

	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University - Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
قسم الهندسة الميكانيكية		
	Department of Mechanical Engineering	

N° d'ordre : M2...../GM/2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergétique

Thème

Étude numérique des effets de la géométrie et la variation du débit sur la température des parois d'un réservoir d'hydrogène pressurisé pendant le processus de remplissage

Présenté par

- 1- Lahcene Hanaa Ghofrane
- 2- Sahnoun Hicham

Soutenu le 25/06/ 2024 devant le jury composé de :

Président(e) :	RETIEL Noureddine	Professeur	Université de Mostaganem
Examineurs :	OULD SAID Belkacem	Maitre de Conférences "A"	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	SENOUCI Moussa	Maître Assistant "B"	Université de Mostaganem

Année universitaire 2023 / 2024

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

À l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Abdenour.

À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère Karima.

A mes frères, et ma petite sœur Imane pour ses soutiens moral.

À mes chères amies, fouzia et feriel et ma cousine Nouha, pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

À mon binôme Hichem.

À toute ma famille Lahcen.

À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Hanaa

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes parents pour leur amour, leur affection, leur soutien et leurs sacrifices
pour Notre éducation et notre formation

À nos chers frères

À toutes nos familles Sahnoun

À tous nos amis et nos collègues

À tous ceux qui nous aiment

Hichem

Remerciements

Avant tout nous tenons à remercier ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage de finir le mémoire

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur SENOUCI Moussa que l'on remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de Juger notre travail :

Le Professeur RETIEL Nouredine et le chef de département le Docteur OULD SAID Belkacem.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs du Département de Génie Mécanique pour leurs générosités et la grande Patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges Académiques et professionnelles.

Liste des figures

Figure 1 - Application de l'hydrogène pour les transports.....	4
Figure 2 - Comparaison de l'énergie spécifique et de la densité énergétique de plusieurs combustibles. Le poids du réservoir n'est pas pris en compte. Tiré de [16]......	5
Figure 3 - Comparaison de l'énergie spécifique et de la densité énergétique pour plusieurs combustibles. Le poids du réservoir est pris en compte. Tiré de [10]......	5
Figure 4 - À gauche, historique de la variation de la température du gaz à l'intérieur du réservoir pendant le remplissage. Issu de [19]. À droite, résultats obtenus par la présente étude.	7
Figure 5 - Coefficient de Joule-Thomson en fonction de la température à la pression atmosphérique. Issue de [21]......	8
Figure 6 - Visualisation des 3 voies de production d'hydrogène (H ₂) et de leur dénomination par une couleur spécifique. Issue de [22]......	9
Figure 7 - Principe de la méthode numérique.	13
Figure 8 - La structure du cylindre à hydrogène.	18
Figure 9 - Maillage du domaine de calcul.	19
Figure 10 - Évolution de la température pendant les premières 50 secondes. Résultats obtenus par Melideo et al. [50].	21
Figure 11 - Évolution de la température pendant les premières 50 secondes. Résultats obtenus par la présente étude.	22
Figure 12 - Évolution de la température du revêtement en aluminium pendant les premières 50 secondes. Résultats obtenus par Melideo et al. [49]......	22
Figure 13 - Évolution de la température du revêtement en aluminium pendant les premières 50 secondes. Résultats obtenus par la présente étude.....	23
Figure 14 - Évolution de la vitesse à l'entrée du réservoir durant les premières 50 secondes.	24
Figure 15 - Variation de la vitesse en fonction du débit massique.	25
Figure 16 - Évolution des fonctions de courant pendant 0,2 seconde du début du remplissage.	26
Figure 17 - Évolution de la température à l'intérieur du réservoir pendant les premières 50 secondes.	26
Figure 18 - Impact du débit massique sur la température maximale du gaz.	27
Figure 19 - Contours de température pour le débit 0,006 kg/s.....	28
Figure 20 - Contours de température pour le débit 0,008 kg/s.....	29
Figure 21 - Contours de température pour le débit 0,01 kg/s.....	29
Figure 22 - Contours de température pour le débit 0,012 kg/s.....	30
Figure 23 - Variation de la pression en fonction du débit massique.....	30
Figure 24 - Distribution de la température au niveau des parois.....	31
Figure 25 - Impact de la température initiale sur la température maximale de l'hydrogène...	32
Figure 26 - Réservoir sans isolation en fibre de carbone.	32
Figure 27 - Contours de température pour le réservoir sans fibre de carbone.	33
Figure 28 - Réservoir avec un rapport L/Di différent.....	33
Figure 29 - Variation de la température pour les deux réservoirs.....	34
Figure 30 - Contours de température pour le débit 0,006 kg/s.....	35

Figure 31 - Contours de température pour le débit 0,008 kg/s.....	36
Figure 32 - Contours de température pour le débit 0,01 kg/s.....	37
Figure 33 - Contours de température pour le débit 0,012 kg/s.....	38

Liste des tableaux

Tableau 1 - Aperçu des méthodes de stockage, adapté de [7].	4
Tableau 2 - Les illustrations des réservoirs sont tirées de [17].	6
Tableau 3 - Dimensions du réservoir.	18
Tableau 4 - Propriétés des matériaux.	19
Tableau 5 - Conditions initiales et aux limites.	19
Tableau 6 - Résumé des paramètres du solveur.	20

Liste des équations

Équation 1 : Équation de conservation de la masse

Équation 2 : Équation de conservation du mouvement

Équation 3 : Équation de l'énergie

Équation 4 : Équation de l'énergie totale

Équation 5 : Tenseur des contraintes déviatoriques

Résumé

Résumé :

Un taux de ravitaillement élevé entraîne une augmentation de la température à l'intérieur du réservoir. Les températures excessives doivent être évitées pendant le remplissage. Dans ce travail, nous avons étudié des méthodes efficaces pour contrôler l'élévation de température par des simulations basées sur la (CFD). Des cylindres avec différents rapports longueur/diamètre et différents diamètres d'entrée ont été simulés. Nous avons constaté que des ratios plus petits de longueur par rapport au diamètre peuvent améliorer le contrôle et la distribution de la température. Un diamètre d'entrée plus grand peut restreindre l'augmentation de la température. En comparant les résultats de simulation avec des valeurs constantes, croissantes et décroissantes du débit massique, le ravitaillement avec débit croissant obtient la plus basse hausse de température.

Mots clés :

1. Hydrogène
2. Simulation numérique
3. Hausse de température
4. Remplissage des réservoirs
5. Réservoir de gaz sous pression

Summary :

A high fueling rate causes the temperature inside the tank to increase. Excessive temperatures should be avoided during filling. In this work, we studied effective methods to control temperature rise through CFD-based simulations. Cylinders with different length/diameter ratios and different inlet diameters were simulated. We have found that smaller ratios of length to diameter can improve temperature control and distribution. A larger inlet diameter may restrict the temperature rise. Comparing the simulation results with constant, increasing and decreasing values of mass flow, the fueling with increasing flow achieves the lowest temperature rise.

Keywords :

1. Hydrogen
2. Digital simulation
3. Temperature rise
4. Filling the tanks
5. Pressurized gas tank

ملخص:

يؤدي معدل التزود بالوقود المرتفع إلى زيادة درجة الحرارة داخل الخزان. يجب تجنب درجات الحرارة الزائدة أثناء التعبئة. في هذا العمل، قمنا بدراسة الطرق الفعالة للتحكم في ارتفاع درجة الحرارة من خلال عمليات المحاكاة المعتمدة

على عقود الفروقات. تمت محاكاة الأسطوانات ذات نسب الطول/القطر المختلفة وأقطار المدخل المختلفة. لقد وجدنا أن النسب الأصغر من الطول إلى القطر يمكن أن تحسن التحكم في درجة الحرارة والتوزيع. قد يؤدي قطر المدخل الأكبر إلى تقييد ارتفاع درجة الحرارة. وبمقارنة نتائج المحاكاة مع قيم التدفق الكتلي الثابتة والمتزايدة والمتناقصة، فإن التزود بالوقود مع التدفق المتزايد يحقق أقل ارتفاع في درجة الحرارة.

الكلمات الدالة

1. الهيدروجين
2. المحاكاة الرقمية
3. ارتفاع درجة الحرارة
4. تعبئة الخزانات
5. خزان الغاز المضغوط

Introduction générale

L'hydrogène est un élément chimique essentiel, le plus léger et le plus abondant dans l'univers. Il joue un rôle crucial dans de nombreux processus naturels et industriels, et récemment, il a attiré une attention croissante en tant que vecteur énergétique propre et potentiellement durable. En tant que carburant, l'hydrogène offre une alternative prometteuse aux combustibles fossiles en raison de sa grande efficacité énergétique et de son potentiel à produire de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre lorsqu'il est utilisé dans des piles à combustible. Cependant, l'un des défis majeurs associés à son utilisation généralisée réside dans son stockage et son transport efficaces.

Le stockage de l'hydrogène est particulièrement critique car il doit être réalisé dans des conditions sûres, efficaces et économiquement viables. Plusieurs méthodes de stockage sont explorées, chacune présentant des avantages et des limitations spécifiques. Ces méthodes incluent le stockage sous forme comprimée, liquéfiée, solide, et sous forme de composés chimiques comme l'ammoniac ou les hydrures métalliques. Chaque méthode de stockage présente des compromis entre la densité d'énergie, la sécurité, la facilité de manutention et les coûts associés. Le développement de solutions efficaces de stockage de l'hydrogène est donc crucial pour soutenir son utilisation à grande échelle dans les secteurs du transport, de l'industrie et de la production d'énergie.

La simulation numérique du stockage d'hydrogène est une méthode puissante pour évaluer et optimiser les différents aspects du processus de stockage. Voici un aperçu général de ce que pourrait impliquer une simulation numérique dans ce domaine :

1. **Modélisation du Comportement des Réservoirs** : Les réservoirs utilisés pour le stockage d'hydrogène peuvent être modélisés numériquement pour étudier leur comportement sous différentes conditions de pression et de température. Cela inclut la prédiction des contraintes mécaniques, des déformations et des propriétés de transfert de chaleur.
2. **Simulation de la Sécurité** : Les simulations peuvent également être utilisées pour évaluer la sécurité des réservoirs d'hydrogène, en simulant des scénarios tels que des fuites ou des ruptures potentielles et en évaluant leur impact sur l'environnement et sur la sécurité des personnes.
3. **Optimisation de la Performance** : Les simulations peuvent aider à optimiser la conception des réservoirs pour maximiser la densité d'énergie tout en minimisant les coûts et en assurant la durabilité. Cela inclut l'optimisation des matériaux, des formes géométriques et des systèmes de gestion thermique.
4. **Évaluation des Systèmes de Distribution** : En plus des réservoirs eux-mêmes, les simulations peuvent être étendues pour évaluer les systèmes de distribution

INTRODUCTION GÉNÉRALE

d'hydrogène, en tenant compte des pertes, des pressions requises, des temps de remplissage et d'autres paramètres critiques.

5. Intégration avec d'Autres Technologies : Les simulations peuvent également aider à intégrer le stockage d'hydrogène avec d'autres technologies, telles que les piles à combustible et les électrolyseurs, pour créer des systèmes énergétiques complets et efficaces.

En pratique, les simulations numériques utilisent des modèles mathématiques complexes qui prennent en compte les lois physiques fondamentales telles que la thermodynamique, la mécanique des fluides et la cinétique chimique. Ces simulations sont cruciales pour la conception et l'optimisation des systèmes de stockage d'hydrogène afin de garantir leur efficacité, leur sécurité et leur viabilité économique à grande échelle.

Chapitre I: Généralités

I.1 Introduction :

L'hydrogène, la plus petite molécule existante, recèle de grands espoirs pour la transition énergétique. La réaction de l'hydrogène avec l'oxygène génère de l'eau et des quantités d'énergie sont libérées sans éléments à base de carbone. Cette réaction peut être obtenue par combustion, induisant une chaleur qui peut être transformée, en partie (environ 30 % pour un véhicule classique), en travail mécanique, ou via une pile à combustible convertissant l'énergie avec un rendement de 60 % en puissance électrique [1]. Bénéficiant de cette propriété, l'hydrogène est un vecteur énergétique intéressant pour réduire les émissions de CO₂. Comme le préconise la Cop26 [2], éviter une augmentation de 2 °C de la température mondiale par rapport aux niveaux préindustriels nécessite de réduire les émissions mondiales de CO₂ de 45 % d'ici 2030. Son potentiel a alimenté de nombreux projets à grande échelle, comme NorthH2 [3], un projet de production, de stockage et transmission d'hydrogène vert. Battant souvent des records de taille, des électrolyseurs géants [4] sont créés partout dans le monde. Pour répondre à la demande croissante en hydrogène. Le champ d'application de l'hydrogène est vaste. Cela va du tampon énergétique pour sources d'énergie renouvelables intermittentes ou stockage à grande échelle dans des cavernes de sel souterraines [5] pour des applications de transport : des véhicules légers (<10 kg d'hydrogène à bord) aux véhicules lourds (>10 kg d'hydrogène à bord), voir figure 1.

L'hydrogène pur, ou sous son nom de molécule dihydrogène, est plus dense énergétiquement que les carburants standards. Par exemple, en termes d'énergie, 1 kg d'hydrogène équivaut à 2,84 kg d'essence ou 2,25 kg de gaz naturel [6]. Cet avantage est cependant diminué par sa très faible densité à température et pression normales, soit 20 °C et 1,01325 bar, soit environ 0,08375 kg/m³. Par conséquent, conserver quelques kilogrammes d'hydrogène dans un stockage compact constitue une contrainte difficile. Les principales solutions reposent sur la dilution de l'hydrogène dans un matériau solide, comme les hydrures métalliques, ou sur l'utilisation de la pression et la température pour augmenter la densité, comme l'hydrogène liquide et l'hydrogène comprimé. Le tableau 1, basé sur [7], présente les différentes solutions ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Méthode	Température [K]	Pression [bar]	Densité d'énergie volumétrique [MJ/L]	Remarques
Comprimé	293	700	4,9	Norme actuelle de l'industrie

GÉNÉRALITÉS

Liquide	20	1	6,4	L'évaporation constitue un inconvénient majeur
Froid/Cryo comprimé	40-80	300	4,9	L'évaporation constitue un inconvénient majeur
Hydrures métalliques	260-425	20	13,2	Nécessite un système de gestion thermique

Tableau 1 - Aperçu des méthodes de stockage, adapté de [7].

Pour les véhicules légers, l'hydrogène sous forme gazeuse constitue la meilleure option. L'hydrogène comprimé peut être stocké pendant une longue période de temps [8], offre une autonomie décente (jusqu'à 650 km pour la Toyota Mirai [9]), est moins coûteux en énergie que l'hydrogène liquide (40 % de l'énergie potentielle interne est nécessaire à la liquéfaction contre 20 % pour la compression à 700 bars [10]). Comme le résume la figure 2, la densité de l'hydrogène constitue une limitation importante par rapport à d'autres carburants standards. L'amélioration de la compétitivité de l'hydrogène gazeux passe donc par une compression maximale de l'hydrogène.

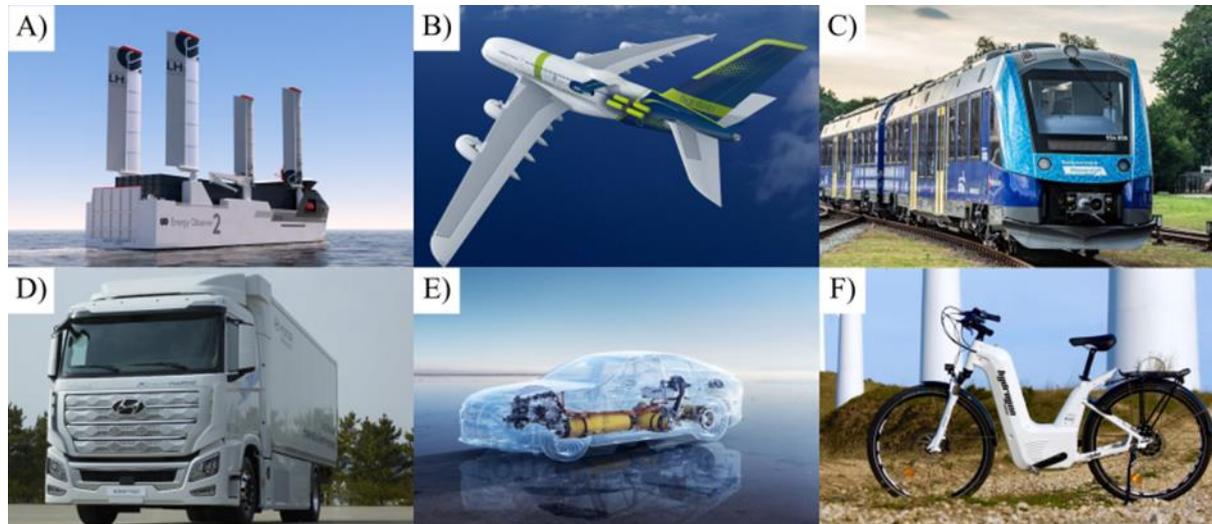


Figure 1 - Application de l'hydrogène pour les transports. A), Energy Observer 2 [11], un navire démonstrateur qui fonctionne avec H₂ liquide. B), Airbus [12] a l'ambition de développer le premier avion commercial zéro émission au monde d'ici 2035, en utilisant la technologie de combustion de l'hydrogène pour propulser les avions. C) Alstom a lancé Coradia iLint™ [13], le premier train à hydrogène au monde. D), Hyundai développe Xcient Fuel Cell [14], un camion propulsé à l'hydrogène. Ils espèrent que 1 600 camions à hydrogène devraient être exploités en Suisse d'ici 2025. E), le Toyota Mirai [9], une voiture à hydrogène, sortie en décembre 2014 et vendue jusqu'en décembre 2021 à 17 940 unités. F), le vélo Alpha, un produit de Industries Pragma [15]. Il s'agit du premier vélo à assistance électrique doté d'une pile à combustible disponible.

GÉNÉRALITÉS

La pression admissible pour un réservoir dépend du matériau utilisé. Le poids du réservoir compte pour l'intégration application. L'énergie spécifique, c'est-à-dire la densité gravimétrique, change considérablement si le poids du réservoir est pris en compte, comme dans la figure 3. En raison de sa petite taille, l'hydrogène peut traverser les parois solides par diffusion et un revêtement est nécessaire pour limiter ce phénomène. L'amélioration du réservoir d'hydrogène au fil des années, en utilisant des matériaux plus légers, plus résistants et moins perméables, a conduit à différents types de réservoir d'hydrogène, comme détaillé dans le tableau 2.

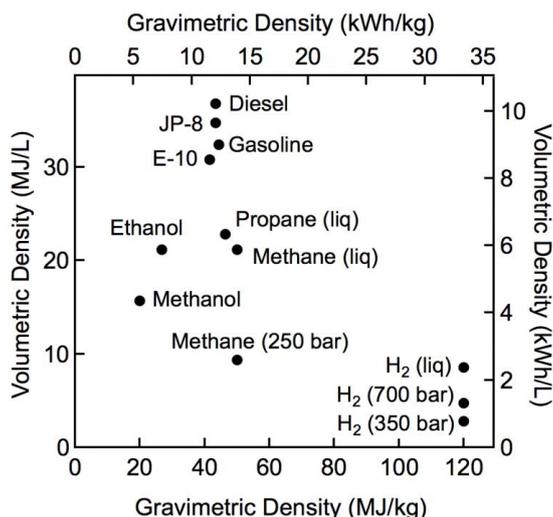


Figure 2 - Comparaison de l'énergie spécifique et de la densité énergétique de plusieurs combustibles. Le poids du réservoir n'est pas pris en compte. Tiré de [16].

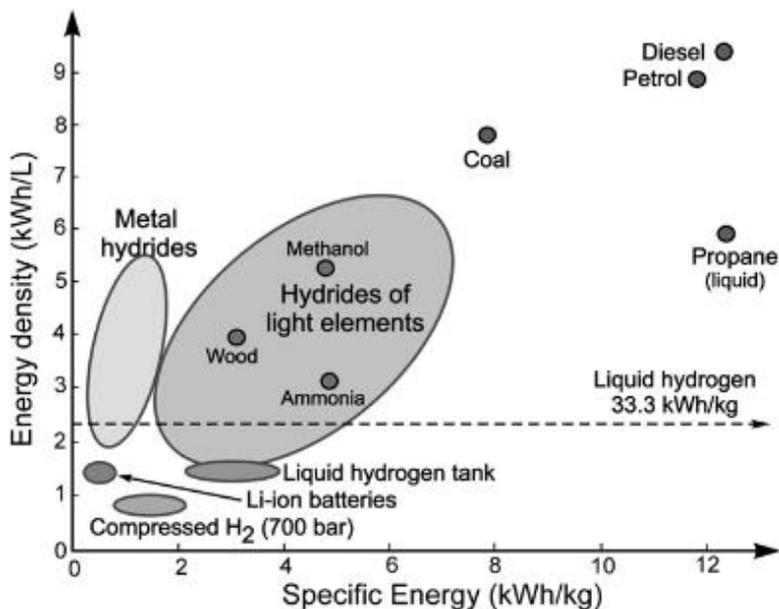


Figure 3 - Comparaison de l'énergie spécifique et de la densité énergétique pour plusieurs combustibles. Le poids du réservoir est pris en compte. Tiré de [10].

GÉNÉRALITÉS

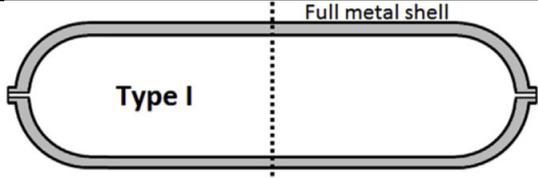
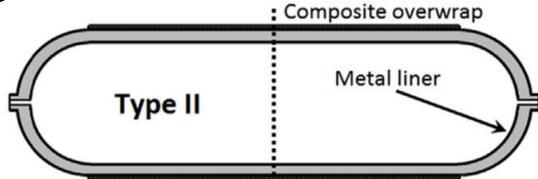
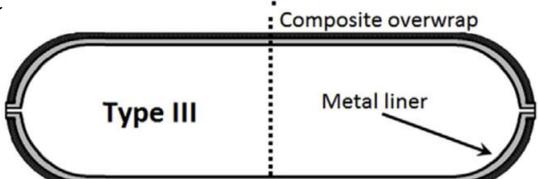
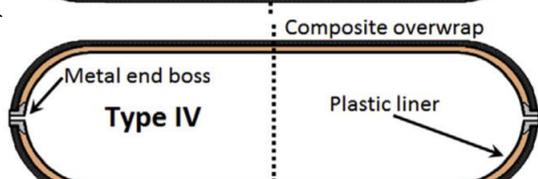
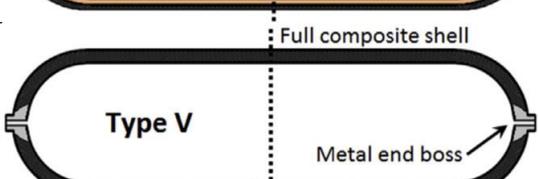
Type	Matériaux	Pression [bar]	Schéma
I	Réservoir en métal	200	
II	Cuve métallique avec composite sureballé	200-300	
III	Doublure métallique avec composite sureballé	350-700	
IV	Doublure en plastique avec composite sureballé	700	
V	Réservoir sans doublure tout composite sureballé	700	

Tableau 2 - Les illustrations des réservoirs sont tirées de [17].

Du point de vue de l'utilisateur, le temps de remplissage d'un véhicule léger à hydrogène est proche du temps de remplissage d'un véhicule à combustible fossile, entre 3 et 5 minutes, ce qui constitue un sérieux avantage par rapport au véhicule électrique à batterie. Lors du remplissage, comme le réservoir est un volume fermé, l'injection d'une masse induit une compression du gaz. La pression intérieure passe de 20 bars à 700 bars. Cette compression induit, comme peut l'expliquer la thermodynamique, une élévation de la température dans le réservoir. La température doit être contrôlée pour ne pas dépasser la limite recommandée par la norme J2601 de l'association mondiale d'élaboration de normes (SAE) [18]. Cette norme exige de maintenir la température intérieure entre -40 °C et 85 °C . Dans la figure 4, issue de [19], il est démontré que la température finale dans le réservoir peut être réduite afin de rester en dessous de la température recommandée de 85 °C en modifiant la température de l'hydrogène injecté.

GÉNÉRALITÉS

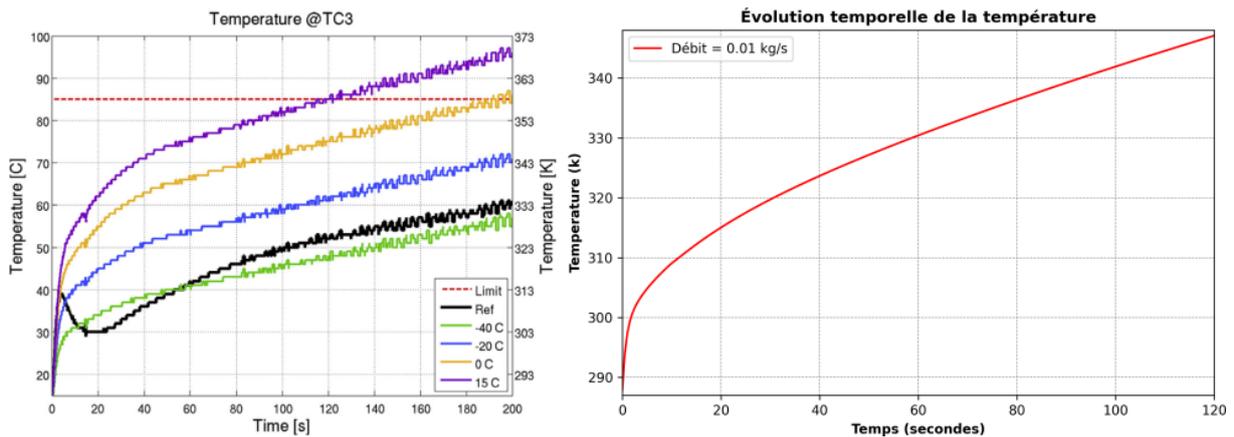


Figure 4 - À gauche, historique de la variation de la température du gaz à l'intérieur du réservoir pendant le remplissage. Issu de [19]. À droite, résultats obtenus par la présente étude.

Les propriétés thermiques des régions solides sont un facteur important sur la température maximale de l'hydrogène à l'intérieur du réservoir. Grâce à la doublure en plastique et l'enveloppe de carbone, deux matériaux considérés comme isolant thermique, le réservoir de type IV tend à limiter les échanges thermiques entre le gaz et les murs.

Pour éviter que la température du gaz ne dépasse la limite de 85 °C, une des solutions possibles consiste à augmenter le temps de remplissage. Cependant, cette solution soulève d'autres problèmes. Un temps de remplissage plus long implique un débit massique plus faible. Selon les travaux de [20], le temps de remplissage le plus long induit la stratification verticale la plus élevée pour un réservoir rempli horizontalement avec une injection axiale. Cet effet a été attribué à une diminution du mélange thermique entre le gaz injecté et du gaz dans le réservoir lorsque le débit massique est réduit.

I.2 Effet Joule-Thomson :

Lorsque le gaz comprimé est détendu ou libéré à travers une vanne dans un environnement à basse pression, d'une part, cela conduit le gaz à chauffer tandis que l'expansion elle-même refroidit le gaz. Ces deux mécanismes entrent en compétition et sont connus sous le nom d'effet Joule-Thomson. En général, on peut affirmer que le coefficient Joule-Thomson est identifié par la dérivée partielle de la température par rapport à la pression à enthalpie constante et que l'effet Joule-Thomson est décrit en obtenant ce coefficient. Pour la plupart des types de gaz dans des conditions normales, le coefficient Joule-Thomson est positif, ce qui signifie que le gaz est refroidi pendant la détente alors que pour quelques gaz comme l'hydrogène, il fonctionne dans l'autre sens dans la plage de pression et de température appropriée. En d'autres termes, lorsque le réservoir est rempli d'hydrogène, à mesure que le gaz se détend après avoir passé la buse, la température à l'intérieur du réservoir augmente. La figure 5 illustre la tendance du coefficient Joule-Thomson en fonction de la température à pression atmosphérique pour plusieurs gaz y compris l'hydrogène.

GÉNÉRALITÉS

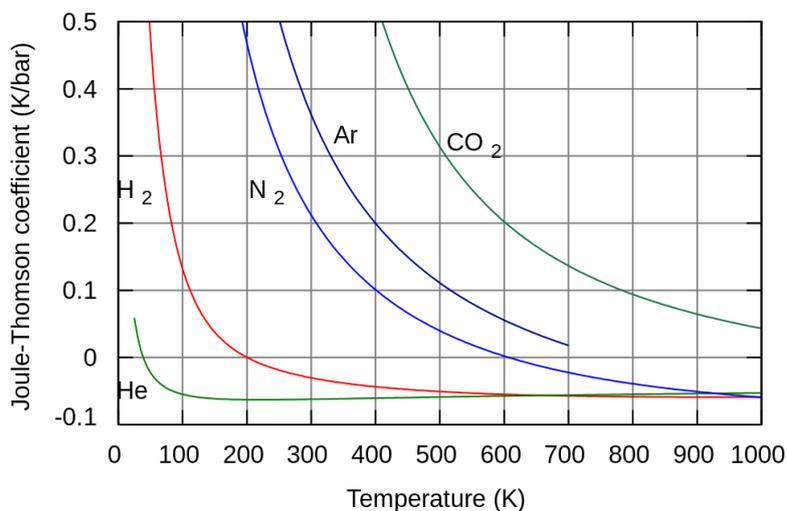


Figure 5 - Coefficient de Joule-Thomson en fonction de la température à la pression atmosphérique. Issue de [21].

I.3 Les couleurs de l'hydrogène :

Présenté depuis plusieurs mois comme une piste miracle dans le secteur de l'énergie, l'hydrogène est une molécule qui semble prometteuse. Néanmoins, dans les médias, sur les réseaux sociaux, on note que l'hydrogène peut être « bleu », « vert », « gris », ou « jaune ». Même pour un spécialiste du secteur, il n'est pas toujours évident de s'y retrouver dans ce déversement de couleurs.

Que représentent ces couleurs ? Sont-elles associées à des puretés d'hydrogène différentes ou des applications distinctes ? Existe-t-il donc plusieurs « types » d'hydrogène ?

L'hydrogène n'est pas une énergie en soi. C'est plutôt un vecteur énergétique, au même titre que l'électricité ou la chaleur. L'hydrogène (H₂) n'existe pas abondamment à l'état naturel et il est nécessaire de le synthétiser au départ d'une matière première.

Actuellement, cette matière première est majoritairement du gaz naturel (pour plus de 50%) suivie par les hydrocarbures (issus du pétrole) pour près de 30%. Le reste de la production repose sur l'usage de charbon (de moins en moins exploité) ou de biométhane (issu des unités de biométhanisation). La conversion de ces matières premières en hydrogène requiert également de l'énergie. Cette énergie est aujourd'hui tirée à plus de 95% des énergies fossiles.

La conversion du gaz naturel en hydrogène repose sur un procédé connu sous le nom de réformage à la vapeur (souvent mentionné sous l'abréviation SMR – Steam Methane Reforming). Ce réformage à la vapeur consiste à faire réagir du méthane (contenu dans le gaz naturel) en présence de vapeur d'eau, à hautes pression et température (aux environs de 700-1000°C), en présence de catalyseurs. Le SMR est la technique de production la plus répandue pour la synthèse d'hydrogène. Elle représente un coût estimé à 1,5 euros/kg. Énergivore, le

GÉNÉRALITÉS

SMR émet énormément de dioxyde de carbone, généralement émis dans l'atmosphère. On estime ainsi que pour une tonne d'hydrogène produite, entre 10 et 11 tonnes de CO₂ sont émises.

L'hydrogène produit à partir de gaz naturel par ce procédé de SMR (avec émissions de CO₂) alimenté par des énergies fossiles est qualifié d'hydrogène gris. (Figure 1) Cet hydrogène gris est celui qui est dominant sur le marché. C'est celui qui est produit à un stade industriel et en grande quantité. Chaque année près de 70 à 80 millions de tonnes de cet hydrogène gris sont produites, dont la principale application reste le secteur de la chimie industrielle. Plus de 80% de la production mondiale d'hydrogène est en effet exploitée pour permettre la synthèse de l'ammoniac et de ses dérivés (pour l'agriculture) ou pour réaliser des opérations de raffinage du pétrole (dont la désulfuration des fractions destinées à des applications comme carburants). Les États-Unis et la Chine sont les deux plus grands fournisseurs mondiaux d'hydrogène, loin devant des pays comme la France par exemple (1,5% de la production mondiale).

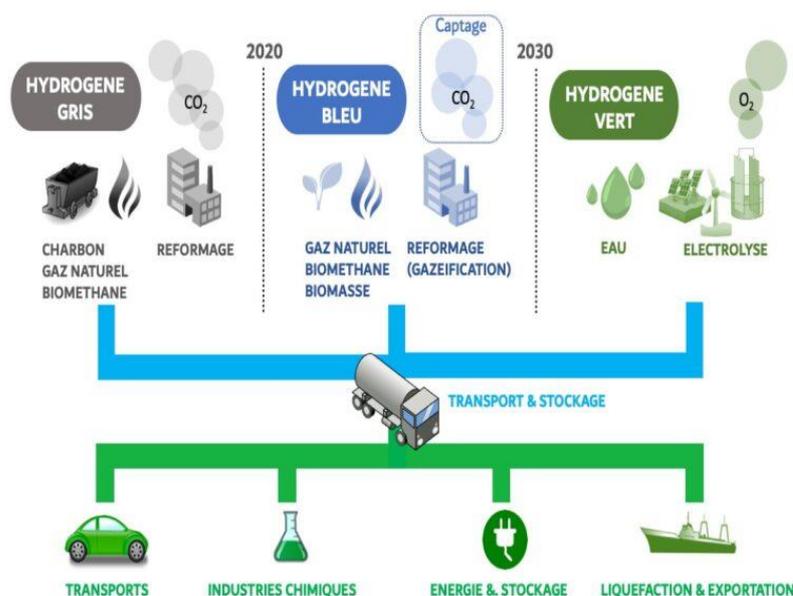


Figure 6 - Visualisation des 3 voies de production d'hydrogène (H₂) et de leur dénomination par une couleur spécifique. Issue de [22].

L'hydrogène peut également être produit au départ de charbon, ou de biomasse (matières végétales et déchets organiques) en incluant une étape supplémentaire dite de gazéification. Cette gazéification, qui s'opère aussi à très hautes températures, permet de produire un gaz de synthèse (mélange de monoxyde de carbone CO et d'hydrogène). Cette étape est aussi hautement énergivore.

Les voies de production actuelle d'hydrogène étant donc émettrices de gaz à effet de serre, de grands enjeux existent pour décarboner au maximum cette production. Pour ce faire, diverses options sont envisagées, avec des niveaux de maturité technologique différents. Une première stratégie consiste à capter le dioxyde de carbone formé pendant le SMR et soit de le réutiliser comme matière première dans certaines entreprises, notamment chimiques, soit de le stocker géologiquement dans d'anciennes « poches » de gaz naturel ou de pétrole vides. C'est ce qu'on appelle la séquestration géologique (aussi appelée en anglais, carbon capture and storage ou CCS).

GÉNÉRALITÉS

L'hydrogène produit par cette approche qui émet moins de gaz à effet de serre est alors appelé « hydrogène bleu ». Bien évidemment, les solutions de captage de CO₂ ont un coût qui n'est pas négligeable (tant économique qu'énergétique) et seuls quelques productions au stade pilote uniquement sont donc recensées dans le monde.

Une autre option pour permettre la production décarbonée d'hydrogène est d'exploiter une matière première différente, à savoir l'eau, et de la convertir dans de grands électrolyseurs, alimentés par du courant électrique, en H₂ et oxygène (O₂) qui retourne dans l'atmosphère. Si l'électricité utilisée pour alimenter les électrolyseurs est 100% issues d'énergies renouvelables (panneaux photovoltaïques, éoliennes, etc.) alors on qualifiera l'hydrogène de vert. Si les électrolyseurs sont alimentés par contre en tout ou en partie par de l'énergie nucléaire, on parlera alors d'hydrogène jaune.

En conclusion : La couleur associée à l'hydrogène dépend de sa méthode de production dans son ensemble. A ce jour, plus de 95% de la production mondiale d'hydrogène repose sur des énergies fossiles, avec des émissions de gaz à effet de serre. Cet hydrogène gris est le plus économique. Le captage des gaz à effet de serre permet de produire un hydrogène bleu, plus cher.

Si la production est assurée à partir uniquement d'énergies renouvelable, l'hydrogène devient vert. Il est encore près de 5 fois plus cher que l'hydrogène gris.

Les couleurs associées à l'hydrogène sont celles utilisées par la presse, le monde socio-économique et certaines industries. Le monde académique et scientifique ne fait nullement référence à ces notions de couleur ; l'hydrogène, qu'il soit produit à partir de gaz naturel, de biomasse, d'eau et avec un apport en énergies fossiles ou renouvelables, reste la seule et même molécule.

Chapitre II: Recherche bibliographique

Plusieurs études ont été réalisées pour évaluer le remplissage rapide en hydrogène. R. Hirotsu et coll. [23] ont démontré que les réservoirs contenant des matériaux à faible conductivité thermique, comme le polymère dans les réservoirs de type IV, entraînent des températures plus élevées. S.C. Kim et coll. [24] ont trouvé une plus grande fréquence de stratification dans les réservoirs de type IV et que ce phénomène a considérablement augmenté la température maximale de l'hydrogène. Y. Zhao et al. [25] ont simulé plusieurs modèles d'augmentation de pression et a conclu qu'un modèle linéaire est le plus approprié pour obtenir des températures finales et maximales plus basses. Y.-L. Liu et coll. [26] a conclu que des augmentations linéaires des pressions initiales entraînent une diminution linéaire de la température maximale. J. Zheng et al. [27] ont découvert qu'il existe une relation linéaire d'augmentation de la température entre la température d'équilibre et la température finale. M.C. Galassi et coll. [28] ont simulé un réservoir entièrement adiabatique et ont constaté que cela entraînait des augmentations significatives des valeurs maximales de la température finale. N. de Miguel et al. [29] ont démontré qu'une augmentation du diamètre et la diminution du débit massique a provoqué la formation d'une stratification due aux faibles vitesses. N.R. Kesana et al. [30] ont modélisé un réservoir avec un rapport longueur/diamètre élevé et ont découvert que, dans ce type de réservoir, les effets de flottabilité sont importants. D. Melideo et al. [19] a conclu que la baisse de température finale est approximativement égale en ampleur à la même baisse de température de pré refroidissement. Wang G et coll. [31] ont déterminé que la masse finale d'hydrogène est inversement proportionnel au débit massique et dépend du transfert de chaleur lors du ravitaillement. On a également construit une courbe non linéaire qui correspond à la diminution de la masse finale avec l'augmentation en taux de remplissage massique dans un réservoir de type 3 de 35 MPa. En revanche, la masse finale a augmenté linéairement avec l'augmentation de la pression initiale. R. Cebolla et al. [32] ont démontré que le plus le débit massique est élevé, plus le SOC est faible, mais cette tendance diminue avec l'augmentation dans le gaz d'entrée pré refroidi. La diminution de la température de pré refroidissement a entraîné une augmentation du volume du réservoir contenu énergétique supérieur à la dépense énergétique.

La densité énergétique volumétrique de l'hydrogène est très faible. Afin d'augmenter sa densité énergétique volumétrique, l'hydrogène est généralement stocké dans un récipient à haute pression. En tant que stockage d'hydrogène pour véhicules, l'énergie gravimétrique devrait également être augmentée [33]. La densité énergétique volumétrique du stockage d'hydrogène à bord est 2,7 kWh/L et la densité énergétique gravimétrique est de 3 kWh/kg, ce qui est l'objectif technique fixé par le DOE (Département de l'Énergie) des États-Unis [34]. Les stockages d'hydrogène traditionnels en acier ne peuvent pas répondre à l'exigence de densité énergétique. Actuellement, les réservoirs d'hydrogène sont pour la plupart entièrement enveloppés de fibre de carbone avec revêtement métallique (Type III) ou revêtement en plastique (Type IV), qui a une densité énergétique de stockage élevée. La bouteille de gaz

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

enveloppée de fibre de carbone possède l'avantage de l'anticorrosion, sa longue durée de vie, sa légèreté, sa haute résistance et de son mode de défaillance LBB (Leak Before Break) [26].

Les bouteilles d'hydrogène embarquées doivent répondre à une exigence plus élevée concernant le taux de ravitaillement afin d'obtenir le même temps pour le remplissage du carburant essence. L'objectif de taux de ravitaillement fixé par Le DOE des États-Unis est de 1,5 kg/min [34]. Un taux de ravitaillement rapide peut entraîner l'échauffement et l'hétérogénéité à l'intérieur des cylindres [35]. Une température trop élevée du gaz a un effet sur les propriétés mécaniques et la sécurité du cylindre. Une haute température affaiblit les propriétés mécaniques de la doublure d'aluminium. La sensibilité de l'époxy à la température est importante. De plus, une température élevée peut également diminuer la résistance à la traction de couches de fibres de carbone et de fibres de verre [36].

De nombreux travaux ont été réalisés pour étudier le processus de ravitaillement des bouteilles d'hydrogène. Yang [35] a effectué une analyse thermodynamique de l'hydrogène en tant que gaz idéal et réel dans des conditions adiabatiques, isothermes ou diathermiques du réservoir de stockage. Mohamed et Paraschivoiu [37] ont étudié les effets des gaz réels lors de la libération d'hydrogène provenant d'une chambre à haute pression. Dicken et Mérida [38] ont mesuré et simulé les effets du temps de remplissage et de la masse initiale sur la répartition de la température dans une bouteille d'hydrogène durant le ravitaillement. Liu et coll. [26] et Lei et al. [39] ont étudié les effets du taux de remplissage massique, de la pression initiale et de la température ambiante sur les augmentations et les distributions de température au moyen d'expériences et de simulation numérique. Sitra et coll. [40], Maus et al. [41] et Liss et al. [42] ont décrit un algorithme et une plage de fonctionnement admissible implémentés dans une station de ravitaillement en hydrogène pour empêcher la surchauffe et la surpression du cylindre. Zheng et coll. [43] ont proposé un algorithme de remplissage optimisé pour atteindre un taux d'utilisation élevé et une vitesse de remplissage rapide de la station à hydrogène, basé sur le modèle d'optimisation multiobjectif. Heitsch et coll. [44] ont étudié la répartition de la température dans le cylindre en fonction des matériaux du revêtement et de l'isolation thermique extérieure. Immel et coll. [45] ont réalisé des études CFD 3D sur un réservoir type IV de 129 L, chargé jusqu'à 700 bars et ont comparé leurs résultats avec ceux issus des mesures expérimentales. Les auteurs ont utilisé le logiciel CFD Fluent 12 et le modèle de turbulence standard $k - \varepsilon$. Leur maillage contenait un total de 2,4 millions de cellules dans les régions solides et 1,4 million de cellules dans la région fluide. La formulation Aungier-Redlich- Kwong [46] a été utilisée. La déflexion du gaz froid injecté est visible à 177,8 s du remplissage. Il n'est pas possible d'estimer le gradient thermique dû à la saturation de la carte de couleurs utilisée pour le champ de température affiché. Après le remplissage, à 252 s, la différence de température entre la partie supérieure et la partie inférieure était d'environ 15 °C. Setoguchi et coll. [47] ont réalisé des études CFD 3D sur un réservoir de type III de 74 L, chargé jusqu'à 350 bar et comparé à des mesures expérimentales de Dicken et al. [38]. Ils ont utilisé le logiciel CFD Fluent 13.0 et le modèle de turbulence $k - \omega SST$. Leur maillage contenait un total de 96 772 cellules hexaédriques dans les régions solides et 209 360 cellules hexaédriques dans la région fluide. L'équation d'état Redlich-Kwong [48] est utilisé.

Cependant, peu d'études ont été réalisées sur les effets de la géométrie et le débit massique variable sur les températures dans une bouteille d'hydrogène sous pression pendant le ravitaillement.

Chapitre III: Méthodes numériques

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter la méthode des volumes finis, l'importance de la CFD dans divers domaines d'application, ses avantages et ses inconvénients.

III.2 Le rôle des méthodes numériques :

La tâche d'une méthode numérique est de résoudre une ou plusieurs équations différentielles en remplaçant les dérivées existantes par des expressions algébriques impliquant les variables inconnues. Lorsqu'une solution analytique n'est pas possible et qu'il faut s'appuyer sur une approximation numérique de l'équation différentielle, il est possible d'avoir la solution pour un nombre discret de points, avec une certaine erreur, en espérant que plus ce nombre de points est grand, plus notre solution approximative (ou numérique) sera proche de la solution exacte.

La figure 1 illustre la tâche de la méthode numérique, qui consiste à transformer une équation différentielle, définie dans un domaine D , en un système d'équations algébriques. Pour cela, les dérivées de l'équation différentielle doivent être remplacées par les valeurs discrètes de la fonction. Transformer les dérivées en termes contenant la fonction signifie intégrer l'équation différentielle, et les différentes manières de le faire sont ce qui caractérise le type de méthode numérique. Nous nous intéresserons dans ce texte uniquement à la méthode des volumes finis, mais d'autres peuvent être employées, comme par exemple les différences finies et les éléments finis, bien que la première soit rarement utilisée.

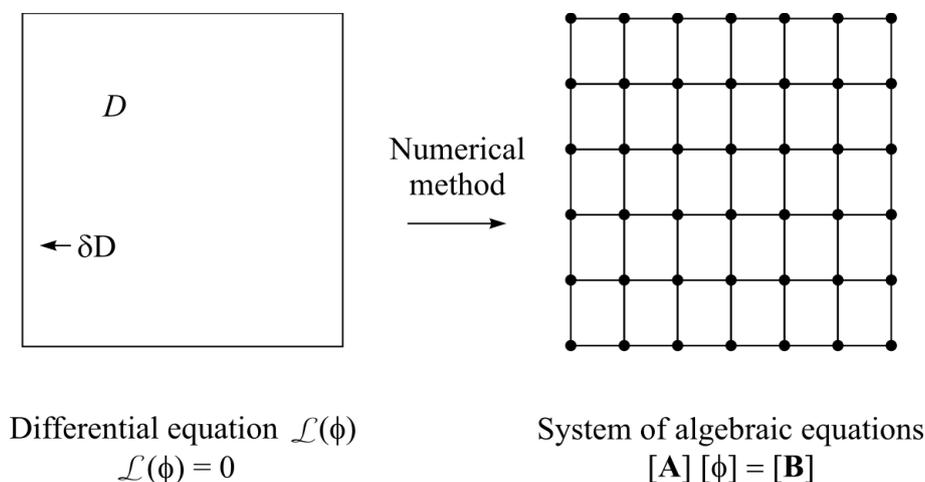


Figure 7 - Principe de la méthode numérique.

MÉTHODES NUMÉRIQUES

Lorsqu'un problème physique doit être approché numériquement et qu'il existe une représentation mathématique de celui-ci, il est obligatoire que la physique soit respectée à n'importe quel niveau de discrétisation. En d'autres termes, cela signifie que la conservation de la masse, par exemple, doit être satisfaite indépendamment de la taille de la grille utilisée. Pour satisfaire à cette règle la seule alternative est d'avoir les équations approchées (équations discrètes) obtenues par bilans aux volumes finis. On sait que toute méthode numérique, si elle est cohérente, produira les mêmes résultats si une grille très fine est utilisée. Le problème est que ce type de solution n'est pas réalisable en raison de la grande quantité de mémoire et du temps de calcul requis. Ainsi, nous devrions nous contenter d'une solution de niveau discret qui contient des erreurs de discrétisation, mais conserve les principes de conservation qui, en aucun cas, ne peuvent être sacrifiés.

III.3 Qu'est-ce que CFD ?

La dynamique des fluides computationnelle ou CFD est l'analyse de systèmes impliquant l'écoulement de fluides, le transfert de chaleur et les phénomènes associés tels que les réactions chimiques au moyen d'une simulation informatique. La technique est très puissante et couvre un large éventail de domaines d'application industriels et non industriels. Certains exemples sont :

- ✓ Aérodynamique des avions et des véhicules : portance et traînée
- ✓ Hydrodynamique des navires
- ✓ Centrale électrique
- ✓ Turbomachines : flux à l'intérieur de passages rotatifs, diffuseurs, etc.
- ✓ Génie électrique et électronique : refroidissement des équipements dont les microcircuits
- ✓ Génie des procédés chimiques : mélange et séparation, moulage de polymères
- ✓ Environnement externe et interne des bâtiments : charge de vent et chauffage/ventilation
- ✓ Génie maritime : charges sur les structures off-shore
- ✓ Ingénierie environnementale : répartition des polluants et des effluents
- ✓ Hydrologie et océanographie : débits des rivières, estuaires, océans
- ✓ Météorologie : prévisions météorologiques
- ✓ Génie biomédical : la circulation sanguine dans les artères et les veines

Depuis les années 1960, l'industrie aérospatiale a intégré les techniques CFD dans la conception et la fabrication des avions et des moteurs à réaction. Plus récemment, les méthodes ont été appliquées à la conception de moteurs à combustion interne, de chambres de combustion de turbines à gaz et de fours. De plus, les constructeurs automobiles prédisent désormais régulièrement les forces de traînée, les flux d'air sous le capot et l'environnement embarqué avec la CFD. De plus en plus, la CFD devient un élément essentiel dans la conception de produits et de processus industriels.

L'objectif ultime des développements dans le domaine des CFD est de fournir une capacité comparable à d'autres outils d'IAO (ingénierie assistée par ordinateur) tels que les codes d'analyse des contraintes. La principale raison pour laquelle le CFD est à la traîne est l'énorme complexité du comportement sous-jacent, qui exclut une description des écoulements

MÉTHODES NUMÉRIQUES

de fluides qui soit à la fois économique et suffisamment complète. La disponibilité d'un matériel informatique de haute performance abordable et l'introduction d'interfaces conviviales ont conduit à un récent regain d'intérêt, et le CFD est entré dans la communauté industrielle au sens large depuis les années 1990.

Les codes CFD sont structurés autour d'algorithmes numériques capables de résoudre les problèmes d'écoulement des fluides. Afin de fournir un accès facile à leur pouvoir de résolution, tous les progiciels CFD commerciaux incluent des interfaces utilisateur sophistiquées pour saisir les paramètres du problème et examiner les résultats. Ainsi, tous les codes contiennent trois éléments principaux :

- i. Un préprocesseur
- ii. Un solveur
- iii. Un post-processeur

Nous examinons brièvement la fonction de chacun de ces éléments dans le contexte d'un code CFD.

Préprocesseur :

Le prétraitement consiste à l'introduction d'un problème d'écoulement dans un programme CFD au moyen d'une interface conviviale et la transformation ultérieure de cette introduction en une forme adaptée à l'utilisation par le solveur. Les activités des utilisateurs au stade du prétraitement impliquent :

- Définition de la géométrie de la région d'intérêt : le domaine de calcul
- Génération du maillage : la subdivision du domaine en un certain nombre de sous-domaines plus petits et qui ne se chevauchent pas : une grille (ou un maillage) de cellules (des volumes de contrôle ou des éléments)
- Sélection des phénomènes physiques et chimiques à modéliser
- Définition des propriétés des fluides
- Spécification des conditions aux limites appropriées au niveau des cellules qui coïncident avec ou touchent la limite du domaine

La solution aux problèmes CFD (vitesse, pression, température, etc.) est définie aux nœuds à l'intérieur de chaque cellule. La précision d'une solution CFD est régie par le nombre de cellules dans la grille. En général, plus le nombre de cellules est grand, meilleure est la précision de la solution. La précision de la solution, son coût en termes de matériel informatique nécessaire et le temps de calcul dépendent de la finesse du maillage. Les maillages optimaux sont souvent non uniformes : plus fins dans les zones où de grandes variations se produisent d'un point à l'autre et plus grossiers dans les régions avec relativement peu de changements. Des efforts sont en cours pour développer des codes CFD dotés d'une capacité de maillage (auto-)adaptatif. En fin de compte, ces programmes affineront automatiquement la grille dans les zones de variations rapides. Un travail de développement de base important doit encore être effectué avant que ces techniques ne soient suffisamment robustes pour être incorporées dans les codes CFD commerciaux. À l'heure actuelle, il appartient toujours aux utilisateurs de CFD de concevoir une grille qui constitue un compromis approprié entre la précision souhaitée et le coût de la solution.

MÉTHODES NUMÉRIQUES

Solveur :

Il existe trois courants distincts de techniques de résolution numérique : les méthodes par différences finies, par éléments finis et spectrales. Nous nous concentrerons uniquement sur la méthode des volumes finis, une formulation spéciale aux différences finies qui est au cœur des codes CFD les mieux établis : CFX/ANSYS, FLUENT, PHOENICS et STAR-CD. En résumé, l'algorithme numérique comprend les étapes suivantes :

- Intégration des équations régissant l'écoulement des fluides sur tous les (finis) les volumes de contrôle du domaine
- Discrétisation : conversion des équations intégrales résultantes en un système d'équations algébriques
- Solution des équations algébriques par une méthode itérative

La première étape, l'intégration du volume de contrôle, distingue la méthode des volumes finis de toutes les autres techniques CFD. Les déclarations résultantes expriment la conservation (exacte) des propriétés pertinentes pour chaque cellule de taille finie. Cette relation claire entre l'algorithme numérique et le principe de conservation physique sous-jacent constitue l'un des principaux attraits de la méthode des volumes finis et rend ses concepts beaucoup plus simples à comprendre pour les ingénieurs que les méthodes des éléments finis et spectrales. La conservation d'une variable de débit générale ϕ , par exemple. Une composante de vitesse ou enthalpie, dans un volume de contrôle fini, peut être exprimée comme un équilibre entre les différents processus tendant à l'augmenter ou à la diminuer.

Les codes CFD contiennent des techniques de discrétisation adaptées au traitement des phénomènes clés de transport, la convection (transport dû à l'écoulement du fluide) et la diffusion (transport dû aux variations de ϕ de point à point) ainsi que pour les termes sources (associés à la création ou à la destruction de ϕ) et le taux de changement par rapport au temps. Les phénomènes physiques sous-jacents sont complexes et non linéaires, une approche de solution itérative est donc nécessaire. Les procédures de résolution les plus populaires sont le TDMA (tri-diagonal algorithme matriciel) solveur ligne par ligne des équations algébriques et l'algorithme SIMPLE pour assurer un lien correct entre la pression et la vitesse.

Les codes commerciaux peuvent également offrir à l'utilisateur une sélection d'autres produits, plus récentes, des techniques telles que les techniques itératives de points de Gauss – Seidel avec des accélérateurs multi-grilles et des méthodes de gradient conjugué.

Post-processeur :

Comme pour le pré-traitement, un énorme travail de développement a récemment eu lieu dans le domaine du post-traitement. En raison de la popularité croissante des postes de travail d'ingénierie, dont beaucoup disposent de capacités graphiques exceptionnelles, les principaux logiciels CFD sont désormais équipés d'outils polyvalents de visualisation de données. Ceux-ci inclus :

- Géométrie du domaine et affichage de la grille
- Tracés vectoriels
- Tracés de contours
- Tracés de surfaces 2D et 3D
- Suivi des particules

MÉTHODES NUMÉRIQUES

- Manipulation de la vue (translation, rotation, mise à l'échelle, etc.)
- Sortie PostScript couleur

Plus récemment, ces fonctionnalités peuvent également inclure une animation pour l'affichage dynamique des résultats, et en plus des graphiques, tous les codes produisent une sortie alphanumérique fiable et disposent de fonctionnalités d'exportation de données pour une manipulation ultérieure en dehors du code. Comme dans de nombreuses autres branches de CAE, les capacités de sortie graphique des codes CFD ont révolutionné la communication des idées aux non-spécialistes.

En résolvant des problèmes d'écoulement de fluide, nous devons être conscients que la physique sous-jacente est complexe et que les résultats générés par un code CFD sont au mieux aussi bons que la physique (et la chimie) qui y est intégrée et au pire aussi bon que son opérateur. En élaborant d'abord sur cette dernière question, l'utilisateur d'un code doit avoir des compétences dans un certain nombre de domaines. Avant de mettre en place et d'exécuter une simulation CFD, il y a une étape d'identification et de formulation du problème d'écoulement en termes de phénomènes physiques et chimiques à prendre en compte.

Les décisions typiques qui pourraient être nécessaires sont de savoir s'il faut modéliser un problème en deux ou trois dimensions, pour exclure les effets de la température ambiante, ou des variations de pression sur la densité d'un écoulement d'air, pour choisir de résoudre les équations d'écoulement turbulent ou de négliger les effets des petites bulles d'air dissoutes dans l'eau du robinet. Faire les bons choix nécessite de bonnes compétences en modélisation, car dans tous les problèmes, sauf les plus simples, nous devons formuler des hypothèses pour réduire la complexité à un niveau gérable tout en préservant les caractéristiques saillantes du problème en question. C'est le bien-fondé des simplifications introduites à ce stade qui détermine, au moins en partie, la qualité des informations générées par la CFD, l'utilisateur doit donc continuellement être conscient de toutes les hypothèses, claires et tacites, qui ont été faites.

Chapitre IV: Problématique

IV.1 Description du réservoir :

La géométrie comme illustrée sur la figure 13 est composée d'un cylindre et de deux demi-sphères, les dimensions sont détaillées dans le tableau 3. Il a été nécessaire de modifier la longueur intérieure du réservoir en raison du manque d'informations sur la géométrie exacte des zones concaves. La longueur est modifiée de sorte que le volume résultant est égal à 40 L.

Les matériaux qui composent le domaine solide sont l'aluminium et la fibre de carbone. En raison du coût de calcul élevé d'un modèle 3D, nous avons décidé de réaliser une simulation 2D. La construction de la géométrie 2D a été réalisée en établissant l'axe X comme axe de symétrie axiale. Le tube d'entrée a un diamètre interne de 3 mm et une épaisseur de 2 mm.

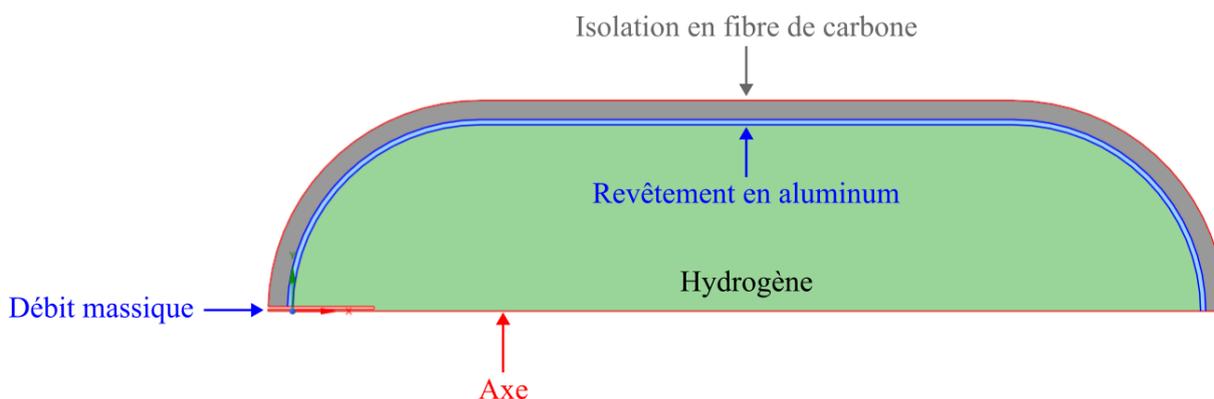


Figure 8 - La structure du cylindre à hydrogène.

Longueur interne (m)	Rayon intérieur (m)	Épaisseur du revêtement (m)	Épaisseur du stratifié (m)
0,702	0,145	0,004	0,015

Tableau 3 - Dimensions du réservoir.

IV.2 Maillage du domaine :

La région gazeuse et les parois sont maillées avec un maillage quadratique. La taille des mailles est de 4×4 mm au niveau de la zone fluide. Le maillage des murs est fixé à 1×4 mm pour garantir suffisamment de nœuds de calcul. Voir la figure 14.



Figure 9 - Maillage du domaine de calcul.

IV.3 Propriétés des matériaux :

Les propriétés des matériaux sont regroupées dans le tableau suivant :

Propriétés des matériaux			
Matériaux	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique Cp (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	Conductivité thermique (W/m.K)
Aluminium	2700	902	238
Fibre de carbone	1513	920	3.72

Tableau 4 - Propriétés des matériaux.

IV.4 Conditions initiales et aux limites :

Le groupe suivant regroupe les conditions aux limites et initiales :

	Valeur	Unité
Température ambiante	293	K
Coefficient de transfert de chaleur par convection	10	W/m ² . K
Débit massique	0.006-0.012	Kg/s
Pression initiale	2	MPa
Température initiale	293	K
Pression finale	35	MPa

Tableau 5 - Conditions initiales et aux limites.

IV.5 Équations gouvernantes et paramètres du solveur :

Avec l'équation des gaz réels, une équation de conservation de la masse (1), deux pour le mouvement (2) et un autre pour l'énergie (3) ont été résolus [49]. Un résumé des paramètres utilisés par le solveur dans ce travail sont présentés dans le tableau 6.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [U_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(K_h + \frac{C_p u_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + U_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

Où ρ est la densité, t le temps, K_h la conductivité thermique, μ et μ_t la viscosité et la viscosité turbulente, u la vitesse, C_p la chaleur spécifique à pression constante. L'indice i indique la direction et $i = 1, 2, 3$ désignent respectivement x, y, z , j et m ayant la même signification que i .

L'équation de l'énergie totale E est donnée par (4), avec h étant l'enthalpie. Et le tenseur des contraintes déviatoriques $(\tau_{ij})_{eff}$:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (4)$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_j}{\partial X_i} + \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_i}{\partial X_i} \delta_{ij} \quad (5)$$

Paramètre	Valeur
Solveur	Pressure-based (segregated)
Couplage pression-vitesse	SIMPLE
Discrétisation spatiale	Second-order/second-order UPWIND
Discrétisation temporelle	Second-order implicit
Discrétisation du gradient	Least-squares cell-based

Tableau 6 - Résumé des paramètres du solveur.

Chapitre V: Résultats et discussions

V.1 Validation numérique :

En général, la validation a montré de bons résultats. Comme dans la simulation faite par D. Melideo et al. [50]. En ajoutant le fait que le profil d'augmentation de la température suit de très près celui de [50], il est possible de conclure que les choix effectués lors du prétraitement et du solveur étaient corrects.

La version Ansys Fluent® 2024 R1 ACADEMIC a été utilisée comme logiciel de simulation. En raison de coût de calcul élevé du calcul, seules 50 s ont été simulées dans chaque cas. Après avoir effectué le temps tests d'indépendance par étapes avec des valeurs de 0,005, 0,002 et 0,001 s, une décision conservatrice a été conçu pour utiliser un pas de temps de 0,005 s dans toutes les simulations. La valeur de pression initiale dans tous simulations était de 2 MPa.

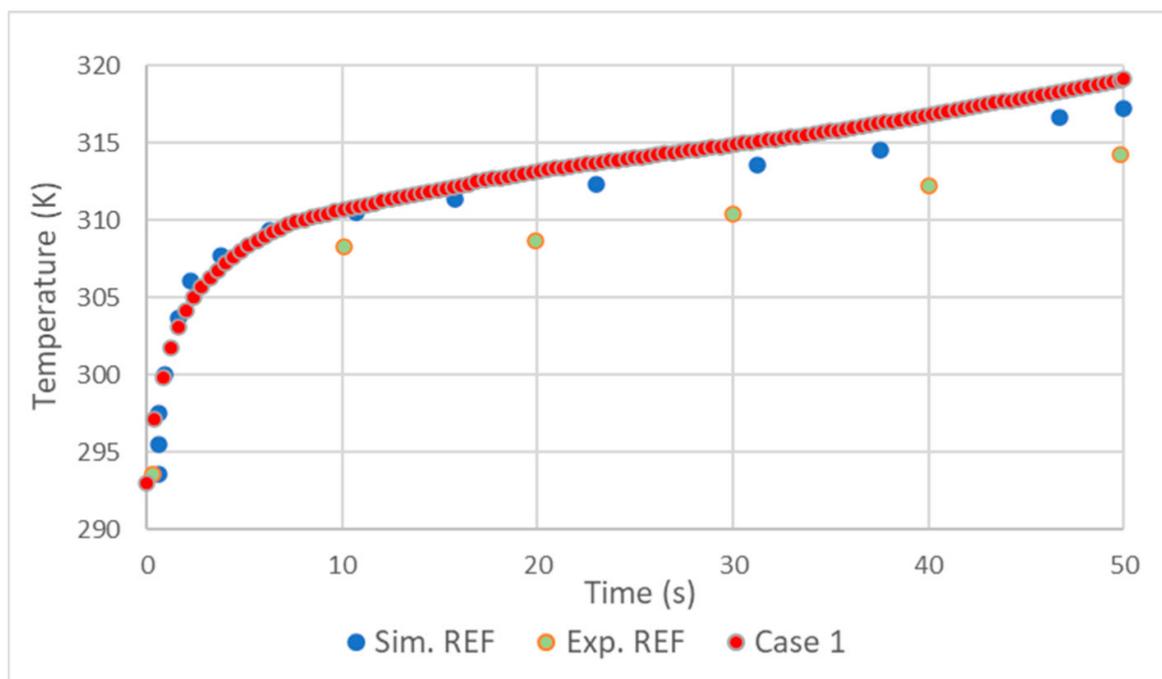


Figure 10 - Évolution de la température pendant les premières 50 secondes. Résultats obtenus par Melideo et al. [50].

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

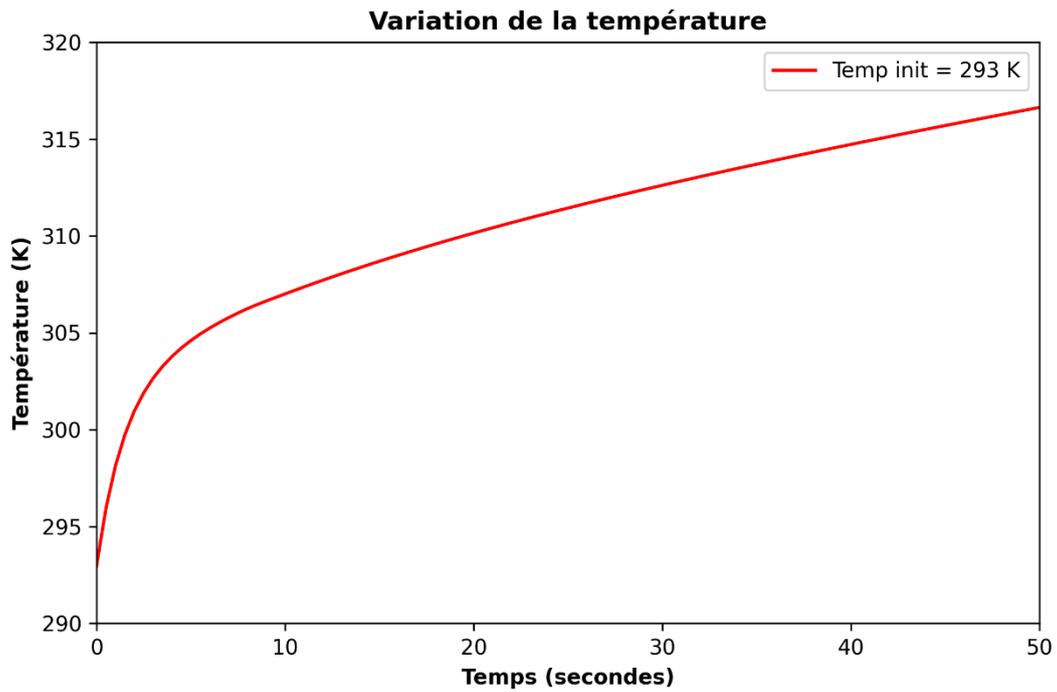


Figure 11 - Évolution de la température pendant les premières 50 secondes. Résultats obtenus par la présente étude.

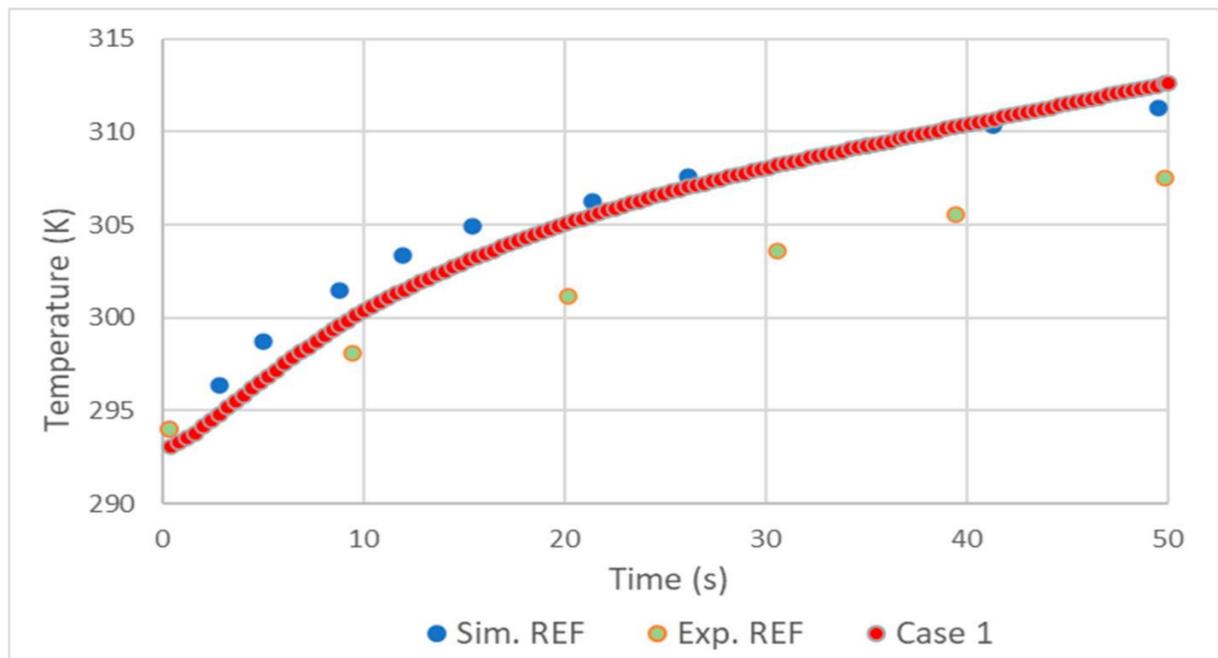


Figure 12 - Évolution de la température du revêtement en aluminium pendant les premières 50 secondes. Résultats obtenus par Melideo et al. [49].

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

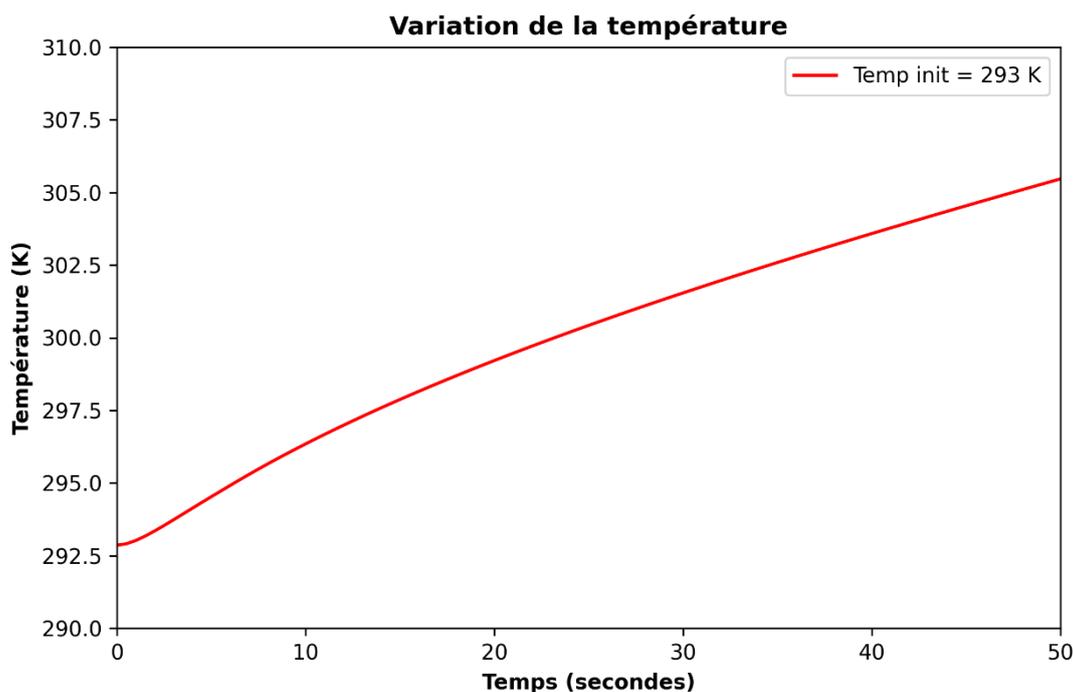


Figure 13 - Évolution de la température du revêtement en aluminium pendant les premières 50 secondes. Résultats obtenus par la présente étude.

V.2 Discussions des résultats :

V.2.1 La vitesse du gaz pendant le ravitaillement :

Les simulations numériques sont réalisées pour le remplissage de l'hydrogène avec une température initiale de 20°C, une pression initiale de 2 MPa et des débits massiques de 6, 8, 10 et 12 g/s et 20 °C pour la température ambiante. La distribution de la vitesse et de la température du gaz sont discutés séparément. La distribution de la vitesse du gaz à différents moments au cours le ravitaillement est illustré à la figure 19. À partir de cette dernière, la vitesse du gaz n'est pas uniformément répartie dans le cylindre avec la vitesse maximale à l'entrée du cylindre tout au long du remplissage. La vitesse du gaz diminue progressivement dans les directions axiale et radiale et atteint la valeur minimale dans la région caudale du cylindre. On peut également constater que la vitesse du gaz est élevée dans la région proche de la paroi interne de la première moitié du cylindre proche de l'entrée. Cela est dû au reflux dans cette région. Comme le ravitaillement continue, la vitesse du gaz à l'entrée du cylindre diminue. Elle diminue de 700 m/s à environ 80 m/s lorsque le temps augmente de 0,5 s à 50 s, comme le montre la figure 7.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

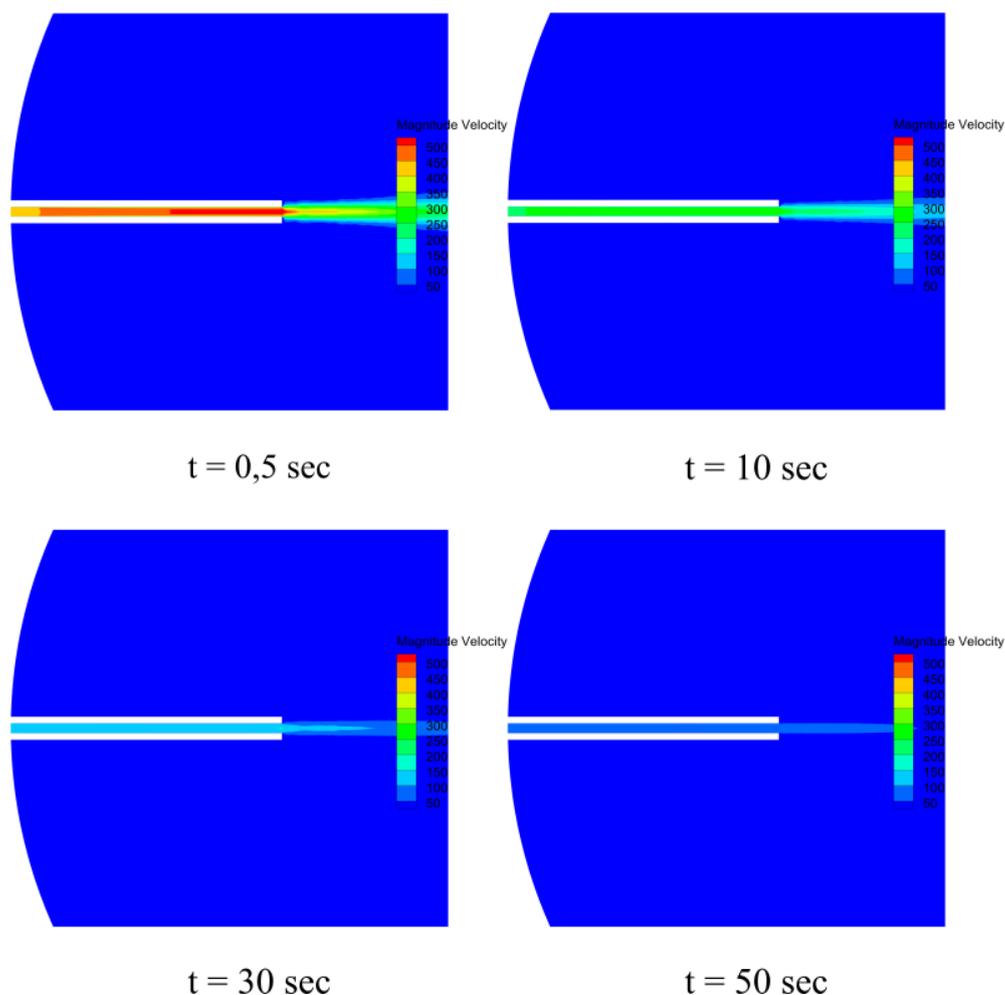


Figure 14 - Évolution de la vitesse à l'entrée du réservoir durant les premières 50 secondes.

V.2.2 L'influence du débit massique sur la vitesse de l'hydrogène à l'entrée du réservoir :

D'après la figure 20 on constate que la vitesse à l'entrée du réservoir est proportionnelle au débit massique, plus le débit est important plus la vitesse est grande. Cependant, on remarque que les vitesses convergent au fil du temps. Pour le débit $\dot{M} = 0,012 \text{ kg/s}$, la vitesse passe de 700 m/s à 90 m/s tandis que pour le débit $\dot{M} = 0,006 \text{ kg/s}$, la vitesse diminue de 434 m/s jusqu'à 82,54 m/s lorsque le temps atteint 50 secondes. Pour une durée supérieure à 50 secondes on remarque la convergence des vitesses vers une valeur unique.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

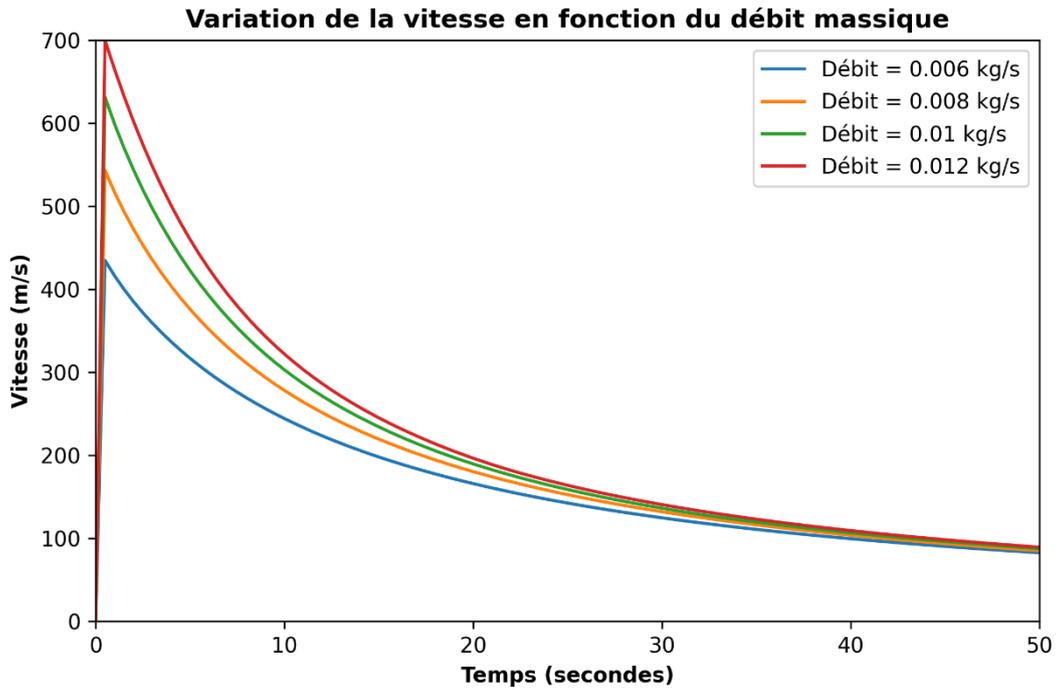
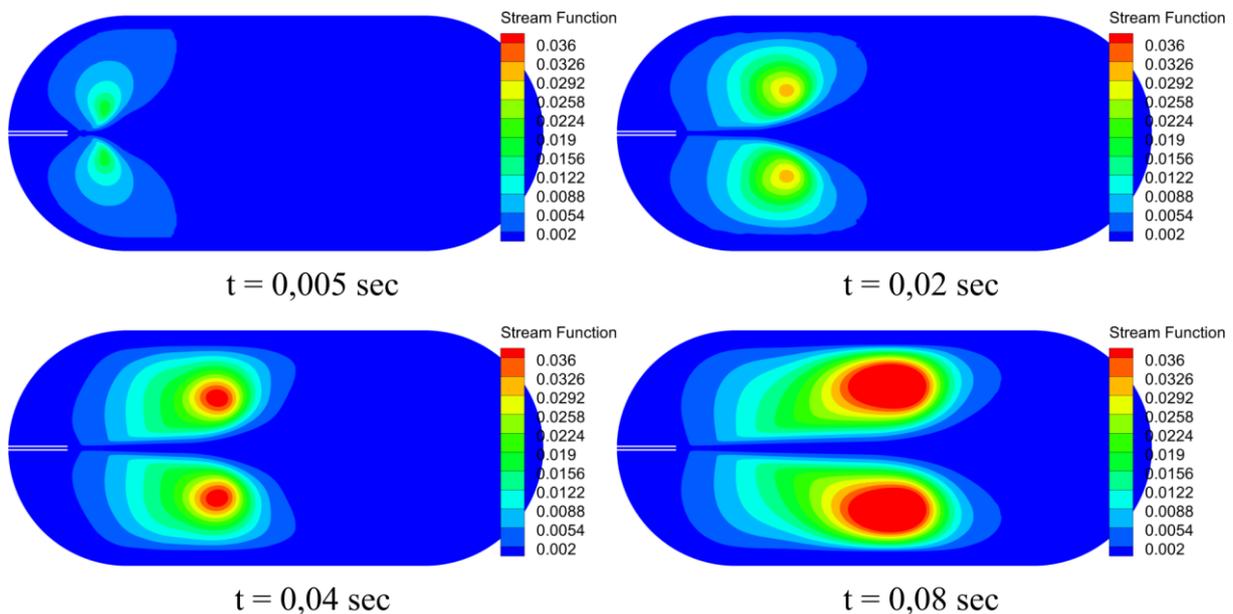


Figure 15 - Variation de la vitesse en fonction du débit massique.

V.2.3 Les fonctions de courant :

Vu que la vitesse au début du remplissage est conséquente, les lignes de courant commencent à se former à l'intérieur du réservoir en un temps record d'environ 0,1 sec. Voir la figure 21. À $t = 0,005$ sec, de petits tourbillons se forment à proximité de l'entrée du réservoir puis commencent à migrer vers la moitié droite du cylindre à cause de la force du jet d'hydrogène, à $t = 0,08$ sec les deux vortex se situent au milieu. À $t = 0,2$ sec on remarque que les deux tourbillons sont emprisonnés à droite sous leurs forme finale.



RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

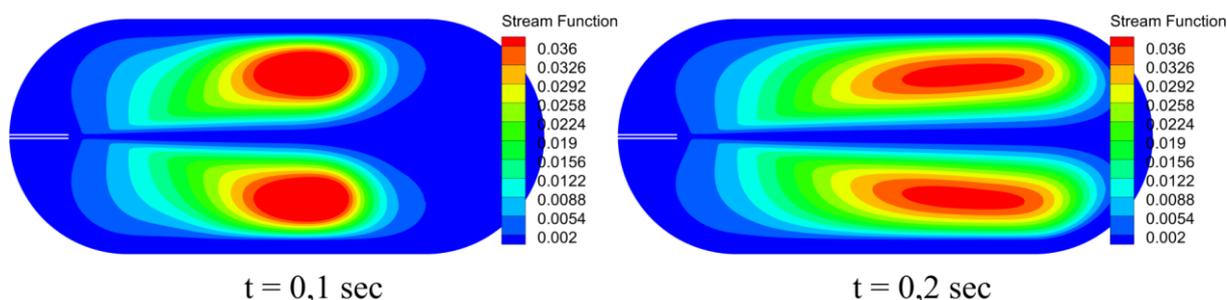


Figure 16 - Évolution des fonctions de courant pendant 0,2 seconde du début du remplissage.

V.2.4 La variation de la température pendant le ravitaillement :

Pendant le processus de ravitaillement, une grande attention est accordée à la répartition de la température au sein du réservoir à hydrogène. L'évolution de la température à différents moments pendant le ravitaillement est indiquée sur la figure 22. La température non uniforme du gaz à l'intérieur du cylindre augmente progressivement dans les deux directions axiale et radiale. Tout au long du remplissage, la plus haute température se produit dans la région caudale tandis que la plus basse près de l'entrée. La température maximale dans le cylindre augmente rapidement au début du ravitaillement, puis l'augmentation ralentit vers une température stable vers la fin du remplissage comme le montre la figure 10. Pendant ravitaillement, la température maximale augmente de 20 °C à 51 °C avec un temps allant de $0,5 \text{ s}$ à 50 s pour le débit $\dot{M} = 0.006 \text{ kg/s}$.

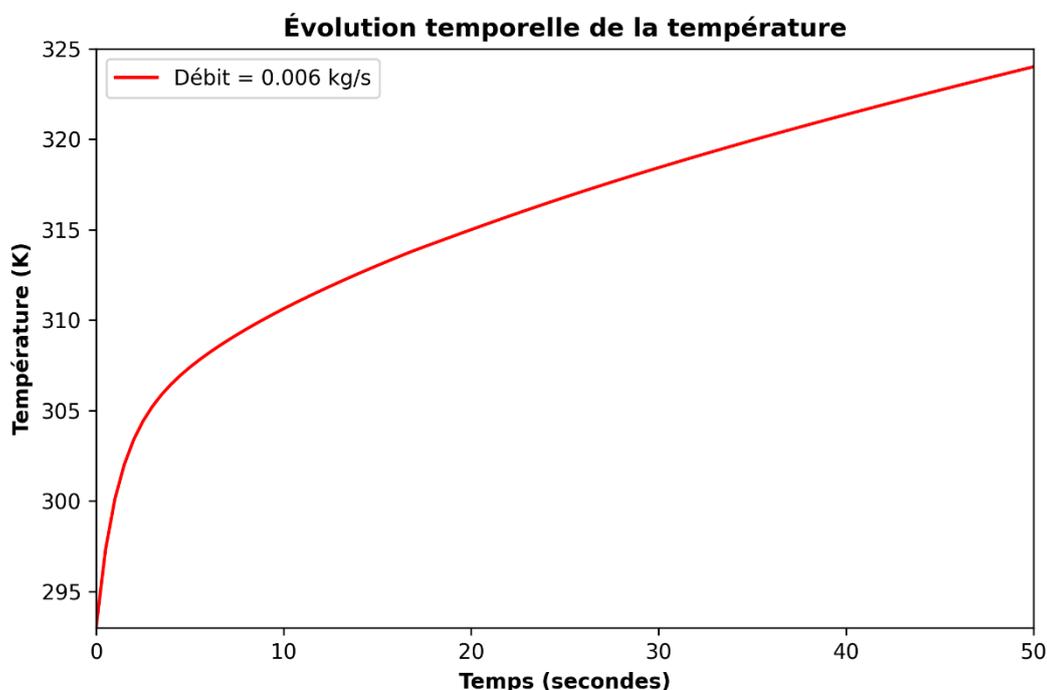


Figure 17 - Évolution de la température à l'intérieur du réservoir pendant les premières 50 secondes.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Avec une augmentation progressive de la température du gaz dans cylindre, la chaleur est transférée du gaz à la paroi intérieure et entraîne une élévation de température dans le revêtement en aluminium. Entre-temps, une partie de la chaleur absorbée par la paroi intérieure est transférée au composite fibre de carbone et enfin, la chaleur se dissipe dans le milieu ambiant par convection naturelle.

V.2.5 Impact du débit massique sur la température maximale du gaz :

La température maximale à l'intérieur du réservoir est proportionnelle au débit massique comme le montre la figure 23. La température initiale est égale à 293 K, cette dernière augmente en fonction du temps, on remarque l'augmentation rapide au début du ravitaillement, puis l'accroissement ralentit vers une température finale.

La diminution de la densité du gaz (lors de l'expansion) entraîne une diminution du nombre de collisions par unité de temps, donc une diminution de l'énergie potentielle, ce qui, du fait de la conservation de l'énergie, entraîne une augmentation de l'énergie cinétique et donc de la température. Le dihydrogène est un des trois gaz pour lesquels ce mécanisme prédomine lors d'une détente adiabatique.

On notera que les températures finales du gaz à $t = 50$ sec sont respectivement 324 K, 329, 89 K, 334,53 K et 338,99 K pour les différents débits massiques.

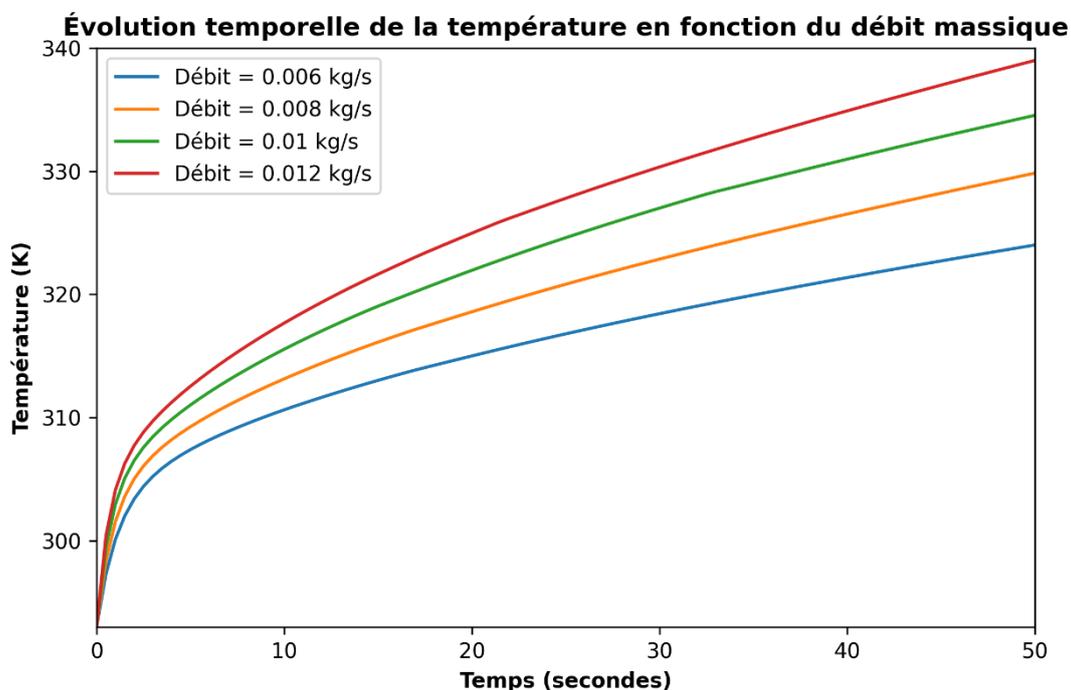


Figure 18 - Impact du débit massique sur la température maximale du gaz.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

V.2.6 Contours de température en fonction du débit massique :

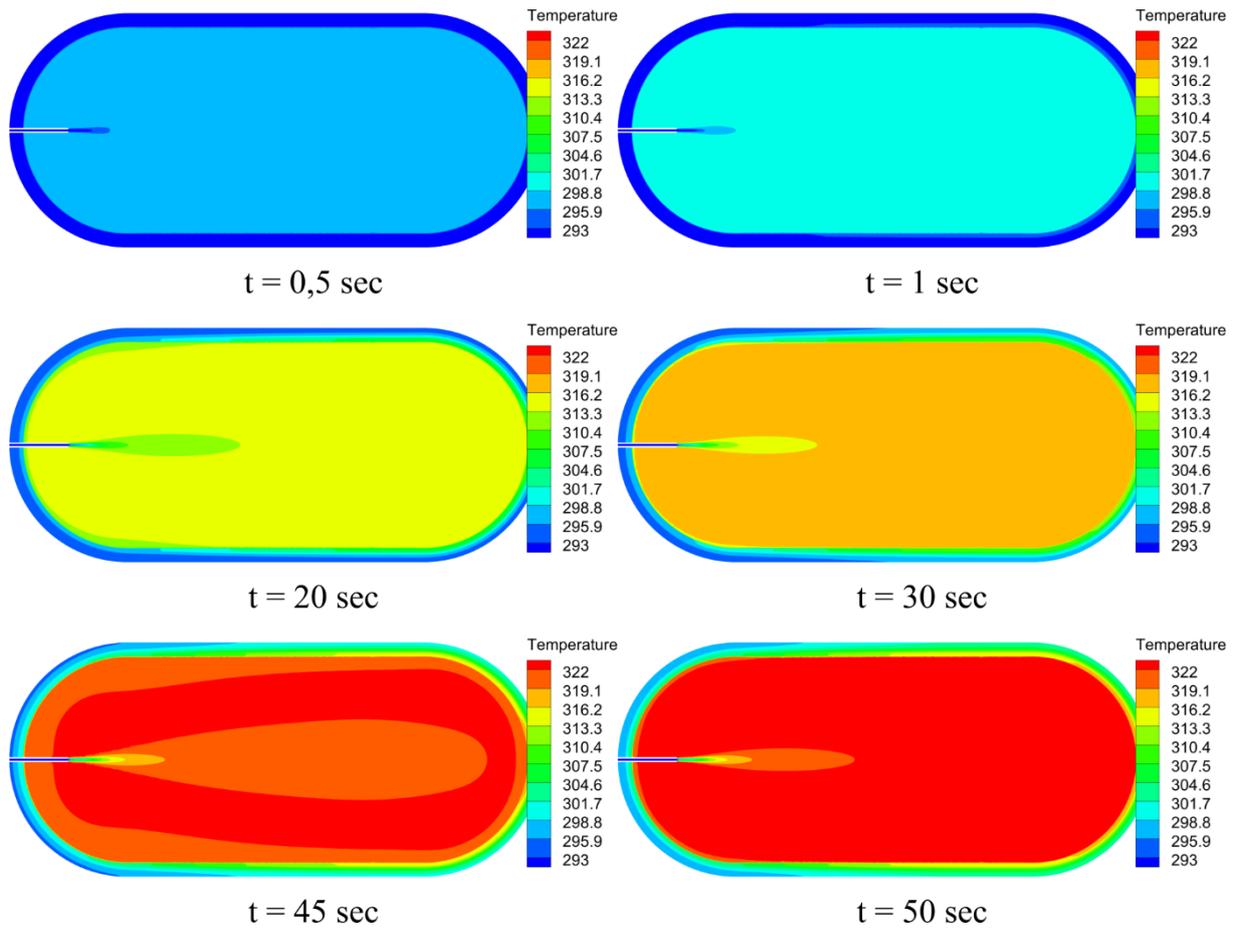
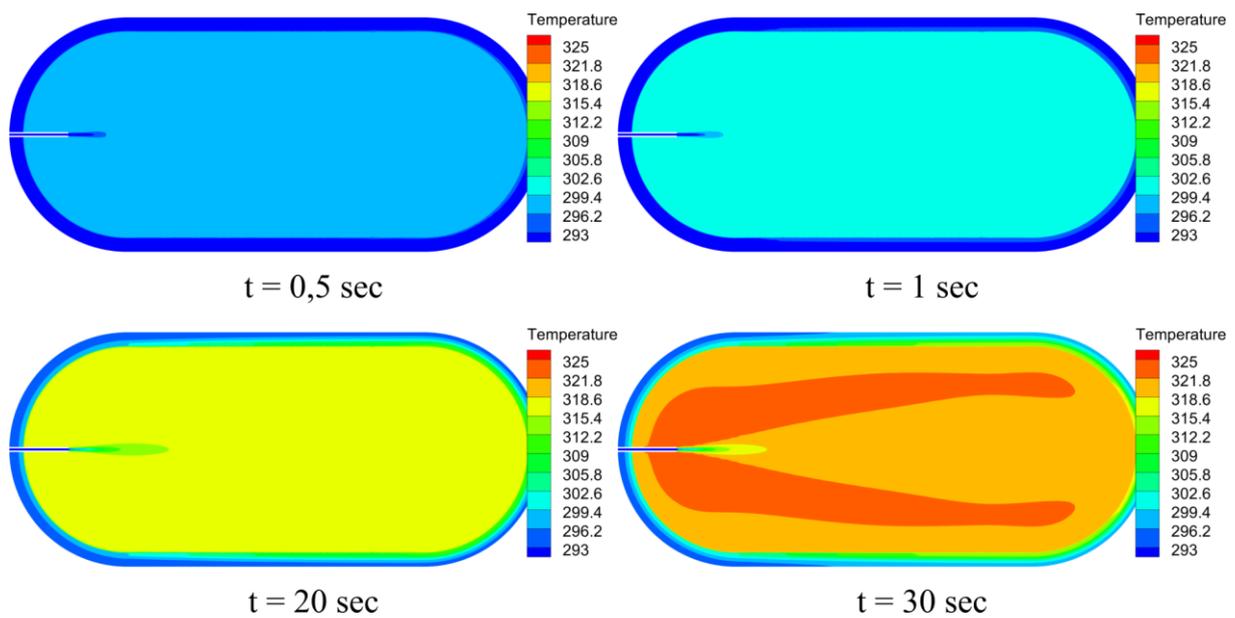


Figure 19 - Contours de température pour le débit 0,006 kg/s.



RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

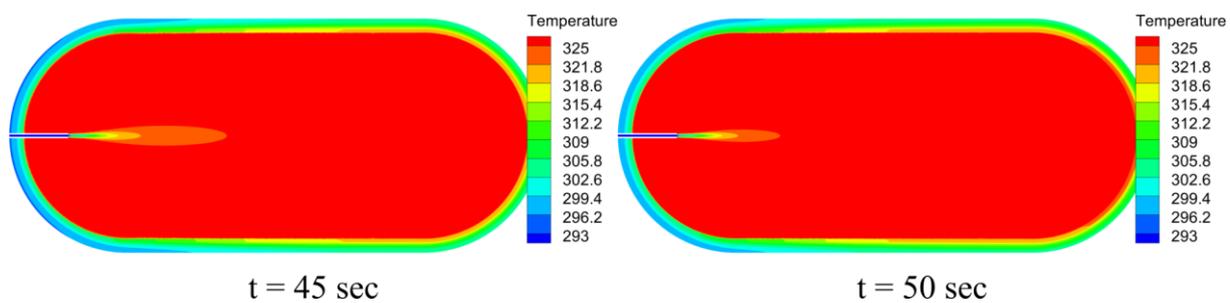


Figure 20 - Contours de température pour le débit 0,008 kg/s.

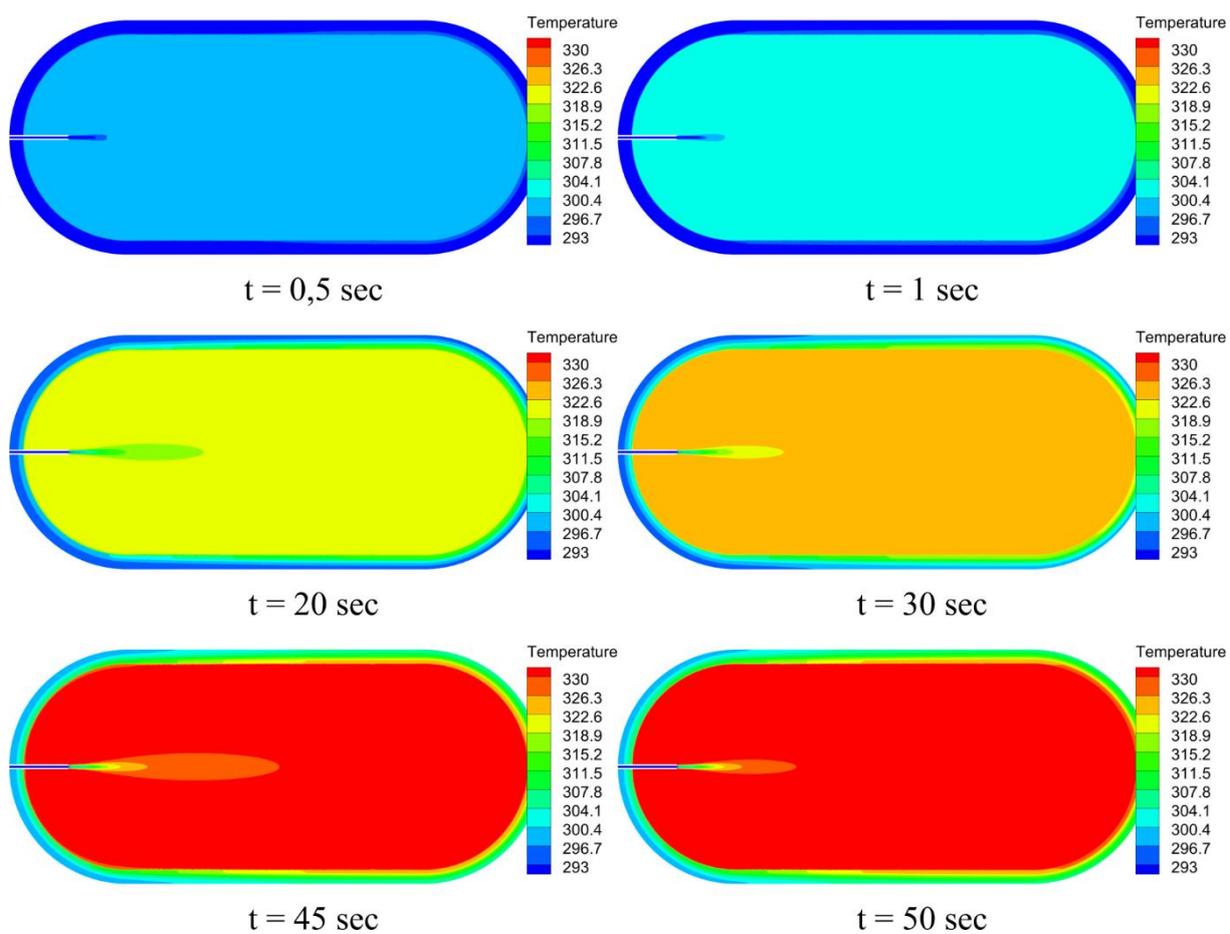
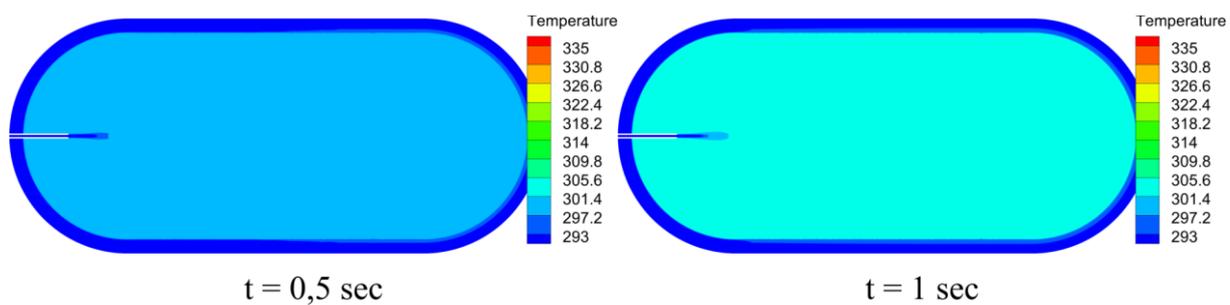


Figure 21 - Contours de température pour le débit 0,01 kg/s.



RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

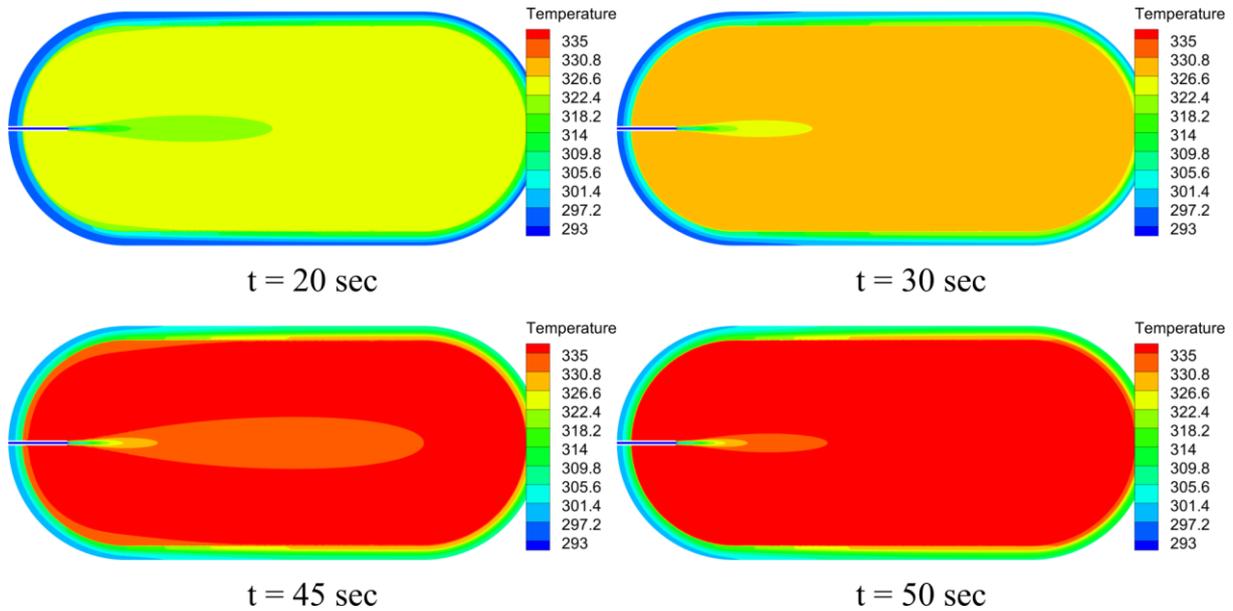


Figure 22 - Contours de température pour le débit 0,012 kg/s.

V.2.7 Variation de la pression en fonction du débit massique :

Comme le montre la figure 28, la pression est proportionnelle au débit massique. On rappelle que la pression initiale est de 2 MPa. La pression accroît vu que l'hydrogène est injecté dans le réservoir au fil du temps. On remarque aussi que l'écart de pression entre les quatre débits augmente au fil du temps.

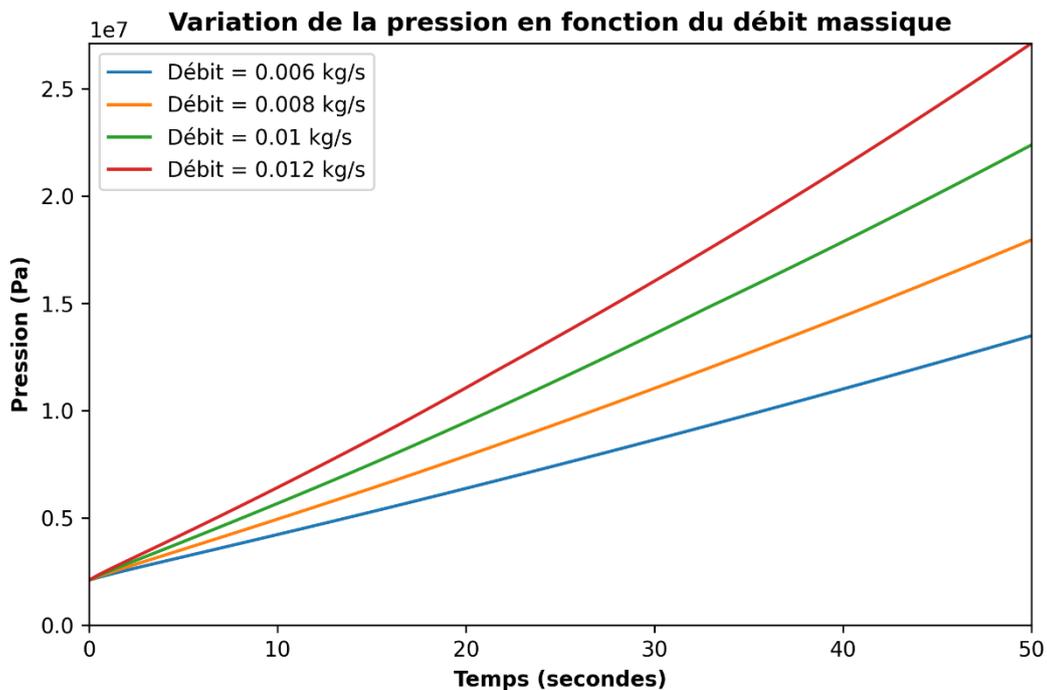


Figure 23 - Variation de la pression en fonction du débit massique.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

V.2.8 Distribution de la température au niveau des parois :

Avec une augmentation progressive de la température du gaz dans cylindre, la chaleur est transférée du gaz à la paroi intérieure et entraîne une élévation de température dans le revêtement en aluminium. Dans l'intervalle, une partie de cette chaleur absorbée par la paroi intérieure est transférée à l'isolation en fibre de carbone. Finalement, la chaleur se dissipe dans le milieu ambiant par convection naturelle. La figure 29 illustre la distribution de la température au niveau de milieu fluide, le revêtement en aluminium ainsi qu'au niveau de l'isolation pour un débit de 0,008 kg/s.

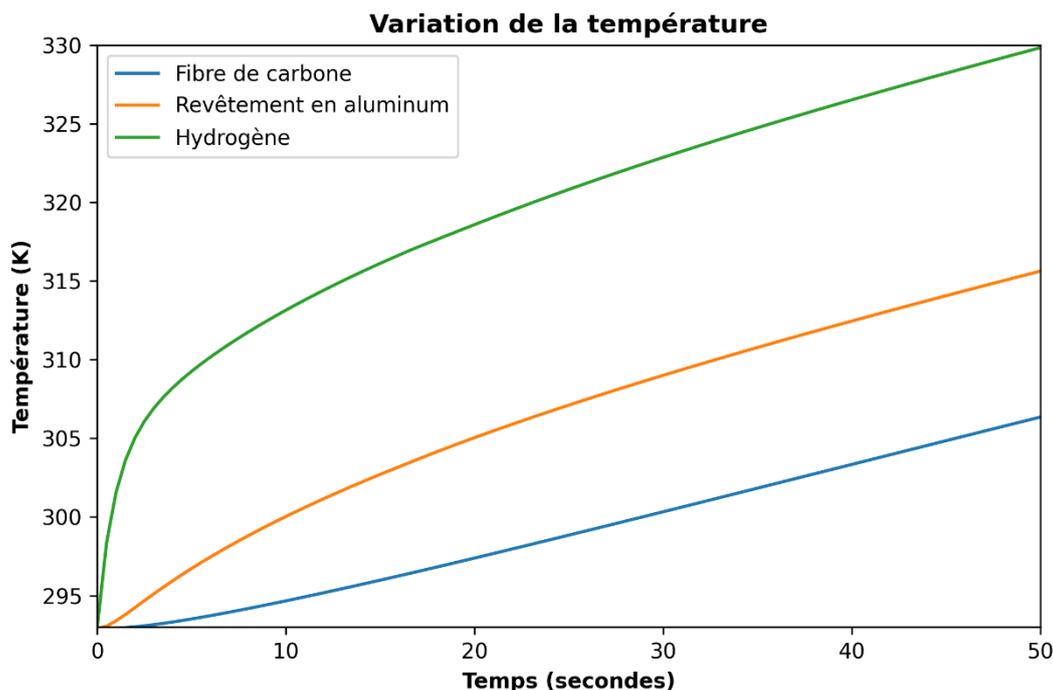


Figure 24 - Distribution de la température au niveau des parois.

Il est évident que la variation de la température au niveau du milieu fluide est plus importante, Concernant le revêtement en aluminium, vu que sa conductivité thermique est beaucoup plus élevée que celle de l'isolation en fibre de carbone on constate qu'à chaque instant durant le remplissage, la température au niveau de ce dernier est plus importante par rapport à celle de l'isolation.

V.2.9 Impact de la température initiale :

La diminution de la température initiale conduit à la baisse de la température maximale dans le réservoir d'hydrogène comme illustré dans la figure 18. Durant le même intervalle temporel, pour des températures initiales de 283 K, 293 K et 303 K les températures finales sont respectivement 312.98 K, 324 K et 334.87 K, la différence de température est d'environ 30 °C pour les trois cas. Il est important d'injecter l'hydrogène avec des températures relativement basses afin d'éviter des températures finales excessives.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

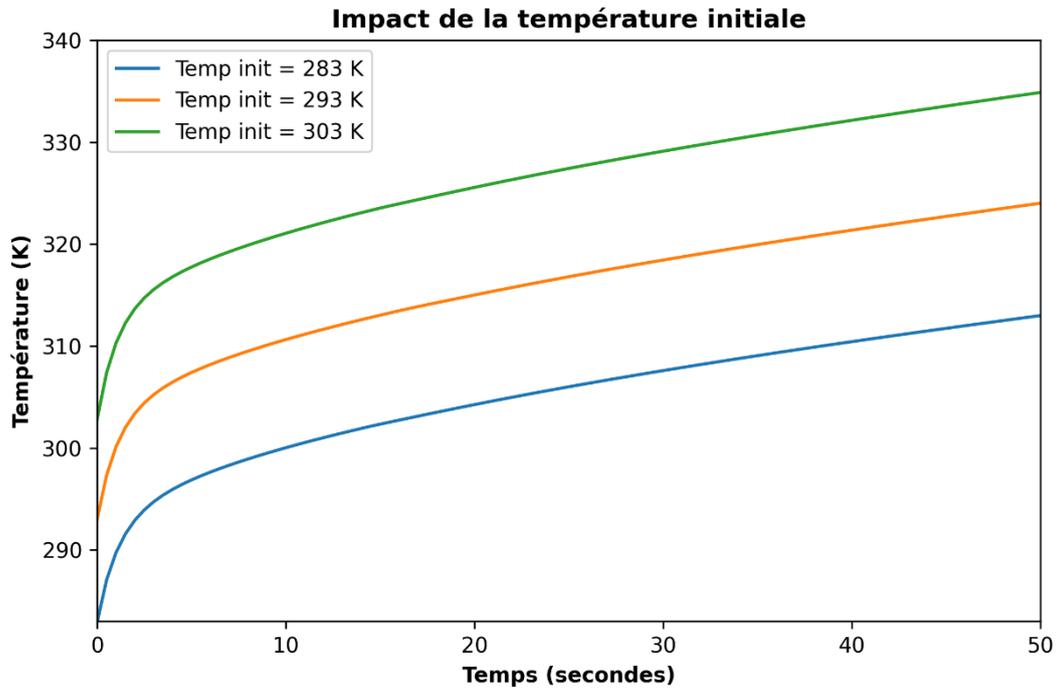


Figure 25 - Impact de la température initiale sur la température maximale de l'hydrogène.

V.2.10 Effet de l'isolation en fibre de carbone :

Dans cette partie de notre travail, nous avons retiré l'isolation en fibre de carbone afin d'évaluer son impact sur le transfert de chaleur entre l'hydrogène comprimé et le milieu ambiant, donc le réservoir est constitué seulement du volume consacré au gaz ainsi que le revêtement en aluminium comme le montre la figure 31.

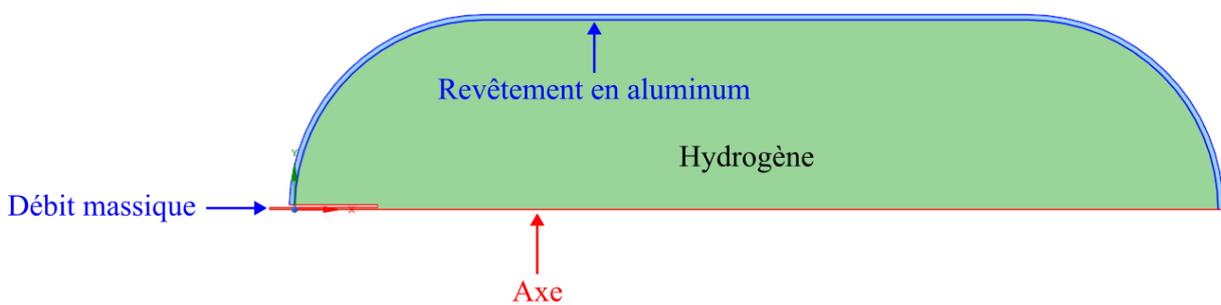


Figure 26 - Réservoir sans isolation en fibre de carbone.

On peut vérifier que lorsque les matériaux étaient retirés du réservoir, il y avait une forte augmentation de la température. Cela s'est produit parce que l'aluminium commence à absorber et à conduire la chaleur de l'hydrogène dès le début, réduisant ainsi sa température.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

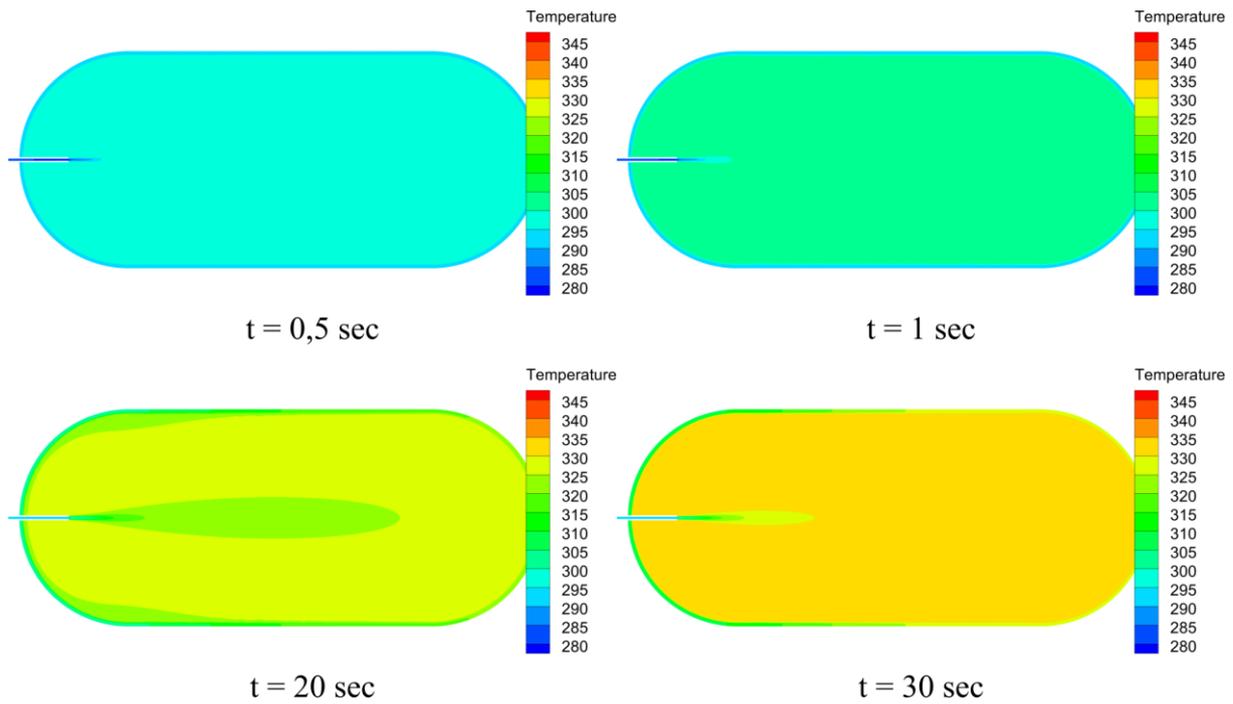


Figure 27 - Contours de température pour le réservoir sans fibre de carbone.

V.2.11 Effet du rapport longueur/diamètre :

Pour étudier l'effet du ratio longueur/diamètre, des simulations numériques ont été effectuées avec $L/D_i = 3,625$ (Voir la figure 33). Les variations de la température maximale en fonction du temps pour les deux réservoirs ($L/D_i = 3,625$ et $L/D_i = 4,97$) et pour un débit de $\dot{M} = 0,001 \text{ kg/s}$ sont illustrées à la Fig. 4. Il peut être observé que la température maximale dans le deuxième réservoir est inférieure à celle dans le premier.

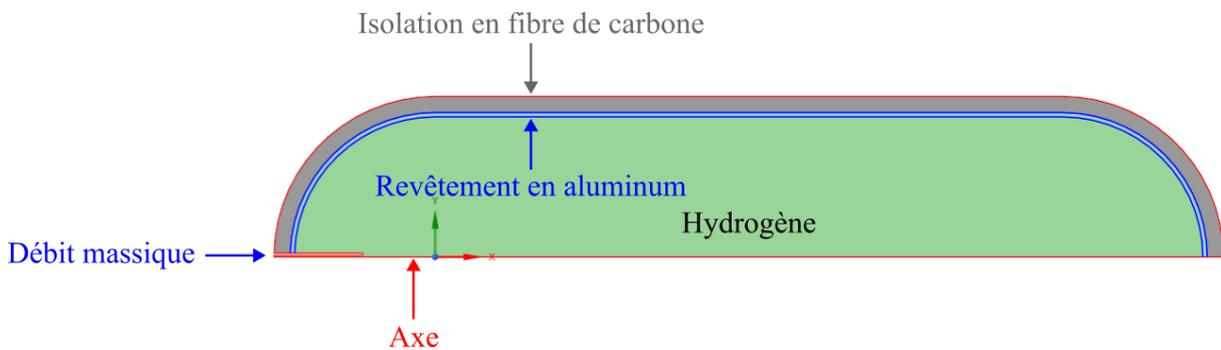


Figure 28 - Réservoir avec un rapport L/D_i différent.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Pour $L/D_i = 0,3625$, $T_{max} = 331.46$ K tandis que pour $L/D_i = 4,97$, $T_{max} = 338.99$ K, Un écart de 7,53 K est enregistré.

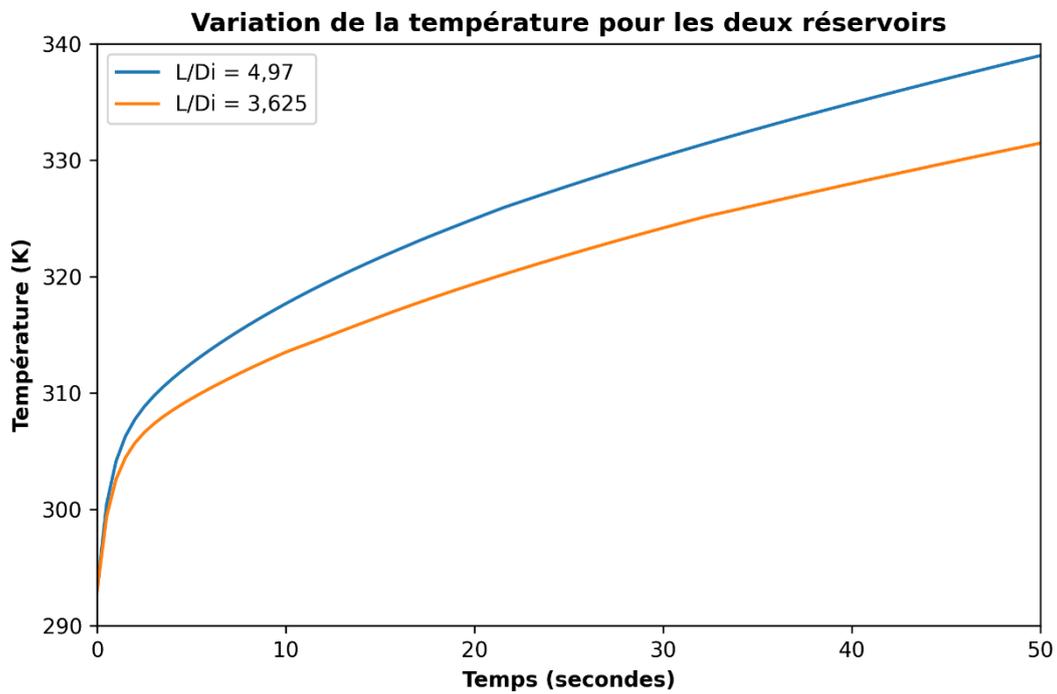


Figure 29 - Variation de la température pour les deux réservoirs.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

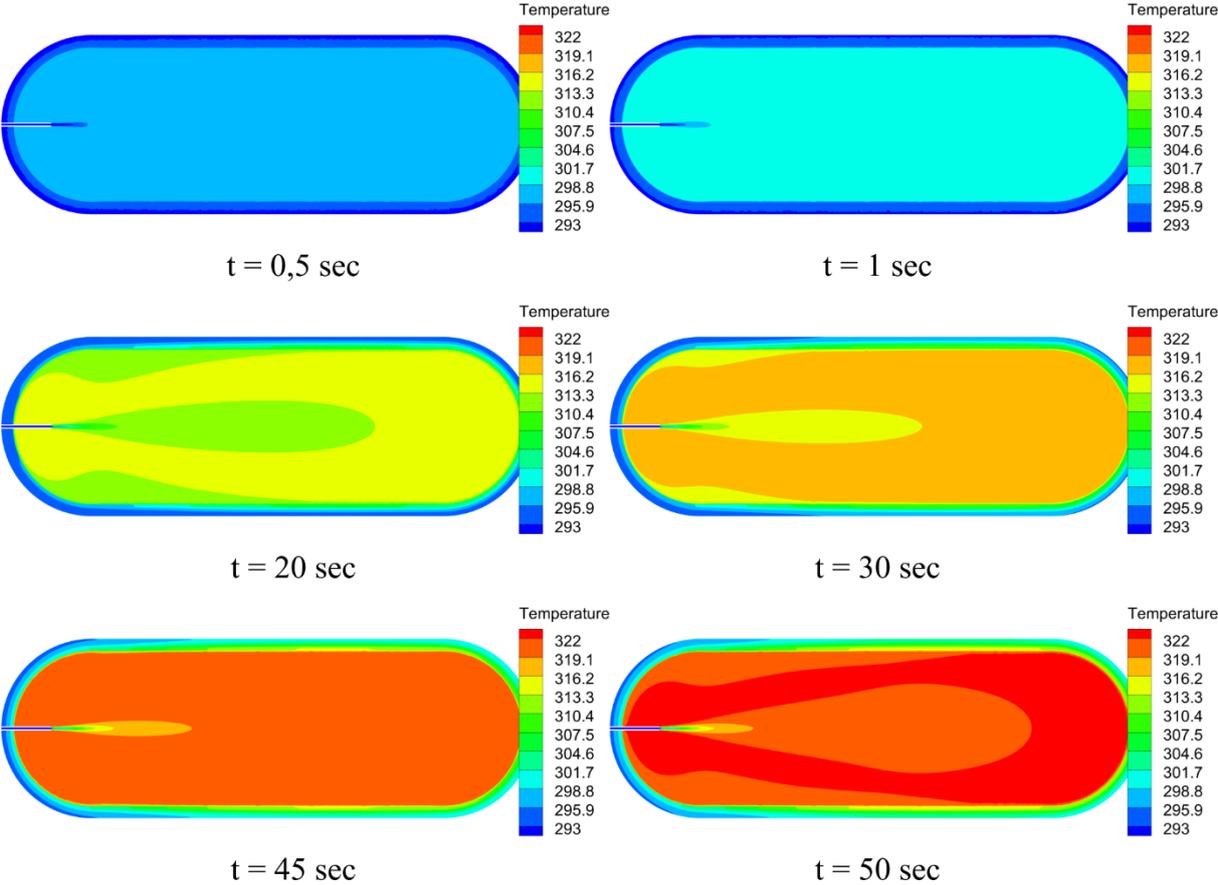


Figure 30 - Contours de température pour le débit 0,006 kg/s.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

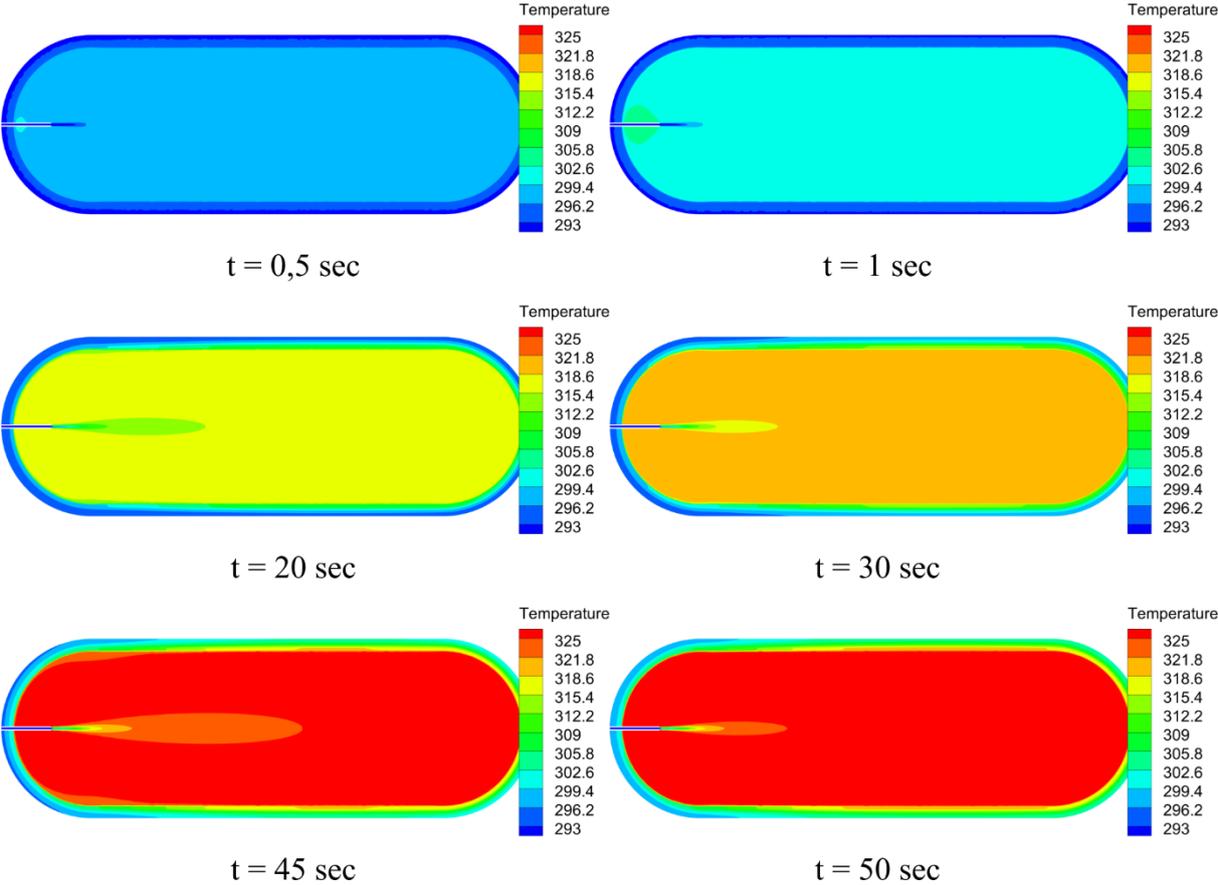


Figure 31 - Contours de température pour le débit 0,008 kg/s.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

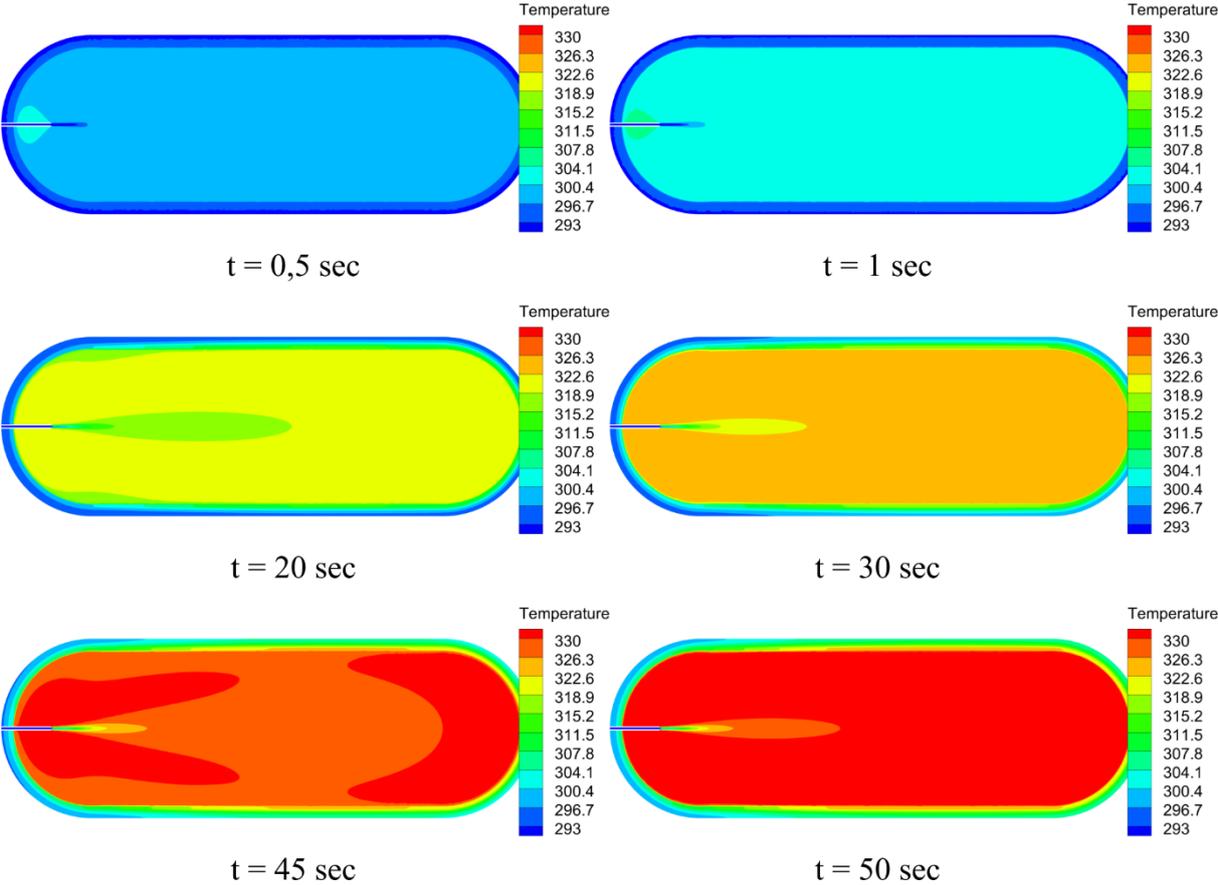


Figure 32 - Contours de température pour le débit 0,01 kg/s.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

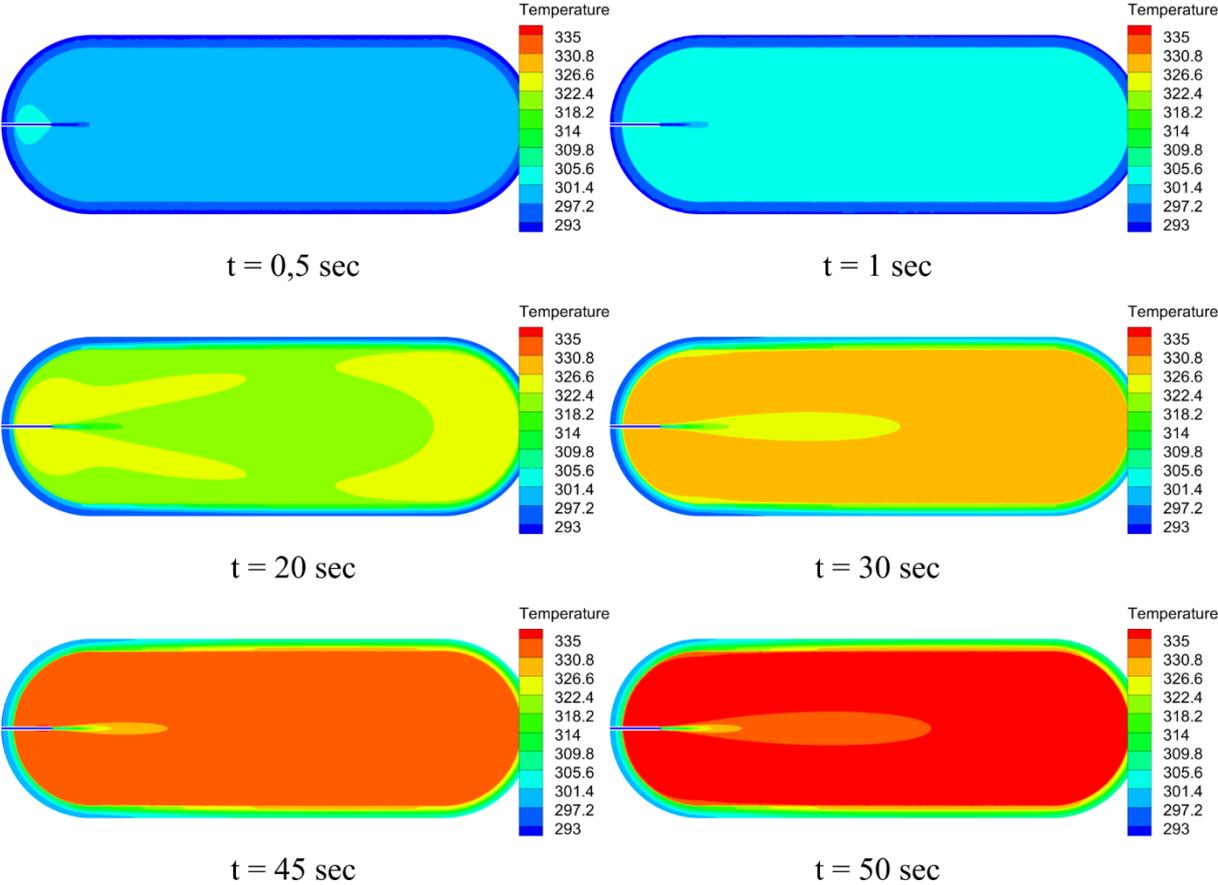


Figure 33 - Contours de température pour le débit 0,012 kg/s.

Conclusion générale

Le présent travail visait à réaliser des simulations numériques dans une cuve de type III de 70 MPa pour la pression de fonctionnement normale (NWP), d'un volume de 40 litres et avec des conditions de débit constant pour analyser l'influence de plusieurs paramètres clés. À partir des résultats de simulation, la répartition de la température dans le cylindre a été obtenue et l'effet du taux de remplissage massique, de la pression initiale et de la température ambiante sur l'augmentation maximale de la température ont été révélés. Les conclusions peuvent être tirées comme suit :

- En raison de la nature compressible de l'écoulement, la variation du débit massique et, par conséquent, de la vitesse a des implications significatives sur les températures le long du tube d'entrée et au niveau de l'espace réservé à l'hydrogène gazeux. À mesure que la vitesse augmente, la température maximale augmente aussi au fil du temps de remplissage du réservoir.
- Les réservoirs adiabatiques provoquent des augmentations de température de l'ordre de 50 à 60 °C par rapport à leurs homologues non adiabatiques.
- Pour la paroi du cylindre, la température dans le revêtement en aluminium est supérieure à celle dans l'isolation en fibre de carbone.
- L'augmentation maximale de la température lors du ravitaillement dépend principalement du débit massique de remplissage, et des valeurs initiales de la température et de la pression. Il connaît une croissance exponentielle à mesure que le taux de remplissage massique augmente.
- L'augmentation de la température à l'intérieur du cylindre avec un rapport longueur/diamètre (L/D_i) plus grand est plus élevée que celle avec un rapport plus petit.

Références bibliographiques :

- [1] « Fuel Cells », Energy.gov. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- [2] « Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement (CMA) | UNFCCC ». Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-serving-as-the-meeting-of-the-parties-to-the-paris-agreement-cma>
- [3] « North2 | Kickstarting the green hydrogen economy », North2 | Kickstarting the green hydrogen economy. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.north2.eu/>
- [4] « Air Liquide inaugure la plus grande unité du monde de production d'hydrogène décarboné par électrolyse à membrane au Canada | Air Liquide ». Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.airliquide.com/fr/groupe/communiqués-presse-actualités/26-01-2021/air-liquide-inaugure-la-plus-grande-unite-du-monde-de-production-dhydrogene-decarbone-par>
- [5] D. G. Caglayan *et al.*, « Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, n° 11, p. 6793-6805, févr. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.161.
- [6] « Hydrogen Properties | H2tools | Hydrogen Tools ». Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-properties>
- [7] E. Rivard, M. Trudeau, et K. Zaghbi, « Hydrogen Storage for Mobility: A Review », *Materials*, vol. 12, n° 12, p. 1973, juin 2019, doi: 10.3390/ma12121973.
- [8] D. Hao, X. Wang, Y. Zhang, R. Wang, G. Chen, et J. Li, « Experimental Study on Hydrogen Leakage and Emission of Fuel Cell Vehicles in Confined Spaces », *Automot. Innov.*, vol. 3, n° 2, p. 111-122, juin 2020, doi: 10.1007/s42154-020-00096-z.
- [9] « Toyota Mirai | Berline Hydrogène 0% d'émissions ». Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.toyota.fr/vehicules-neufs/mirai>
- [10] A. Sartbaeva, V. L. Kuznetsov, S. A. Wells, et P. P. Edwards, « Hydrogen nexus in a sustainable energy future », *Energy Environ. Sci.*, vol. 1, n° 1, p. 79, 2008, doi: 10.1039/b810104n.
- [11] « Energy Observer 2, un navire démonstrateur qui carbure à l'hydrogène liquide », Energy Observer. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.energy-observer.org/fr/ressources/energy-observer-2-hydrogene-liquide>
- [12] H2-View, « Hydrogen-powered Airbus A380 to take flight this decade », H2 View. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.h2-view.com/story/hydrogen-powered-airbus-a380-to-take-flight-this-decade/2067048.article/>

BIBLIOGRAPHIE

- [13] « Alstom Coradia iLint – the world's 1st hydrogen powered passenger train », Alstom. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train>
- [14] « Hyundai XCIENT Fuel Cell Heads to Europe for Commercial Use ». Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hyundai.news/eu/articles/press-releases/hyundai-xcient-fuel-cell-heads-to-europe-for-commercial-use.html>
- [15] « Accueil », Pragma Industries. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pragma-industries.com/>
- [16] « Hydrogen Storage », Energy.gov. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [17] C. P. Fowler, A. C. Orifici, et C. H. Wang, « A review of toroidal composite pressure vessel optimisation and damage tolerant design for high pressure gaseous fuel storage », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, n° 47, p. 22067-22089, déc. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.10.039.
- [18] Fuel Cell Standards Committee, « Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles ». SAE International. doi: 10.4271/J2601_201612.
- [19] D. Melideo, D. Baraldi, M. C. Galassi, R. Ortiz Cebolla, B. Acosta Iborra, et P. Moretto, « CFD model performance benchmark of fast filling simulations of hydrogen tanks with pre-cooling », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, n° 9, p. 4389-4395, mars 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.12.196.
- [20] C. J. B. Dicken, « Temperature distribution within a compressed gas cylinder during filling », University of British Columbia, 2006. doi: 10.14288/1.0080715.
- [21] « Joule–Thomson effect », *Wikipedia*. 7 juin 2024. Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Joule%E2%80%93Thomson_effect&oldid=1227772558
- [22] A. Richel, « Bleu, vert, gris : les couleurs de l'hydrogène ». Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.chem4us.be/energie/h2/>
- [23] Hirotsu, Ryuichi, Terada, Toshihiro, Tamura, Yousuke, Mitsuishi, Hiroyuki, et Watanabe, Shogo, « Thermal Behavior in Hydrogen Storage Tank for Fuel Cell Vehicle on Fast Filling », in *SAE World Congress & Exhibition*, SAE International, avr. 2007. doi: <https://doi.org/10.4271/2007-01-0688>.
- [24] S. C. Kim, S. H. Lee, et K. B. Yoon, « Thermal characteristics during hydrogen fueling process of type IV cylinder », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, n° 13, p. 6830-6835, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.130>.
- [25] Y. Zhao *et al.*, « Numerical study on fast filling of 70 MPa type III cylinder for hydrogen vehicle », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, n° 22, p. 17517-17522, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.046>.

BIBLIOGRAPHIE

- [26] Y.-L. Liu *et al.*, « Experimental studies on temperature rise within a hydrogen cylinder during refueling », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, n° 7, p. 2627-2632, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.04.042>.
- [27] J. Zheng *et al.*, « Experimental and numerical study on temperature rise within a 70 MPa type III cylinder during fast refueling », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, n° 25, p. 10956-10962, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.053>.
- [28] M. C. Galassi, D. Baraldi, B. A. Iborra, et P. Moretto, « CFD analysis of fast filling scenarios for 70 MPa hydrogen type IV tanks », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 37, n° 8, p. 6886-6892, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.041>.
- [29] N. de Miguel, B. Acosta, P. Moretto, et R. O. Cebolla, « Influence of the gas injector configuration on the temperature evolution during refueling of on-board hydrogen tanks », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, n° 42, p. 19447-19454, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.008>.
- [30] N. R. Kesana, P. Welahettige, P. M. Hansen, Ø. Ulleberg, et K. Vågsæther, « Modelling of fast fueling of pressurized hydrogen tanks for maritime applications », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, n° 79, p. 30804-30817, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.142>.
- [31] G. Wang, J. Zhou, S. Hu, S. Dong, et P. Wei, « Investigations of filling mass with the dependence of heat transfer during fast filling of hydrogen cylinders », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, n° 9, p. 4380-4388, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.189>.
- [32] R. O. Cebolla, B. Acosta, N. de Miguel, et P. Moretto, « Effect of precooled inlet gas temperature and mass flow rate on final state of charge during hydrogen vehicle refueling », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 40, n° 13, p. 4698-4706, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.035>.
- [33] « Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage | Wiley », Wiley.com. Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.wiley.com/en-us/Handbook+of+Hydrogen+Storage%3A+New+Materials+for+Future+Energy+Storage-p-9783527322732>
- [34] « DOE Technical Targets for Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Vehicles », Energy.gov. Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles>
- [35] J. C. Yang, « A Thermodynamic Analysis of Refilling of a Hydrogen Tank », *NIST*, vol. 34, n° 16, p. 6712-6721, août 2009.
- [36] K. W. Garrett et H. M. Rosenberg, « The thermal conductivity of epoxy-resin / powder composite materials », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 7, n° 9, p. 1247, juin 1974, doi: 10.1088/0022-3727/7/9/311.
- [37] K. Mohamed et M. Paraschivoiu, « Real gas simulation of hydrogen release from a high-pressure chamber », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 30, n° 8, p. 903-912, juill. 2005, doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.10.001.

BIBLIOGRAPHIE

- [38] C. J. B. Dicken et W. Mérida, « Measured effects of filling time and initial mass on the temperature distribution within a hydrogen cylinder during refuelling », *J. Power Sources*, vol. 165, n° 1, p. 324-336, févr. 2007, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.11.077.
- [39] L. Zhao *et al.*, « Numerical simulation of temperature rise within hydrogen vehicle cylinder during refueling », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 15, n° 35, p. 8092-8100, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.027.
- [40] S. Pregassame, F. Barth, L. Allidières, et K. Barral, « Hydrogen refuelling station: filling control protocols development », 2006. Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Hydrogen-refuelling-station%3A-filling-control-Pregassame-Barth/37d35b514fc9c3657c02495c91a4ecd815703ac8>
- [41] S. Maus, J. Hapke, C. N. Ranong, E. Wüchner, G. Friedlmeier, et D. Wenger, « Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, n° 17, p. 4612-4621, sept. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.06.052.
- [42] R. Liss et K. Kountz, « Development and Validation Testing of Hydrogen Fast-Fill Fueling Algorithms ».
- [43] J. Zheng, J. Ye, J. Yang, P. Tang, L. Zhao, et M. Kern, « An optimized control method for a high utilization ratio and fast filling speed in hydrogen refueling stations », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, n° 7, p. 3011-3017, avr. 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.07.001.
- [44] M. Heitsch, D. Baraldi, et P. Moretto, « Numerical investigations on the fast filling of hydrogen tanks », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 36, n° 3, p. 2606-2612, févr. 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.134.
- [45] R. Immel, A. Mack-Gardner, R. Immel, et A. Mack-Gardner, « Development and Validation of a Numerical Thermal Simulation Model for Compressed Hydrogen Gas Storage Tanks », avr. 2011, doi: 10.4271/2011-01-1342.
- [46] R. H. Aungier, « A Fast, Accurate Real Gas Equation of State for Fluid Dynamic Analysis Applications », *J. Fluids Eng.*, vol. 117, n° 2, p. 277-281, juin 1995, doi: 10.1115/1.2817141.
- [47] « Characteristics of Turbulent Confined Jets during Fast Filling of H₂ Tank at High Pressure - T. Setoguchi, M.M.A. Alam, M. Monde, H.D. Kim, 2013 ». Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/1475-472X.12.5-6.455>
- [48] « On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions. | Chemical Reviews ». Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cr60137a013>
- [49] D. Melideo, D. Baraldi, B. Acosta-Iborra, R. Ortiz Cebolla, et P. Moretto, « CFD simulations of filling and emptying of hydrogen tanks », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, n° 11, p. 7304-7313, mars 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.262.