions contrôlées. Il est possible de réaliser des tests de fuite, de confinement, de détonation, d'extinction et d'effets sur les structures lors de ces tests. Les résultats de l'expérience sont utilisés pour confirmer les modèles numériques et approfondir la compréhension des phénomènes d'explosion. Le tableau ci-dessous présente une liste des études expérimentales, mais il n'y a pas de liste exhaustive

Tableau I.4 : Résumé des études expérimentales sur les explosions d'hydrogène

Category	Scenario	P_{max}	Reference
Hydrogen expansion deflagration	Réservoir d'hydrogène (35Mpa, type 4) lors d'un incendie	300Kpa (1,9m) et 41Kpa (6,5)	Zalosh [16]
	Réservoir d'hydrogène (35Mpa, type3) lors d'un incendie	140Kpa (1,2m) et 30Kpa (6,5)	Zalosh[16]
	Jet s'échappe d'un réservoir	103 Kpa (0,5m)	Shirvill et al.

	d'hydrogène (40Mpa)		[17]
	Le jet sort d'un réservoir d'hydrogène de 18,8 Mpa avec une buse sténopé de 10mm	40Kpa (near the nozzle exit) et 7Kpa (1,5m)	Mogi et al. [18]
	Jet d'hydrogène sous pression cryogénique avec une buse sténopé de 0,7 mm	>3Kpa (1m)	Kobayashi et al [19]
Hydrogen-air cloud deflagration	300m ² cadre en dôme avec obstacle (30%)	17Kpa (15,6m)	Groethe et al. [11]
	Premixed 5,4 × 6,0 × 2,5m ² nuages hydrogène-air (31,5%) à 2 parois	140Kpa (centerline) et 19,5 Kpa (17,5m)	Shirvill et al. [17]
	L'hydrogène s'échappe par une rupture de tuyauterie et est rejeté dans l'atmosphère (40 Mpa)	20,4 Kpa (3,9m)	Takeno et al. [20]
	Dans un 57m ³ chambre avec un 0,55 m ² évent et turbulence initiale (9 %, ventilateurs de mélange à 1 000 tr/min)	35Kpa	Liang et al. [21]
Hydrogen-air cloud detonation	Dans le 4 × 4 × 1800m ² channel (66%)	2,95Mpa (end of DDT)	Bykov et al. [22]
	Tests de détonation dans l'installation RUT en Russie	>2,5Mpa	Zbikowski et al. [23]
	Le mélange hydrogène-air a été fixé comme 29,6% avec une énergie d'allumage de 1500 MJ dans le tube.	À propos 2,0Mpa	Rao et al. [24]

Le Tableau I. 4 présente une synthèse des recherches existantes sur les explosions d'hydrogène, où les essais sont classés en fonction du type d'explosion, à savoir l'expansion et la déflagration (incluant la rupture du réservoir et le dégagement), la déflagration et la détonation. L'intensité des différentes surpressions d'explosion d'hydrogène a été observée dans le tableau 4, avec des variations de grandeur allant de plusieurs kPa de déflagration par expansion à plusieurs MPa de détonation [25].

1.4.2 Modélisation numérique

On a également utilisé une méthode de modélisation numérique pour simuler une explosion d'hydrogène en prenant en compte sa rentabilité par rapport à la méthode expérimentale. Divers chercheurs ont effectué une modélisation de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour mieux comprendre les mécanismes et expliquer les phénomènes observés lors de l'explosion d'hydrogène. Cette approche a permis d'obtenir une compréhension globale de la diffusion des nuages d'hydrogène [26], du développement de flammes et d'explosions [27], ainsi que de l'interaction de divers facteurs dans différents termes. Des logiciels de modélisation CFD tels que FLACS, OpenFOAM et ANSYS-Fluent sont couramment utilisés pour simuler des explosions d'hydrogène.

- FLACS-CFD : GexCon a créé un module spécifique dans FLACS-CFD en se basant sur de nombreux tests et dérivations théoriques, afin de simuler une explosion d'hydrogène. FLACS, un logiciel industriel très apprécié pour simuler la dispersion et l'explosion de gaz inflammables, offre une interface conviviale ainsi que des outils de pré- et post-traitement. Divers chercheurs ont vérifié la précision du FLACS dans la modélisation de l'hydrogène. Dans ce cadre, Vyazmina et Jallais[28] ont sélectionné des expériences d'explosion d'hydrogène existantes avec différentes configurations. On a observé que les FLACS ne sont pas adaptés (moins précis) pour les applications à petite échelle ($1 < m^3$).
- OpenFOAM (Open-Source Field Operation and Manipulation), est un logiciel numérique populaire qui permet de réaliser des explosions d'hydrogène. En comparaison avec FLACS, OpenFOAM présente une interface utilisateur moins conviviale. De cette façon, le processus de pré- et post-traitement devient complexe et laborieux. Les déflagrations d'hydrogène inhomogènes ventilées dans un conteneur ISO de 20 pieds ont été simulées par HySEA en utilisant le cadre OpenFOAM, et les

précisions de la modélisation ont été évaluées [29]. On a remarqué que la surpression prévue pendant le souffle était plus faible que la surpression mesurée lors de l'essai. Toutefois, en comparaison avec FLACS, OpenFOAM en tant que logiciel open source présente une plus grande souplesse et flexibilité, permettant aux chercheurs de modifier le solveur, les conditions minimales, les conditions initiales et le modèle de turbulence afin de prédire les explosions d'hydrogène dans différents scénarios.

- ANSYS est l'un des logiciels les plus performants pour la dynamique des fluides (CFD), intégrant des produits comme CFX et Fluent, pour simuler des explosions d'hydrogène. La fiabilité de ces modèles CFD a été évaluée en simulant des déflagrations à 18 % d'hydrogène dans une enceinte ventilée, réalisées par FM Global. Par rapport aux résultats conservateurs de FLACS, CFX et Fluent peuvent améliorer les prévisions de la surpression maximale après une explosion [30]. La surpression prédite par CFX et Fluent diminuerait jusqu'à atteindre approximativement la température ambiante après l'explosion, puis augmenterait jusqu'à un niveau bas et resterait stable pendant une période qui ne concorde pas avec les résultats expérimentaux disponibles. De plus, la fiabilité des résultats de CFX est grandement affectée par la taille du maillage et les conditions de turbulence initiales [30], ce qui nécessite une vérification appropriée avant de procéder à une modélisation numérique.

1.4.3 Méthodes empiriques et les méthodes théorique

Les formules empiriques générées à partir des données expérimentales les plus appropriées ont été utilisées pour prédire l'explosion de l'hydrogène sous pression, tandis que les guides de dérivation théorique et de conception pour les gaz combustibles et les explosifs ont également été modifiés et utilisés pour prédire les explosions d'hydrogène sous pression.

Trois approches classiques sont fréquemment utilisées en ingénierie pour prédire la charge explosive du VCE : la méthode TNT équivalente (TNT-EM), la méthode multi-énergies TNO (TNO MEM) et la méthode Baker-Strehlow-Tang (BST). La méthode TNT-EM convertit l'énergie libérée par l'explosif en énergie équivalente à celle du TNT. Selon le TNO MEM, la capacité explosive d'un nuage de vapeur est évaluée en fonction des conditions aux limites, ce qui signifie que la partie non contrainte du nuage de vapeur contribue de manière limitée à l'intensité de l'explosion. Les vitesses de flamme des divers explosifs ou VCE sont prises en

compte dans la méthode BST, bien qu'elles soient généralement similaires à celles du TNO MEM.

La précision de ces méthodes pour prédire l'explosion. Les résultats de prédiction ont été confrontés aux données de test disponibles sur les explosions de nuages d'hydrogène dans l'air pour évaluer la charge explosive de l'hydrogène. Les auteurs [32] ont comparé les pics de surpression et les impulsions des mesures de test avec les prédictions de ces trois méthodes en conditions stœchiométriques. L'objectif est de décrire la détonation d'un nuage d'hydrogène et d'air (avec une concentration d'hydrogène de 29,5 %) dans une chambre confinée de 0,283 m³, qui explose en utilisant 6 gC-4.

Les prédictions de ces trois méthodes sont assez peu précises, même si elles permettent d'obtenir l'ordre de grandeur approximatif de la surpression du souffle. En comparaison, TNO MEM a obtenu des résultats supérieurs à ceux de TNT-EN et BST, en particulier pour prédire les surpressions de pointe, tandis que la méthode TNT EM avait donné la prévision la plus défavorable. Il existe plusieurs raisons pour ces grandes différences : tout d'abord, les techniques classiques ont été développées pour un environnement symétrique sans obstacles, ce qui diffère du cas spécifique des explosions d'hydrogène dans un espace restreint. De plus, l'hydrogène présente une activité plus élevée que le gaz combustible classique, entraînant une libération d'énergie accrue ainsi qu'une surpression et une impulsion de souffle plus élevées. Enfin, l'hydrogène peut ne pas correspondre aux paramètres des modèles TNO MEM et BST utilisés pour les carburants à base d'hydrocarbures [31].

1.4.3.1 Modèle TNO (Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek)

L'approche multipotente a été développée en 1984 au sein du laboratoire Mauritz de l'organisation néerlandaise TNO Prins, en particulier par Van Den Berg [33]. Les principes de base de cette méthode sont directement inspirés des mécanismes de régulation de l'explosion de gaz. Ainsi, pour comprendre la méthode Multi-Énergie, il est important de retenir que la surpression importante causée par une explosion de gaz est peu probable, sauf dans les cas suivants : - Lorsque la flamme atteint des vitesses de propagation très élevées (dizaines de mètres par seconde). - Lorsque le gaz est confiné par des parois solides. En fait, l'idée principale est fondée sur la présomption que la taille et le confinement de la région couverte

par le mélange inflammable sont des facteurs cruciaux pour déterminer la vitesse de propagation de la flamme et, par conséquent, la quantité de surpression atteinte.

1.4.3.2 Modèle de BAKER-STREHLOW

Le modèle Baker-Strehlow élaboré par Baker et ses collègues [34] a été publié pour la première fois en 1996. C'est un outil précieux pour prédire les surpressions engendrées par les explosions de nuages de vapeur et évaluer les risques associés. Il s'appuie sur la même notion de zones désordonnées qui avait été initialement suggérée par le modèle multi-énergie hybride. La présence d'obstacles dans ces deux modèles entraîne une expansion de la flamme et entraîne de violentes explosions de nuages de vapeur. Les zones congestionnées sont repérées dans le modèle multi-énergie, et des détonations y ont lieu avec une intensité accrue, avec un coefficient d'explosion d'explosif. D'autre part, dans le modèle de Baker-Strehlow, le pouvoir de sélection est un paramètre clé qui influence l'explosivité, c'est-à-dire la vitesse de propagation de la flamme. Trois éléments clés déterminent ce pouvoir de sélection :

- a) Le processus de propagation du front de flamme.
- b) La capacité de réaction du carburant.
- c) Le nombre d'obstacles.

Le modèle Baker-Strehlow présente certaines limites comme par exemple ; ne prend pas en compte tous les facteurs : tels que la forme du nuage de vapeur et la géométrie du confinement, elle nécessite des données précises sur les propriétés du mélange gazeux, la distribution des obstacles et les conditions environnementales pour un calcul précis. Et en fin, les résultats peuvent être sensibles aux variations des paramètres d'entrée, nécessitant une analyse approfondie des incertitudes.

1.4.3.3 Modèle de l'équivalent TNT (trinitrotoluène)

Cette méthode utilise la masse équivalente en TNT pour calculer la puissance d'explosion d'un nuage de vapeur d'un produit ou d'une matière. L'équivalent TNT d'un mélange gazeux explosible est donc la masse de TNT qui, en explosant, provoquerait le même champ de surpressions que celui produit par l'explosion d'un kg du mélange explosible en question. En trois étapes, le modèle permet d'évaluer le niveau de pression obtenu en fonction du niveau de confinement ou d'obstruction du mélange inflammable [35].

Le modèle de l'équivalent TNT présente certaines limites ; Ne prend pas en compte tous les facteurs, tels que la forme du nuage de vapeur et la géométrie du confinement, Fournit une estimation approximative de la puissance d'explosion et Nécessite des données précises sur les propriétés du mélange explosif pour un calcul précis.

1.5 Facteurs influençant l'explosion de l'hydrogène

Nous avons vu précédemment que la charge de souffle des explosions d'hydrogène peut être affectée par différents éléments. Ces facteurs, tels que la taille et l'hétérogénéité des nuages d'hydrogène-air, l'énergie et l'endroit où l'inflammation se produit, la température et la pression ambiantes, les obstacles, la ventilation, l'eau et les particules inertes, ainsi que les matériaux/structures de suppression des explosions, ont un impact sur le charbon. On examine et résume les caractéristiques des explosions d'hydrogène et la précision de l'estimation de la surpression de souffle.

1.5.1 Taille et hétérogénéité des nuages hydrogène-air

La taille d'un nuage d'hydrogène et d'air joue un rôle crucial dans la charge de souffle produite. Si le volume du nuage est petit, il n'y a pas assez d'hydrogène pour supporter l'accélération turbulente de la flamme, seule une combustion voire une extinction se produira ; tandis que si le volume du nuage est suffisamment grand, du DDT peut se produire après avoir été enflammé. Comme le montre la **Fig.I.8**, la vitesse de la flamme des nuages prémélanges d'hydrogène et d'air augmente avec l'augmentation de la distance de propagation de la flamme. La surpression générée lors d'un processus de déflagration augmenterait également avec la vitesse de la flamme [36].

Dans le pipeline où la détonation peut se propager, la distance entre la déflagration et la détonation (DDT) entre la combustion et la détonation est généralement 100 fois supérieure au diamètre du pipeline. Par conséquent, la disparité radiale entre les études existantes sur la limite de détonation est sans doute liée à l'échelle et à la taille du dispositif expérimental employé. La grandeur du dispositif expérimental entraîne une explosion plus violente et une largeur limite de détonation plus élevée. Ainsi, la dimension d'un nuage d'hydrogène et d'air joue un rôle crucial dans la limite de détonation et les conséquences d'une explosion d'hydrogène.



Fig. 1.8: déflagration d'hydrogène dans un garage : a) avant l'explosion b) pendant l'essai [12]

1.5.2 Intensité et localisation de l'inflammation

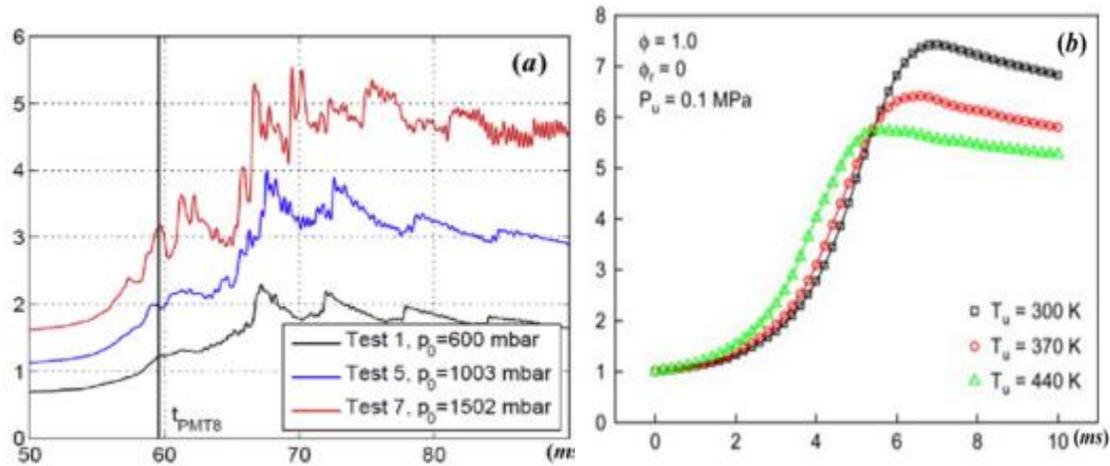
L'intensité et l'emplacement de l'inflammation ont joué un rôle dans les explosions d'hydrogène. Le type d'explosion d'hydrogène est directement influencé par l'intensité de la source d'inflammation (expansion et déflagration, détonation ou DDT). C'est dans les années 1960-1982 que l'US Air Force et la NASA ont réalisé une série d'études expérimentales et de modélisation sur les fuites et les explosions d'hydrogène [13], qui ont montré que la détonation directe de l'hydrogène exige des sources d'inflammation puissantes, telles que des explosifs puissants, des flammes de jet et des explosifs. Les courts-circuits de condensateurs à haute tension 13720 International Journal of Hydrogen Energy 48 (2023) 13705 e13730, tandis que les faibles sources d'inflammation, comme une surface chaude ou une étincelle, ne peuvent engendrer qu'un incendie et une déflagration [13].

De plus, ces essais ont aussi démontré que la surpression de l'explosion d'hydrogène augmentera en fonction de l'énergie d'inflammation [37]. Comme une plus grande énergie d'allumage entraîne une plus grande libération de chaleur, cela entraîne un noyau d'allumage à haute température plus élevé et un temps de chauffage plus long. En augmentant progressivement l'énergie d'inflammation, le processus de croissance de la flamme sera perturbé, ce qui entraîne habituellement un feu laminaire jusqu'à la déflagration et même à la détonation.

Dans les utilisations courantes de l'hydrogène comme énergie renouvelable, une faible source d'inflammation est généralement perçue comme la plus probable cause d'accidents d'explosion d'hydrogène. Il faut cependant noter qu'une faible source d'inflammation qui provoque une

déflagration peut aussi entraîner une déflagration d'hydrogène qui se transforme en détonation si la taille du nuage d'hydrogène est adéquate.

1.5.3 Température et pression ambiances



FigI.9. Historiques de pression de souffle (bar), (a) avec des pressions différentes (b) avec des températures différentes [38]

Les paramètres de pression et de température ambiante jouent un rôle crucial dans l'impact de la charge de souffle des explosions de nuages d'hydrogène et d'air. La pression initiale augmentée peut entraîner une augmentation significative de la surpression de l'explosion d'hydrogène. La surpression du souffle est approximativement proportionnelle à la pression initiale dans des conditions isovolumétriques adiabatiques [38], comme illustré dans la (figureI.9a). Effectivement, lorsque la pression initiale augmente dans les conditions isothermes de volume constant, l'hydrogène serait comprimé et la densité de l'hydrogène dans le même volume augmenterait. En raison de la forte dépendance de la surpression de souffle à la densité de l'hydrogène, une pression ambiante initiale plus élevée entraînerait donc une augmentation de la surpression de souffle.

Cependant, comme mentionné dans la section Allumage (propriétés de base de combustion et d'explosion), la surpression maximale diminuera au fur et à mesure que le rapport de concentration en hydrogène continuera d'augmenter après l'obtention du rapport « optimisé ». Ainsi, une très forte pression ambiante peut provoquer une diminution de la surpression maximale de souffle, mais cela n'est pas encore démontré. De plus, la vitesse de propagation turbulente de la flamme diminue avec l'augmentation de la pression initiale, ce qui est dû à

l'interaction de l'onde de choc réfléchi avec la flamme [39]. L'effet négatif de la température initiale sur la surpression des explosions d'hydrogène est signalé. Comme la montre (**Fig. I.9b**), à la même pression initiale, une élévation de la température initiale entraîne une réduction de la surpression du souffle [38]. Effectivement, lorsque la température ambiante augmente, l'hydrogène se dilate, ce qui entraîne une diminution de la densité d'hydrogène et donc une diminution de la surpression de souffle. En augmentant la température ambiante, la vitesse de propagation de la flamme pourrait augmenter, ce qui entraînerait une augmentation plus rapide de la pression de soufflage.

1.5.4 Matériaux/structures anti-explosion

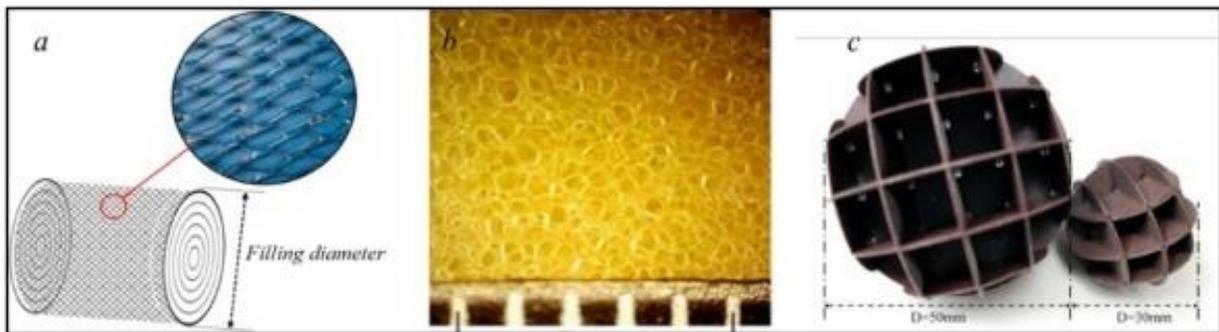


Fig. I.10. Matériaux antidéflagrants : (a) alliages d'aluminium en treillis, (b) mousse de polyuréthane, (c) billes sphériques non métalliques [40]

Il est de plus en plus intéressant d'utiliser des matériaux/structures techniques pour réduire les explosions de nuages d'hydrogène et d'air dans des espaces confinés. Les matériaux anti-explosion sont généralement composés de structures maillées ou poreuses, qui sont déposées dans le récipient ou le conduit confiné. Ces structures diminueront la vitesse de la flamme et la concentration en hydrogène, ce qui diminuera l'effet de souffle grâce à leurs formes et dimensions spécialement élaborées. Les matériaux/structures couramment utilisés pour éviter les explosions sont présentés dans la figure I.10, tels que des alliages d'aluminium à mailles (MAA), de la mousse de polyuréthane et des billes sphériques non métalliques. Le matériau/structure de suppression d'explosion (MAA) est couramment employé dans le domaine des gaz combustibles [40].

Mais en ce qui concerne l'explosion de l'hydrogène. [41] ont effectué des tests en laboratoire et ont découvert que le MAA augmentait la surpression de souffle dans le tube à essai par rapport

au tube vide de référence, qui n'est donc pas adapté à la suppression des explosions d'hydrogène. Ils ont étudié les résultats du MMA et ont mis en évidence que le MAA a un double effet de stimulation et de neutralisation de l'explosion d'hydrogène. En effet, une densité de remplissage plus élevée et un diamètre de MAA plus élevé dans un tube rempli d'hydrogène pourraient contribuer à une atténuation efficace du DDT. Ainsi, il est essentiel de développer de manière adéquate la forme, la structure et la densité de remplissage adéquates pour le nuage hydrogène-air dans diverses concentrations d'hydrogène.

Une autre méthode de suppression d'explosion fréquemment employée pour les gaz combustibles est la mousse de polyuréthane, qui pourrait contribuer à ralentir la propagation des flammes [42]. Le matériau non métallique sphérique, tel qu'illustré dans la Fig. (I.10c), est une nouvelle structure conçue pour améliorer l'efficacité de la suppression des explosions. Il est encore nécessaire de mener des études plus approfondies sur les performances de ces matériaux/structures pour l'explosion de nuages d'hydrogène dans l'air. En prenant en compte les diverses caractéristiques de l'explosion d'hydrogène par rapport à d'autres gaz combustibles, il serait possible de développer de nouveaux matériaux/structures de suppression d'explosion.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous devons faire face les concepts fondamentaux liés à l'hydrogène en tant que gaz explosif très dangereux, ainsi que les concepts essentiels sur le phénomène d'explosion ainsi que les différentes méthodes de modélisation analytique et numérique. Dans le deuxième chapitre, on a exposé la méthodologie suggérée pour évaluer les utilisations d'enceintes de stockage d'hydrogène sous pression.

Chapitre II : Méthodologie d'évaluation de la surpression des explosions du réservoir d'hydrogène sous pression

Chapitre II : Méthodologie d'évaluation de la surpression des explosions du réservoir d'hydrogène sous pression	31
2.1 INTRODUCTION	31
2.2 MECANISME D'EXPLOSION D'UN RESERVOIR D'HYDROGENE A HAUTE PRESSION DANS DES SCENARIOS D'INCENDIE	31
2.2.1 Phase I: explosion physique	31
2.2.2 Phase II: Ignition (Allumage/ inflammation).....	32
2.2.3 Phase III : Déflagration hydrogène-air.....	32
2.3 METHODOLOGIE D'EVALUATION DE LA SURPRESSION DES EXPLOSIONS DU RESERVOIR D'HYDROGENE HAUTES PRESSIONS.....	32
2.3.1 Modélisation de l'explosion physique par l'analyse thermo-structurale dans ANSYS Mechanical	33
2.3.1.1 Analyses thermiques	34
2.3.1.2 Analyse structurelle.....	34
2.3.2 Évaluation des effets de surpression d'explosion d'un réservoir d'hydrogène à haute pression	35
2.3.2.1 Calcul de l'énergie total	35
a) Calcul de l'énergie mécanique.....	35
b) Calcul de l'énergie chimique	36
2.3.2.2 Évaluation de la surpression des ondes de souffle.....	37
a) Modèle TNO-Multi-Energie	37
2.4 CONCLUSION	42

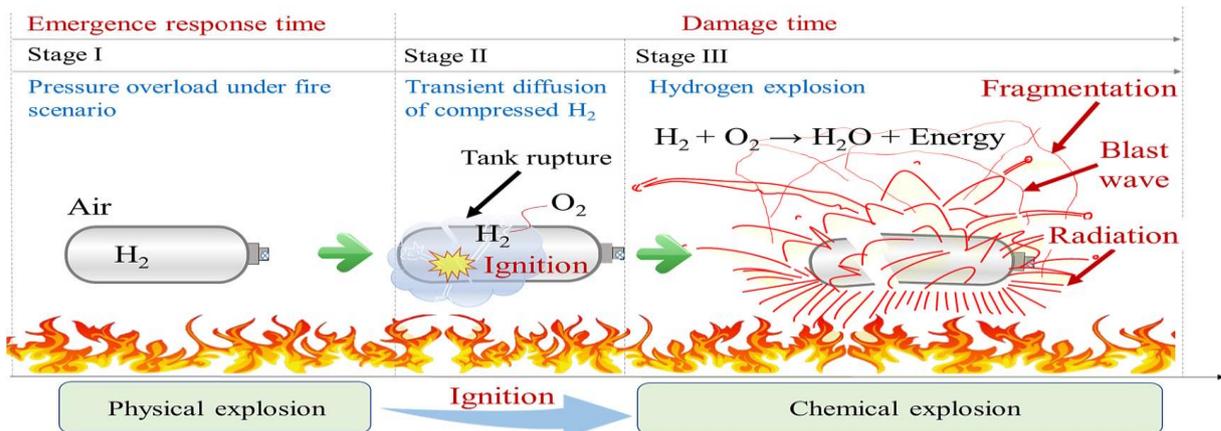
Chapitre II : Méthodologie d'évaluation de la surpression des explosions du réservoir d'hydrogène sous pression

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire le principe de l'explosion d'hydrogène et un gas d'une enceinte sous pression et suggérer une méthode pour simuler l'explosion physique en utilisant des modèles d'ANSYS mécanique. De plus, nous allons également étudier les effets de surpression en utilisant des modèles d'estimation analytique.

2.2 Mécanisme d'explosion d'un réservoir d'hydrogène à haute pression dans des scénarios d'incendie

Il est essentiel de décrire le principe et le mécanisme des explosions d'hydrogène dans une enceinte sous pression afin de modéliser ces explosions. **FigII.1** présente un modèle physique simplifié de l'explosion d'un réservoir de stockage d'hydrogène à haute pression. En fonction des étapes et de l'ordre chronologique, les étapes à l'origine d'une explosion classique d'un réservoir d'hydrogène à haute pression ont été [43] :



FigII.1 : processus d'explosion des réservoirs d'hydrogène sous-pression [1]

2.2.1 Phase I: explosion physique

L'énergie cinétique et thermique moyenne. Le déplacement des molécules d'hydrogène stockées dans le réservoir a été accéléré par l'action d'une source de chaleur externe, ce qui a entraîné une augmentation continue de la pression à l'intérieur du réservoir.

Les composites en fibre de carbone, largement utilisés dans les systèmes de stockage d'hydrogène, peuvent succomber à une défaillance structurelle sous l'influence d'un incendie. L'interaction entre la pression interne sans cesse croissante et la température externe élevée peut exacerber les dommages matériels, voire déclencher une explosion [45]. Dans un tel scénario, l'hydrogène à haute pression rompt le confinement affaibli et se

dilate rapidement, libérant une énorme quantité d'énergie physique en un instant. Comprendre ces mécanismes est crucial pour prévenir et atténuer les risques associés à l'utilisation de l'hydrogène dans diverses applications.

Cette rupture du réservoir est due à l'absence de contact entre l'air extérieur et l'hydrogène à l'intérieur de la bouteille, ce qui entraîne une explosion physique. Une autre raison pour qualifier la Phase I d'explosion physique est que l'oxygène et l'hydrogène sont isolés à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du cylindre avant sa division. Ce processus peut donc être considéré comme le résultat d'une défaillance physique du réservoir causée par une pression interne élevée, sans qu'il n'y ait aucune réaction chimique.

2.2.2 Phase II: Ignition (Allumage/ inflammation)

La rupture du réservoir de stockage entraîne un rejet rapide d'hydrogène sous haute pression dans l'atmosphère. Suite à la propagation de l'onde de souffle à grande vitesse du réservoir dans l'air ambiant, elle génère un mélange hydrogène-air pré-mélangé à l'interface. Ce mélange pré-mélangé se met rapidement en feu lorsqu'il est exposé à une source de flamme nue, ce qui entraîne une explosion dangereuse. [44,47].

2.2.3 Phase III : Déflagration hydrogène-air

Représente une explosion chimique qui libère une quantité massive d'énergie, formant rapidement une grosse boule de feu, un champignon atomique et d'autres phénomènes associés. À mesure que l'onde de souffle se propage loin du réservoir rompu et se dissipe, la combustion turbulente sans prémélange a un impact minimal sur l'intensité de l'onde de souffle [47].

Une boule de feu, une onde de souffle et des fragments ont été produits en même temps par l'explosion, libérant ainsi une grande quantité d'énergie. Cet événement a provoqué une grande détérioration de l'équipement et du personnel environnant [44].

2.3 Méthodologie d'évaluation de la surpression des explosions du réservoir d'hydrogène hautes pressions

La Fig. II.2 illustre les étapes méthodologiques et l'approche proposée. Pour évaluer les conséquences d'une explosion d'un réservoir d'hydrogène gazeux (GH₂), nous avons d'abord modélisé l'explosion physique à l'aide de l'analyse thermo-structurale dans ANSYS Mechanical. Par la suite, nous avons évalué les énergies mécaniques et chimiques à l'aide de modèles d'estimation d'énergie appropriés. Ensuite, nous avons utilisé deux méthodes, masse équivalente au TNT et TNO multi-énergie, pour analyser les conséquences de l'explosion. En utilisant les deux méthodes, nous avons calculé les valeurs de surpression à

l'aide de formules empiriques conservatrices pour une prévision prudente. Des données expérimentales sur les ondes de souffle ont été utilisées pour valider les résultats prédits. Par la suite, nous avons discuté en détail des distances de sécurité en cas d'explosion du réservoir GH2.

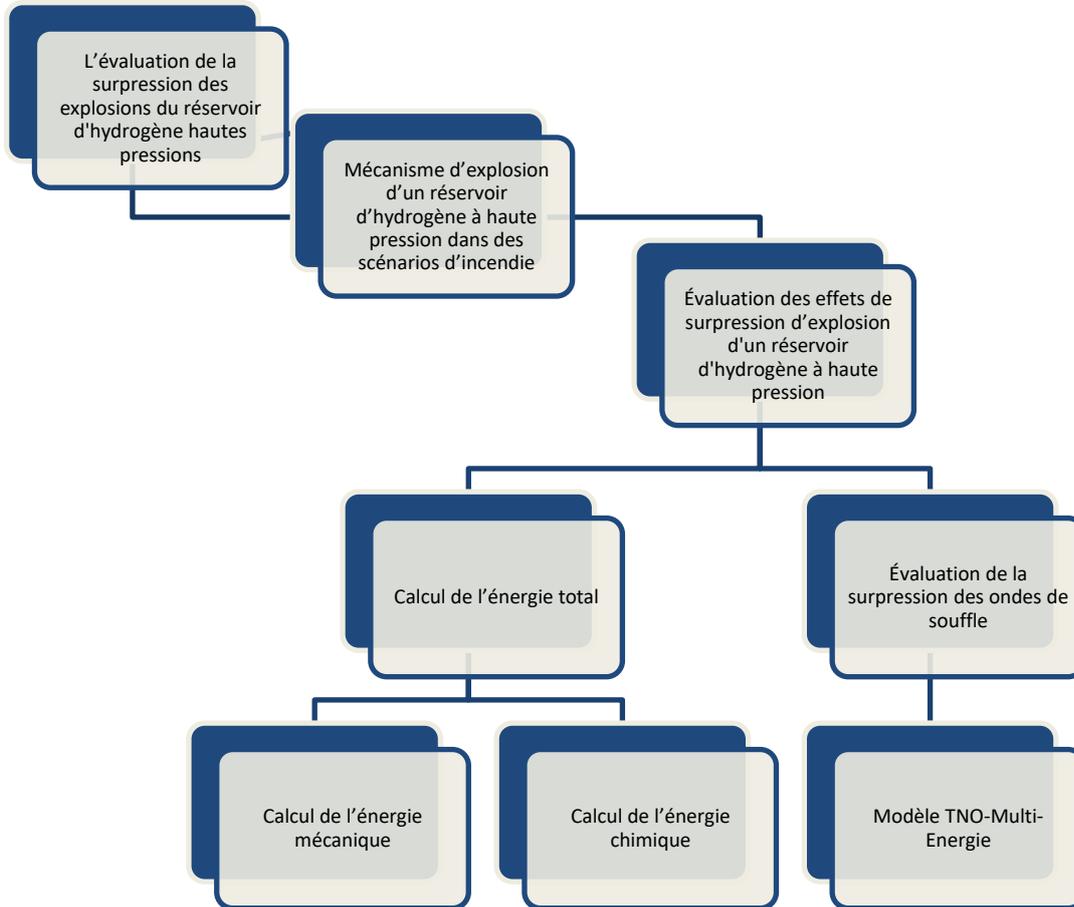
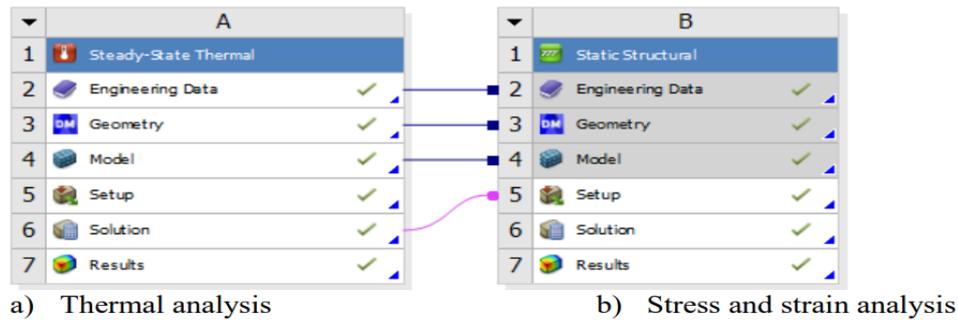


Fig.II.2. Étapes méthodologiques et l'approche proposée.

2.3.1 Modélisation de l'explosion physique par l'analyse thermo-structurale dans ANSYS Mechanical

Les résultats de l'analyse par la méthode des éléments finis dans ANSYS, en utilisant les deux systèmes d'analyse connectés (**Fig.II.3**). Dans ANSYS Mechanical, l'analyse thermo-structurale est une méthode efficace qui permet de simuler les effets combinés des charges thermiques et structurelles sur une structure. Les analyses thermiques et structurelles sont principalement combinées dans le même environnement logiciel, ce qui vous permet de saisir le comportement d'une structure dans des conditions où les fluctuations de température ont un impact sur son intégrité mécanique.



FigII. 3 : les deux systèmes ANSYS connectés

2.3.1.1 Analyses thermiques

- Définition du modèle : créer un modèle 3D de la structure dans ANSYS Mechanical à l'aide de Design Modeler ou d'un autre outil de CAO.
- Propriétés des matériaux : définir les propriétés des matériaux de la structure, notamment la conductivité thermique, la capacité thermique spécifique et la densité. Ces propriétés déterminent la manière dont le matériau conduit la chaleur et comment sa température affecte ses autres propriétés.
- Conditions aux limites : définir les conditions aux limites thermiques, telles que les flux de chaleur, les coefficients de convection et les températures prescrites. Ces conditions représentent la manière dont la chaleur entre ou sort de la structure depuis son environnement.
- Génération de maillage : discrétiser le modèle en un maillage d'éléments. Ce maillage est utilisé pour résoudre les équations régissant le transfert de chaleur dans toute la structure.
- Résoudre : le logiciel résout les équations de transfert de chaleur, ce qui entraîne une répartition de la température à travers la structure.

2.3.1.2 Analyse structurelle

- Charges thermiques : la distribution de température obtenue à partir de l'analyse thermique est ensuite transférée à l'analyse structurelle sous forme de charges thermiques. Ces charges représentent les contraintes et déformations internes provoquées par les variations de température au sein de la structure.
- Conditions aux limites structurelles : définir les conditions aux limites structurelles, telles que les supports fixes, les forces et les moments. Ces conditions représentent les forces et contraintes externes agissant sur la structure.
- Résoudre : le logiciel résout les équations structurelles du mouvement en tenant compte des charges thermiques et des forces externes. Cela aboutit au calcul des

contraintes, déformations et déplacements de la structure sous les charges thermiques et structurelles combinées.

Et en fin, nous citons quelques avantages de l'analyse thermo-structurale comme suivant :

- Prédire les déformations thermiques : vous pouvez prédire comment la structure se déformera en raison de la dilatation et de la contraction thermiques.
- Évaluation des contraintes et des déformations : vous pouvez évaluer les contraintes et les déformations générées dans la structure en raison des charges thermiques et structurelles.
- Optimisation de la conception : vous pouvez optimiser la conception de la structure pour vous assurer qu'elle peut résister sans défaillance aux charges thermiques et structurelles combinées.
- Évaluation de la sécurité : vous pouvez évaluer la sécurité et la fiabilité de la structure dans des conditions de chargement combinées.

2.3.2 Évaluation des effets de surpression d'explosion d'un réservoir d'hydrogène à haute pression

2.3.2.1 Calcul de l'énergie total

L'évaluation de l'explosion d'un réservoir d'hydrogène implique la prise en compte de plusieurs facteurs, notamment l'énergie interne totale du contenu du réservoir, l'énergie mécanique (l'énergie nécessaire pour la rupture du réservoir) et l'énergie chimique (libérée par la combustion de l'hydrogène). Ces éléments sont analysés séparément pour comprendre la contribution globale des explosions de réservoirs à haute pression et des explosions de nuages de vapeur à la surpression de l'onde de souffle.

a) Calcul de l'énergie mécanique

Pour comparer la précision de différents modèles de calcul d'énergie mécanique afin d'évaluer l'énergie réelle d'explosion, un modèle de gaz parfaits et un modèle modifié de comportement des gaz réels ont été utilisés. Ces modèles ont été appliqués au calcul de l'énergie physique d'explosion (E_m) des réservoirs de stockage d'hydrogène. C'est-à-dire le modèle isochore de Brobe[49], et le modèle de gaz comprimé non idéal (réel) proposé par Molkov et al. [47], qui peuvent être respectivement exprimés par les équations suivantes :

$$E_{Brode} = \frac{P_b - P_0}{(\gamma - 1)} * V_T \quad (\text{II .1})$$

$$E_{Molkov} = \frac{(P_b - P_0) * (V_T - m_{H_2} b)}{(\gamma - 1)} \quad (\text{II .2})$$

Où :

- P_b est la surpression à l'intérieur du réservoir avant rupture complète,
- $P_a = P_0$ est la pression atmosphérique, qui est de 101 325 Pa ;
- γ est le rapport de chaleur spécifique de l'hydrogène dans des conditions sous-critiques, soit 1,39 ;
- V_T est nominal volume du réservoir, m^3

Pour le gaz réel et selon le modèle de Molkouv qui nous a données les meilleurs résultats. L'énergie physique réelle d'une explosion est souvent plus élevée que l'énergie théorique calculée, en raison de l'effet de réflexion près du sol dans des environnements réalistes. Cet effet peut augmenter l'ampleur de l'explosion et doit être considéré lors de l'évaluation des risques et des répercussions. Ainsi, on corrige l'énergie mécanique réelle E_{am} en se basant sur le coefficient empirique recommandé par Baker et al. [46], qui a une valeur de (1.8), pour laquelle on peut calculer l'équation (II .3) :

$$E_{am} = 1.8 * E_m \text{ (II .3)}$$

De plus, l'énergie interne totale de l'hydrogène haute pression stocké dans un réservoir de (6,8 L) peut être calculé par l'équation (II .4) :

$$U_{IE} = u_{\text{vapor-spec}} * m_{H_2} \text{ (II .4)}$$

Où :

- U_{IE} est l'énergie interne totale de l'hydrogène haute pression à l'intérieur du réservoir, en kJ ;
- $u_{\text{vapor-spec}}$ est l'énergie interne spécifique de l'hydrogène, J/kg, qui peut être calculée par l'équation. (II.5) [50] :

$$u_{\text{vapor-spec}} = -4.048 * 10^5 + 10475T_b - 1.48 * 10^{-3} * P_b \text{ (II .5)}$$

Où : T_b est la température de l'hydrogène au moment de la rupture du réservoir (en K).

b) Calcul de l'énergie chimique

La valeur calorimétrique permet de déterminer l'énergie chimique libérée par la combustion de l'hydrogène. Étant donné que seulement une partie de l'énergie chimique joue un rôle dans la surpression de l'onde de souffle. Selon Kudriakov et ses collègues [48], il a été observé que la projection de fragments ne dissipait qu'une petite partie de l'énergie interne totale du fluide, avec un rapport estimé entre 2,8 % et 5,3 % en fonction de la masse des fragments. Cette étude a employé un coefficient empirique de 5,2 % [47].

$$E_c = 0.052 * m_{H_2} * H_c \text{ (II .6)}$$

Où : H_c est la valeur calorimétrique de la combustion de l'hydrogène, qui est $(1,1993 \times 108 \text{ J/kg})$.

L'énergie totale E_{total} utilisée pour générer l'onde de souffle du stockage d'hydrogène.

$$E_{total} = U_{IE} + E_c \quad (\text{II.7})$$

2.3.2.2 *Évaluation de la surpression des ondes de souffle*

a) *Modèle TNO-Multi-Energie*

Selon la philosophie de cette méthode, l'explosion d'un nuage gazeux est définie comme de nombreuses sous-explosions correspondant à de multiples sources d'inflammation présentes dans le nuage.

La procédure d'application de la méthode TNO Multi Energy a été présentée par Jaune (1995) [51] selon les étapes suivantes :

- Déterminer la position des sources potentielles d'accélération de front de flamme telles que les parkings, les usines chimiques, les ponts, les canalisations, les jets à haute pression, etc.
- Déterminer la taille du nuage (volume en m^3) :

$$V_c = Q_{est} / (\rho \times C_s) \quad (\text{II.8})$$

- Q_{est} La quantité de gaz inflammable est exprimée en kg .
- C_s La concentration stœchiométrique est exprimée en % vol.
- ρ La densité du gaz inflammable est exprimée en $[\text{kg} \times \text{m}^{-3}]$.

Cette étape n'est utilisée qu'en présence de gaz lourds (ce n'est pas le cas pour l'hydrogène). Dans la plupart des cas, la masse ou le volume est directement calculé.

- Définir les régions obstruées et/ou non obstruées.
- Estimer l'intensité de la source ou le numéro de classe pour chaque région.
- Calculer le rayon du nuage.
- Calculer les paramètres de l'explosion : distance mise à l'échelle, surpression mise à l'échelle positive et phase de durée mise à l'échelle positive.
- Calculer les paramètres réels : surpression positive, durée positive mise à l'échelle et impulsion positive.

En fonction du numéro de classe et de la distance mise à l'échelle, la surpression mise à l'échelle et la durée positive mise à l'échelle seront lues à partir des courbes de référence figurant dans les monographies. La surpression, la phase de durée et l'impulsion sont calculées comme suit [54-55] :

a) *Calcul de l'énergie d'explosion $E_x(J)$:*

$$E_x = M_G * \Delta H_c \text{ (II .9)}$$

M_G Masse de gas inflammable (Kg), ΔH_c : chaleur de combustion (J/kg)

b) *Détermination de la distance réduite (\bar{R})*

Utilisation des courbes Multi-énergie ci-dessous pour détermine et en fonction de l'indice de sévérité choisi et les seuils de surpression choisi :

$$\bar{r} = r \times (pa/E)^{1/3} \text{ (II .10)}$$

Avec :

- ✓ \bar{r} La distance à l'échelle.
- ✓ r La distance jusqu'au centre de l'allumage, [m]
- ✓ E L'énergie de combustion du mélange air-carburant en quantité stœchiométrique, [J]
- ✓ pa La pression atmosphérique, [Pa]
- Choix de degré de sévérité (violence index)

Cet indice correspond au niveau de surpression maximal produit par l'explosion. La détermination de la surpression maximale revient à choisir un "indice de violence" parmi les 10 proposés [52]. Pour mémoire, la correspondance entre les indices de 1 à 10 et les niveaux de surpression maximale est rappelée dans le Tableau II.1.

Tableau II .1 : la correspondance entre les indices de sévérité et les niveaux de surpression maximale

Index de la méthode (-)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Surpression maximum (bar)	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10

Le niveau de surpression maximal est directement lié à la vitesse de flamme atteinte lors de la combustion du nuage. En théorie, il suffirait de calculer cette vitesse de flamme pour déterminer précisément l'indice de violence à retenir. En pratique, ce calcul est difficile à effectuer, car il dépend de plusieurs paramètres :

- Réactivité intrinsèque des gaz : La réactivité inhérente du gaz impliqué dans le processus de combustion a un impact significatif sur la vitesse de propagation de la flamme.
- Turbulence du jet : la turbulence inhérente au jet de gaz influence davantage le comportement et la vitesse de la flamme.
- Densité d'obstacles : la présence et la densité d'obstacles le long du trajet de la flamme peuvent gêner sa propagation, entraînant des variations de surpression.

- Énergie de la source d'inflammation : l'énergie de la source d'inflammation joue un rôle crucial dans le déclenchement du processus de combustion et dans l'influence de la vitesse de la flamme ultérieure.

Compte tenu de la complexité du calcul de la vitesse des flammes et de son impact associé sur la surpression maximale, la détermination de l'indice de violence dans des scénarios réels repose sur une combinaison de lignes directrices établies et d'expériences empiriques. Cette approche prend en compte les divers facteurs qui influencent la gravité de l'explosion et garantit une évaluation plus pratique et plus fiable des dangers potentiels.

Chaque indice de violence a associé une courbe de décroissance des surpressions aériennes comme représenté par la **Fig.II .4**.

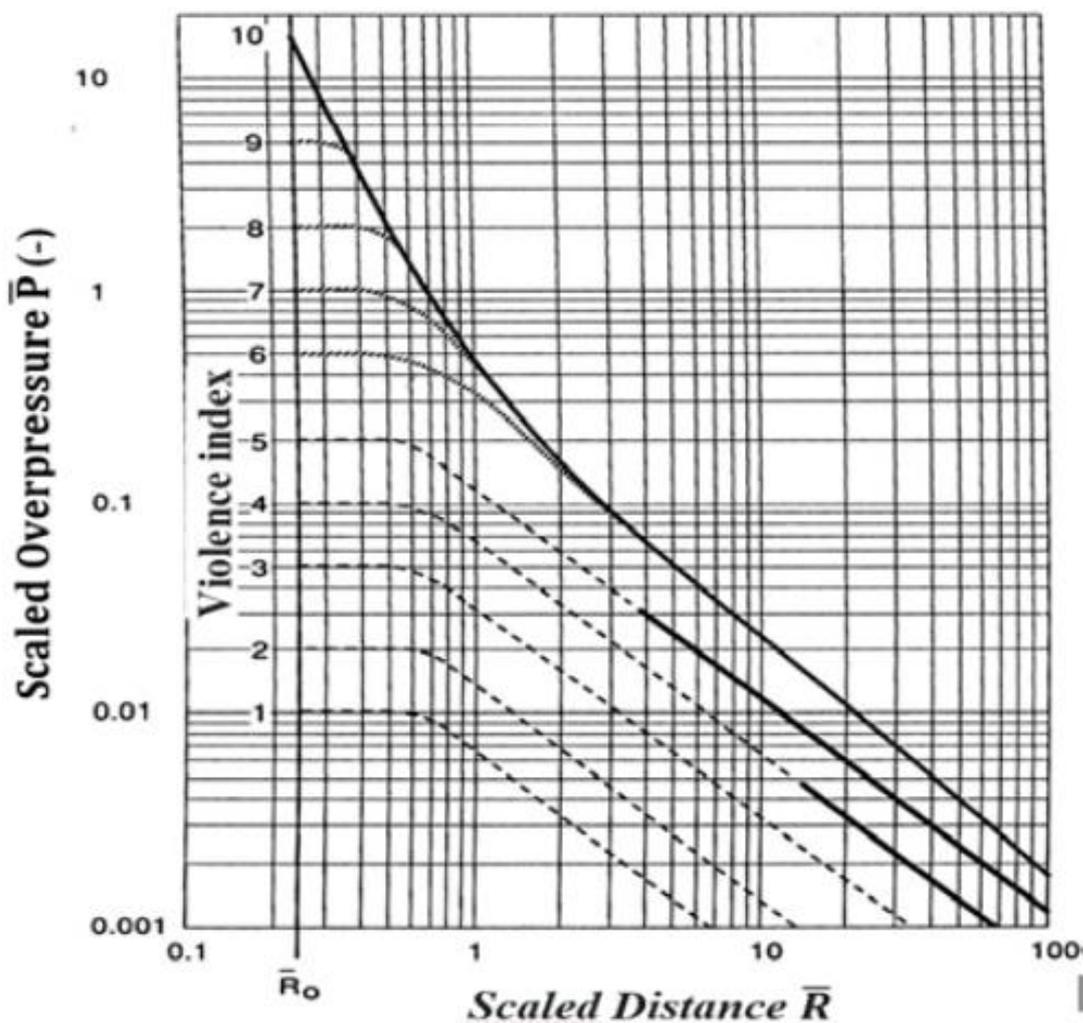


Fig.II .4 : Surpression en fonction de la distance d'échelle [11]

Le numéro de la courbe d'explosion est une valeur de 1 à 10, qui décrit la force typique de l'explosion. Pour chaque courbe de souffle (voir **Fig.II.4** ci-dessous), un comportement typique de surpression en fonction de la distance est dérivé.

c) *Détermination des surpressions positive*

$$P = \overline{Ps} \times pa \text{ (II .11)}$$

Avec :

- P : la surpression positive, [Pa]
- Ps : la surpression positive mise à l'échelle.

d) *Détermination de la durée positive, [s]*

$$T = \overline{T_s} \times (E/pa)^{1/3} \times \frac{1}{a_0} \quad \text{(II .12)}$$

$$I = \frac{1}{2} \times p \times T \quad \text{(II .13)}$$

Avec :

- T La durée positive, [s]
- $\overline{T_s}$ Durée positive mise à l'échelle.
- a_0 Vitesse du son dans les conditions ambiantes, [m/s]
- I L'impulsion positive, [Pa. S]

Les numéros de classe permettent de calculer ou de référencer la durée positive et la surpression positive d'une explosion. Le choix du numéro de classe approprié est crucial et dépend de divers facteurs, notamment l'énergie d'inflammation, la densité des obstacles, le niveau de confinement et la réactivité du combustible.

Kinsella (1993) a proposé des lignes directrices pour la sélection des numéros de classe, résumées dans le tableau II.2. Ces lignes directrices catégorisent l'environnement expérimental en fonction de la densité des obstacles, du confinement et de l'énergie d'inflammation. D'autres sous-catégories au sein de chaque catégorie visent à englober un large éventail de contextes expérimentaux et sont associées à des numéros de classe spécifiques. Toutefois, les plages de valeurs exactes pour chaque sous-catégorie ne sont pas explicitement définies.

Tableau II.2 : Principes de Kinsella (1993) concernant la sélection du nombre de classes [56]

Energie d'inflammation		Densité des obstacles			Degré de confinement		Sévérité
Faible	Fort	Fort	Faible	Inexistant	Existant	Inexistant	
	X	X			X		7-10
	X	X				X	7-10
X		X			X		5-7
			X		X		5-7
	X		X			X	4-6

	X			X	X		4-6
X		X				X	4-5
	X			X		X	4-5
X			X		X		3-5
X			X			X	2-3
X				X	X		1-2
X				X		X	1

De plus, la réactivité du carburant n'est pas clairement considérée. Il n'est donc pas possible de résoudre le problème du choix des paramètres avec ces lignes directrices, car la décision finale reste toujours à l'utilisateur.

b) Modèle équivalent TNT

La méthode TNT est une méthode assez traditionnelle pour évaluer la surpression créée lors de la propagation de l'onde de souffle vers l'environnement. Effectivement, cette approche est également employée pour évaluer la distance de sécurité par rapport au champ lointain ($R > 2$) d'un explosif contenu [57]. Cependant, selon les auteurs [57], les résultats de la méthode équivalente TNT ont été affectés par des incertitudes en raison de la turbulence et des fragments. Dans ces champs, pour distinguer ces champs, on a utilisé l'équation de distance à l'échelle de l'énergie [58-59] :

$$\bar{R} = R * \left(\frac{P_0}{E_{total}} \right)^{\frac{1}{3}} \text{(II .14)}$$

Où : R (m) est la distance entre le point de surveillance de la pression et le centre du réservoir.

L'énergie de l'explosion est convertie en équivalent TNT (W_{TNT}) selon l'équation. (II .15) [60] :

$$W_{TNT} = \frac{E_{total}}{E_{TNT}} \text{(II .15)}$$

Où :

- E_{total} est l'énergie totale apportée à l'onde de souffle par l'explosion d'un réservoir
- E_{TNT} est la masse équivalente du TNT en kg, soit $4,52 \times 10^6$ J/kg.

Il est essentiel de déterminer la valeur de distance à l'échelle du TNT appelé (Z) afin de prévoir la surpression. Ces valeurs sont exprimées par l'équation (II .16) [61] :

$$Z = r / (W_{TNT})^{1/3} \text{(II .16)}$$

Où : Z est la distance mise à l'échelle TNT, (m/kg^(1/3))

Plusieurs chercheurs ont proposé des formulations pour la surpression de l'onde de souffle, et pour notre étude, nous avons opté pour la méthode classique proposée par Mills [62], qui est exprimée par les équations (II .17), afin de prédire le pic de surpression :

$$\Delta P_{Mills} = \frac{0.108}{Z} - \frac{0.114}{Z^2} + \frac{1.772}{Z^3} \text{(II .17)}$$

Où :

- ΔP est la surpression maximale, MPa.

2.4 Conclusion

La méthode proposée implique deux étapes principales : la première consiste à représenter le mécanisme d'explosion et la deuxième à représenter les effets de surpression causés par l'explosion. Pour valider la méthodologie proposée, elle a été appliquée à un exemple d'application qui a déjà été expérimentalement testé afin de confirmer les résultats obtenus.

Chapitre III : Résultats & Discussions

Chapitre III : résultats et discussions	44
3.1 INTRODUCTION	44
3.2 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE L'EXPLOSION PHYSIQUE.....	44
3.2.1 <i>Modélisation Ansys-Fluent de réservoir d'hydrogène sous pression de type III</i>	44
3.2.1.1 Caractéristiques de l'enceinte sous pression de gaz d'hydrogène	44
3.2.1.2 Hypothèse de modélisation	44
3.2.1.3 Géométrie.....	44
3.2.1.4 Maillage	45
3.2.1.5 Résultats et discussions	45
3.2.2 <i>Partie analyse thermo-structurel</i>	49
3.2.2.1 Géométrie.....	49
3.2.2.2 Insérer les matériaux	50
3.2.2.3 Maillage du récipient sous pression.....	50
3.2.2.4 Analyse thermique	50
3.2.2.5 Analyse structurelle.....	52
3.3 ÉVALUATION DE L'ENERGIE EXPLOSIVE DES RESERVOIRS DE STOCKAGE HAUTE PRESSION	56
3.3.1 <i>Calcul de l'énergie de l'explosion</i>	56
3.3.1.1 Calcul de l'énergie mécanique de l'explosion.....	56
3.3.1.2 Calcul de l'énergie chimique.....	56
3.3.1.3 Calcul de l'énergie total	57
3.3.2 <i>Calcul des effets de surpression</i>	57
3.3.2.1 Application de la méthode équivalente TNT	57
3.4 CONCLUSION	58

Chapitre III : résultats et discussions

3.1 Introduction

Pour valider la méthodologie proposée, nous optons pour le chapitre trois à une application de notre méthodologie sur une enceinte de stockage d'hydrogène sous pression, une étude numérique a été réalisée pour modéliser le mécanisme d'explosion, et une méthode analytique pour évaluer les effets de surpression.

3.2 Modélisation numérique de l'explosion physique

3.2.1 Modélisation Ansys-Fluent de réservoir d'hydrogène sous pression de type III

3.2.1.1 Caractéristiques de l'enceinte sous pression de gaz d'hydrogène

Tableaux III.1 : caractéristiques des matériaux de l'enceinte multi couches

Matériaux	Distances (m)	Density ($\frac{kg}{m^3}$)	Specific heat ($\frac{j}{kg.k}$)	Thermal conductivity ($\frac{w}{m.k}$)
glass-fiber	0.001	2700	902	0.133
carbon-fiber	0.01	1513	920	3.72
aluminum-liner	0.004	2050	878	238

3.2.1.2 Hypothèse de modélisation

Pour notre étude de cas de simulation de mécanique de fluide numérique, il a été essentiel d'acquérir une grande quantité de données d'entrée afin de réaliser cette simulation. D'un côté, nous avons pris en compte les deux paramètres essentiels à étudier (température et pression) pour la modélisation et la simulation des explosions. De l'autre côté, nous avons pris en compte le choix de l'hydrogène et, dans ce contexte, nous avons pris en compte la phase de remplissage de ce produit pour analyser l'évolution de ces paramètres. Nous avons donc utilisé les hypothèses de modélisation suivantes pour cela.

3.2.1.3 Géométrie

On a utilisé la même géométrie de programme général (fluide + structure) en suite désactiver le Esquisse 4 (partie de fluide) et transférer le surface esquisse (2 3 4) «3D » sur la révolution comme la figure III.1 indique Suite on a écrit 2 esquisses pour les supports fixe.

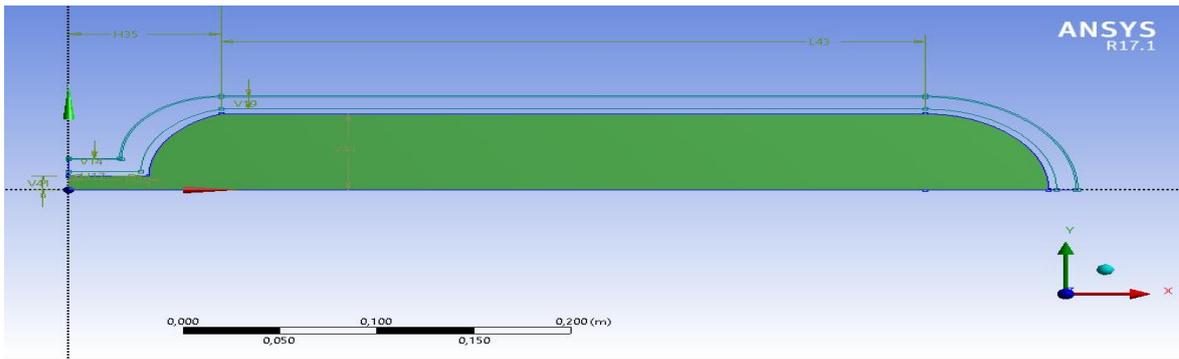


Fig.III.1. Géométrie de l'enceinte à simuler

3.2.1.4 Maillage

Dans le cadre de notre étude, le maillage contient 181192 Nœuds et 179885 éléments. Comme indique la Fig. III.2

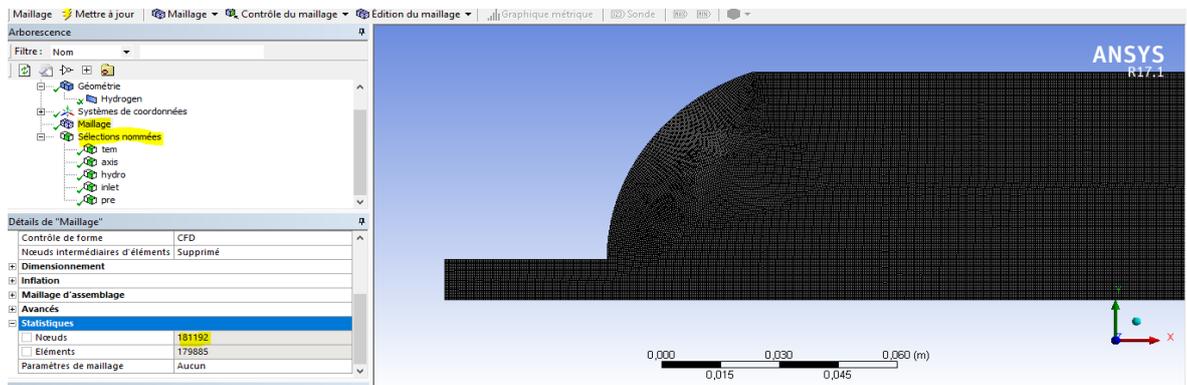


Fig III.2. Maillage de la géométrie

3.2.1.5 Résultats et discussions

Pour le modèle, cette étude est basée sur le modèle d'énergie combinée avec le modèle de turbulence ; Viscose- standards K-Omega avec une vélocité de (0,05 Kg/ s), et une approximation d'ordre 10^{-3} et pour le modèle d'énergie : 10^{-6} .

Et comme conditions limites, nous avons réalisé un scénario de sur remplissage avec un débit d'incendie qui génère une température de 1000 K en continu au niveau de surface extérieure de l'un des côtés sphériques comme indique la Fig. III.3.

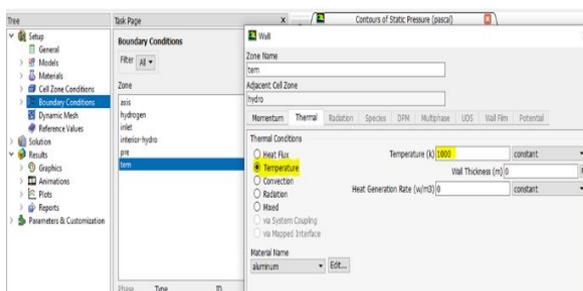


Fig. III.3 Représentation des conditions limites de température

Un fluent a été utilisé pour simuler le remplissage d'un réservoir en hydrogène, et les résultats d'approximations présentés dans la Figure III.4 nous ont été fournis. Ces résultats montrent clairement que les estimations se rapprochent des valeurs préétablies par notre dispositif.

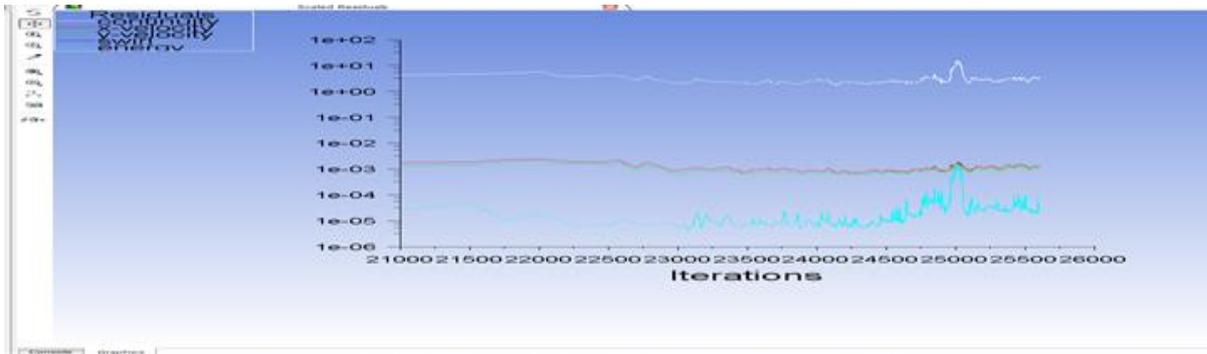
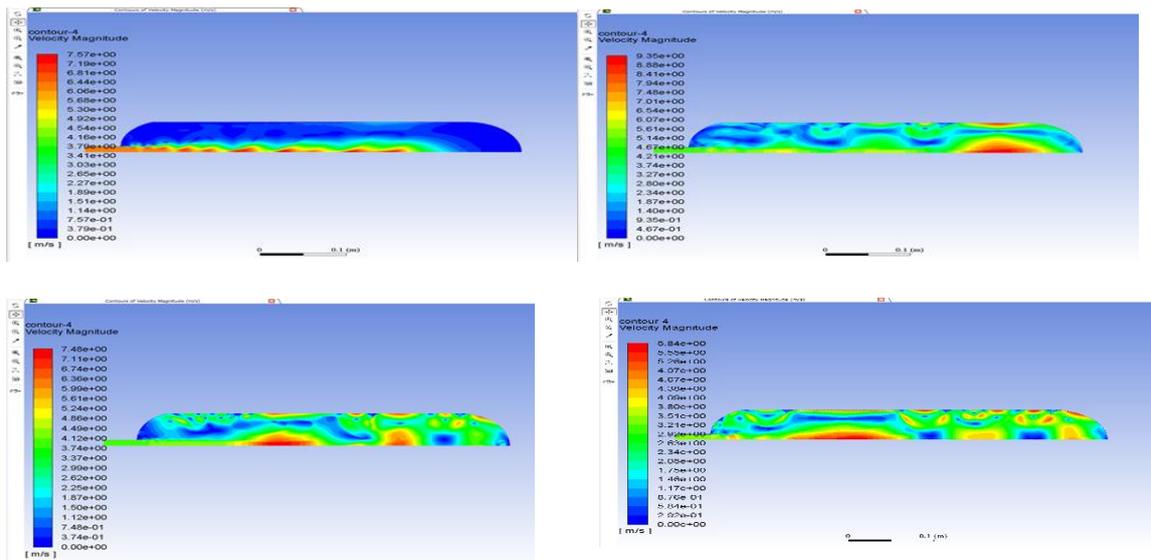
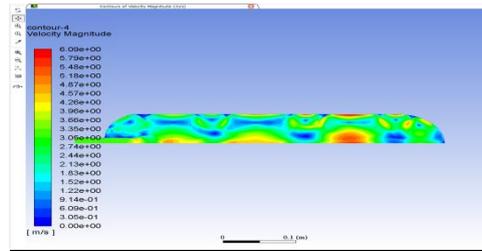


Fig. III.4 Résultats d'approximation obtenus pour les différents résidus

3.2.1.5.1 Vitesse de remplissage

À travers cette partie, nous avons exposé les contours de la vitesse de remplissage pour les différentes périodes : 20, 320, 640, 1040, 1280, respectivement. En effet, la variation de la vitesse de remplissage et du taux de remplissage a un impact direct sur la variation de la température et de la pression dans l'enceinte d'hydrogène sous pression.

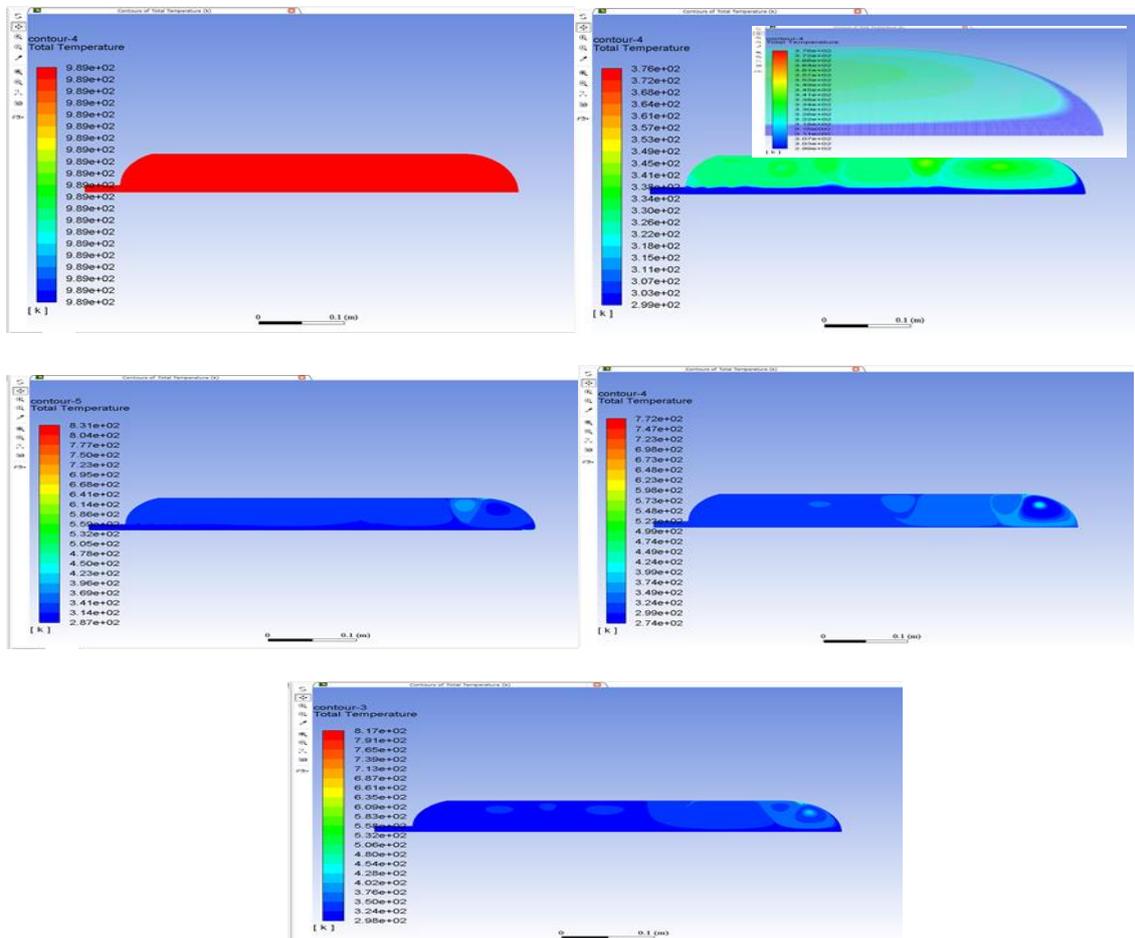




FigIII.5. Contours de variation de la vitesse de remplissage

3.2.1.5.2 Évolution de de température

La Fig. III.6 présente la répartition de la température dans l'enceinte à des temps de remplissage spécifiques de 0, 320, 640, 1040, 1280 secondes. Ces instantanés illustrent les différentes valeurs de température à différentes étapes du processus de remplissage.



FigIII.6 Contours d'évolution de température de remplissage issue ANSYS

La fig III.7 détaille l'évolution temporelle de la température lors du remplissage. Il révèle que la température suit une relation non-linéaire. Cette tendance non-linéaire implique des augmentations et des diminutions de la température à mesure que le temps de remplissage progresse influencé par la température très élevé des surfaces chaudes.

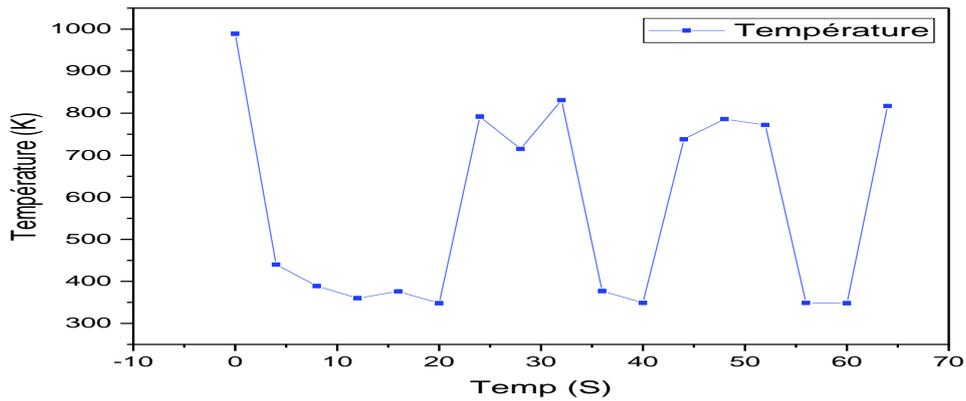


Fig. III.7. Evolution de de température

3.2.1.5.3 Evolution de la pression

Les contours de la Fig. III.8 illustrent l'évolution de la pression en fonction du temps de remplissage pour une vitesse de remplissage constant (0,05 Kg/s). Les différentes valeurs de pression en fonction des instants de remplissage sont illustrées par les intervalles de temps 0,320,640,1040,1280 respectivement. L'objectifs et pour avoir une idée sur la distribution de champ de pression dans les différentes zones de l'enceinte.

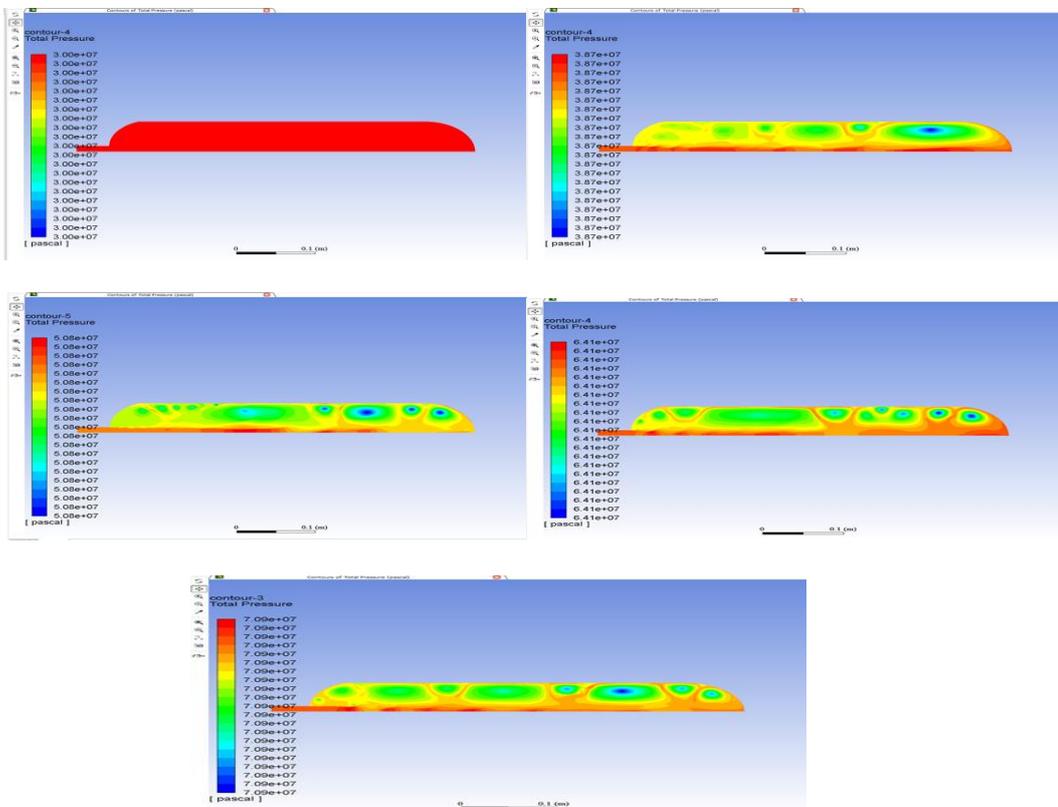


Fig. III.8. Evolution de la pression en fonction de temps de remplissage

La Fig. III.9 explore l'évolution de la pression en fonction du temps de remplissage. Il révèle une tendance convaincante : la pression augmente régulièrement à mesure que le temps de remplissage se prolonge. Cette observation s'aligne sur les principes fondamentaux de la dynamique des gaz, où l'introduction de molécules de gaz supplémentaires dans un espace confiné entraîne inévitablement une augmentation de la pression également, l'augmentation de la température de gaz froid (298K) qui est en contact avec la paroi chauds influence à l'augmentation rapide de la pression.

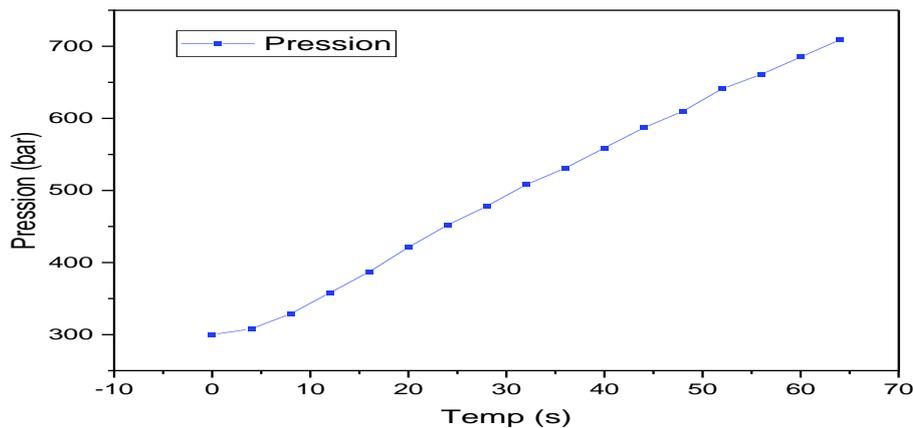


Fig.III.9 Evolution de tendances de pression en fonction des temps de remplissage

3.2.2 Partie analyse thermo-structurel

3.2.2.1 Géométrie

La Fig.III.10 présente le modèle géométrique 3D qui a été analysé en même temps dans deux systèmes ANSYS, qui sont connectés à la cellule "Solution" depuis le système "Analyse Thermique". De plus, le support fixe, composée d'un élément solide du matériel (...) représente de manière réaliste le scénario de fixation des enceintes de gaz au niveau des véhicules pour reproduire autant que possible l'état réel.

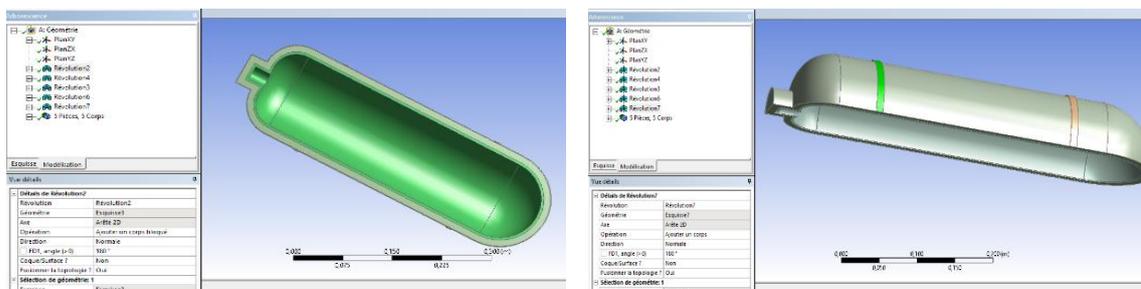


Fig.III.10. Géométrie 3D de l'enceinte d'hydrogène sous pression de type III

3.2.2.2 Insérer les matériaux

Pour modéliser le comportement correct, nous avons défini le type de matériau, ainsi que ses propriétés mécaniques. Propriétés, à l'aide de la cellule Données d'ingénierie. La réponse à la déformation du modèle dépendra du matériau défini.

3.2.2.3 Maillage du récipient sous pression

Pour ce travail, nous avons opté pour le maillage mécanique avec une taille d'élément de (0,005 m). Nous avons obtenu 230586 nœuds et 116 703 éléments, comme le montre la Figure III.11.

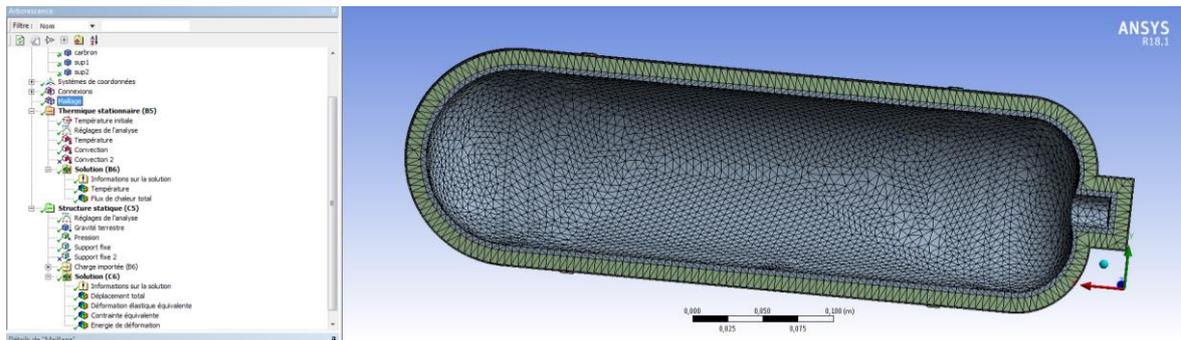


Fig. III.11 : maillage mécanique de l'enceinte sous pression

3.2.2.4 Analyse thermique

La température, concentrée dans la surface de la paroi touchée par l'incendie (en appliquant une température de 1000 K), est l'une des conditions limites (figure 3) dans le premier système. Et dans le second système sont les températures (la solution de la procédure primaire), reprises par le transfert de données, par l'intermédiaire de la connexion au niveau de la cellule "Solution", du système "Analyse Thermique", et du support fixe, matérialisé par un élément solide du matériel (...). Dans le deuxième système, les températures (la solution de la procédure initiale) sont corrigées par le transfert de données, grâce à la connexion entre la cellule "Solution", le système "Analyse Thermique"

Dans la première phase, le corps du récipient sous pression est appliqué avec une température de 1000°C sur la paroi de la face extérieure présenté aux Fig. III.12 car, il est exposé à l'incendie. De plus, le coefficient de convection est appliqué à la partie extérieure du corps avec 5E006 W/mm² °C car le corps est censé se reposer à l'air libre.

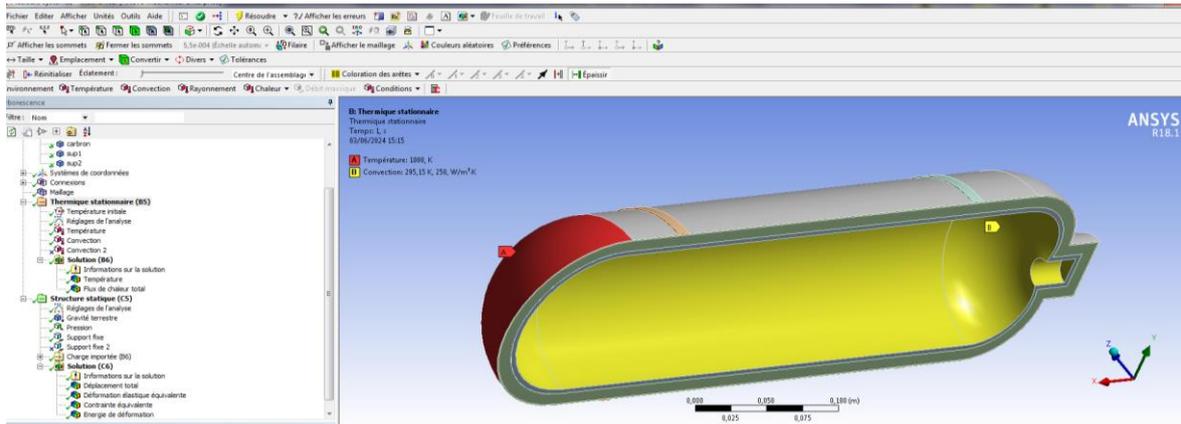


Fig III.12. Conditions limites pour le modèle thermique

3.2.2.4.1 Distribution de la température

La répartition de la température dans les parois est réalisée pour environ 30 000 nœuds dans zone thermiquement impliquée des trois couches de l'épaisseur de l'enceinte sous pression.

L'étude effectuée dans les conditions mentionnées précédemment montre une répartition différente de la température pour les différents matériaux sur tout le corps grâce à la convection, comme illustré dans la Fig. III.13 Ce résultat est très logique, car la conductivité thermique de l'aluminium, qui est significativement affectée par la température, est très élevée (238 w/(m.k)) par rapport aux matériaux composites de l'enceinte Carbon fiber et Glass fiber, qui ont respectivement des valeurs de (3,72 w/(m.k)) et (0,133 w/(m.k)). Afin de valider cette conclusion, nous avons examiné la distribution des flux thermiques sur l'aluminium, comme illustré dans la Fig.III.14.

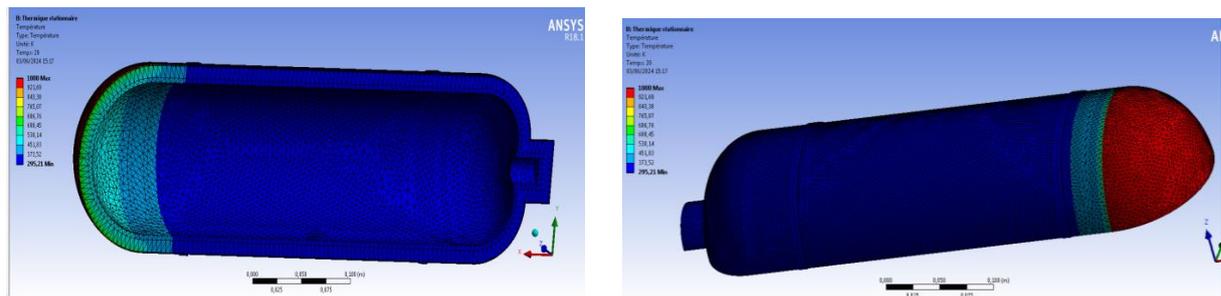


Fig. III.13. Distribution de la température sur les parois de l'enceinte

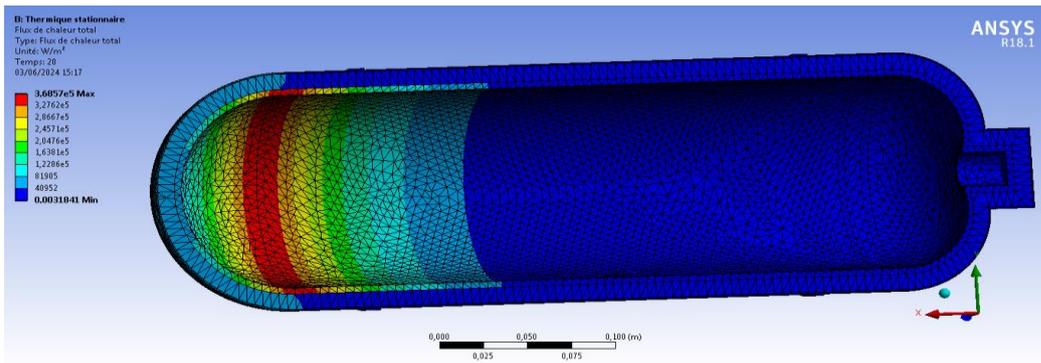


Fig.III.14 Distribution du flux de chaleur sur les parois de l'enceinte

Ensuite, dans la deuxième partie de l'analyse thermique, nous avons examiné les contraintes thermiques causées par les températures de la paroi chaude causée par la température de l'incendie, ainsi que leur impact sur la structure. Pour notre étude, le système d'analyse thermique a été connecté au niveau de la cellule à un système d'analyse structurelle et mécanique, Fig. III.15.

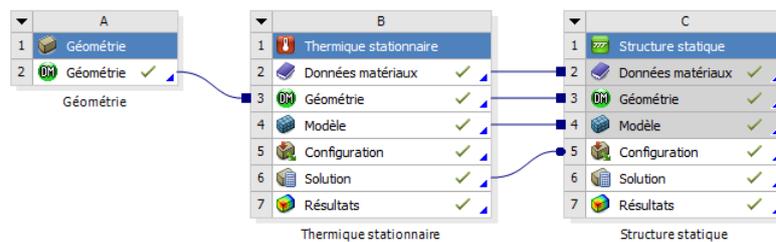


Fig III.15. Modèle d'analyse thermo-structurelle

Grâce à cette méthode, il a été possible d'intégrer les températures, la solution du système d'analyse thermique, dans le sous-système de fixation des conditions limites (les températures obtenues en résolvant le premier système sont devenues les charges dans le deuxième système d'analyse) ⁵.

3.2.2.5 Analyse structurelle

Après la fin de la première étape, les résultats de la répartition de la température corporelle provenant de l'analyse thermique seront intégrés à l'analyse structurelle. En utilisant les résultats importés, en accord avec notre scénario d'accidents que nous avons élaboré, nous appliquerons une pression de 470 bars au récipient sous pression. En effet, d'après l'analyse fluente effectuée par les sections xx et les études expérimentales menées (), il s'agit d'une

⁵ Lee Huei-Huang- Finite Element Simulations with ANSYS Workbench, SDC Publications, 2021.

pression de rupture. De plus, il est nécessaire de déclarer des supports fixes pour notre étude et de faire appliquer la gravité terrestre standard dans la direction Y négative.

Le second système d'analyse a été conçu pour déterminer analytiquement la **déformation totale** des zones impactées par les contraintes thermiques (Fig.III.16.), et vers le calcul et évaluation de la contrainte équivalente de von Mises (Fig. III.17).

3.2.2.5.1 Déformation totale

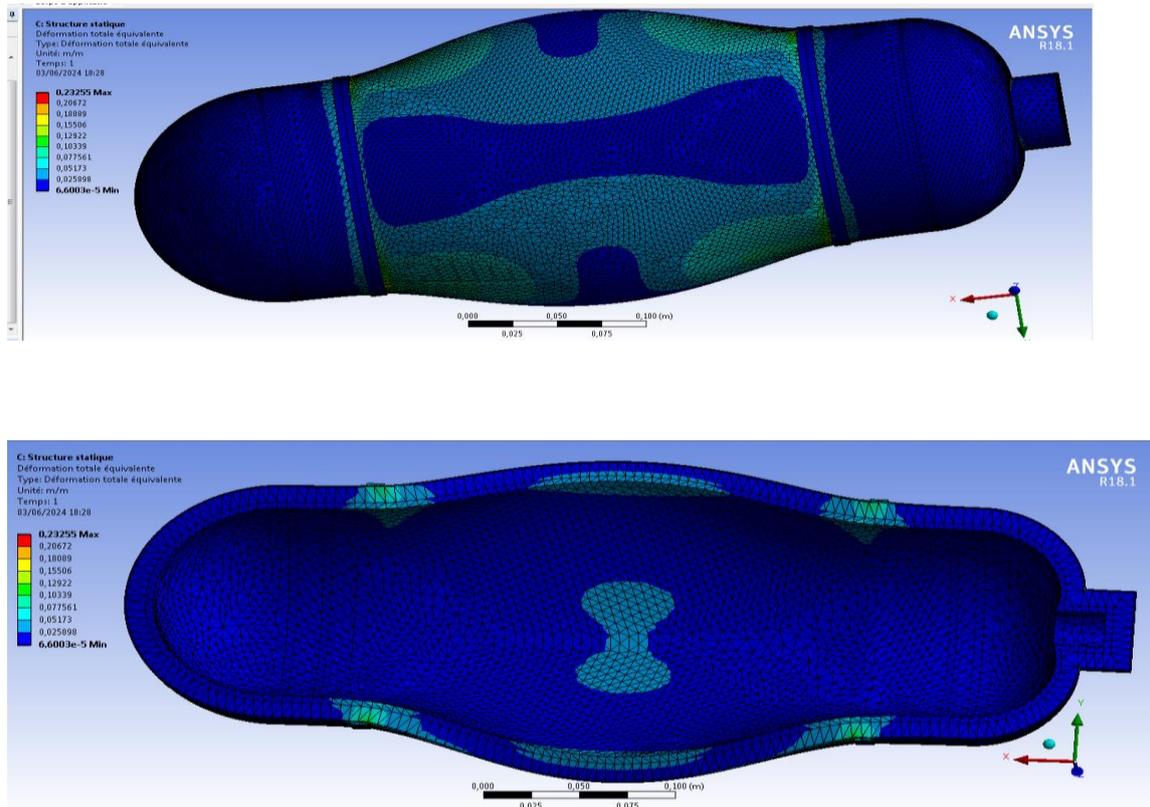


Fig. III.16. Déformation totale due aux contraintes thermiques

3.2.2.5.2 Equivalent stress

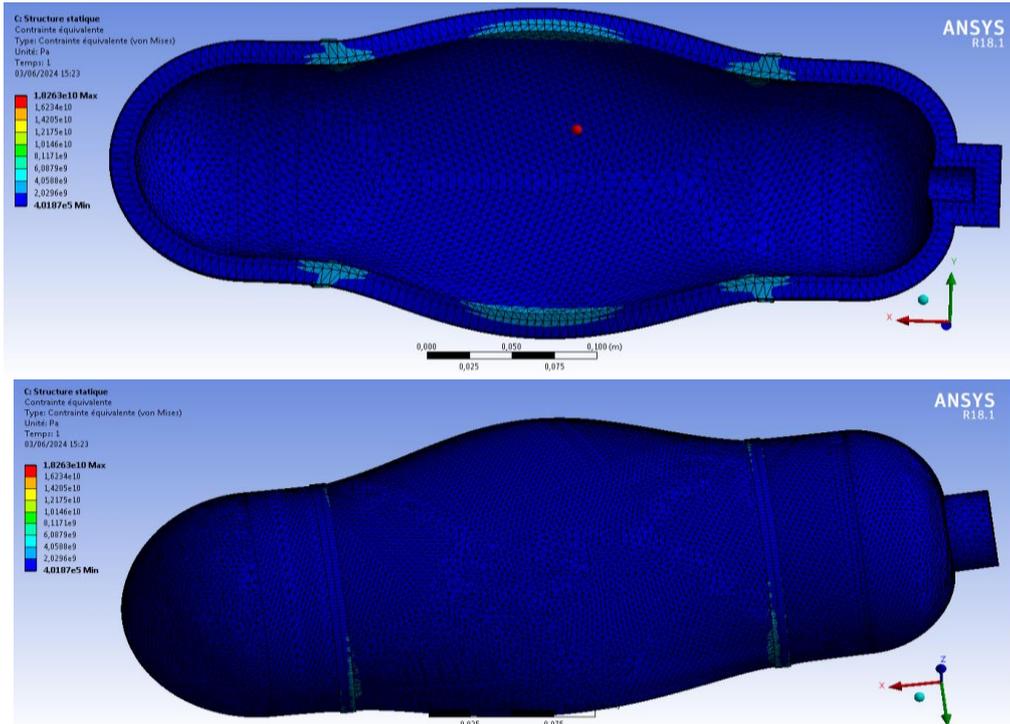


Fig III.17. Contrainte équivalente de von Mises due aux contraintes thermiques

3.2.2.5.3 Déplacement total

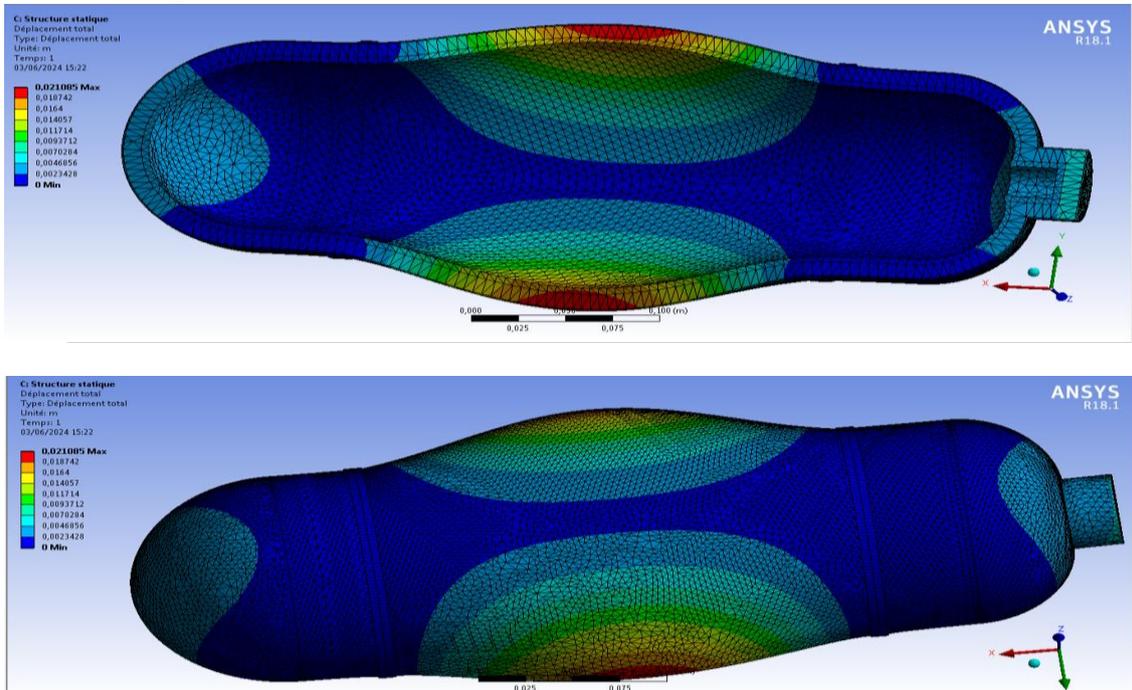


Fig III.18. Tracé de déplacement pour la direction x (U_x)

3.2.2.5.4 Déformation élastique équivalente (Equivalent elastic strain)

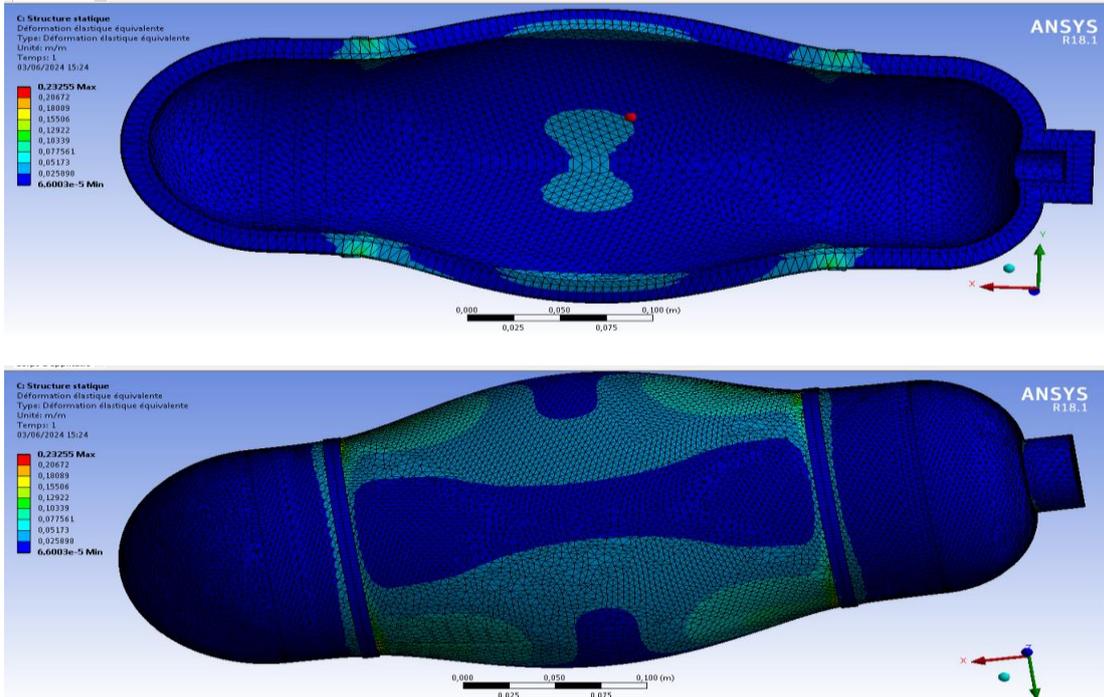


Fig. III.19 : Déformation élastique équivalente

Pour analyser les résultats obtenus, nous avons les présenté par le tableaux XX suivant :

Tableau III.2 Tableau récapitulatif des résultats obtenus

	Contrainte équivalente (Von mises)		Déformation élastique équivalente		Déplacement totale	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Contrainte de fonctionnement	4,7582 E+6	7.8116. E+9	0.00011216	0.040448	0.00055267	0.004974
Contrainte maximal (de rupture)	0.40187 E+6	18.263 E+10	6. 5003E+5	0.23255	0.0023428	0.021085

Un examen approfondi des résultats présentés dans le tableau III-2 pour la contrainte équivalente (Von Mises) dans des conditions de charge maximale révèle une augmentation notable de $2,34E+01$ par rapport aux conditions normales de fonctionnement. Cette augmentation de contrainte est principalement concentrée au centre de la partie cylindrique, notamment à proximité immédiate des supports fixes.

De même, l'analyse des résultats de déformation élastique équivalente dans des conditions de charge maximale révèle une augmentation notable de $5,749357$ principalement au

voisinage des supports fixes. Une augmentation plus faible de la déformation élastique équivalente est également observée au centre de la partie cylindrique.

Ainsi que, la comparaison du déplacement total dans des conditions de charge maximale et dans des conditions normales de service révèle une différence de 0,016111 au centre de la partie cylindrique. Cependant, dans la région sphérique et à l'entrée, le déplacement total augmente respectivement à 0,0023 mètres et 0,00702 mètres.

3.3 Évaluation de l'énergie explosive des réservoirs de stockage haute pression

3.3.1 Calcul de l'énergie de l'explosion

3.3.1.1 Calcul de l'énergie mécanique de l'explosion

L'énergie mécanique théorique libérée lors de l'explosion de l'enceinte fait l'objet de notre étude était calculé sur la base des deux modèles mentionnés en chapitre 2, qui étaient (0,824338631 MJ) pour le modèle de brode et (0,69310967 MJ) pour le modèle de molkouv.

Sachant que, cette valeur théorique calculé a été ajuster une **coefficient empirique** recommandé par **Baker et al. [31] afin de trouver la valeur de l'énergie mécanique réelle E_{am}** qui est égale pour notre étude de cas (1,483809535 et 1,247597405 MJ) pour le modèle de brode et Molkouv respectivement.

Ainsi que, selon la littérature [], on peut calculer **l'énergie interne totale de l'hydrogène haute pression stocké dans l'enceinte** (6,8 L) qui a été calculé en se basant sur les deux équation () mentionné en chapitre 2 est égale à (1,301266372 MJ). Sachant que cette valeur a été obtenus à une température de (927,82 K) et à la pression de (470 Bar) et ces résultats a été obtenus par l'analyse réalisée par fluente.

Pour cette raison, l'énergie de dilatation mécanique transmise lors de la rupture de l'enceinte sous pression était d'environ 1,24 à 1,30 MJ. Le modèle de gaz comprimé non idéal (réel) peut être considéré comme un modèle d'estimation de l'énergie physique approprié pour les explosions de réservoirs d'hydrogène comprimé non idéal (réel) en raison du nombre limité d'hypothèses disponibles et de son accord étroit avec la contribution de l'énergie interne totale.

3.3.1.2 Calcul de l'énergie chimique

D'après les équations présentées dans la section méthodologie du chapitre 2, cette étude a employé un coefficient empirique de 5,2 % [33]. Le résultat du calcul a montré que le

produit chimique de l'énergie d'explosion de l'enceinte sous pression était de (0,948116149 MJ) en se basant sur la valeur de l'énergie mécanique réel de Molkhou

3.3.1.3 Calcul de l'énergie totale

L'énergie totale E_{total} utilisée pour générer l'onde de souffle du stockage d'hydrogène a été calculé en utilisons l'équation () c'est que la somme de l'énergie chimique et l'énergie interne totale de l'hydrogène haute pression à l'intérieur de l'enceinte. Et par conséquent, nous obtenons la valeur (2,249382522 MJ).

3.3.2 Calcul des effets de surpression

Comme alternative au CFD, le modèle multi-énergie peut être appliqué, qui est un modèle simple, direct et peu gourmand en calcul. Le modèle multi-énergie est une méthode de « courbe de souffle », spécialement développée pour simuler les VCE. Le modèle décrit la force de l'explosion en fonction de deux paramètres : le numéro de la courbe d'explosion et la quantité de masse explosive.

3.3.2.1 Application de la méthode équivalente TNT

En appliquons l'équation décrit par le chapitre 2, nous avons les résultats présentés par le la Fig. III.20suivantes :

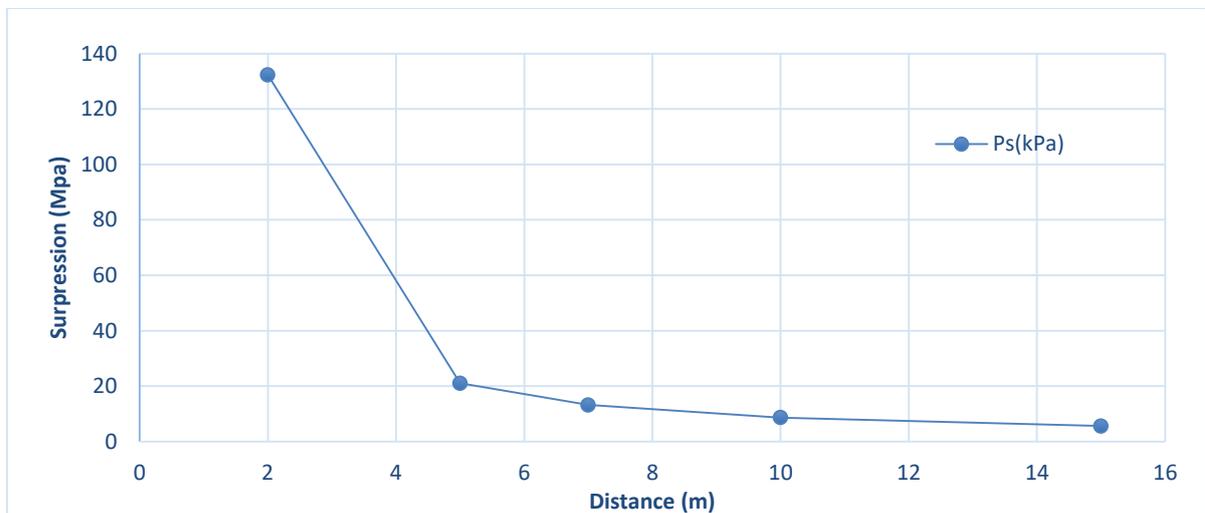


Fig. III.20. Evolution de la surpression en fonction de distance d'ffet

La simulation montre une diminution efficace de la surpression causée par l'explosion, ce qui correspond aux résultats de l'étude expérimentale réalisée par l'auteur (1). Les résultats expérimentaux de l'auteur ont été confirmés par une comparaison avec d'autres études expérimentales et de simulation impliquant des enceintes de dimensions variables, ce qui confirme la validité de la méthodologie de simulation.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a démontré avec succès l'applicabilité de notre méthodologie proposée pour la modélisation des mécanismes d'explosion et le calcul des effets de surpression. L'étude a été menée sur un récipient de stockage sous pression d'hydrogène de type III. Les résultats obtenus ont été présentés, discutés et validés par rapport aux résultats expérimentaux d'une étude parallèle impliquant la même enceinte. Nos résultats indiquent que la méthodologie proposée présente un potentiel prometteur pour simuler avec précision les phénomènes d'explosion et prédire les conséquences de la surpression.

Conclusion Générale

La mémoire commence par étudier en détail l'importance de l'hydrogène comme source d'énergie alternative, en détaillant la méthodologie proposée pour représenter les explosions d'hydrogène et calculer les effets de surpression. Il conduit à une étude approfondie des résultats obtenus, confirmant ainsi l'approche proposée. Grâce à l'utilisation de notre approche, nous avons pu obtenir des résultats précieux sur le comportement des explosions d'hydrogène sous pression, ce qui a permis de développer des évaluations de sécurité plus solides pour réduire les risques de stockage d'hydrogène sous pression.

La première phase de la méthodologie a utilisé une modélisation numérique des mécanismes d'explosion de l'hydrogène gazeux dans le scénario choisi. Cette simulation complète a exploité la puissance de trois modules ANSYS WORKBENCH pour obtenir des résultats très satisfaisants : une analyse Fluent qui nous a permis la modélisation dynamique des variations de pression et de température en fonction du temps de remplissage et du déclenchement d'un incendie sur une paroi d'enceinte désignée, et une analyse thermo-structurale : en s'appuyant sur les données de pression obtenues grâce à l'analyse Fluent, ce module a simulé les effets structurels de l'augmentation de la pression, en examinant les contraintes, la déformation et le déplacement à l'intérieur de l'enceinte. La deuxième phase de la méthodologie a utilisé une combinaison de deux méthodes analytiques pour modéliser efficacement les effets de surpression : le Modèle multi-énergie TNO excellait dans la prévision de la surpression dans le champ proche (en prenant en considération les facteurs amplificateurs des effets de surpression), et le Modèle équivalent TNT s'est avéré apte à prédire la surpression dans le champ lointain, en tenant compte efficacement des effets de la distance et en ignorant l'influence des obstacles. La combinaison de ces deux méthodes analytiques a fourni un cadre robuste pour quantifier les effets de surpression sur une large gamme de distances.

En conclusion, notre étude offre des arguments convaincants en faveur de l'efficacité de la méthodologie proposée pour la modélisation des explosions d'hydrogène et le calcul des effets de surpression. L'application réussie de cette méthodologie à un enceinte de stockage d'hydrogène sous pression de type III démontre sa robustesse et son potentiel pour des applications plus étendue dans le domaine de la sécurité de l'hydrogène. L'obtention de résultats satisfaisants

Conclusion Générale

constitue une fondation solide pour la poursuite de la recherche et du développement dans ce domaine crucial.

Nous déclarons que les objectifs fixés ont été atteints avec succès. Cependant, nous avons rencontré des défis lors de l'utilisation du logiciel ANSYS pour calculer les effets de surpression (analyse numérique). Ces défis provenaient des limites de nos ressources informatiques hautes performances (station de travail) et d'accès à des versions sous licence mises à jour du logiciel.

Comme perspectives, nous avons choisi d'adopter une approche pour modéliser et simuler numériquement les effets de surpression d'explosion d'un récipient à hydrogène sous pression en prenant en considération de la géométrie réels de l'application (géométrie complexe). Pour réaliser cette nouvelle approche, nous impliquons des outils plus adaptés, tels que FLAC pour gérer les exigences informatiques de cette tâche.

Références bibliographiques

- [1] Strohmeier, J., 2011. *Étude numérique et analytique des propriétés des torchères d'hydrogène dans un milieu venteux* (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [2] Duclos, A., Proust, C., Daubech, J., & Verbecke, F. (2017, July). Ingénierie de la sécurité appliquée à des applications hydrogène-énergie. In *16. Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP 2017)* (Vol. 110). SFGP.
- [3] Angers B. *Simulations de fuites d'hydrogène en provenance d'un réservoir de stockage à haute pression : dispersion et conséquences de l'allumage* (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [4] Khan FI, Abbasi SA. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. *J Loss Prevent Proc* 1999; 12:361e78.
- [5] (AIAA) AIAA. Guide to safety of hydrogen and hydrogen systems. The United States of America American National Standards Institute; 2017.
- [6] Liu XL, Zhang Q. Influence of initial pressure and temperature on flammability limits of hydrogen-air. *Int J Hydrogen Energy* 2014; 39:6774e82.
- [7]
- [8] Molkov VV, Cirrone DMC, Shentsov VV, Dery W, Kim W, Makarov DV. Dynamics of blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire in the open atmosphere. *Int J Hydrogen Energy* 2021; 46:4644e65.
- [9] Molkov V, Dadashzadeh M, Kashkarov S, Makarov D. Performance of hydrogen storage tank with TPRD in an engulfing fire. *Int J Hydrogen Energy* 2021; 46:36581e97.
- [10] Holborn PG, Benson CM, Ingram JM. Modelling hazardous distances for large-scale liquid hydrogen pool releases. *Int J Hydrogen Energy* 2020; 45:23851e71.
- [11] Groethe M, Merilo E, Colton J, Chiba S, Sato Y, Iwabuchi H. Large-scale hydrogen deflagrations and detonations. *Int J Hydrogen Energy* 2007; 32:2125e33.
- [12] Pitts WM, Yang JC, Prasad K, Fernandez M. Dispersion and burning behavior of hydrogen released in a full-scale residential garage in the presence and absence of conventional automobiles - supplemental video materials. *J Res Natl Inst Stan* 2018;123.

- [13] Klebanoff LE, Pratt JW, LaFleur CB. Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SFBREEZE high-speed fuel-cell ferry. *Int J Hydrogen Energy* 2017; 42:757e74.
- [14] Liu D, Liu Z, Xiao H. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in narrow channels filled with stoichiometric hydrogen-air mixture. *Int J Hydrogen Energy* 2022; 47:11052e67.
- [15] Sherman MP, Tieszen S, Benedick WB. FLAME facility: the effect of obstacles and transverse venting on flame acceleration and transition on detonation for hydrogen-air mixtures at large scale. In: Nuclear regulatory commission. Washington, DC (USA): Div. of Systems; 1989.
- [16] Zalosh R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure. In: 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards; 2007. p. 27.
- [17] Shirvill LC, Roberts TA, Royle M, Willoughby DB, Sathiah P. Effects of congestion and confining walls on turbulent deflagrations in a hydrogen storage facility-part 1: experimental study. *Int J Hydrogen Energy* 2018; 43:7618e42.
- [18] Mogi T, Kim D, Shiina H, Horiguchi S. Self-ignition and explosion during discharge of high-pressure hydrogen. *J Loss Prevent Proc* 2008; 21:199e204.
- [19] Kobayashi H, Muto D, Daimon Y, Umemura Y, Takesaki Y, Maru Y, et al. Experimental study on cryo-compressed hydrogen ignition and flame. *Int J Hydrogen Energy* 2020; 45:5098e109.
- [20] Takeno K, Okabayashi K, Kouchi A, Nonaka T, Hashiguchi K, Chitose K. Dispersion and explosion field tests for 40 MPa pressurized hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 2007; 32:2144e53.
- [21] Liang Z, Clouthier T, MacCoy R, Chin YS. Overview of hydrogen combustion experiments performed in a large-scale vented vessel at Canadian Nuclear Laboratories. *NuclEng Des* 2018; 330:272e81.
- [22] Bykov V, Koksharov A, Kuznetsov M, Zhukov VP. Hydrogen-oxygen flame acceleration in narrow open-ended channels. *Combust Flame* 2022:238.
- [23] Zbikowski M, Makarov D, Molkov V. LES model of large-scale hydrogen-air planar detonations: verification by the ZND theory. *Int J Hydrogen Energy* 2008; 33:4884e92.

- [24] Rao ZM, Luo YH, Wang B, Xie QF, He W. Mitigation of H-2/air gaseous detonation via utilization of PAN-based carbon fibre felt. *Int J Hydrogen Energy* 2019; 44:5054e62.
- [25] Yu MG, Zheng K, Zheng LG, Chu TX, Guo PK. Scale effects on premixed flame propagation of hydrogen/methane deflagration. *Int J Hydrogen Energy* 2015; 40:13121e33.
- [26] Middha P, Ichard M, Arntzen BJ. Validation of CFD modelling of LH2 spread and evaporation against largescale spill experiments. *Int J Hydrogen Energy* 2011; 36:2620e7.
- [27] Song YH, Zhang Y, Chen Y, Liu XY, Fu M, Li YT. Numerical investigation of effects on premixed hydrogen/air flame propagation in pipes with different contraction or expansion angles. *J Loss Prevent Proc* 2021:70.
- [28] Vyazmina E, Jallais S. Validation and recommendations for FLACS CFD and engineering approaches to model hydrogen vented explosions: effects of concentration, obstruction vent area and ignition position. *Int J Hydrogen Energy* 2016; 41:15101e9.
- [29] Skjold T, Hisken H, Bernard L, Mauri L, Atanga G, Lakshmipathy S, et al. Blind-prediction: estimating the consequences of vented hydrogen deflagrations for inhomogeneous mixtures in 20-foot ISO containers. *J Loss Prevent Proc* 2019; 61:220e36.
- [30] Toliás IC, Stewart JR, Newton A, Keenan J, Makarov D, Hoyes JR, et al. Numerical simulations of vented hydrogen deflagration in a medium-scale enclosure. *J Loss Prevent Proc* 2018; 52:125e39.
- [31] Mukhim ED, Abbasi T, Tauseef SM, Abbasi SA. A method for the estimation of overpressure generated by open air hydrogen explosions. *J Loss Prevent Proc* 2018; 52:99e107.
- [32] Mueschke NJ, Joyce A. Measurement of gas detonation blast loads in semiconfined geometry. *J Loss Prevent Proc* 2020;63.
- [33] Journal Officiel, Algérie. Décret exécutif n° 06-198 du 31 mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement. 2006
- [34] Mezrague, A., & Ounas, N. (2015). Simulation numérique du comportement thermique d'un réservoir de stockage de propane (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).

- [35] CCPS, (2010). Guidelines for vapor cloud explosion, pressure vessel burst, BLEVE, and flash fire hazards
- [36] Rocourt X, Sochet I, Pellegrinelli B. Small-scale flame acceleration and application of medium and large-scale flame speed correlations. *Int J Hydrogen Energy* 2017; 42:1327e36.
- [37] Song XZ, Su H, Xie LF, Li B, Cao Y, Wang YX. Experimental investigations of the ignition delay time, initial ignition energy and lower explosion limit of zirconium powder clouds in a 20 L cylindrical vessel. *Process Saf Environ* 2020; 134:429e39.
- [38] Tang CL, Huang ZH, Jin C, He JJ, Wang JH, Wang XB, et al. Explosion characteristics of hydrogen-nitrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures. *Int J Hydrogen Energy* 2009; 34:554e61.
- [39] Scarpa R, Studer E, Kudriakov S, Cariteau B, Chaumeix N. Influence of initial pressure on hydrogen/air flame acceleration during severe accident in NPP. *Int J Hydrogen Energy* 2019; 44:9009e17.
- [40] Song XZ, Zuo XC, Yang ZK, Chen J, Xie LF, Li B. The explosion-suppression performance of mesh aluminum alloys and spherical nonmetallic materials on hydrogen-air mixtures. *Int J Hydrogen Energy* 2020; 45:32686e701.
- [41] Pang L, Wang CX, Han MX, Xu ZL. A study on the characteristics of the deflagration of hydrogen-air mixture under the effect of a mesh aluminum alloy. *J Hazard Mater* 2015; 299:174e80.
- [42] Bivol G, Golovastov S. Effects of polyurethane foam on the detonation propagation in stoichiometric hydrogen-air mixture. *Process Saf Environ* 2019; 130:14e21.
- [43] X. Wang, B. Li, B. Han, X. Jin, D. Zhang, & M. Bi. Explosion of high-pressure hydrogen tank in fire: Mechanism, criterion, and consequence assessment. *Journal of Energy Storage* (2023), 72, 108455. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108455>
- [44] V. Molkov, D. Cirrone, V. Shentsov, W. Dery, W. Kin, D. Makarov, Dynamics of blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire in the open atmosphere, *Int. J. Hydrog. Energy* 46 (2021) 4644–4665
- [45] X.Y. Wang, B. Li, X. Jin, B. Han, C. Shu, Ultimate pressure-bearing capacity of type iii onboard high-pressure hydrogen storage tanks under typical accident scenarios, *J. Energy Storage* 63 (2023), 107135
- [46] W.E. Baker, P.A. Cox, P.S. Westine, *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier, Amsterdam, 1983.

- [47] V. Molkov, S. Kashkarov, Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks, *Int. J. Hydrog. Energy* 40 (2015) 12581–12603.
- [48] S. Kudriakov, E. Studer, G. Bernard-Michel, D. Bouix, L. Domergue, D. Forero, et al., Full-scale tunnel experiments: blast wave and fireball evolution following hydrogen tank rupture, *Int. J. Hydrog. Energy* 47 (2022) 18911–18933.
- [49] H.L. Brode, Blast wave from a spherical charge, *Phys. Fluids* 2 (1959) 217–229.
- [50] J. Li, T. Wang, Q. Yang, P. Song, H. Su, towards fast and safe hydrogen filling for the fuel vehicle: a variable mass flow filling strategy based on a real-time thermodynamic model, *Int. J. Hydrog. Energy* (2023), <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.001>.
- [51] Committee for Prevention of Disaster (1995). *Methods for the calculation of physical effects – Third Edition. Yellow Book*, chap 5, 5.31-5.72.
- [52] TNO, *Methods for the Calculation of Physical Effects (Yellow Book 3rd edition) CPR14E Part 1*, Director-General for Social Affairs & Employment, The Netherlands, 1997
- [53] CPR, Committee for the Prevention of disaster. *Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects, Part 2, CPR 14E, Chap. 5*, 3 editions, 1997
- [54] A. C. Van den Berg, “The multi-energy method: a framework for vapour cloud explosion blast prediction,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, 1985
- [55] F. D. Alonso, E. G. Ferradas, J. F. S. Pérez, A. M. Aznar, J. R. Gimeno, and J. M. Alonso, “Characteristic overpressure-impulse-distance curves for vapour cloud explosions using the TNO multi-energy model,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137, no. 2, pp. 734–741, 2006
- [56] Committee For Prevention of Disaster (1995). *Methods for the calculation of physical effects – Third Edition. Yellow Book*, chap 5, 5.31-5.72.

- [57] C.C. Shen, L. Ma, G. Huang, Y.Z. Wu, J.Y. Zheng, Y. Liu, J. Hu, Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test, *J. Loss Prev. Process* 55 (2018) 223–231.
- [58] A.M. Birk, C. Davison, M. Cunningham, Blast overpressures from medium scale BLEVE tests, *J. Loss Prev. Process* 20 (2007) 194–206.
- [59] A. Sari, Comparison of TNO multienergy and Baker-Strehlow-Tang models, *Process Saf. Prog.* 30 (2011) 23–26.
- [60] B. Hemmatian, J. Casal, E. Planas, A new procedure to estimate BLEVE overpressure, *Process Saf. Environ.* 111 (2017) 320–325.
- [61] F. Ustolin, N. Paltrinieri, G. Landucci, An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions, *J. Loss Prev. Process* 68 (2020), 104323

Références bibliographiques

- [62]C.A. Mills, the design of concrete structure to resist explosions and weapon effects,in: Proceedings of the 1st Int. Conference on Concrete for Hazard Protections,1987, pp. 61–73.