

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par : BOUCHERIHA Mohamed

KHOUANI Fouad

Sujet

Adaptation du moteur à allumage commandé par l'hydrogène

Soutenu publiquement, le 04 /06 /2023 , devant le jury composé de :

Mme/BENAHMED Lamia

MCB

Université de Tlemcen

Président

Mme/MOST EFAOUI Amina

MCB

Université de Tlemcen

Examineur

M/BENMANSOUR

MCB

Université de Tlemcen

Encadreur

Abdelkrim

Remerciement :

En premier lieu, nous exprimons notre gratitude envers le Tout-Puissant, Allah, pour nous avoir accordé la santé, la volonté et la patience tout au long de ces années.

Nous souhaitons adresser nos remerciements infinis à notre encadreur, Monsieur **BENMANSOUR Abdelkrim**, enseignant à l'université de Tlemcen, pour son encadrement, sa disponibilité et sa patience. Nous les remercions également pour leur soutien, leurs conseils et leur orientation tout au long de ce travail. Nous avons eu le grand plaisir de travailler sous leur direction et nous avons trouvé en eux les conseils et les orientations dont nous avons besoin.

Nous tenons également à remercier notre président **BENAHMED Lamia** et examinateur **MOSTEFAOUI Amina** pour leur contribution à la réussite de cette année universitaire exceptionnelle.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers tous les professeurs et enseignants du département de Génie mécanique de l'université de Tlemcen qui ont joué un rôle essentiel dans notre formation tout au long de notre parcours universitaire, ainsi que tous ceux qui nous ont enseigné pendant notre scolarité.

Dédicaces

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers deux piliers essentiels,
mon père **BOUCHERIHA Boulnoir**, ma mère **BAHAR Touriya**

Mes frères **Yasser, Djihad, Merieme**

Ma famille, mes amis

Par **BOUCHERIHA Mohamed**

Dédicaces

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers deux piliers essentiels,
mon père **KHOUANI Mohamad**, ma mère **BELGHOMARIE Amaria**

Mes frères **Leila, Sanaa, Zoheir**

Mes amis **B. Oussama, B. Hichem, L. Amine, M.Salah, B.Amine, B. Ismail,**
B. Ilyes, K.Younes, B.imad, G.Ahmed, et mes amis **de ma promo**

Par KHOUANI Fouad

Résumé

Dans le cadre de notre travail on a présenté l'adaptation d'un moteur à allumage commandé Pour fonctionner à l'hydrogène qui est un sujet intéressant. Le passage à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant présente des avantages potentiels en termes d'émissions réduites de gaz à effet de serre et de dépendance accrue à l'égard des combustibles fossiles. Cependant, il y a plusieurs aspects à considérer lors de l'adaptation d'un moteur à essence ou diesel pour fonctionner à l'hydrogène. Le fonctionnement par l'hydrogène implique des modifications du système d'injection de Carburant, de l'allumage, de la chambre de combustion, et du système de stockage. Des recherches supplémentaires, des essais et une expertise en ingénierie automobile sont nécessaires pour garantir une conversion réussie. Par ailleurs, l'infrastructure de ravitaillement en hydrogène est également un facteur important à prendre en compte, car l'utilisation de l'hydrogène comme carburant nécessite un réseau de stations-service adaptées.

في إطار عملنا، قدمنا تكييف محرك بإشعال قابل للتحكم للعمل بالهيدروجين وهو موضوع مثير للاهتمام. يوفر الانتقال إلى استخدام الهيدروجين كوقود مزايا محتملة فيما يتعلق بتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري والاعتماد المتزايد على الوقود الأحفوري. ومع ذلك، هناك عدة جوانب يجب مراعاتها عند تكييف محرك البنزين أو الديزل للعمل بالهيدروجين. يتضمن تشغيل الهيدروجين تعديلات في نظام حقن الوقود والإشعال وغرفة الاحتراق ونظام التخزين. إنه مجال بحث وتطوير مستمر يهدف إلى تعزيز التقنيات البديلة للدفع وأكثر احترامًا للبيئة. يتطلب ذلك إجراء بحوث إضافية واختبارات وخبرة في هندسة السيارات لضمان نجاح التحويل. بالإضافة إلى ذلك، فإن بنية البنية التحتية لتزويد الهيدروجين هي عامل مهم يجب أخذه في الاعتبار، حيث يتطلب استخدام الهيدروجين كوقود شبكة من محطات الخدمة المناسبة.

In the context of our work, we presented the adaptation of a spark-ignition engine to operate on hydrogen, which is an interesting topic. The transition to using hydrogen as a fuel offers potential advantages in terms of reduced greenhouse gas emissions and increased independence from fossil fuels. However, there are several aspects to consider when adapting a gasoline or diesel engine to run on hydrogen. Operating with hydrogen involves modifications to the fuel injection system, ignition, combustion chamber, and storage system. Additional research, testing, and automotive engineering expertise are required to ensure a successful Conversion. Furthermore, hydrogen refueling infrastructure is also an important factor to consider, as the use of hydrogen as a fuel requires a network of suitable refueling stations.

Sommaire

1	Introduction générale	1
2	Problématique	3
3	Objectif	3
Chapitre 1	Analyse bibliographique.....	12
1.1	Introduction	13
1.2	Moteur à combustion interne (à explosion)	13
1.3	Moteurs Diesel (à allumage par compression)	14
1.4	Moteurs à essence (à allumage commandé)	15
1.5	Moteurs à gaz naturel	15
1.6	L’histoire des véhicules à combustion d’hydrogène	17
1.7	L’hydrogène comme vecteur énergétique	20
1.8	Production de l’hydrogène.....	21
1.8.1	Reformage du gaz naturel : (Reformage au méthane à la vapeur	21
1.8.2	Production électrolytique d’hydrogène	23
1.8.3	Gazéification du charbon	23
1.8.4	Gazéification de la biomasse.....	24
1.8.5	Conversion de la biomasse microbienne	26
1.8.6	Cycles de fractionnement thermochimique de l’eau	26
1.9	Stockage.....	27
1.9.1	Sécurité de stockage	28
1.9.2	Matériaux de stockage d’hydrogène	28
1.10	Les propriétés de l’hydrogène	31
1.11	Les avantages.....	32
1.12	Les inconvénients	34
1.13	Conclusion	38
Chapitre 2	Moteur à hydrogène.....	31
2.1	Introduction	32
2.2	Principe de fonctionnement	32
2.2.1	Injection de carburant :.....	32
2.2.2	Compression :.....	33
2.2.3	Allumage :	33
2.2.4	Expansion :.....	34

2.2.5	L'échappement :	34
2.3	Modification par rapport au moteur conventionnel	35
2.3.1	Injecteurs de carburant	35
2.3.2	Bougies d'allumage	36
2.3.3	Systèmes de contrôle d'injection et d'allumage	37
2.3.4	Matériaux des composants	38
2.4	Méthodes d'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs.....	39
2.4.1	Utilisation de l'hydrogène comme carburant direct.....	39
2.4.2	Utilisation de l'hydrogène en tant que carburant secondaire.....	39
2.4.3	Moteurs à mélanges hydrogène-hydrocarbures.....	40
2.5	Impact des carburants à l'hydrogène sur les performances des moteurs à combustion interne (CI)	41
2.5.1	Puissance et couple.....	41
2.5.2	Efficacité thermique du frein.....	43
2.5.3	Consommation spécifique de carburant au frein.....	44
2.6	Méthodes pour fournir de l'hydrogène aux moteurs à combustion interne	45
2.6.1	Technique de carburation	45
2.6.2	Technique d'injection dans le collecteur et le port d'admission	46
2.7	Le retour de flamme	47
2.7.1	Systèmes d'injection directe	49
2.7.2	Injection d'eau.....	52
2.7.3	Admission séparée.....	53
2.7.4	Refroidissement des points chauds	54
2.8	Conclusion.....	54
Chapitre 3	Modélisation	55
3.1	Equations de l'aérothermochimie	56
3.2	Équations de bilan pour un écoulement réactif laminaire	56
3.3	Modélisation de l'écoulement réactif turbulent.....	59
3.4	Modèle de combustion.....	63
3.5	Modèle des taux finis.....	64
3.6	Modèle EDM pour la combustion turbulente	65
3.7	La voie thermique (mécanisme de Zel'dovich).....	66
Chapitre 4	Simulation.....	67

4.1	Outils de la simulation.....	68
4.1.1	Gambit.....	68
4.1.2	Fluent.....	68
4.2	La géométrie.....	68
4.3	La combustion d’octane.....	69
4.4	Les émissions Nox d’octane.....	70
4.5	La combustion d’hydrogène.....	72
4.6	Les émissions Nox dans l’hydrogène.....	73
	Conclusion	76

Tableau de figures :

Figure 1 L'hydrogène comme carburant.	2
Figure 2 : L'hydrogène dans le future.	20
Figure 1.1 : Schéma du procédé du vaporéformage.	22
Figure 1.2 : Principe de l'électrolyse de l'eau.	23
Figure 1.3 : Production d'hydrogène à partir du charbon	24
Figure 1.4 : principe de la gazéification de la biomasse	25
Figure 1.5 Cellules d'électrolyse microbienne	26
Figure 1.6 méthodes de production d'hydrogène	27
Figure 1.7 : réservoir de stockage d'hydrogène en liquide	28
Figure 1.8 : Injection de carburant	32
Figure 1.9 : Utilisation de 'hydrogène dans les moteurs à combustion interne.....	40
Figure 1.10: Changements de l'efficacité volumétrique avec différents pourcentages d'hydrogène dans le moteur CI.....	42
Figure 1.11: Changements de la puissance de freinage et du couple de freinage avec différents pourcentages d'hydrogène dans le moteur CI.....	42
Figure 1.12: illustre les variations de l'efficacité thermique de freinage en fonction des pourcentages d'hydrogène dans le moteur à combustion interne, comme indiqué par la source [170]	43
Figure 1.13: représente la variation de l'efficacité thermique de freinage en fonction des différents pourcentages d'hydrogène utilisés dans le moteur à allumage commandé [167] ..	44
Figure 1.14 : illustre l'efficacité thermique de freinage dans un moteur à allumage commandé en fonction de différents pourcentages d'hydrogène, telle que présentée dans la référence [170]	45
Figure 1.15 : Technique de carburation du carburant en action [182]	46
Figure 1.16 : Méthode d'injection de port d'admission et de collecteur d'admission [186]	47
Figure 1.17 : Système d'injection directe	50
Figure 1.18: la charge stratifiée.....	52
Figure 1.19: présente un schéma illustrant le concept de l'admission séparée, disponible sur le site	53
Figure 4.1 : La géométrie.	68
Figure 4.2 : Contour présente la flamme d'octane	69

Figure 4.3 : La variation de la température (K) de la combustion par rapport la position (m)	70
Figure 4.4 :Contour présente les différentes variations de la concentration Nox	70
Figure 4.5 : Graphe qui présente la fraction de masse de polluant Nox a la position X(m)	71
Figure 4.6 :Contour représente la flamme de l'hydrogène.....	72
Figure 4.7 :La variation de la température (K) de la combustion d'hydrogène par rapport la position X(m)	73
Figure 4.8 : Contour présente les différentes variations de la concentration Nox	73
Figure 4.9 : La variation de la fraction de mass de polluant Nox par rapport la position X(m)	74

Nomenclature

IC	interne combustion
HFC	Hydrocarbon fuel combustion
HC	Hydrocarb combustion
DI	direct injection
CEM	cellules electrolyse microbienne
TWSC	thermochemical water splitting cycles
MOFs	metal-organic frameworks
POPs	polymères organique poreux
LOHC	liquide organique hydrogen carriers
H/M	hydrogen/metal
EMS	engine management system
BTE	brake thermal efficiency
BSFC	brake specific fuel consummation
EGR	exhaust gas recirculation
PMB	point mort base

ρ la masse volumique

u_j la composante du vecteur vitesse

J_{jk}^s le flux de diffusion

$\dot{\omega}_k$ le taux de production ou de consommation

D_k Le coefficient de diffusion

P la pression

S_i forces volumiques

μ représente la viscosité dynamique

S_{ij} le tenseur des vitesses de déformation

δ_{ij} l'opérateur de Kronecker avec l'indice "l" arbitraire

J_j^{et} le flux d'énergie totale dans la direction j

S^{et} le terme source d'énergie totale

λ la conductivité thermique

ν la viscosité cinématique

$(\hat{\lambda}$ et $\hat{\mu})$ coefficients de transport moléculaire

$\overline{\rho k' u_j''} + \overline{\tau_{ij} u_j''}$ diffusion de l'énergie cinétique turbulente.

μ_t la viscosité dynamique turbulente

α la composante de la vectrice vitesse

k l'énergie cinétique turbulente

ε la dissipation

G_k la génération de l'énergie cinétique turbulente

- \mathcal{M}_K Symbole de l'espèce chimique (H_2O , CH_4 , CO_2 , ...).
- M_k masse molaire
- Q_j le taux d'avancement de la réaction en mol/s.
- A_{fj} le facteur pré-exponentiel (tables des mécanismes cinétiques).
- E_j énergie d'activation (tables des mécanismes cinétiques).
- B_j exposant de température (tables des mécanismes cinétiques).
- K_p la constante d'équilibre.

1 Introduction générale

L'augmentation de la population mondiale et l'utilisation excessive de combustibles fossiles ont entraîné de la demande mondiale d'énergie au cours de la vingt et unième siècle. [1]

Cependant, le pétrole est une ressource finie qui devient de plus en plus rares et coûteux [2]. En raison de leur disponibilité, les environ 65 % de la demande mondiale d'énergie [3]. Qui nécessitent des combustibles fossiles pour fonctionner utilisent une proportion importante de cette énergie. [4]

La baisse de la disponibilité des combustibles fossiles a conduit à une crise énergétique (carburant). moteurs IC, sur d'autre part, continuera à dominer les industries du transport et de l'énergie en raison de les polluants émis par les moteurs à combustion interne et de graves problèmes tels que le réchauffement climatique, la pollution atmosphérique, les pluies acides, problèmes respiratoires. [5]

Les gaz les plus importants contribuant directement à l'effet de serre sont les suivants : le dioxyde de carbone (CO_2), qui représente 31 % des émissions totales, le protoxyde d'azote (N_2O), avec 0,9 % des émissions totales, les hydrofluorocarbures (HFC), qui contribuent à hauteur de 19 % des émissions totales, et enfin le méthane (CH_4), qui représente moins de 0,1 % des émissions totales.

En plus des gaz à effet de serre, le transport routier peut être considéré comme le principal responsable des émissions d'oxydes d'azote (NO , NO_2) et de dioxyde de soufre (SO_2). La présence de monoxyde et de dioxyde d'azote dans l'air est nocive pour la santé humaine. De plus, lorsque combinés avec de l'eau, les oxydes d'azote (NO) et le dioxyde de soufre (SO_2) réagissent chimiquement dans l'air pour former des acides, entraînant l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques et des sols.

Dans l'atmosphère, le dioxyde d'azote se convertit en acide nitrique, contribuant à la pollution acide de l'air. Les émissions provenant des moteurs automobiles, telles que les hydrocarbures non brûlés (HC), qui résultent d'une combustion incomplète près des parois, sont également nocives pour la santé humaine et notre environnement. [6]

En raison de la diminution continue des réserves de pétrole, il devient nécessaire d'explorer de nouvelles alternatives de carburants pour le remplacer [7]. Jusqu'à présent, de nombreux chercheurs ont essayé de créer un système de combustion pour la combustion

Introduction

complète des hydrocarbures [8] [9]. Cependant, l'accroître la qualité du combustible et créer une meilleure combustion du combustible dans les moteurs sont parmi les méthodes qui ont été considérées pour résoudre ce problème. Dans ces méthodes, il n'est pas nécessaire d'apporter des changements dans la structure du moteur.

L'utilisation de biocarburants, l'eau, les nanoparticules et d'autres additifs sont parmi les solutions étudiées pour accroître la combustion et la qualité du combustible [10].

L'une des possibilités les plus prometteuses pour répondre aux futures demandes d'énergie est l'hydrogène [11]. L'hydrogène est écologique lorsqu'il est produit à partir de sources renouvelables ou d'hydrocarbures dans un processus durable et efficace [12]. En comparaison avec les combustibles fossiles comme le gaz naturel, l'essence et le diesel, l'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans la combustion interne des moteurs peut améliorer l'efficacité thermique tout en réduisant les émissions de carbone. L'utilisation de l'hydrogène pour le transport est qu'il augmente notre dépendance aux sources renouvelables tout en réduisant notre utilisation de combustibles fossiles non renouvelables. [13]

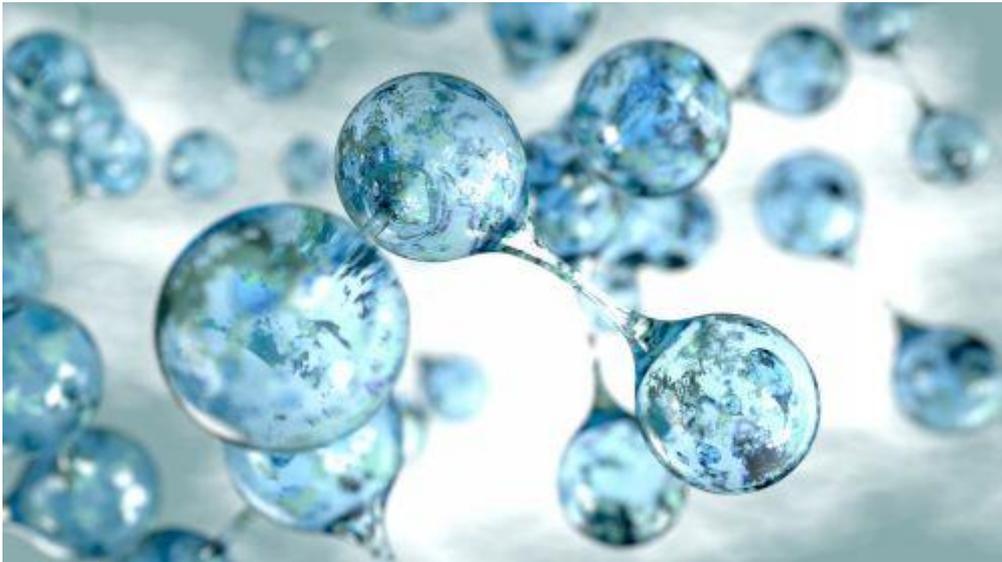


Figure 1 L'hydrogène comme carburant.

2 Problématique

Étant donné que ce moteur à hydrogène est la solution à de nombreux problèmes de pollution, mais il fait également face à certains problèmes qui sont un frein à ses utilisations, car il est encore en cours de développement. L'un des principaux problèmes sur lesquels on travaille est l'émission NOx et le retour de la flamme.

3 Objectif

Dans ce travail notre objectif c'est d'étudier l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne, comment fonctionner comment utiliser le principe de fonctionnements de ce type de carburant dans ces moteurs et les systèmes d'utilisations et les effets sur le moteur, et quel sont les problèmes sommes-nous confrontés et comment le gérer.

Chapitre 1 Analyse bibliographique

1.1 Introduction

En anticipant l'émergence de l'hydrogène comme carburant du futur, il est nécessaire d'adapter les technologies actuelles pour qu'elles soient compatibles avec ce carburant. Malgré les nouvelles technologies des piles à combustible et des moteurs électriques, le moteur à combustion interne demeurera une solution viable pour fournir de la puissance aux véhicules et aux installations stationnaires. Ce moteur a déjà prouvé son efficacité et reste une option fiable, d'autant plus que les nouvelles avancées technologiques permettront d'améliorer davantage son efficacité. Parmi ces avancées, on trouve des développements en cours tels que l'injection directe et la photo-détonation. À l'avenir, il sera donc nécessaire d'adapter les moteurs à pistons pour qu'ils puissent fonctionner avec de l'hydrogène. [7]

Dans ce chapitre en va démontrer des informations sur l'hydrogène comme la production le stockage, ses propriétés, et ses avantages et les inconvénients.

1.2 Moteur à combustion interne (à explosion)

Le moteur à combustion interne, également connu sous le nom de moteur à explosion, convertit l'énergie provenant de la combustion du mélange air/carburant en énergie mécanique. Le mélange d'air est principalement composé d'azote avec l'ajout d'oxygène. Avantages et inconvénients :

Les moteurs à combustion interne sont relativement compacts et légers, compensant leur faible couple par une vitesse de rotation élevée. Les carburants conventionnels utilisés dans ces moteurs sont facilement disponibles et peu encombrants, ce qui les rend adaptés aux petits véhicules terrestres et même aux appareils volants. Leur succès réside également dans leur facilité d'utilisation et de maintenance. De plus, ils sont polyvalents et peuvent fonctionner avec différents types de carburants sans modifications majeures. Par exemple, l'essence peut être remplacée par de l'alcool ou du gaz, tandis que le carburant diesel peut être remplacé par des huiles végétales.

Cependant, comme toute création humaine, ces moteurs présentent des avantages et des inconvénients. En plus de leur inefficacité en haute altitude où la teneur en oxygène est faible, la combustion produit des gaz potentiellement polluants et toxiques. Malgré les efforts visant à les améliorer, ils sont considérés comme l'une des principales sources de pollution atmosphérique.

Le rendement des moteurs à explosion est déjà relativement faible et se dégrade significativement en dehors de leur plage de fonctionnement optimale. Dans les véhicules, étant donné que la vitesse de rotation du moteur varie considérablement, une boîte de vitesses est nécessaire pour modifier les rapports de rotation et maintenir le moteur dans sa plage de fonctionnement optimale. De plus, étant donné que le couple est nul au démarrage, un dispositif auxiliaire tel qu'un démarreur électrique est nécessaire pour démarrer le moteur. [6]

1.3 Moteurs Diesel (à allumage par compression)

C'est l'Allemand Rudolf Diesel, qui a conçu en 1893 le premier prototype du moteur qui porte son nom jusqu'à nos jours. Il s'agissait d'un moteur à 4-temps dont le combustible est injecté, par le biais d'un système d'injection, directement à forte pression dans la chambre de combustion. Ce type de moteur, dont le taux de compression est élevé, a connu une expansion rapide dans le domaine de l'automobile depuis sa création.

Avantages du diesel :

- Le rendement est supérieur à celui d'un moteur à essence: une proportion plus grande de la chaleur est convertie en travail.
- Le carburant Diesel coûte environ 10 % moins cher que l'essence.
- La consommation moyenne est moins élevée que la motrice essence.

Inconvénients du diesel:

- De fortes contraintes thermiques et mécaniques sont exercées sur les composants mécaniques du moteur, d'où la nécessité de les surdimensionner.
- Le coût d'entretien est environ 20 % plus élevé que celui d'un moteur à essence.
- L'étanchéité entre le cylindre et le piston est plus difficile à réaliser.

Le moteur est plus bruyant. Les moteurs diesel émettent un certain nombre de polluants parmi lesquels:

- Le dioxyde de carbone CO_2 .
- L'oxyde d'azote NO_x .
- Les hydrocarbures H_c .
- Les fines particules (dont le diamètre est inférieur à 2.5 micromètres).
- Le dioxyde de soufre SO_2 . [6]

1.4 Moteurs à essence (à allumage commandé)

Les moteurs à essence, également connus sous le nom de moteurs à allumage commandé, présentent certaines caractéristiques distinctes. Ils sont plus légers et plus réactifs à bas régimes et à froid, car l'allumage est réalisé par une bougie. Comparativement, ils sont généralement plus silencieux que les moteurs Diesel, car l'explosion du mélange air-carburant dans un moteur Diesel crée un bruit de claquement dû à l'auto-inflammation. Les moteurs à essence ont également une mise en marche plus rapide à bas régimes, grâce à l'étincelle produite par la bougie. En raison de leurs régimes moteurs plus élevés, les moteurs à essence sont souvent utilisés dans les véhicules de sport et les voitures de luxe. Cependant, ils ont généralement un couple plus faible à bas régime, ce qui limite leur puissance à haut régime.

Le rendement thermodynamique théorique des moteurs à essence est inférieur à celui des moteurs Diesel et dépasse rarement 30%. Cette différence est principalement due aux taux de compression. Un taux de compression plus élevé améliore le rendement, car il permet une combustion plus complète du carburant.

De plus, la consommation de carburant est plus élevée dans les moteurs à essence en raison du rendement inférieur et de la valeur énergétique moins élevée de l'essence. Les moteurs à essence ont tendance à fonctionner à des régimes de rotation plus élevés tout en offrant un couple inférieur à bas régime. Il convient également de noter que, même avec un pot catalytique, les voitures à essence produisent davantage de CO₂ que les moteurs Diesel. [6]

1.5 Moteurs à gaz naturel

Moteurs à gaz naturel Les avantages du gaz naturel par rapport aux carburants traditionnels:

- Les moteurs fonctionnant avec ce type de carburant émettent beaucoup moins de polluants que ceux qui utilisent les combustibles traditionnels tels que l'essence, le carburant Diesel ou le gaz du pétrole liquéfié (GPL). Le gaz naturel est composé principalement de méthane. Par unité d'énergie, il produit ainsi le moins de CO₂ (jusqu'à 25 % plus faibles par rapport à l'essence), le gaz qui contribue majoritairement à l'effet de serre. En outre, les moteurs au gaz naturel émettent moins d'agents polluants acidifiants que les carburants conventionnels. Les émissions de particules fines sont presque nulles pour les véhicules qui roulent au gaz naturel. Donc le gaz naturel est beaucoup moins nocif pour l'environnement et

Chapitre 1 : analyse bibliographique

pour les 10 santés humaines: le NO_2 et les particules fines entraînent des maladies respiratoires et de l'asthme.

- Les véhicules alimentés au gaz naturel sont moins bruyants que ceux roulant au carburant Diesel. Cet avantage est un aspect important dans les zones urbaines, où actuellement le transport en commun utilise généralement le diesel. De plus, étant donné qu'un moteur au gaz naturel émet moins de vibrations de résonance qu'un moteur diesel, le moteur s'use moins et les frais d'entretien sont moins élevés.
- Le gaz naturel étant plus léger que l'air, il se disperse et se dilue rapidement dans l'air ambiant. Contrairement à l'essence et au gaz du pétrole liquéfié, il s'enflamme uniquement quand sa concentration dans l'air se situe entre 5 et 15 %. En dessous de 5 %, le mélange est trop pauvre pour brûler et au-dessus de 15 %, le mélange est trop riche et ne brûlera pas non plus. Le point d'inflammation du gaz naturel est d'approximativement 1076 OF, pour le diesel, il est de 500 OF, alors que l'essence s'enflamme à 428 OF. Le gaz naturel prend donc moins facilement feu que le diesel et l'essence. Le gaz naturel est transporté en toute sécurité par gazoducs souterrains. Ceci permet à l'USSI de distribuer du gaz naturel dans les stations-service des zones à forte densité de population. Un réservoir de gaz naturel résiste mieux à une collision qu'un réservoir à essence traditionnel. Le gaz naturel est stocké dans des cylindres dont la paroi mesure 10 à 20 mm d'épaisseur et qui sont réalisés en matériaux durables et comprennent des dispositifs de sécurité intégrés.
- Les véhicules roulant au gaz naturel sont actuellement plus chers que ceux fonctionnant avec les carburants traditionnels. Néanmoins, le gaz naturel véhicule est significativement moins cher que les carburants classiques tels que l'essence ou le diesel: 1 kg de gaz naturel comprimé coûte à la pompe de 30 à 40 % moins cher qu'un litre de diesel. L'écart de prix entre un véhicule au gaz et un véhicule essence ou diesel va diminuer au fil du temps. Grâce à la combustion plus propre du gaz naturel, il y aura moins de frais d'entretien et la durée de vie du moteur est nettement plus longue que celle d'un moteur essence ou diesel. En plus, le gaz naturel possède d'autres avantages tels que:
 - Couple disponible à bas régime plus élevé qu'à l'essence.
 - Stabilité de fonctionnement accrue.
 - Bruits de fonctionnement atténués.
 - Démarrages en richesse stœchiométrique possibles.
 - Indice d'octane élevé.

Les inconvénients sont les suivants:

Pour stocker le gaz naturel comprimé, il faut plus d'espace que pour stocker un même poids d'essence. Donc, les réservoirs qui stockent le gaz naturel comprimé sont très souvent grands et prennent beaucoup d'espace. Cependant, il est également possible d'installer le réservoir sous la carrosserie, grâce à une disposition plus rationnelle des composants (par exemple, Volkswagen Touran EcoFuel, Fiat multipla, la Nouvelle Fiat Panda, etc.). En outre de cet inconvénient majeur, on peut citer d'autres tels que:

- Le couple du moteur au gaz naturel est moins élevé que celui du moteur à essence.
- Le réseau de distribution du gaz naturel est peu développé. [6]

1.6 L'histoire des véhicules à combustion d'hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant pour les moteurs à combustion interne remonte à plus de deux siècles, ce qui témoigne de son intérêt durable dans le domaine automobile [14]. L'histoire de l'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant peut être divisée en différentes périodes historiques. Les premières mentions d'un moteur fonctionnant à l'hydrogène remontent au début du XIXe siècle. En 1807, un inventeur suisse du nom de François Isaac de Rivaz conçut le premier moteur à combustion hydrogène-oxygène. Rivaz utilisa ce moteur expérimental pour propulser un véhicule prototype sur de courtes distances, faisant ainsi de cette création le premier véhicule équipé d'un moteur à combustion interne [15]. À l'époque, le moteur de Rivaz ne disposait d'aucun mécanisme de synchronisation, nécessitant ainsi une injection de carburant et un allumage manuels. Une cellule de Volta était utilisée pour générer une étincelle électrique [16], suivant ainsi le même principe d'allumage que les moteurs à combustion modernes [17]. En 1820, le révérend W. Cecil présenta un article intitulé "Sur l'application de l'hydrogène gazeux pour produire une puissance motrice dans les machines" à la Cambridge Philosophical Society [18]. Son moteur à gaz fonctionnait de manière satisfaisante et utilisait un système de vide [19] [20]. Depuis le début du XIXe siècle, de nombreux modèles de moteurs à combustion interne et de leurs composants ont été développés. Cependant, l'année charnière fut 1860, lorsque l'inventeur belge Etienne Lenoir construisit le premier moteur à gaz horizontal de petite taille, véritablement fonctionnel [21]. Ce moteur monocylindre à deux temps était alimenté par de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau [22]. Il était refroidi à l'eau et produisait une puissance de 0,7 kW à 80 tr/min [23]. Par la suite, Lenoir adapta son moteur pour utiliser différents gaz, notamment le gaz de charbon. En 1863, un véhicule propulsé par le moteur de Lenoir réalisa un essai sur

Chapitre 1 : analyse bibliographique

une distance de 9 km entre Paris et Joinville, atteignant une vitesse moyenne de 3 km/h [24]. Le moteur a rencontré un immense succès économique avec la vente de plus de 400 unités, représentant ainsi une avancée significative dans le domaine de la technologie automobile [25]. Malgré ce succès initial dans le développement des moteurs à hydrogène, ils ont ultérieurement été peu répandus, car ils ont été surpassés par la concurrence des moteurs utilisant des combustibles fossiles. Les moteurs à combustion d'hydrogène de l'époque étaient moins efficaces que ceux fonctionnant aux hydrocarbures, et le stockage de l'hydrogène dans les véhicules représentait un défi majeur. En revanche, les carburants hydrocarbonés étaient un sous-produit des compagnies pétrolières qui produisaient en grande quantité du kérosène pour les besoins d'éclairage et de chauffage à la fin du XIXe siècle. Étant donné que l'industrie du pétrole brut utilisait déjà des méthodes d'extraction et de raffinage éprouvées, cela rendait le carburant beaucoup moins cher que l'hydrogène pour alimenter les véhicules. Malgré cela, les recherches sur les véhicules à hydrogène ont été poursuivies. Les progrès technologiques dans le domaine des véhicules fonctionnant à l'hydrogène ont été significatifs grâce aux événements des Première et Seconde Guerres mondiales. La demande croissante en carburant et le risque de pénurie des combustibles fossiles ont incité les gouvernements nationaux à investir dans la recherche sur l'utilisation de l'hydrogène dans le secteur des transports. Une autre voiture à hydrogène a été inventée en 1933 [26]. La centrale hydroélectrique norvégienne Norsk a converti un petit camion pour qu'il fonctionne au gaz d'hydrogène. Le camion transportait un reformeur d'ammoniac qui extrayait l'hydrogène pour ensuite le brûler dans un moteur à combustion interne [27]. Rudolf Erren a été l'un des premiers ingénieurs importants à se pencher sur les moteurs à combustion interne alimentés à l'hydrogène. Dans les années 1920, il a entrepris des recherches sur la modification des moteurs Otto et diesel alors disponibles. Erren s'est intéressé à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant et a réalisé de nombreuses expériences sur des moteurs fonctionnant à l'hydrogène [28]. Il a converti plusieurs moteurs à essence et diesel pour permettre l'injection directe d'hydrogène. Les moteurs modifiés par Erren ont été utilisés dans divers véhicules tels que des camions, des bus et des sous-marins [29]. Les travaux d'Erren ont commencé en Allemagne, mais malheureusement, les archives de ses recherches ont été entièrement détruites lors des bombardements alliés de Berlin [20]. Par la suite, il a poursuivi ses travaux en Angleterre. L'article présenté par Erren et Campbell à l'Institut du carburant à Londres fournissait des données extrêmement prometteuses sur l'efficacité thermique à freinage élevé, atteignant jusqu'à 60% dans un moteur hydrogène-oxygène avec recirculation de la vapeur. Selon le directeur de la "Deutsche Erren Studiengesellschaft", les moteurs d'Erren ne

rencontraient aucun problème d'allumage, mais le système breveté nécessitait des mécanismes spéciaux d'injection de carburant et de contrôle pour l'injection d'hydrogène [20]. De nombreux autres chercheurs ont également consacré leurs travaux aux moteurs à hydrogène. Il est intéressant de noter que les premières installations de moteurs à combustion interne fonctionnant à l'hydrogène en Russie ont été mises en place en 1941 pendant le siège de Léninegrad (actuellement Saint-Pétersbourg). Afin de répondre à des besoins urgents, le Russe Boris Shelishch a converti 200 camions GAZ-AA pour les rendre utilisables avec de l'hydrogène, offrant ainsi une combustion plus propre et une durée de fonctionnement plus longue que les camions alimentés à l'essence [30]. Un nouvel intérêt pour les moteurs à hydrogène a émergé dans les années 1970, principalement en raison de la dégradation environnementale causée par les émissions des combustibles fossiles [31]. En 1966, Roger Billings a effectué la conversion d'une Ford A à l'hydrogène avec un moteur à combustion, ce qui en a fait un modèle phare des moteurs à combustion à l'hydrogène [32]. Entre 1971 et 1978, des véhicules d'essai équipés de moteurs à combustion à l'hydrogène ont été développés au Japon à l'Institut de technologie Musashi, ainsi qu'en Allemagne chez Mercedes-Benz et DFVLR (Centre aérospatial allemand, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt) [33]. En 1974, l'Institut de technologie Musashi a présenté le premier véhicule japonais à hydrogène doté d'un moteur à hydrogène à 4 temps et d'un réservoir de stockage à haute pression. Entre 1975 et 1977, l'Institut de technologie Musashi a introduit des véhicules à hydrogène équipés d'un moteur à hydrogène à 4 temps, associés à un réservoir de stockage d'hydrogène liquide, ainsi qu'à un moteur à allumage par étincelle à 2 temps avec injection directe d'hydrogène (DI). En 1984, la Musashi-6, équipée d'un système d'injection directe tardive dans le cylindre et d'un système de distribution d'hydrogène liquide, a été présentée lors de la conférence WHEC-5 à Toronto [34]. Les travaux de recherche du DFVLR ont apporté une contribution significative au développement de la technologie des réservoirs d'hydrogène liquide pour les applications automobiles. En collaboration avec le DFVLR, BMW (Bayerische Motoren Werke) a introduit son premier véhicule à hydrogène en 1979 [33]. Entre les années 1970 et 1990, BMW et Mazda ont entrepris le développement de plusieurs véhicules commerciaux à combustion fonctionnant à l'hydrogène. Le XXe siècle a été marqué par des avancées dans la technologie des moteurs à hydrogène, démontrant ainsi la possibilité d'utiliser l'hydrogène dans des conceptions de moteurs existantes sans modifications majeures des pièces d'origine [31]. Au XXIe siècle, nous assistons à un intérêt croissant pour ce type de véhicule, avec de nombreux nouveaux modèles en cours de développement.

1.7 L'hydrogène comme vecteur énergétique

Parlons sur l'utilisation d'hydrogène es que L'hydrogène pourrait-il être le vecteur énergétique du futur ? Il n'est pas approprié de répondre à la question par un simple "oui" ou "non" - la réalité est plus nuancée. Alors que le monde est aux prises avec les défis du réchauffement climatique, de l'épuisement des réserves de combustibles fossiles et de la flambée des prix, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique prometteur qui pourrait jouer un rôle crucial dans le futur mix énergétique.



Figure 1 .1: L'hydrogène dans le future.

Ne serait-ce que du point de vue des usages, l'hydrogène apparaît comme la solution miracle à la crise énergétique et environnementale actuelle. En effet, l'hydrogène semble être inépuisable, inépuisable, et omniprésent sous forme d'eau, il peut donc être produit par tous les pays, résolvant ainsi les tensions économiques et socio-politiques entre pays. De plus, il ne produit a priori aucune contamination. L'hydrogène semble donc idéale, mais cette hypothèse est extrêmement simpliste et ne tient pas compte des difficultés précitées de production, de stockage, de distribution et d'utilisation. Le rendement de production d'hydrogène a été grandement amélioré. Cependant, les principales voies de synthèse sont encore basées sur les combustibles fossiles, ce qui entraîne d'importantes émissions de CO₂ lors de la production d'hydrogène. Comme mentionné précédemment, l'hydrogène ne devient vraiment intéressant d'un point de vue écologique que lorsqu'il est produit à partir de diverses sources d'énergie renouvelables. En effet, l'hydrogène présente actuellement un grand intérêt pour le stockage d'énergie renouvelable et les installations hors réseau, ainsi que pour les usages portables ou mobiles. Aussi, comparé à d'autres modes de stockage de l'énergie

électrique, comme le stockage de l'énergie électrique dans des supers condensateurs, des accumulateurs électrochimiques, des volants d'inertie et des bouteilles d'air comprimé, l'hydrogène reste tout à fait adapté au stockage mobile des énergies renouvelables. Les piles à combustible ont l'avantage particulier d'avoir des densités d'énergie très élevées, même si les rendements doivent être améliorés.

D'un point de vue technologique, d'autres améliorations seront apportées et les verrous technologiques seront toujours levés. En particulier, un point important est la question du stockage et de la distribution de l'hydrogène.

D'un point de vue économique, si les prix des énergies fossiles continuent d'augmenter et si l'industrialisation de la technologie hydrogène se poursuit, celles-ci deviendront compétitives et largement commercialisable, ce qui réduira encore le prix. D'un point de vue socio-politique, pour que l'hydrogène soit accepté par le public, il est impératif que les gouvernements le communiquent et l'annoncent et surtout démontrent la sécurité de la technologie à travers des projets de démonstration et des équipements aux normes. Les gouvernements doivent également promouvoir l'hydrogène en maintenant une stratégie de croissance pour la technologie et en établissant des incitations financières pour les industries et les particuliers. [35]

1.8 Production de l'hydrogène

L'hydrogène est devenu l'une des alternatives les plus utiles aux combustibles fossiles aujourd'hui due à ses propriétés telles que grande gamme d'inflammabilité, distance de trempe mineure, Minimal source d'inflammation, une grande diffusivité et une faible densité [35]. Puisque l'hydrogène est l'un des de nombreux éléments dans l'environnement, il est facilement disponible [36]. L'hydrogène n'est pas disponible sous sa forme pure dans la nature (atmosphère). Cependant, il peut être produit à partir de composés contenant de l'hydrogène tel que les combustibles fossiles, le sulfure d'hydrogène, biomasse et eau. Pour acquérir de l'hydrogène, il faut d'abord le séparer des autres éléments dans la combinaison [35]. Voici les moyens de produire de l'hydrogène. En raison de leur coût inférieur (moins de 2 \$/kg H₂) par rapport à d'autres méthodes, le reformage du méthane à la vapeur et la gazéification du charbon sont les procédés industriels actuels de production d'hydrogène. [37]

1.8.1 Reformage du gaz naturel : (Reformage au méthane à la vapeur

Plus de 90 % de l'hydrogène mondial est produit par reformage du méthane à la vapeur processus [38]. Le principe de la production d'hydrogène par reformage du gaz naturel repose

sur la réaction catalysée par un métal entre le gaz naturel (méthane) et la vapeur d'eau (H₂O) sous haute température et pression [39]. (Une pression de 3 à 25 bars (1 bar = 14,5 psi)) en présence d'un catalyseur, le méthane se combine avec la vapeur pour former de l'hydrogène, du monoxyde de carbone et une quantité infime de dioxyde de carbone.

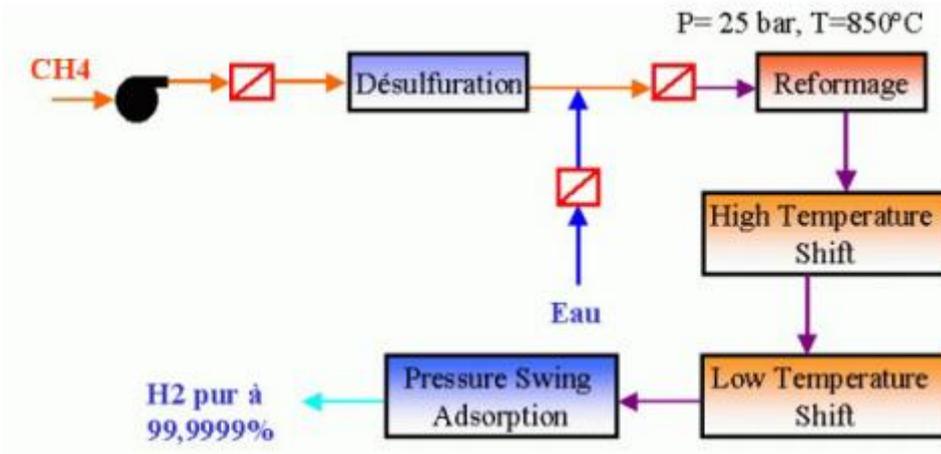


Figure 1.2 : Schéma du procédé du vaporéformage.

Le vaporéformage [40] du méthane est une réaction endothermique, ce qui signifie qu'il nécessite de la chaleur pour terminer le processus. La majeure partie de l'hydrogène produit dans le monde aujourd'hui est dérivé du gaz naturel. Le processus de reformage vapeur-méthane pour la production d'hydrogène est similaire à celui de produire d'autres carburants comme l'éthanol, le propane ou même l'essence. La première étape consiste à générer du monoxyde de carbone et de la vapeur, qui sont ensuite combinés avec un catalyseur pour produire plus d'hydrogène. Dans une étape de production finale connue sous le nom d'« adsorption modulée en pression », le dioxyde de carbone et les autres impuretés sont éliminés du flux gazeux, laissant essentiellement hydrogène pur [40]. Réaction de reformage vapeur-méthane [40]

- Réaction de reformage vapeur-méthane [40] :



- Réaction entre l'eau et le gaz [40] :



1.8.2 Production électrolytique d'hydrogène

Le principe de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau repose sur l'utilisation d'un courant électrique pour décomposer l'eau en ses composants hydrogène et oxygène. L'électrolyse de l'eau peut être réalisée en plaçant une anode (anode) et une cathode (cathode) dans l'eau et en les séparant avec une membrane électrolytique.

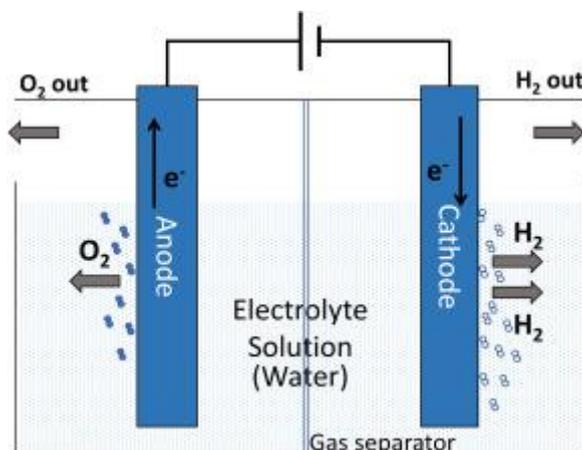
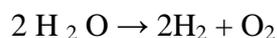


Figure 1.3 Principe de l'électrolyse de l'eau.

Lorsqu'un courant électrique est appliqué, l'eau se décompose en oxygène gazeux à l'anode et en hydrogène gazeux à la cathode selon les équations chimiques suivantes :



L'hydrogène ainsi produit peut être nettoyé et stocké pour une utilisation ultérieure.

[41] [42] [43] [44]

1.8.3 Gazéification du charbon

Le charbon se compose de deux éléments : la matière carbonée (résidus décomposés de plantes préhistoriques) et la partie minérale (issue du sol où le charbon est extrait). La matière carbonée contient principalement cinq composants : carbone, hydrogène, oxygène, azote et soufre. [45]

Pour comprendre le processus de gazéification, il est nécessaire de comprendre d'abord la combustion. La combustion est l'oxydation complète d'un combustible tel que le charbon, produisant de la chaleur et du dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone est un produit non combustible issu de la combustion, car il ne peut être davantage oxydé. Toutefois, lors de la gazéification, le charbon n'est pas complètement oxydé. Il est plutôt traité avec un agent de gazéification. La gazéification est un processus endothermique, ce qui signifie qu'il ne génère

pas de chaleur. En réalité, il nécessite un apport de chaleur pour se dérouler. Étant donné que le gaz résultant n'est pas complètement oxydé, il peut être brûlé comme combustible. Le processus de production d'hydrogène à partir du charbon commence par une oxydation partielle. Cela implique d'ajouter de l'air au charbon, ce qui produit du dioxyde de carbone par combustion traditionnelle. Cependant, la chaleur fournie n'est pas suffisante pour brûler complètement le charbon, mais seulement suffisante pour chauffer la réaction de gazéification. L'oxydation partielle produit également du dioxyde de carbone, qui est utilisé comme agent gazéifiant. Lorsque le dioxyde de carbone réagit avec le reste du carbone présent dans le charbon, cela forme du monoxyde de carbone (une réaction de gazéification endothermique nécessitant un apport de chaleur). À ce stade, il n'y a pas encore d'hydrogène. Le monoxyde de carbone dans le flux de gaz réagit ensuite avec de la vapeur d'eau pour produire de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. Ainsi, nous obtenons maintenant de l'hydrogène.

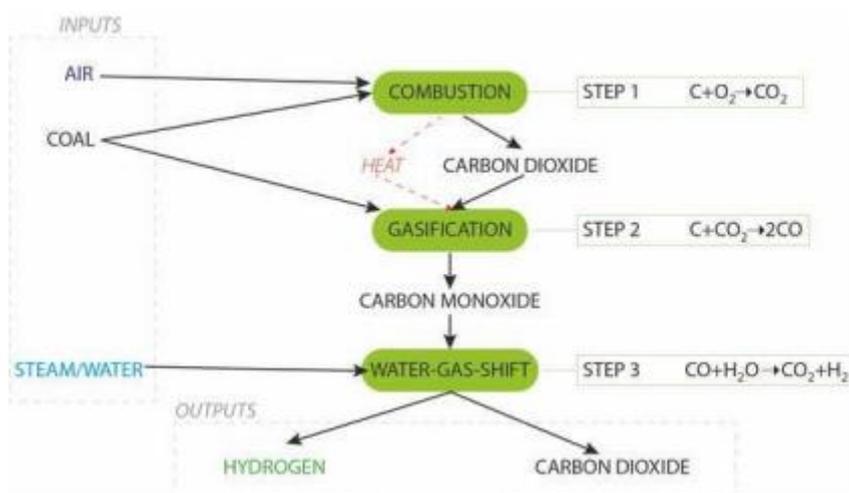


Figure 1.4 Production d'hydrogène à partir du charbon

1.8.4 Gazéification de la biomasse

La gazéification est un procédé qui permet de convertir des matériaux carbonés organiques ou d'origine fossile en monoxyde de carbone, en hydrogène et en dioxyde de carbone à des températures élevées, sans recourir à la combustion.

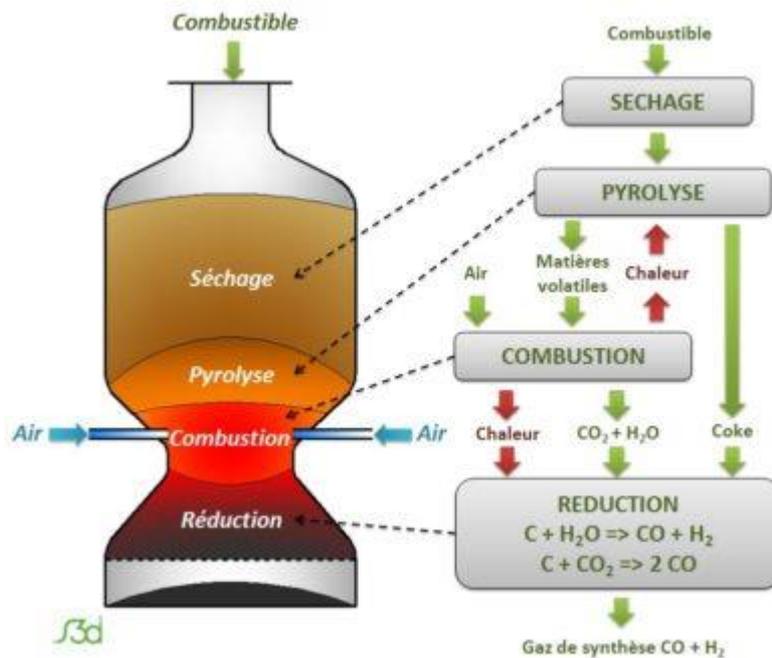
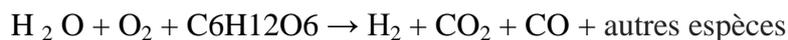


Figure 1.5 : principe de la gazéification de la biomasse

Cependant, la gazéification de la biomasse est moins rapide que celle du charbon, car elle génère des composés hydrocarbonés supplémentaires dans le mélange gazeux entrant dans le gazéifieur, notamment en l'absence d'oxygène. Par conséquent, il est généralement nécessaire d'ajouter une étape supplémentaire consistant à reformer ces hydrocarbures à l'aide d'un catalyseur afin de produire un syngaz propre. Un exemple simplifié de réaction est donné par [46] :



Il est important de souligner que, dans le processus mentionné précédemment, le glucose est utilisé en remplacement de la cellulose. La composition et la complexité de la biomasse réelle peuvent considérablement varier, la cellulose étant l'un des composants les plus significatifs [47]. La gazéification à l'eau supercritique représente une technologie hydrothermique prometteuse pour convertir les déchets de biomasse en un syngaz riche en hydrogène (composés gazeux, liquides et solides) et en bio huile, à des températures et pressions élevées [48]. Ce processus implique l'utilisation de l'eau à l'état supercritique ($T > 374 \text{ }^\circ\text{C}$, $p > 22,1 \text{ MPa}$). Les conditions proches du point critique de l'eau supercritique sont généralement recommandées, car l'eau est capable d'hydrolyser facilement les polymères naturels de la biomasse tels que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine [49].

1.8.5 Conversion de la biomasse microbienne

Les méthodes de conversion de biomasse microbienne exploitent la capacité des microorganismes à consommer et à digérer la biomasse tout en libérant de l'hydrogène. Cette étude pourrait conduire à des systèmes à grande échelle à moyen ou long terme, selon la voie choisie. Des sucres raffinés, des sources de biomasse brute telles que les résidus de maïs et même les eaux usées peuvent être utilisés comme matière organique. Ces méthodes sont souvent appelées approches de "fermentation sombre" car elles ne nécessitent pas l'utilisation de la lumière [50].

Les microbes produisent de l'hydrogène directement dans la fermentation directe de l'hydrogène. Ces bactéries peuvent décomposer les composés complexes de différentes manières, et les enzymes peuvent combiner les sous-produits de certaines de ces voies pour créer de l'hydrogène.[50]

Les cellules d'électrolyse microbienne (CEM) sont des dispositifs qui génèrent de l'hydrogène en combinant l'énergie et les protons fournis par les microorganismes qui décomposent les matériaux organiques avec un faible courant électrique. Cette technologie en est encore à ses débuts, et les chercheurs s'efforcent d'améliorer plusieurs aspects, notamment la recherche de matériaux moins coûteux et la détermination des meilleurs microorganismes à utiliser. [50]

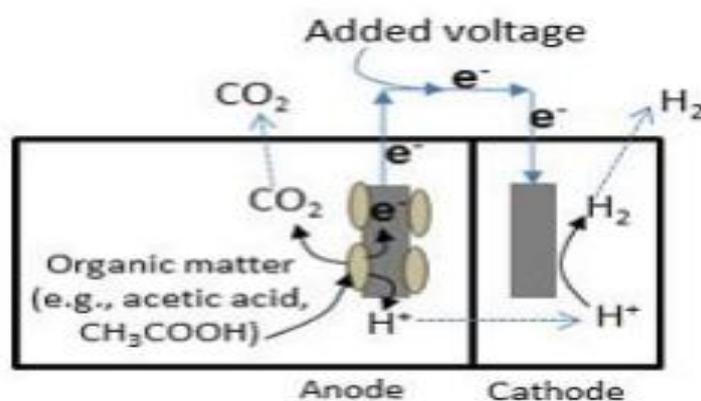


Figure 1.6 Cellules d'électrolyse microbienne

1.8.6 Cycles de fractionnement thermochimique de l'eau

Les cycles thermochimiques de fractionnement de l'eau (TWSC) sont une séquence de processus chimiques utilisant l'énergie thermique pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau [51]. La température requise pour le fractionnement direct de l'eau

en une seule étape dépasse 2000 °C, ce qui nécessite l'utilisation d'une source de chaleur à très haute température. Cependant, les matériaux de construction actuels ne sont pas suffisamment résistants à de telles températures [52]. Par conséquent, au cours des 50 dernières années, des TWSC à deux étapes ou plus ont été étudiés et développés. Les TWSC se déclinent en plusieurs catégories, avec différentes technologies en cours de développement caractérisées par le nombre de stades distincts et la température maximale de fonctionnement.

1.9 Stockage

Le stockage de l'hydrogène est une technologie essentielle permettant de faire progresser les technologies de l'hydrogène et des piles à combustible dans des domaines tels que l'énergie stationnaire, l'énergie portable et le transport. L'hydrogène possède la plus grande énergie par rapport à sa masse parmi tous les combustibles. Cependant, sa faible densité à température ambiante entraîne une faible énergie par unité de volume, ce qui nécessite le développement de méthodes de stockage avancées ayant le potentiel d'une densité d'énergie plus élevée. [53]

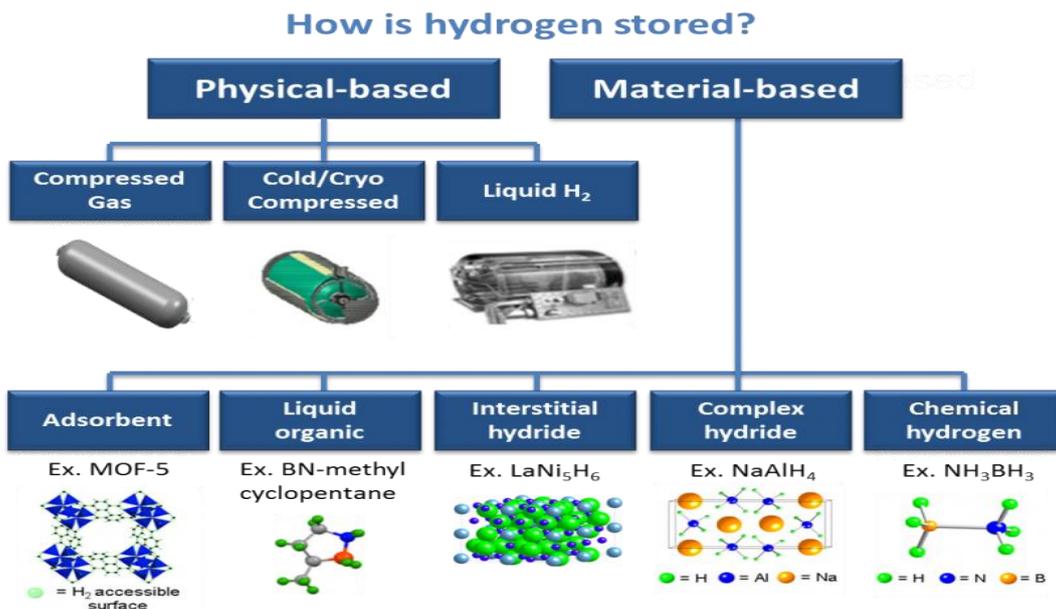


Figure 1.7 méthodes de stockage d'hydrogène

L'hydrogène peut être conservé physiquement soit sous forme gazeuse, soit sous forme liquide. Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse implique généralement l'utilisation de réservoirs solides. Les réservoirs doivent également être légers pour maintenir une capacité gravimétrique élevée. Les réservoirs composites renforcés de fibre de carbone sont légers et capables de stocker l'hydrogène à haute pression (avec une pression allant de 350 à 700 bars [5 000 à 10 000 lb/po2]). Quant au stockage de l'hydrogène sous forme liquide, il nécessite

des températures cryogéniques, étant donné que le point d'ébullition de l'hydrogène à pression atmosphérique est de $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. [53]

1.9.1 Sécurité de stockage

Le fait de contenir de l'hydrogène en toute sécurité à des pressions suffisamment élevées exige des réservoirs solides. Les réservoirs doivent également être légers pour maintenir une capacité gravimétrique élevée. Les réservoirs composites renforcés de fibre de carbone sont légers et capables de stocker l'hydrogène à des pressions allant jusqu'à 700 bars ($4,7\text{ MJ L}^{-1}$). Bien que l'hydrogène liquide à basse pression, proche de son point d'ébullition normal de 20 K, soit couramment utilisé pour le stockage et le transport en vrac de l'hydrogène, il y a actuellement peu de recherches menées pour son utilisation à bord des véhicules automobiles. En revanche, l'hydrogène comprimé est généralement stocké à des températures proches de la température ambiante, soit "froid" (sous-ambient mais supérieur à 150 K), soit "cryogénique" (150 K et inférieur). Le stockage de l'hydrogène comprimé est étudié en raison des densités d'hydrogène plus élevées qui peuvent être obtenues à des températures réduites. [53]



Figure 1.8 : réservoir de stockage d'hydrogène en liquide

1.9.2 Matériaux de stockage d'hydrogène

1.9.2.1 Les Cadres Métal-Organique (MOFs)

Les matériaux à base de carbone, tels que le charbon actif, les nanotubes de carbone et le graphène, ont démontré un fort potentiel dans le domaine du stockage de l'hydrogène.

Leurs caractéristiques, telles que leurs surfaces spécifiques élevées et leurs structures poreuses uniques, favorisent une adsorption efficace de l'hydrogène. [54]

1.9.2.2 Polymères Organiques Poreux (POPs)

Les POPs sont une classe de matériaux poreux composés de blocs de construction organiques. Ils présentent une porosité élevée et peuvent être conçus avec des fonctionnalités spécifiques pour améliorer les capacités de stockage de l'hydrogène. [55]

1.9.2.3 Liquide organique

Les défis liés au stockage conventionnel de l'hydrogène, tels que les technologies de compression et de liquéfaction, comprennent des problèmes de sécurité, une faible densité de stockage, le transport, les pertes par évaporation et des coûts relativement élevés. [16–20] Une option alternative qui suscite un intérêt croissant pour le stockage et le transport de l'hydrogène, en contournant les défis mentionnés ci-dessus, est l'utilisation de systèmes de transporteurs d'hydrogène organiques liquides (LOHC) [56] Le système LOHC est composé d'une paire de composés organiques, l'un appauvri en hydrogène (LOHC⁻) et l'autre riche en hydrogène (LOHC⁺). L'hydrogène est stocké en convertissant LOHC⁻ en LOHC⁺ lors d'une réaction d'hydrogénation catalytique. L'hydrogène est libéré en convertissant LOHC⁺ en LOHC⁻ lors d'une réaction de déshydrogénation catalytique. [57]-[58] Un exemple de la manière dont un système LOHC peut être intégré à une infrastructure énergétique, où une source d'énergie renouvelable est utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse, suivi du stockage de l'hydrogène produit à l'aide de la technologie LOHC. Dans un composé LOHC⁺, l'hydrogène peut être stocké pendant très longtemps sans autodécharge, ce qui favorise le stockage saisonnier de l'énergie et son transport vers des zones éloignées où la déshydrogénation peut être effectuée. Ce processus est réversible et permet une hydrogénation et une déshydrogénation rapides sans consommation des composés formant le système LOHC, et seul l'hydrogène est libéré. [59]– [60]

1.9.2.4 Les hydrures interstitiels

Sont des métaux élémentaires ou alliés (généralement des alliages binaires ou ternaires, par exemple Pd [61], TiFe [62], LaNi₅ [63], PdAgAu [64] dans lesquels l'hydrogène s'est infiltré dans les interstices, les vides entre les atomes métalliques du réseau cristallin. Le processus d'hydratation commence par l'adsorption du dihydrogène à la surface du métal, suivi d'une dissociation homolytique en deux atomes d'hydrogène, puis l'hydrogène pénètre dans le réseau cristallin pour occuper les sites interstitiels [65]. La quantité molaire

d'hydrogène absorbée, mesurée sous la forme du rapport atomique hydrogène/métal (H/M), dans ces systèmes est limitée à $H/M = \text{environ } 2$ [66].

1.9.2.5 Les hydrures chimiques

Les hydrures chimiques, également connus sous ce nom car ils utilisent des éléments plus légers que les hydrures métalliques, offrent une capacité de stockage gravimétrique considérablement supérieure. Toutefois, leur utilisation nécessite une rupture des liaisons covalentes entre les éléments et l'hydrogène, ce qui implique des exigences plus strictes en termes de réversibilité. Pour qu'un système soit réversible, il est essentiel que son énergie libre de Gibbs (ΔG) pour la libération de l'hydrogène soit proche de 0 kcal mol^{-1} . Pendant la libération de l'hydrogène gazeux, ces matériaux présentent un terme entropique positif (ΔS). Ainsi, afin d'obtenir un système réversible dans des conditions raisonnables et pratiques, il est nécessaire que la réaction de déshydrogénation soit légèrement endothermique ($\Delta H > 0$). Pour obtenir un système qui est réversible dans des conditions raisonnables/pratiques. [67]

1.9.2.6 Les hydrures complexes

Il est évident que les éléments légers et les hydrures plus covalents, tels que BH_3 , AlH_3 et NH_3 , présentent des densités d'énergie élevées. Cependant, ils sont extrêmement difficiles à manipuler en toute sécurité et se décomposent en éléments très stables, à savoir B, Al et N_2 . Ces éléments stables posent des défis pour la recharge en hydrogène à bord des véhicules. Heureusement, ces trois composés réagissent facilement avec des hydrures ioniques, comme les hydrures alcalins, pour former des composés tels que $LiBH_4$, $NaAlH_4$ et $LiNH_2$ [68]- [69]- [70]. Cette catégorie de matériaux comprend des solides stables, plus faciles à manipuler, qui se composent d'un contre-ion électropositif et d'un complexe de coordination où l'hydrogène est lié de manière covalente, tels que $[BH_4]$, $[AlH_4]$ et $[NH_2]$. Un changement de paradigme majeur s'est produit dans les années 1990 lorsque Bogdanović a observé la libération et l'absorption d'hydrogène dans le tétrahydridoalanoate de sodium catalysé par le titane, également appelé alcanate de sodium, dans des conditions modérées [71]. Des hydrures complexes réversibles à base d'azote, tels que $LiNH_2$ - Li_2NH - LiH , ont été découverts en 2002 par P. Chen [71], tandis que A. Züttel et K. ont également contribué aux avancées significatives dans ce domaine.

1.10 Les propriétés de l'hydrogène

La vitesse de combustion de l'hydrogène est beaucoup plus élevée que celle d'autres carburants, comme l'essence; par conséquent, il s'agit d'un carburant de remplacement qui pourrait améliorer efficacement la combustion et améliorer l'efficacité des moteurs à combustion interne. [53] [54]

Propriétés	hydrogène	essence	diesel
Teneur en glucides (pourcentage de masse)	0	84	86
masse moléculaire	2.015	110	170
Rapport stœchiométrique A/F	34.3	14.6	17
Température d'allumage (K)	858	530	-
Température de la flamme adiabatique (K)	2384	2270	2300
vitesse de flamme de 293 K (cm/s)	237	41.5	-
pourcentage de vol dans l'air)	4.1–75	1.5–7.6	0.6–5.5
Éteindre l'écart (cm)	0.06	0.2	-
PCI par kilogramme (MJ/kg)	120	44	-
Coefficient de diffusion (cm ² /s)	0.61	0.05	-

Tableau 1 les propriétés de l'hydrogène par rapport les autres carburantes

L'hydrogène a trois fois la valeur calorifique du pétrole dans les moteurs à combustion interne et les piles à combustible et produit réduction considérable des émissions d'échappement dangereuses, ce qui constitue l'un des principaux inconvénients des combustibles fossiles [75]. L'un des principaux avantages de l'hydrogène est qu'il est un

combustible convivial car utilisé dans une pile à combustible, il produit uniquement du H₂O [76]. Hydrogène une valeur calorifique 4, 2,8 et 2,4 fois supérieure à celle du charbon, de l'essence et du méthane, respectivement [77]. Comparé aux combustibles fossiles, l'hydrogène, l'élément le plus abondant, va la plus haute teneur spécifique en énergie [78]. Le carburant à hydrogène dans les moteurs CI peut réduire les émissions de CO₂ tout en préservant ou même améliorer la performance du moteur. [79] [80]

Les caractéristiques de l'hydrogène, de l'essence et du diesel sont différentes. Pour utiliser de l'hydrogène pur dans les moteurs, des modifications importantes sont nécessaires. Cependant, l'hydrogène peut être utilisé comme carburant auxiliaire dans les automobiles pour réduire la consommation de carburant et les émissions, constituant une solution intermédiaire [81] [82]. Étant donné l'importance des carburants à base d'hydrogène en tant que carburants renouvelables et propres dans les moteurs à combustion interne, il est important d'examiner leur influence sur les moteurs à allumage par étincelle et à allumage par compression. L'objectif de cette recherche est d'étudier comment les carburants à base d'hydrogène affectent les performances et les émissions des moteurs à allumage par étincelle et à allumage par compression.

1.11 Les avantages

L'hydrogène dans les moteurs à combustion interne présente de nombreux avantages en termes de propriétés de combustion. Cependant, des travaux de recherche supplémentaires sont encore nécessaires pour améliorer plusieurs propriétés des véhicules à combustion d'hydrogène, telles que l'efficacité du moteur, la puissance de sortie, l'efficacité thermique des freins, la puissance de freinage, la consommation de carburant spécifique aux freins, l'autonomie et réduction des émissions de NO_x, Cependant, dans le cas des moteurs à combustion à hydrogène, il y a une trace d'émissions de CO₂ (de l'air ambiant et huile de lubrification). [83] [84]

Le secteur des transports dépend actuellement fortement des combustibles fossiles, contribuant aux émissions de dioxyde de carbone et de polluants. Compte tenu de la pollution croissante de l'environnement et de l'augmentation simultanée de la demande d'énergie, la soi-disant «économie de l'hydrogène» est l'une des voies les plus prometteuses pour développer une énergie durable. [85] [86] [87] [88]

L'hydrogène dans les moteurs à combustion interne présente de nombreux avantages en termes de propriétés de combustion :

Chapitre 1 : analyse bibliographique

- Faibles émissions de polluants : l'hydrogène brûle proprement et ne produit que de l'eau et de la chaleur lorsqu'il est brûlé dans un moteur à combustion interne, ce qui entraîne une réduction des émissions de polluants tels que les gaz à effet de serre, les particules, les oxydes d'azote et les hydrocarbures [89] [90] [91] [92] le monoxyde de carbone ou le dioxyde de carbone, l'oxyde de soufre et les acides organiques. [6]
- Haute efficacité : L'hydrogène a un potentiel énergétique plus élevé et brûle plus complètement que les combustibles fossiles, ce qui augmente l'efficacité globale des moteurs à combustion interne [89] [90] [91] [92], L'hydrogène est déjà couramment et massivement utilisé dans l'industrie chimique. C'est un combustible à pouvoir énergétique élevé, non polluant, non toxique. Son énergie massique, délivrée lors de sa combustion avec le dioxygène, est élevée (120MJ/Kg), comparée à celle de l'essence (45MJ/Kg) ou du méthane (50MJ/Kg) [93] [94]
- L'atout de l'hydrogène : est qu'il ne possède ni couleur, ni odeur, ni saveur, et qu'il n'est pas corrosif. En effet, il est particulièrement riche en énergie : la combustion d'un kilogramme d'hydrogène produit environ trois fois plus d'énergie qu'un kilogramme d'essence. [6]
- Haute performance : L'hydrogène peut être utilisé dans les moteurs à combustion interne pour améliorer les performances du moteur telles que la puissance et le couple [89] [90] [92] [91]
- L'utilisation de l'hydrogène comme carburant présente des avantages techniques par rapport aux carburants liquides, tels que l'absence de problèmes de vaporisation insuffisante, de blocage de vapeur (vapor lock), de mélange pauvre, et autres. [6]
- Utilisation de sources d'énergie renouvelables : L'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et hydroélectrique, parce que L'hydrogène est une ressource illimitée, très abondante, renouvelable et possède une combustion propre. En effet, la combustion de l'hydrogène avec l'oxygène ne produit que de l'eau et aucune formation de dérivés soufrés ou carbonés, ce qui fait donc de l'hydrogène un carburant propre, contrairement à celle des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) qui rejettent des gaz à effet de serre ce qui en fait une option de carburant propre et renouvelable. Cela peut réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et contribuer à la transition vers une économie à faibles émissions de carbone. [93]

Chapitre 1 : analyse bibliographique

- Les moteurs à combustion interne alimentés à l'hydrogène peuvent bénéficier d'un système appelé "freinage régénératif", qui permet de récupérer l'énergie cinétique produite lors du freinage et de la stocker sous forme d'électricité pour une utilisation future. Cette technique peut améliorer l'efficacité énergétique du moteur et réduire la consommation de carburant. [94]
- Le fait que l'hydrogène soit l'élément le plus petit de la classification périodique, avec une longueur de seulement 10^{-15} mètres, lui permet de se diffuser rapidement dans l'air. En effet, son coefficient de diffusion dans l'air est de 0.61 cm²/s, soit quatre fois plus rapide que celui du gaz naturel dont le coefficient de diffusion est égal à 0.16. Cette caractéristique est considérée comme un atout en matière de sécurité. [6]
- Un système énergétique à base d'hydrogène est considéré comme une option viable pour fournir de l'énergie service de manière efficace, propre et sûre tout en respectant les objectifs de durabilité. [95]
- Les moteurs à combustion à hydrogène sont une technologie importante pour la décarbonation. Les véhicules et équipements alimentés par batterie ne constituent pas actuellement une application prioritaire de la technologie des batteries. Cela suggère que la technologie de l'hydrogène pourrait être une solution zéro émission prometteuse pour de nombreux opérateurs. Les systèmes électriques à base d'hydrogène sont considérés comme une option viable pour fournir de l'énergie commerciale de manière efficace, propre et sûre tout en respectant les objectifs de durabilité. [95]
- Réduction de bruit : Une diminution du niveau sonore peut être observée en utilisant de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne. En effet, contrairement aux moteurs alimentés par des combustibles fossiles, la combustion de l'hydrogène ne génère pas de bruit d'échappement. [96]

1.12 Les inconvénients

Bien que l'hydrogène ait de nombreux avantages, dans ses utilisations, il y a des obstacles auxquels nous sommes confrontés, il est trop dangereux, explosif, difficile d'utilisation et de manipulation Comme tout autre gaz ou liquide combustible. De plus, en raison de la température de combustion plus élevée, l'hydrogène des véhicules à combustion affiche des émissions de NOx identiques ou jusqu'à 20 % supérieures à celles des véhicules à essence [83] [97] [98] [99] [100] [84], l'hydrogène présente des risques liés à ses propriétés physico-chimiques. :

Chapitre 1 : analyse bibliographique

- **Inflammabilité** : Le dihydrogène est un gaz hautement inflammable. Il présente une plage d'inflammabilité très large (4 à 75 % de la masse d'air) et un très faible apport d'énergie d'activation de 0,02 MJ (une étincelle suffit à fournir l'énergie) provoquera une déflagration, mais ne déclenchera pas Nécessite 0,29 MJ. Explosion de méthane). L'hydrogène mélangé à l'oxygène dans des rapports stœchiométriques est un puissant explosif. L'hydrogène dans l'air est un mélange explosif lorsque le rapport volumique H₂/air est compris entre 13 et 65 %. [101]
- **Explosivité** : La combustion vigoureuse est la libération soudaine d'énergie, entraînant des fronts de flamme et des ondes de surpression, qui suivent deux régimes possibles :

a-Déflagration : Le front de flamme se propage à vitesse subsonique, le gaz frais est comprimé par détente volumique (effet piston) et la surpression augmente continuellement

b- Détonation : Le front de flamme se propage à une vitesse supersonique, la flamme est sur pressurisée et une onde de pression se forme. [102]

- En plus d'être potentiellement explosif dans certaines concentrations en milieu confiné, mais pas à l'air libre sous forme de gaz peu comprimé, l'hydrogène prend beaucoup de place sur un véhicule. Lorsqu'il est comprimé à haute pression, il peut présenter un risque d'auto-inflammation spontanée, ce qui constitue un danger supplémentaire. Les différentes techniques d'absorption pour réduire la taille de l'hydrogène restent à améliorer et sont coûteuses. De plus, la masse de l'absorbant (sous forme de poudre ou de pastilles d'alliages métalliques) est encore un inconvénient pour son utilisation. [6]
- **La faible densité énergétique** : l'hydrogène est l'un des inconvénients majeurs de son utilisation comme carburant pour les moteurs à combustion interne. La densité énergétique de l'hydrogène est d'environ 120 mégajoules par kilogramme (MJ/kg), contre environ 44 MJ/kg pour l'essence et 48 MJ/kg pour le diesel. Cela signifie que les voitures à hydrogène consomment plus de carburant pour parcourir une distance donnée que les voitures à essence ou diesel, ce qui peut entraîner une autonomie moindre. La faible densité énergétique de l'hydrogène est due à sa nature gazeuse et à son faible poids moléculaire. Cela signifie qu'il faut beaucoup plus d'hydrogène que les carburants conventionnels pour stocker une quantité d'énergie donnée. Il peut

également augmenter la taille du réservoir de carburant et la pression nécessaire au stockage. [103] [104] [105]

- Du fait de sa légèreté, l'hydrogène à poids égal, occupe un volume beaucoup plus important qu'un autre gaz. Concrètement, même comprimés à 700 bars, 4.6 litres d'hydrogène sont encore nécessaires pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence. Ces volumes importants sont une contrainte pour le transport et le stockage sous forme gazeuse. Pour ces raisons, il sera très difficile de concevoir un réservoir sûr, compact, léger et moins dispendieux tout en gardant une autonomie relativement élevée. [6]
- Stockage : Le stockage de l'hydrogène comme carburant pour les moteurs à combustion interne présente plusieurs défis. Un défi majeur est la faible densité énergétique de l'hydrogène, qui nécessite des réservoirs de stockage volumineux et coûteux. Les réservoirs d'hydrogène doivent être conçus pour stocker l'hydrogène à haute pression (350-700 bar) ou à basse température (-253 °C). Les réservoirs à haute pression nécessitent des réservoirs épais et lourds pour maintenir l'hydrogène à haute pression, et les réservoirs cryogéniques nécessitent une isolation coûteuse pour maintenir l'hydrogène au frais. De plus, le stockage de l'hydrogène peut entraîner une perte d'efficacité énergétique. L'hydrogène peut se diffuser dans les matériaux de stockage, réduisant potentiellement la quantité d'hydrogène disponible pour le carburant. De plus, la compression de l'hydrogène pour le stockage à haute pression nécessite également de l'énergie, ce qui peut réduire. [106] [107] [108]
- Le transport : l'hydrogène comme carburant pour les moteurs à combustion interne est également confronté à de nombreux défis. L'hydrogène est un gaz très léger et volatil, ce qui le rend difficile à transporter et à stocker en toute sécurité. De plus, l'hydrogène a une très faible densité d'énergie et doit être comprimé ou refroidi pour être transporté en quantité suffisante. L'hydrogène peut être transporté par pipeline, ou camion-citerne. Le transport par pipeline est le plus économique, mais nécessite des conduites d'hydrogène spécialement conçues et peut être coûteux. Le transport par camion-citerne est plus flexible, mais nécessite des camions spécialement conçus pour transporter l'hydrogène en toute sécurité. Le transport par tanker est également possible, mais nécessite un navire spécialement conçu pour transporter de l'hydrogène liquide à basse température. Le transport de l'hydrogène entraîne également une moindre efficacité énergétique. La compression de l'hydrogène pour le transport à haute pression nécessite de l'énergie qui peut réduire l'efficacité de l'ensemble du

système. De plus, la sécurité est une préoccupation majeure lors du transport d'hydrogène, car l'hydrogène est hautement inflammable et peut exploser en présence d'air. Cependant, des progrès ont été réalisés dans le transport de l'hydrogène. Les chercheurs travaillent sur des technologies de transport plus sûres et plus efficaces, notamment des réservoirs de stockage d'hydrogène plus légers et des technologies de transport par pipeline plus économiques. [109] [110] [111]

- Émissions de NOx : L'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans les moteurs à combustion interne réduit les émissions de gaz à effet de serre, mais entraîne également l'émission de polluants atmosphériques nocifs NOx (oxydes d'azote). Les émissions de NOx sont principalement produites à des températures de combustion élevées dans les moteurs à combustion interne. Des études ont montré que les moteurs à combustion à hydrogène ont des émissions de NOx plus élevées que les moteurs à essence ou diesel. Cependant, ces émissions peuvent être réduites en utilisant des technologies de combustion plus efficaces et en contrôlant les températures de combustion. Par exemple, des études ont montré que l'utilisation d'un mélange d'hydrogène et d'air appauvri en oxygène peut réduire les émissions d'oxyde d'azote des moteurs à combustion interne à hydrogène. De plus, l'utilisation de technologies de post-traitement telles que les catalyseurs d'échappement peut également réduire les émissions d'oxyde d'azote. [112] [113] [114]
- Étant donné que la flamme de l'hydrogène se propage sur une courte distance, elle se propage près de la paroi du cylindre et de l'injecteur, favorisant ainsi une augmentation de la tendance de retour de flamme. Par conséquent, la flamme du mélange hydrogène-air se propage plus facilement à travers la soupape d'admission presque fermée que la flamme des hydrocarbures/air. [6]
- La faible énergie d'allumage de l'hydrogène peut causer la formation de gaz chauds et de points chauds dans le cylindre, qui peuvent servir de sources pour des allumages prématurés pendant la course d'admission. Ces phénomènes peuvent causer des cliquetis (vibrations des parois de la chambre de combustion) et des retours de flamme (ou backfire). [6]
- Étant donné que l'hydrogène a une température d'auto-inflammation élevée, il n'est pas possible de l'utiliser directement dans un moteur diesel. Pour allumer l'hydrogène dans ce type de moteur, il est nécessaire d'installer des bougies d'allumage ou d'utiliser une petite quantité de carburant diesel pour l'allumage pilote). [6]

Chapitre 1 : analyse bibliographique

- Les difficultés liées à la combustion de l'hydrogène représentent un frein dans le développement de moteurs fonctionnant avec ce carburant. Des mesures doivent être prises pour éviter ces anomalies, ce qui a un impact important sur la conception des moteurs, le contrôle de la charge et la formation du mélange). [6]
- Production d'hydrogène : Bien que l'hydrogène soit l'élément le plus présent dans la nature, il est rare de le trouver sous forme pure de dihydrogène. Il doit être synthétisé car il n'est pas disponible à l'état brut. Cependant, la synthèse de l'hydrogène nécessite plus d'énergie que celle qu'il peut produire. Pour produire de l'hydrogène, on utilise des sources d'énergie provenant de centrales thermiques qui fonctionnent avec des énergies fossiles telles que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Cela libère du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre, ce qui ne fait que transférer le problème de la non-utilisation des énergies fossiles et augmenter leur consommation plutôt que de les utiliser directement dans l'industrie automobile. [6]. La production d'hydrogène à grande échelle peut être coûteuse et énergivore. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne pour générer de l'hydrogène est une option plus durable, mais elle peut également être coûteuse.

1.13 Conclusion

Dans ce contexte, nous voyons que l'hydrogène est une source d'énergie nouvelle et plus efficace avec moins d'émissions représentées dans l'eau et les NOx par rapport aux combustibles fossiles, en raison de ses caractéristiques, de la possibilité de le produire à partir de sources naturelles et biologiques, et de la capacité de le stocker, bien qu'il y ait des difficultés à cela. Ses utilisations dans les moteurs à combustion interne nécessitent quelques études et quelques modifications mineures au niveau structure et le fonctionnement, on va le voir dans le chapitre suivante.

Chapitre 2 Moteur à hydrogène

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons montrer le principe de fonctionnement et le changement d'organe et comment utilise et fournie l'hydrogène dans le moteur à combustion interne. Et certains des problèmes auxquels nous pouvons être confrontés et comment les résoudre.

2.2 Principe de fonctionnement

2.2.1 Injection de carburant :

Le procédé d'introduction de carburant dans un moteur à hydrogène diffère de celui d'un moteur à essence conventionnel. Au lieu d'injecter du carburant liquide, une méthode distincte est employée pour l'hydrogène gazeux. Ce dernier est pulvérisé dans la chambre de combustion par le biais d'un injecteur, qui est alimenté par un réservoir à haute pression contenant l'hydrogène. La pulvérisation est réalisée à l'aide d'une petite buse et d'une pompe haute pression. Après l'injection, l'hydrogène réagit avec l'air lorsque la bougie d'allumage entre en action, générant uniquement de l'eau comme sous-produit. Ainsi, cette source d'énergie présente une option propre et respectueuse de l'environnement. Toutefois, l'utilisation de l'hydrogène entraîne des défis pour certains composants tels que les bougies d'allumage et les injecteurs de carburant, nécessitant ainsi des adaptations de conception pour garantir la sécurité. De plus, l'hydrogène a une densité d'énergie inférieure à celle de l'essence, ce qui peut entraîner une augmentation de la taille et du poids du réservoir de carburant et des véhicules utilisant l'hydrogène. Néanmoins, des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité et la sécurité de cette technologie, notamment pour les véhicules équipés de piles à combustible et les moteurs à combustion interne modifiés. [115]

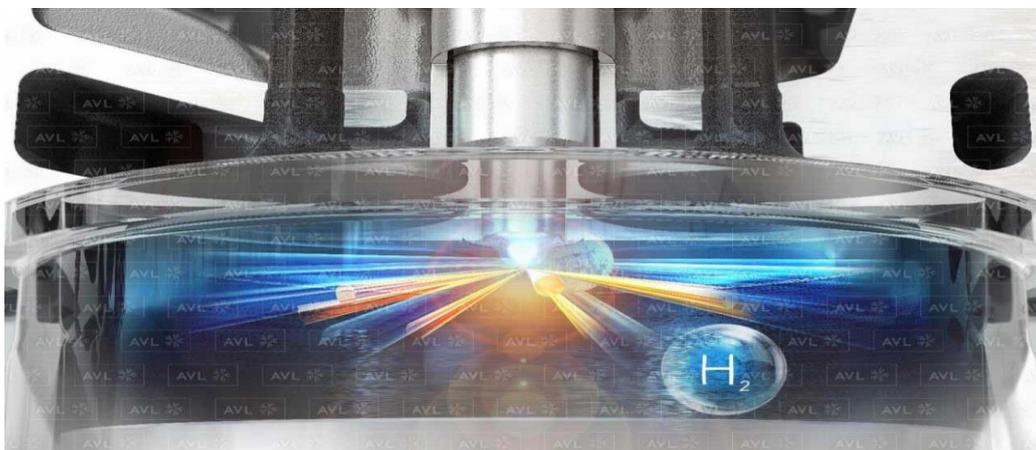


Figure 2.1 : Injection de carburant

2.2.2 Compression :

La compression dans un moteur à combustion interne à hydrogène présente des similitudes avec celle d'un moteur à combustion interne conventionnel, mais des différences existent quant à l'optimisation de la compression spécifique à l'hydrogène. Contrairement aux moteurs traditionnels qui compriment le mélange air-carburant dans le cylindre, les moteurs à hydrogène font souvent usage de compresseurs externes pour comprimer l'hydrogène avant son injection dans le cylindre. L'optimisation de la compression pour l'hydrogène revêt une importance capitale étant donné sa densité énergétique inférieure à celle d'autres carburants, nécessitant ainsi une compression plus élevée pour atteindre des niveaux de puissance comparables à ceux des moteurs à combustion interne classiques. De plus, l'hydrogène présente une vitesse de combustion très élevée, ce qui exige un contrôle précis de la compression afin de prévenir tout risque d'auto-allumage et de détonation. [116] [117] [118]

2.2.3 Allumage :

Il est des différences importantes dans les moteurs à combustion interne à l'hydrogène par rapport aux moteurs à essence en raison des caractéristiques particulières de l'hydrogène. Le principe fondamental repose sur l'injection d'hydrogène pur dans le cylindre, suivi de sa compression avant d'être enflammé par une étincelle électrique. Toutefois, contrairement aux moteurs à essence, l'hydrogène requiert une étincelle plus puissante en raison de sa grande inflammabilité. Par conséquent, les bougies d'allumage doivent être spécialement conçues pour produire une étincelle d'intensité supérieure [119] [120] [121]. De plus, l'ajustement de l'allumage d'un moteur fonctionnant à l'hydrogène nécessite des paramètres distincts par rapport à un moteur à essence. Pour un fonctionnement avec un mélange stœchiométrique d'hydrogène, le calage de l'allumage doit être retardé de manière significative par rapport à celui initialement prévu pour un moteur à essence. En ce qui concerne le fonctionnement avec un mélange pauvre en hydrogène, le calage de l'allumage doit également être relativement avancé par rapport à la valeur stœchiométrique correspondante prévue pour un réglage spécifique à l'hydrogène. Le calage de l'allumage dépend du rapport de richesse du fonctionnement avec un mélange pauvre en hydrogène. Les retours de flamme dans les moteurs à hydrogène, qui peuvent causer d'importants dommages, sont souvent dus à une propagation rapide de la flamme. Dans un moteur spécialement conçu pour fonctionner à l'hydrogène, il est également crucial d'ajuster le calage des soupapes d'admission et d'échappement par rapport au réglage existant pour l'essence [122]. Il est essentiel de

contrôler avec précision la quantité d'hydrogène injectée afin de prévenir tout risque d'explosion ou de surchauffe. Les moteurs à combustion interne fonctionnant à l'hydrogène sont souvent équipés de systèmes de gestion électronique avancés chargés de contrôler à la fois l'injection de carburant et l'allumage. [121] [120] [119]

2.2.4 Expansion :

Dans ce type de moteur, l'hydrogène est introduit dans la chambre de combustion où il se mélange à l'air et est ensuite enflammé, générant ainsi une réaction chimique qui produit de la chaleur convertie en énergie mécanique pour générer du mouvement. Par ailleurs, il convient de noter que l'hydrogène présente une vitesse de combustion plus élevée par rapport aux combustibles fossiles, ce qui peut entraîner des défis de contrôle de la combustion tels que la détonation. Cependant, les ingénieurs peuvent remédier à ce problème en utilisant des systèmes d'injection de carburant plus avancés qui permettent de réguler la combustion de manière appropriée. [123] [124] [125]

2.2.5 L'échappement :

Le fonctionnement de l'échappement dans les moteurs à combustion interne à l'hydrogène présente des similitudes avec celui des moteurs à essence ou diesel. Dans ce cas, l'hydrogène est injecté dans le cylindre où il se mélange à l'air et est comprimé. La combustion de l'hydrogène et de l'air est déclenchée par l'étincelle produite par la bougie d'allumage, générant de la chaleur, de l'eau et des gaz d'échappement. Cependant, il est important de noter que les moteurs à hydrogène ont des exigences spécifiques en matière de systèmes d'échappement.

Étant donné la température élevée résultant de la combustion de l'hydrogène, les matériaux utilisés dans les systèmes d'échappement doivent résister à des températures plus élevées que celles des moteurs à essence ou diesel. Ainsi, l'utilisation d'alliages spéciaux peut être nécessaire pour résoudre ce défi.

De plus, en raison de la haute inflammabilité de l'hydrogène, les systèmes d'échappement des moteurs à hydrogène doivent être conçus de manière à éviter toute étincelle ou flamme provenant du système d'échappement. Cela implique l'utilisation de matériaux de haute qualité et une étanchéité adéquate du système pour garantir une sécurité optimale. [126] [127] [128]

2.3 Modification par rapport au moteur conventionnel

Les moteurs à hydrogène ont des similitudes avec les moteurs à essence à combustion interne en termes de conception et de principes de fonctionnement. Cependant, il est nécessaire d'apporter des modifications à certains organes et composants pour adapter un moteur à essence afin de le rendre fonctionnel avec de l'hydrogène. Ci-dessous sont présentés quelques exemples d'organes qui peuvent différer entre les deux types de moteurs :

2.3.1 Injecteurs de carburant

Dans un moteur à combustion interne à essence, l'essence est injectée dans le moteur à travers des injecteurs de carburant. Dans un moteur à combustion interne à hydrogène, l'hydrogène est injecté dans le moteur via un injecteur de carburant adapté aux propriétés de l'hydrogène. [129] [130] [131]

Les moteurs à combustion interne à hydrogène sont équipés d'injecteurs de carburant qui ont un rôle primordial. Contrairement aux moteurs à essence, où les injecteurs de carburant envoient de l'essence dans la chambre de combustion pour créer l'explosion, les moteurs à hydrogène requièrent une injection précise d'hydrogène gazeux dans la chambre de combustion. Pour ce faire, des injecteurs spécifiques ont été conçus pour fonctionner avec l'hydrogène. Divers types d'injecteurs de carburant sont disponibles pour les moteurs à combustion interne à hydrogène, tels que les injecteurs à jet liquide, les injecteurs à jet gazeux et les injecteurs à jet transversal. Chacun de ces types d'injecteurs présente des avantages et des inconvénients, et peut être adapté aux exigences du moteur. [132] [133] [134]

- **Injecteurs à jet liquide :** Les moteurs à combustion interne à hydrogène utilisent différents types d'injecteurs de carburant, dont les injecteurs à jet liquide. Ces derniers sont souvent employés dans les moteurs à hydrogène de faible puissance, tels que ceux équipant les véhicules à piles à combustible. Ils ont pour fonction d'injecter de l'hydrogène liquide dans la chambre de combustion, où il est vaporisé et mélangé à de l'air comprimé avant d'être enflammé. L'un des avantages des injecteurs à jet liquide réside dans leur capacité à réguler précisément la quantité d'hydrogène injectée dans la chambre de combustion. Toutefois, ils peuvent également présenter des inconvénients à long terme, tels qu'une plus grande propension à accumuler des dépôts de carbone qui affectent leur performance. [133] [134] [132]
- **Injecteurs à jet gazeux :** Les moteurs à combustion interne à hydrogène utilisent également des injecteurs à jet gazeux pour l'injection du carburant. Ce type d'injecteur

projetée de l'hydrogène gazeux à haute pression dans la chambre de combustion, où il est mélangé à de l'air comprimé avant d'être enflammé. Les injecteurs à jet gazeux sont avantageux en termes de contrôle électronique de l'injection d'hydrogène, ce qui permet une plus grande précision. Ils sont également moins susceptibles de s'encrasser avec des dépôts de carbone que les injecteurs à jet liquide. Toutefois, leur utilisation nécessite des systèmes de régulation de pression plus sophistiqués. [138] [139] [138]

- **Injecteurs à jet transversal** : Les injecteurs à jet transversal jouent un rôle important dans les moteurs à combustion interne alimentés à l'hydrogène en garantissant une bonne dispersion du carburant à l'intérieur de la chambre de combustion, favorisant ainsi une combustion homogène. Ils conviennent particulièrement bien aux moteurs à combustion interne alimentés à l'hydrogène car ce carburant possède des propriétés différentes de celles des carburants fossiles tels que l'essence ou le diesel. Les injecteurs à jet transversal sont généralement conçus pour injecter le carburant perpendiculairement à l'axe de la chambre de combustion, ce qui permet une dispersion optimale. De plus, certains de ces injecteurs peuvent être munis de plusieurs orifices de pulvérisation pour améliorer encore la dispersion du carburant et ainsi optimiser la combustion. [141] [142]

2.3.2 Bougies d'allumage

Les bougies d'allumage sont utilisées dans les moteurs à combustion interne à essence pour déclencher une étincelle qui permet d'allumer le mélange air-essence. En revanche, dans les moteurs à combustion interne à hydrogène, à la base ces bougies ne sont pas importantes car l'hydrogène peut s'enflammer spontanément dans certaines circonstances. [129] [130] [131]

Toutefois, dans les moteurs à hydrogène, l'allumage est habituellement obtenu par l'injection contrôlée d'hydrogène, évitant ainsi le besoin de bougies d'allumage. Pour ce faire, l'hydrogène est injecté sous haute pression dans la chambre de combustion où il est mélangé avec de l'air comprimé, entraînant une inflammation spontanée lorsque les conditions de pression et de température requises sont atteintes [141] [142]. Il est recommandé d'utiliser des bougies d'allumage de type "froid" afin d'éviter que les électrodes de la bougie ne dépassent la limite d'auto-inflammation [143] [144]. Il y a néanmoins des cas exceptionnels où les bougies d'allumage sont utilisées dans les moteurs à combustion interne à hydrogène, notamment dans les moteurs hybrides hydrogène-essence. Dans ces derniers, où un système de combustion mixte est employé. [141] [142]

2.3.3 Systèmes de contrôle d'injection et d'allumage

Le fonctionnement des systèmes de contrôle d'injection et d'allumage dans les moteurs à combustion interne à hydrogène est similaire à celui des moteurs à essence, mais des ajustements sont nécessaires pour prendre en compte les propriétés particulières de l'hydrogène. Pour la gestion de l'injection de carburant, un système de gestion électronique du moteur (EMS) régule la quantité d'hydrogène injectée dans la chambre de combustion en fonction de la charge et des conditions de conduite. Les capteurs surveillent la quantité d'oxygène et d'hydrogène dans le mélange air-hydrogène, ainsi que la température et la pression dans la chambre de combustion, ce qui permet au système EMS d'ajuster la quantité d'hydrogène injectée pour maintenir un ratio air-hydrogène optimal. [145] [146]

Le système d'injection peut être configuré de manière synchronisée, soit en injectant du carburant dans l'orifice d'admission et en programmant le système d'injection pour créer une période initiale de refroidissement de l'air pendant la phase initiale de l'admission, et en terminant l'injection de manière à ce que tout l'hydrogène soit admis sans laisser de résidus dans le collecteur d'admission lorsque la soupape se ferme, ou en utilisant l'injection directe pendant la course de compression. Dans les deux cas, des injecteurs à débit élevé sont nécessaires, et l'utilisation de plusieurs injecteurs par cylindre peut réduire cette exigence. Il convient de noter que la synchronisation décrite ici peut ne pas être indispensable, car il existe des études où aucun lien entre le calage de l'injection et le retour de flamme ou le rapport d'équivalence limité du pré-allumage n'a été observé [147]. La synchronisation de l'injection réduit également la quantité de carburant non brûlé présente dans le collecteur d'admission à un moment donné, limitant ainsi la gravité des retours de flamme en cas de survenance. [6]

Concernant le système d'allumage, bien que les bougies d'allumage puissent être utilisées pour démarrer le moteur à hydrogène, une fois en fonctionnement, l'allumage est généralement obtenu par l'injection d'hydrogène à haute pression, ce qui provoque une inflammation spontanée. [145] [146]. Pour prévenir l'inflammation incontrôlée causée par l'énergie résiduelle d'inflammation, il est possible d'assurer une bonne mise à terre du système d'allumage ou de modifier la résistance électrique du câble d'allumage [148] [149]. Il est également important d'éviter l'induction d'allumage dans le câble d'allumage voisin, par exemple en utilisant un système de bobine sur la bougie. Étant donné que l'allumage des mélanges d'hydrogène nécessite une tension d'allumage secondaire plus élevée en raison de la concentration plus faible d'ions de flamme d'hydrogène, il est recommandé d'utiliser un système d'allumage à haute tension [148] [149] [150], qui peut être satisfait par un système de

bobine sur la bougie. De plus, l'écartement des électrodes peut être réduit pour diminuer la tension d'allumage. Cela ne pose pas de problème pour les moteurs à hydrogène car la formation de dépôts est presque inexistante. Des électrodes avec des espacements aussi petits que 0,25 mm ont été utilisées [151] (bien que l'écartement ait été porté à 0,5 mm ultérieurement en raison des difficultés de démarrage à froid dues à la condensation d'eau à la pointe de la bougie). [6]

Toutefois, il est important de souligner que les systèmes de contrôle d'injection et d'allumage pour les moteurs à hydrogène sont toujours en cours de développement, car l'utilisation de l'hydrogène comme carburant nécessite des technologies spécifiques pour garantir une performance et une efficacité optimales. [145] [146]

2.3.4 Matériaux des composants

Il est crucial de sélectionner des matériaux pour les composants du moteur qui soient capables de résister à l'hydrogène afin de minimiser les effets néfastes de la corrosion. [6]

Les moteurs à combustion interne utilisant l'hydrogène nécessitent l'utilisation de matériaux spécifiques pour garantir la sécurité et la durabilité de fonctionnement. Ainsi, les réservoirs de stockage d'hydrogène doivent être conçus pour résister à la pression élevée et à la corrosion de l'hydrogène, et sont souvent faits en acier inoxydable, en aluminium ou en matières composites. De même, Les pistons les bielles, les soupapes d'admission et d'échappement sont généralement doivent être capables de supporter des pressions élevées et résister à la corrosion, et sont souvent en aluminium, titane ou acier inoxydable. Les bougies d'allumage sont fabriquées à partir d'électrodes en iridium ou en platine pour une meilleure durabilité et résistance à la corrosion [152] [153] [154] [155] [156], et d'après d'autres bibliographie ils sont dit que Il est déconseillé d'opter pour des bougies dotées d'électrodes en platine, car le platine peut agir comme un catalyseur d'oxydation de l'hydrogène [157] [158]. Il convient de noter que le platine a été utilisé dans les systèmes d'échappement pour oxyder l'hydrogène non brûlé [159] [6]. Enfin, les joints d'étanchéité doivent être résistants à la corrosion et capables de supporter des températures élevées, et sont souvent en acier inoxydable ou en polymère fluoré. Il est important de souligner que la recherche est en constante évolution pour améliorer la sécurité et la durabilité des composants des moteurs à combustion interne à hydrogène et optimiser leur efficacité globale. [152] [153] [154] [155] [156]

2.4 Méthodes d'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs

Il est possible d'utiliser de l'hydrogène comme carburant dans les moteurs à combustion interne. Cependant, il est nécessaire d'apporter quelques modifications modestes au niveau du moteur pour adapter la structure de combustion du carburant. L'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne est similaire à celle dans d'autres types de moteurs. Plusieurs études ont été menées dans l'industrie automobile [160] sur l'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à essence à combustion interne, où l'hydrogène est injecté dans la chambre de combustion du moteur.

L'exploitation de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne offre une perspective intéressante pour diminuer les rejets de gaz à effet de serre et de contaminants dans l'atmosphère. Plusieurs méthodes ont été élaborées afin de concrétiser cette alternative, telles que celles présentées ci-après pour l'usage de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne. :

2.4.1 Utilisation de l'hydrogène comme carburant direct

En règle générale, les moteurs classiques utilisent des carburants liquides comme l'essence et le diesel. Quelques moteurs ont été conçus pour fonctionner avec des carburants alternatifs comme le gaz naturel. Cependant, les moteurs classiques ne sont pas adaptés à l'utilisation directe de l'hydrogène, à moins de modifier les systèmes de combustion. Ainsi, pour combiner différents types d'électricité et d'hydrogène, des idées novatrices doivent être élaborées. [161]

2.4.2 Utilisation de l'hydrogène en tant que carburant secondaire

La possibilité d'utiliser l'hydrogène comme carburant principal ou secondaire dans les moteurs à combustion interne est envisageable. Bien que l'utilisation de l'hydrogène en tant que source de carburant unique présente certaines limites, elle s'avère plus adaptée dans le contexte actuel [162]. Bien que cette technique ne permette pas de se détourner complètement des combustibles fossiles, l'hydrogène peut être utilisé conjointement avec un changement économique dans le cadre des combustibles, ce qui permettrait de minimiser les émissions d'échappement nocives. [163]

2.4.3 Moteurs à mélanges hydrogène-hydrocarbures

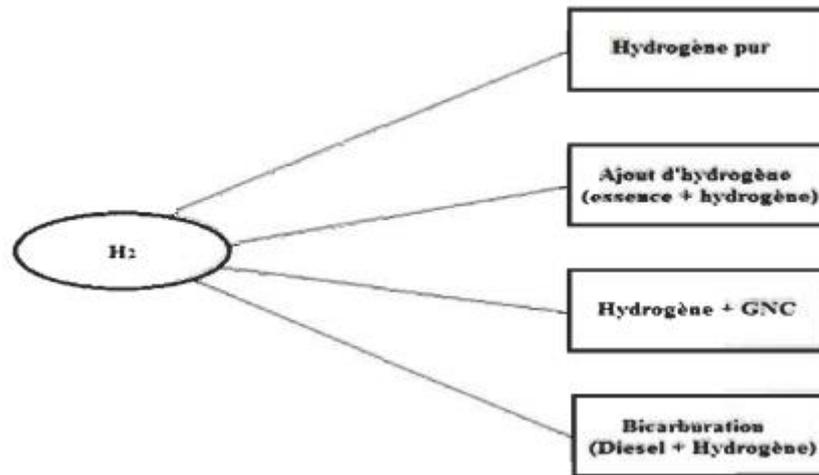


Figure 2.2 : Utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne

L'utilisation de l'hydrogène en tant qu'additif combustible ou comburant d'appoint mélangé aux carburants dérivés des hydrocarbures présente divers avantages (voir fig. 2.2). Ce procédé, connu sous le nom d'enrichissement du carburant par hydrogène, améliore la combustion du mélange hydrogène-hydrocarbures en exploitant l'énergie d'allumage réduite et la vitesse de combustion élevée de l'hydrogène. Cela permet de réduire les anomalies de combustion, d'améliorer les performances et l'efficacité du carburant, tout en réduisant les émissions polluantes, telles que les émissions de CO₂.

Cependant, il est impossible de stocker simultanément de l'hydrogène gazeux et un combustible liquide dans un même réservoir en raison de la faible densité de l'hydrogène. L'hydrogène se concentre naturellement au-dessus du carburant liquide, ce qui empêche la formation du mélange nécessaire à la combustion. De plus, les combustibles liquides sont généralement stockés à des pressions relativement faibles, ce qui limite la capacité d'ajouter de l'hydrogène. De surcroît, l'hydrogène liquide a un point d'ébullition extrêmement bas (-258 °C ou 20,35 K), ce qui entraînerait la solidification des autres carburants s'il était stocké dans le même réservoir.

Néanmoins, il est possible d'utiliser l'hydrogène en combinaison avec d'autres combustibles liquides denses, tels que l'essence, le diesel ou l'alcool, à condition que chacun soit stocké séparément et mélangé à l'état gazeux juste avant l'allumage du moteur. Cependant, l'utilisation de l'hydrogène en conjonction avec d'autres combustibles nécessitant un système de stockage volumineux, comme le propane, présente des défis. Bien que le

moteur à allumage commandé soit moins efficace que le moteur à allumage par compression, il est possible de combler cette différence en rendant le mélange air-essence plus détonant avec l'ajout d'une petite quantité d'hydrogène. Cette approche permet de faire fonctionner le moteur avec un mélange air-essence en deçà du rapport stœchiométrique normal, ce qui réduit la consommation de carburant et diminue les émissions de CO₂. [6]

2.5 Impact des carburants à l'hydrogène sur les performances des moteurs à combustion interne (CI)

Les propriétés de l'hydrogène nécessitent diverses modifications des moteurs à essence pour son utilisation, ce qui a fait l'objet de nombreuses recherches [164]. Des études antérieures se sont concentrées sur la combinaison de l'hydrogène avec de l'essence ou du diesel et l'évaluation de l'amélioration des performances. [165] [166]

2.5.1 Puissance et couple

La performance en puissance et en couple Étant donné que la valeur calorifique inférieure (LHV) de l'hydrogène (120 MJ/kg) est supérieure à celles du diesel (43,6 MJ/kg) et de l'essence (43,4 MJ/kg) lorsqu'il est ajouté dans les moteurs à allumage par étincelle (SI) et à allumage par compression (CI), l'hydrogène diminue l'efficacité volumétrique du moteur [167]. À l'intérieur du moteur, l'expansion de l'hydrogène est plus importante que celle des carburants liquides, ce qui réduit l'efficacité volumétrique des moteurs à hydrogène. Cette réduction était prévisible, car le collecteur d'admission se réchauffe généralement pour aider à l'évaporation des carburants liquides (diesel et essence). Selon les chercheurs, la composition stœchiométrique du mélange air-hydrogène comprend environ 30% d'hydrogène, tandis que le rapport en volume de l'essence entièrement vaporisée dans les mélanges d'essence et d'air est de 20 [168] [169]. La figure 2.3 montre l'effet de cette réduction d'efficacité volumétrique dans un moteur diesel utilisant de l'hydrogène en fonction du pourcentage d'énergie [170] . Une étude portant sur un moteur SI utilisant du méthane comme carburant de base, avec une valeur LHV proche de celle de l'essence (50) et de l'hydrogène, a montré la même quantité de réduction, comme indiqué dans la figure 2.4 [171]. D'après les figures 2.3 et 2.4, plus la quantité d'hydrogène dans le carburant est élevée, plus la quantité d'efficacité volumétrique du moteur diminue, et plus la quantité d'hydrogène est élevée, plus la diminution de l'efficacité volumétrique est importante.

Chapitre 2 : moteur à hydrogène

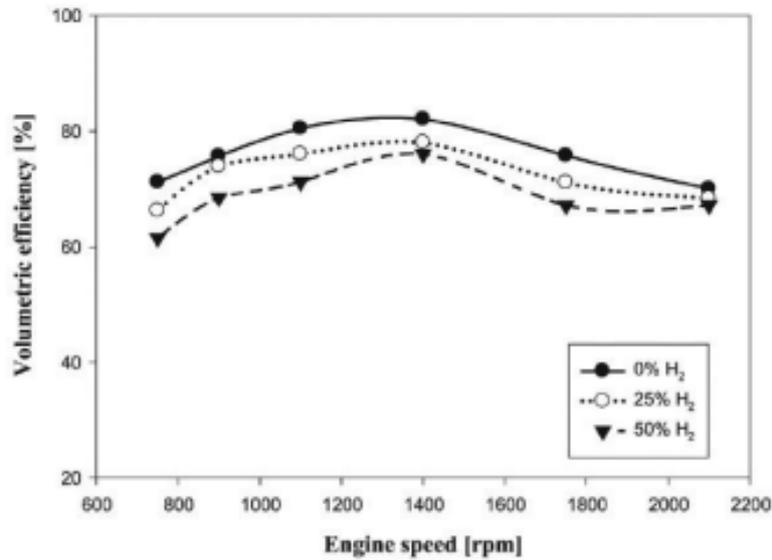


Figure 2.3: Changements de l'efficacité volumétrique avec différents pourcentages d'hydrogène dans le moteur CI

La puissance et le couple du moteur seront réduits en raison de la diminution de l'efficacité volumétrique. Selon les données présentées dans la figure 2.4, qui représente les résultats d'une étude portant sur l'utilisation de 25% et 50% d'hydrogène dans un moteur CI [170], l'augmentation du pourcentage d'hydrogène se traduit par une diminution de la puissance et du couple du moteur. Des résultats similaires ont également été rapportés pour les moteurs à essence alimentés à l'hydrogène. [172]

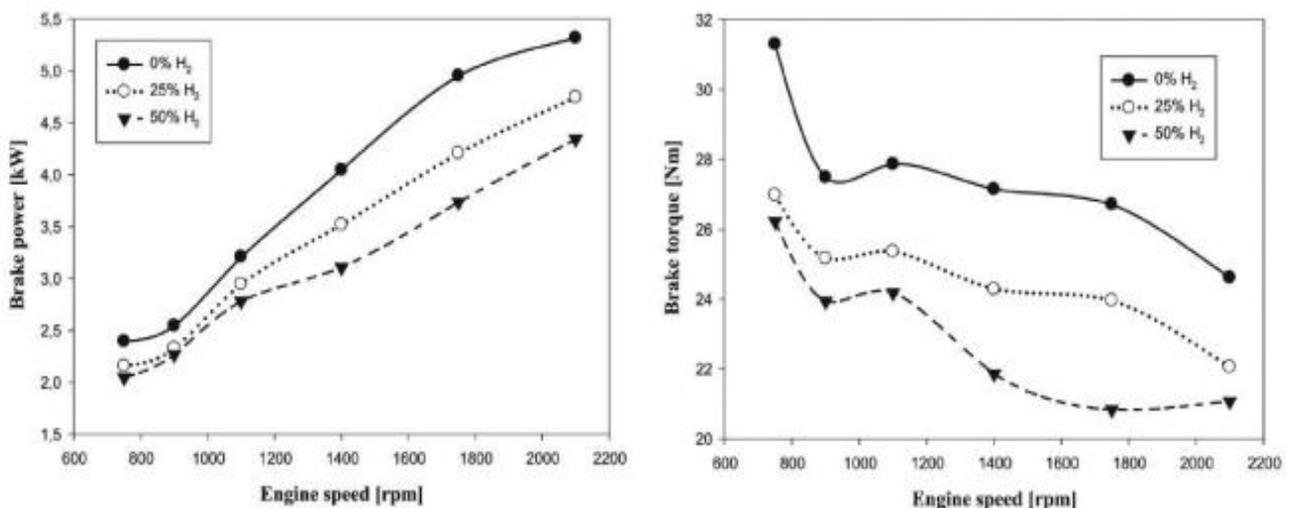


Figure 2.4: Changements de la puissance de freinage et du couple de freinage avec différents pourcentages d'hydrogène dans le moteur CI

2.5.2 Efficacité thermique du frein

En raison de sa capacité thermique moléculaire élevée, l'ajout d'hydrogène aux moteurs à combustion interne peut causer un décalage dans la phase de combustion et réduire l'efficacité de celle-ci [170]. Ainsi, l'ajout d'hydrogène aux moteurs à allumage commandé et à compression variable peut entraîner une diminution de l'efficacité thermique de freinage du carburant (BTE). Des études antérieures ont montré que l'ajout d'hydrogène au carburant de base, généralement du diesel, peut entraîner une réduction de la quantité de BTE dans un moteur à combustion interne, comme illustré dans la figure 2.5. D'autres recherches ont également signalé une diminution de la BTE dans ces types de moteurs [172] [174]. La figure 2.5 présente les modifications de la puissance de freinage et du couple de freinage en fonction des pourcentages d'hydrogène dans le moteur à compression variable [175].

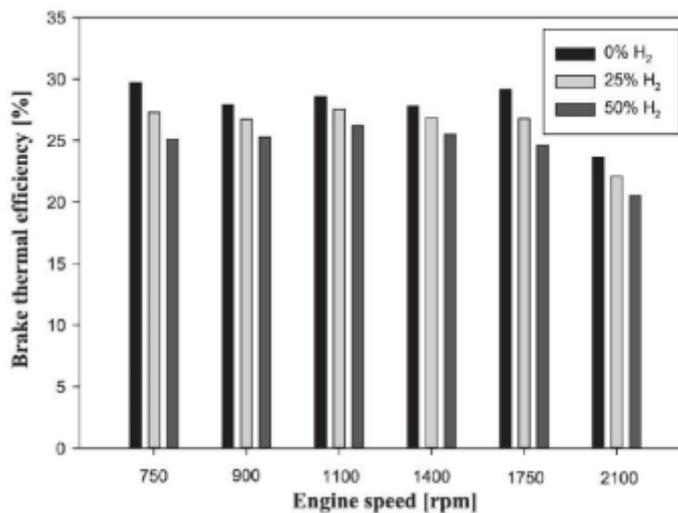


Figure 2.5: illustre les variations de l'efficacité thermique de freinage en fonction des pourcentages d'hydrogène dans le moteur à combustion interne, comme indiqué par la source [170]

La figure 2.6 illustre la diminution de la BTE dans un moteur à allumage commandé fonctionnant au méthane suite à l'ajout d'hydrogène. Divers aspects du carburant à base d'hydrogène sont actuellement étudiés, notamment l'ajout d'hydrogène à différentes sources d'énergie présentant des caractéristiques de fonctionnement variables. Toutefois, l'un des éléments clés à considérer lors d'une étude de performance est la variation du taux de compression. Selon des recherches antérieures [166] [176] [165]. Les moteurs avec un taux de compression opérationnel plus élevé ont une meilleure efficacité thermique et une production de puissance supérieure. Pour réduire la perte de puissance du moteur à hydrogène, il est

possible d'augmenter le taux de compression [177]. D'autres chercheurs ont signalé une augmentation de la BTE avec une augmentation du taux de compression. [172] [178]

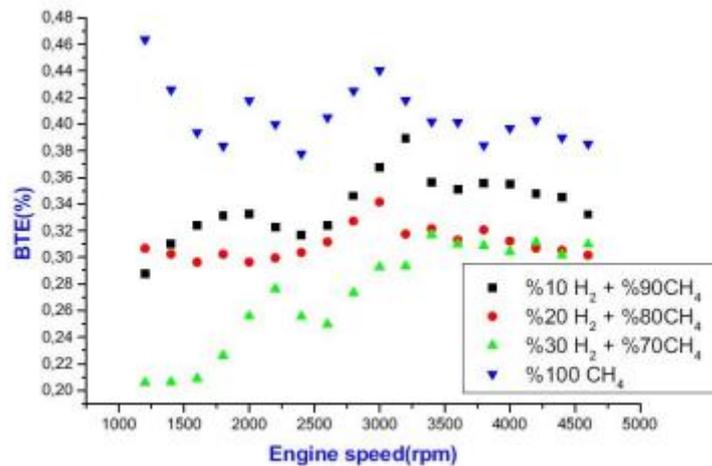


Figure 2.6: représente la variation de l'efficacité thermique de freinage en fonction des différents pourcentages d'hydrogène utilisés dans le moteur à allumage commandé [167]

2.5.3 Consommation spécifique de carburant au frein

Dans un moteur diesel à double carburant, l'ajout d'hydrogène provoque une combustion plus rapide avec une vitesse de flamme neuf fois plus élevée. Cette combustion plus rapide entraîne une augmentation du taux de dégagement de chaleur avec l'augmentation de la charge et de la substitution d'hydrogène [179]. Cependant, cette augmentation du taux de dégagement de chaleur conduit également à une augmentation de la consommation spécifique de carburant de frein lorsque de l'hydrogène est mélangé avec du carburant diesel dans un moteur à combustion interne. La figure 2.7 illustre comment l'ajout d'hydrogène au carburant diesel entraîne une augmentation de la quantité de BSFC produite à différentes vitesses.

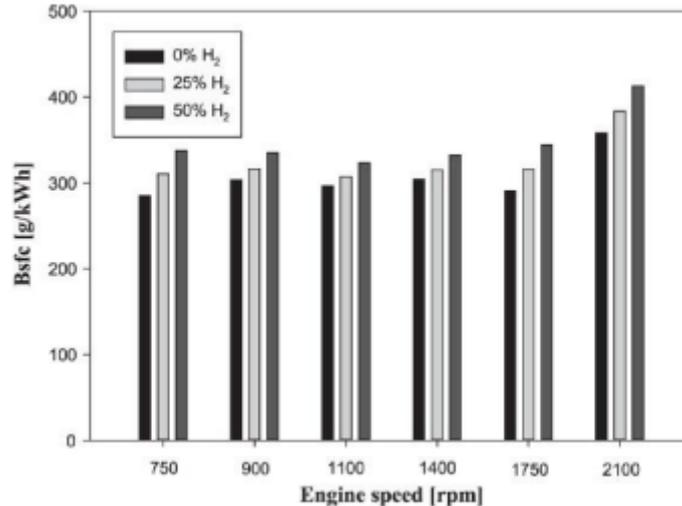


Figure 2.7 : illustre l'efficacité thermique de freinage dans un moteur à allumage commandé en fonction de différents pourcentages d'hydrogène, telle que présentée dans la référence [170]

En modifiant les proportions d'injection d'hydrogène, la consommation spécifique de carburant de frein équivalente (BSFC) augmente par rapport à celle observée lors de l'utilisation d'essence, car la puissance du moteur est réduite (lors de l'utilisation de méthodes d'injection d'hydrogène qui diminuent la puissance du moteur). Toutefois, en ajustant l'injection d'eau et les temps d'allumage, il est possible de supprimer la détérioration causée par l'injection d'hydrogène et de réduire efficacement le BSFC. [180] [181]

2.6 Méthodes pour fournir de l'hydrogène aux moteurs à combustion interne

La construction des moteurs à hydrogène est similaire à celle des moteurs à combustion interne ordinaires. Cependant, pour résoudre plusieurs problèmes tels que la faible puissance de sortie, les émissions élevées de NO_x et la combustion irrégulière, diverses modifications du système d'alimentation en carburant et du système de combustion sont nécessaires [35]. Pour brûler complètement l'hydrogène, le rapport masse air / carburant doit être de 1/34, ce qui signifie qu'une partie d'hydrogène doit être combinée avec 34 parties d'air dans le cylindre. Dans des conditions stœchiométriques, l'hydrogène représente environ 30% de la chambre de combustion [164]. Par conséquent, trois techniques d'alimentation en carburant uniques ont été étudiées pour déterminer leur potentiel en tant que piles à combustible.

2.6.1 Technique de carburation

Dans les moteurs à hydrogène, l'utilisation d'un carburateur à gaz est l'une des techniques les plus anciennes et efficaces qui offre des avantages. L'avantage de cette

technique est qu'elle peut être facilement appliquée aux moteurs à essence couramment utilisés en utilisant simplement le processus de gazéification du carburant à l'hydrogène.

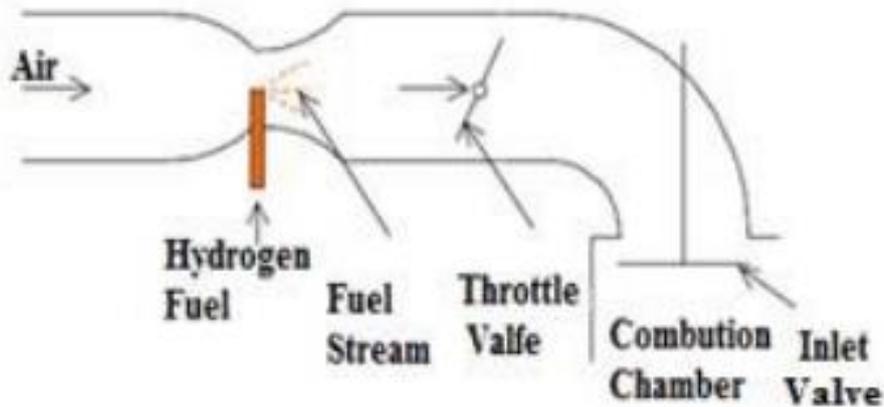


Figure 2.8 : Technique de carburation du carburant en action [182]

Le mélange d'air et d'hydrogène est introduit régulièrement dans le collecteur d'admission. Une soupape régule la quantité d'air hydrogéné à mélanger pour alimenter le moteur. Certains moteurs nécessitent l'ajout d'eau. L'ajout de vapeur d'eau à l'air hydrogéné permet d'augmenter les performances du moteur, surtout à des vitesses élevées, ce qui est déterminé par la quantité de carburant injecté. Cependant, en raison de l'efficacité volumétrique inférieure et des pertes de système, la puissance du moteur est réduite de 15%. De plus, cette méthode peut causer des problèmes de pré-allumage, de recul et de cliquetis du moteur, car le rapport air-hydrogène reste constant [183], [184].

2.6.2 Technique d'injection dans le collecteur et le port d'admission

L'hydrogène est injecté dans le cylindre par des injecteurs mécaniques ou électriques à des taux et des mélanges variables avec l'air qui entre par le collecteur d'admission. Le collecteur d'admission joue un rôle essentiel. Les effets indésirables de la technique de carburation, tels que le vieillissement prématuré, la réduction et la formation de choc, ont été éliminés. [185] [186]

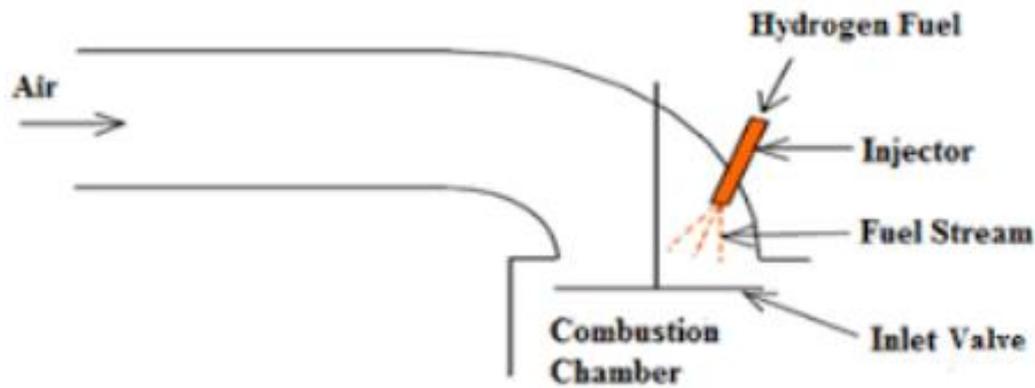


Figure 2.9 : Méthode d'injection de port d'admission et de collecteur d'admission [186]

2.7 Le retour de flamme

L'un des principaux problèmes rencontrés lors de l'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs à combustion interne est le phénomène des retours de flamme. De nombreux prototypes utilisant de l'hydrogène souffrent d'un grave problème de retour de flamme vers le système d'admission. Ce phénomène est souvent désigné à tort par le terme "backfire", qui en réalité fait référence à une explosion dans le système d'échappement. On appelle ce type de phénomène un "backflash". Dans ce cas, le mélange air-H₂ s'enflamme avant ou pendant son entrée dans le cylindre, et la flamme retourne jusqu'au filtre à air

La réapparition des flammes a été un obstacle majeur au développement des moteurs à hydrogène. Selon la plupart, voire la totalité des publications, les flammes ne se produisent que lorsque le mélange combustible est présent dans la tubulure d'admission (formation externe du mélange gazeux). Les causes de ce phénomène sont les suivantes :

- La présence de points chauds dans la chambre de combustion, tels que des dépôts et des particules [187] [188] des bougies d'allumage [189] [189], des gaz résiduels [143] [157] [190] des soupapes d'échappement [190] [191] [192] peut causer facilement un retour de flamme en raison de l'énergie d'inflammation de l'hydrogène, qui est beaucoup plus faible que celle des hydrocarbures, ainsi que de ses limites d'inflammabilité très étendues. Les dépôts et les particules sont générés par la combustion incomplète de l'huile de lubrification et/ou la formation de rouille.
- La concentration d'ions de la flamme hydrogène/air étant plus faible que celle de la flamme hydrocarbure/air, il est possible que l'énergie d'allumage ne soit pas entièrement libérée dans la flamme et reste dans le circuit d'allumage du cylindre.

Chapitre 2 : moteur à hydrogène

Cette énergie résiduelle peut se libérer à un moment indésirable, notamment lors de l'expansion ou du cycle d'admission, lorsque la pression est faible

- Dans les moteurs à cylindres multiples, les câbles d'allumage individuels placés à proximité les uns des autres peuvent provoquer une inflammation induite dans un autre cylindre lorsque l'allumage est contrôlé dans un cylindre. Cette situation est due à l'induction dans le câble d'allumage [188]
- La combustion dans le cordon du piston se poursuit jusqu'à l'ouverture de la soupape d'admission et l'allumage de la charge fraîche [189] [194] [195] [196]. Cette situation est due à la distance d'extinction de l'hydrogène, qui est plus courte que celle des hydrocarbures, permettant ainsi à la flamme d'hydrogène de se propager dans le cordon.
- Le phénomène de pré-allumage survient lorsque la charge de carburant s'enflamme et se consume avant que l'étincelle d'allumage ne se produise. Il est fréquent dans les moteurs fonctionnant à l'hydrogène en raison de la faible énergie d'allumage et des larges limites d'inflammabilité de ce gaz. Le pré-allumage peut entraîner la formation de points chauds dans la chambre de combustion, qui à leur tour peuvent déclencher un pré-allumage en augmentant la température de la chambre de combustion. Ce cycle peut se poursuivre jusqu'à ce que le pré-allumage se produise pendant la phase d'admission et provoque un retour de flamme. Ce phénomène est appelé emballement de pré-allumage et peut également être causé par un cognement, qui augmente la température de la chambre de combustion et crée un point chaud. [188] [195] [197] [198]
- Il est courant de considérer à tort que la faible énergie d'inflammation est la principale cause du retour des flammes dans les moteurs à allumage par compression à hydrogène. L'énergie d'allumage est définie comme l'énergie minimale requise pour allumer le mélange, tandis que l'inflammation causée par les masses thermiques telles que les soupapes et les gaz résiduels est davantage liée à la température d'auto-allumage du mélange, c'est-à-dire la température à laquelle le mélange s'enflamme spontanément. Étant donné que les moteurs à allumage par compression à hydrogène nécessitent des taux de compression très élevés pour assurer l'auto-inflammation, il est peu probable que les gaz résiduels puissent initier l'auto-allumage. En outre, cela ne peut pas expliquer l'apparition du retour des flammes dans des conditions de mélange pauvre, à basse température. Bien que les dépôts et les particules soient souvent cités

comme des causes potentielles, les concentrations de ces éléments sont extrêmement faibles dans les moteurs à hydrogène en bon état. Certains ont même cité la présence de "poussière inerte dans l'air" comme cause potentielle. [157]

- La question du phénomène de cliquetis dans les moteurs à hydrogène, qui est une forme de combustion anormale qui engendre des vibrations explosives dans les parois de la chambre de combustion et du piston, n'a pas été étudiée de manière approfondie. En ce qui concerne le retour des flammes, plusieurs causes ont été confondues ou exagérées, mais en ce qui concerne le cliquetis, il existe des affirmations contradictoires dans la littérature.
- Des éléments suggèrent que les causes du cliquetis dans les moteurs à hydrogène pourraient différer de celles des moteurs à essence, dans lesquels le cliquetis est principalement causé par des vitesses de flamme excessives [157]. Par conséquent, il est possible que limiter la vitesse de montée en pression soit plus efficace pour contrôler le cliquetis que de limiter la durée de combustion. [199]

- Ce problème se produit particulièrement dans les moteurs équipés d'un système d'injection indirecte central ou multipoint, et l'utilisation d'un carburateur provoquerait également ce phénomène. La présence de points chauds est la principale cause de ce problème. De nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation de l'hydrogène dans le cycle Otto [200] [201]

-Solution

Afin de définir le problème des retours de flamme, différentes solutions sont disponibles. Dans les prochains paragraphes chacune présentant ses avantages et ses inconvénients, nous examinerons chacune de ces solutions et leur impact sur les émissions polluantes de NOx.

2.7.1 Systèmes d'injection directe

Après la fermeture de la soupape d'admission, une combustion air-carburant est générée dans le cylindre de combustion à l'aide d'un mécanisme plus avancé, appelé système d'injection directe. Une fois comprimé, l'hydrogène est directement injecté dans la chambre de combustion, comme cela peut être réalisé avec plusieurs injections. En raison de sa diffusion rapide, l'hydrogène se mélange rapidement à l'air et peut être utilisé comme source d'allumage pour la bougie d'allumage. [202]

Chapitre 2 : moteur à hydrogène

L'utilisation de l'injection directe représente une avancée technologique majeure en matière d'hydrogène. Cette méthode permet d'injecter le carburant à un stade extrêmement tardif, ce qui s'approche du principe des moteurs diesel. En injectant le carburant en fin de compression, cela permet à l'air de disposer de plus de temps pour refroidir les zones chaudes. Toutefois, il est important de noter que malgré les améliorations apportées pour prévenir les retours de flamme dans le système d'admission, il subsiste toujours un risque de préallumage dans la chambre de combustion si les points chauds ne sont pas suffisamment refroidis. La figure 2.10 illustre le mode d'injection directe.

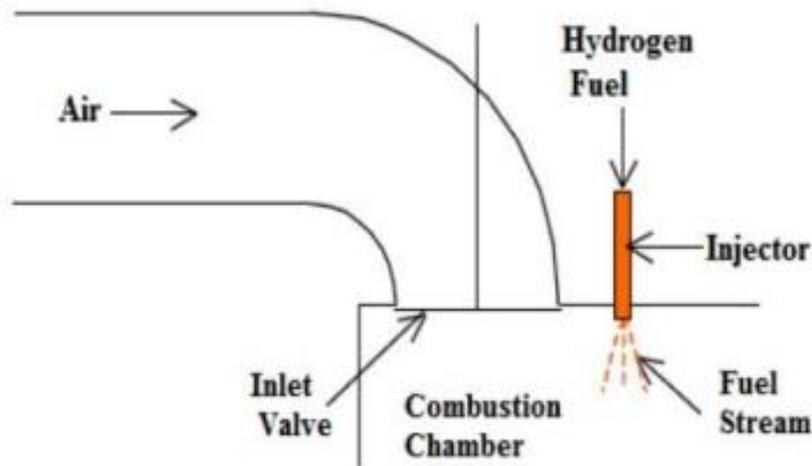


Figure 2.10 : Système d'injection directe

Le moteur à hydrogène à injection directe offre des performances et une efficacité supérieures aux deux autres technologies (Technique de carburation, Technique d'injection dans le collecteur d'admission et dans le port d'admission.), et présente des avantages comme l'élimination des risques du retour de flammes. Permet une augmentation de la puissance en évitant le remplacement d'une partie de l'air par de l'hydrogène lors de la phase d'admission. Dans un mélange stœchiométrique, le volume d'hydrogène représente 30 %, ce qui équivaut à remplacer 30 % de l'air par le carburant. [7]

Et comme inconvénients Pour assurer une injection efficace, il est nécessaire d'utiliser un injecteur capable de fournir des débits très élevés en raison de la courte durée d'injection. Cependant, cela se heurte au défi de la faible densité de l'hydrogène à l'état gazeux. La formation d'un mélange homogène devient beaucoup plus complexe par rapport à l'injection indirecte. Si le mélange n'est pas suffisamment homogène, cela peut entraîner une augmentation des émissions de NOx De plus, les injecteurs sont soumis à des pressions et des

températures extrêmes pendant la phase de combustion [7] .Et Toutefois, des problèmes tels qu'une température excessive d'auto-inflammation, une augmentation de pression et un retard de combustion peuvent survenir dans les moteurs à hydrogène à injection directe. [143]

2.7.1.1 La charge stratifiée dans l'injection directe

Dans ce cas (injection direct) pour assurer une homogénéité du mélange plus parfaite et aussi la diminution de les émissions NOx en utilise un système qui s'appelle la charge stratifié, On sait que l'injection directe à charge stratifiée est efficace pour éliminer le cliquetis par rapport à une charge homogène [204]. Cette suppression est due à un mélange beaucoup plus pauvre dans le gaz résiduel, ce qui entraîne une température plus basse du gaz brûlé près de la paroi. Des études antérieures ont démontré, en utilisant une chambre de combustion à volume constant [205], que l'injection directe à charge stratifiée est une méthode efficace pour réduire les pertes de refroidissement lors de la combustion de l'hydrogène. L'injection directe de carburant et le mélange interne du carburant avec l'air offrent également l'avantage de prévenir le retour de flamme, c'est-à-dire la propagation de la flamme de la chambre de combustion vers le conduit d'admission, pouvant provoquer l'arrêt du moteur. Le retour de flamme constitue le principal obstacle limitant la puissance des moteurs à hydrogène à charge pré mélangée [206] [207]. La stratification du mélange contribue également à réduire les émissions de NOx lorsque les rapports d'équivalence globaux sont proches de la stœchiométrie dans les moteurs à allumage par étincelle [204]. Cela est dû au NO de Zeldovich, qui est la principale source d'émissions de NOx lors de la combustion du moteur, et dont la quantité diminue lorsque le rapport d'équivalence du mélange s'éloigne de la stœchiométrie. Avec des rapports d'équivalence globaux proches de la stœchiométrie, la stratification réduit la proportion de mélange proche de la stœchiométrie, ce qui entraîne des émissions de NOx plus faibles. Ainsi, lorsqu'on augmente le rapport d'équivalence vers la stœchiométrie pour obtenir une puissance de sortie plus élevée dans un moteur à hydrogène, une charge stratifiée émet moins de NOx qu'une charge homogène. Enfin, il est possible de traiter les NOx ultérieurement à l'aide de certains types de catalyseurs pour répondre aux normes d'émissions des gaz d'échappement des véhicules.

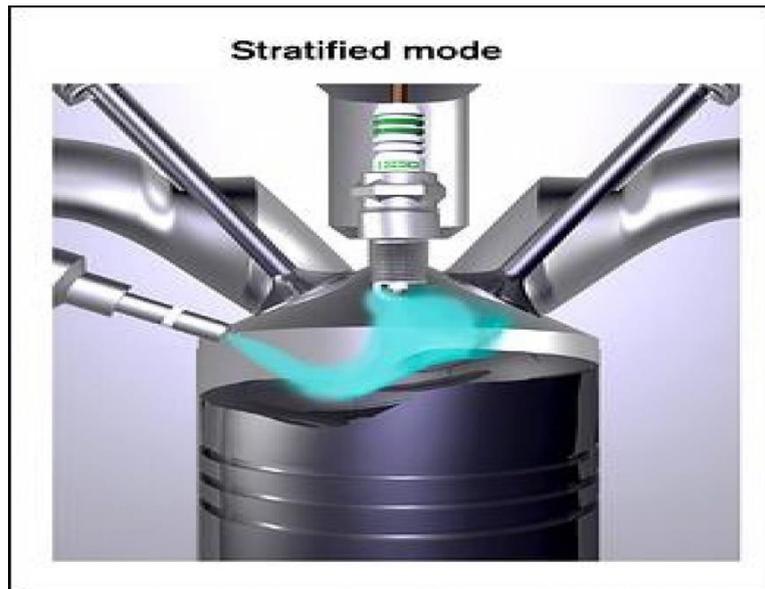


Figure 2.11: la charge stratifiée

2.7.2 Injection d'eau

La méthode d'injection d'eau constitue une solution pour abaisser la température à l'intérieur du cylindre [203]. L'eau peut être introduite par le biais d'un carburateur ou d'un système d'injection conventionnel, sous forme de fines gouttelettes plutôt que sous forme de vapeur. Lorsque le mélange s'enflamme, ces fines gouttelettes jouent un rôle essentiel dans la réaction chimique, entraînant divers phénomènes tels que le changement de phase de liquide à vapeur et l'absorption de chaleur. Un effet similaire peut être observé avec le dispositif de recirculation des gaz d'échappement (EGR), car la principale réaction de combustion de l'hydrogène dans l'air produit de l'eau. Pour expliquer brièvement le phénomène, lors de la première étape, le mélange dans la chambre de combustion s'enflamme et se propage. Sur le front de la flamme, la partie du mélange qui n'a pas encore brûlé se mêle aux gouttelettes d'eau. Lorsque la flamme les rencontre, elles se transforment instantanément en vapeur, entraînant une expansion significative. Ce changement de phase de l'eau consomme donc une quantité considérable d'énergie, ce qui réduit la température maximale de combustion. Les zones chaudes sont refroidies et la probabilité d'auto-allumage est réduite. [7]

- **Avantages** : L'utilisation de l'injection d'eau présente un avantage significatif en réduisant considérablement les émissions de NOx. Il est important de noter que les NOx se forment lorsque l'azote et l'oxygène de l'air sont exposés à des températures très élevées. Ainsi, si l'injection d'eau permet de maintenir la température maximale en dessous du seuil de formation des NOx, cela permet de réduire considérablement le

niveau de pollution. Des résultats concernant l'utilisation de l'injection d'eau sont présentés dans la section [204]

- **Inconvénients :** L'un des principaux problèmes c'est comment injecté l'eau de la façon efficace. Avec les technologies d'injection actuelles, cela peut sembler être une tâche simple. Cependant, il est crucial de veiller à ce que l'eau ne se mélange pas à l'huile dans la chambre de combustion. Par conséquent, une attention particulière doit être accordée aux mécanismes d'étanchéité. La corrosion peut également devenir un problème, comme indiqué par Prior et al. [203].

2.7.3 Admission séparée

Une approche alternative pour résoudre ce problème consiste à opter pour l'admission séparée. Cela implique d'admettre l'air et l'hydrogène de manière séparé. Ce système nécessite ainsi l'utilisation de deux soupapes d'admission, comme illustré dans la figure 2.12.

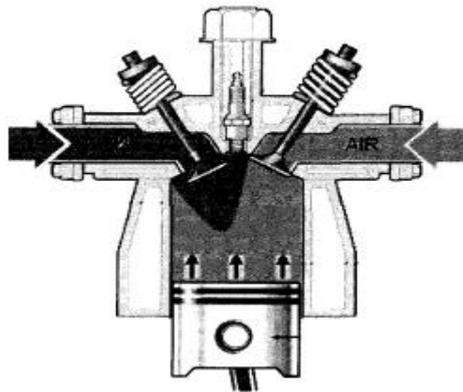


Figure 2.12: présente un schéma illustrant le concept de l'admission séparée, disponible sur le site

On peut faire une comparaison avec l'injection retardée, qui consiste à injecter le carburant le plus tard possible, permettant ainsi à l'air de refroidir davantage les zones chaudes. Dans le cas de l'admission séparée, une des soupapes s'ouvre initialement pour permettre à l'air d'entrer. Cela permet à l'air de refroidir les zones chaudes et de diluer les gaz résiduels chauds du cycle précédent. Ensuite, la deuxième soupape s'ouvre pour permettre à l'hydrogène sous haute pression d'entrer, idéalement à la fin de l'admission lorsque le piston est au PMB et que la soupape d'admission d'air est presque fermée. Cette approche vise à maximiser la quantité d'air présente dans le cylindre.

- **Avantages:** La pression requise par l'injecteur d'hydrogène est inférieure à celle nécessaire dans un système à injection directe. Cette solution présente le potentiel

d'augmenter la puissance du moteur, pour des raisons similaires à celles de l'injection directe.

- **Inconvénients :** Il existe toujours un risque accru d'auto-allumage par rapport à l'injection directe. Le risque de retour de flamme n'est pas complètement éliminé puisque l'injection peut également se produire lorsque la soupape d'admission d'air est encore ouverte. Il est nécessaire de séparer le système d'admission en deux, en modifiant l'arbre à cames pour que les deux soupapes ne s'ouvrent pas simultanément. Pour un moteur fabriqué en série, il s'agit simplement d'une modification dans les schémas de conception, plutôt que d'un inconvénient majeur. Le rendement volumétrique peut être significativement perturbé en raison de l'élimination d'une soupape d'admission d'air, entraînant potentiellement une diminution importante des performances. Comme pour l'injection directe, il peut également y avoir des problèmes liés à la formation du mélange. [7]

2.7.4 Refroidissement des points chauds

Pour éviter les problèmes de pré-allumage ou de retour des flammes dans la chambre de combustion, différentes mesures peuvent être prises. L'utilisation de soupapes d'échappement refroidies permet d'éviter les points chauds. De plus, l'utilisation de culasses à soupapes multiples permet de réduire encore davantage la température des soupapes d'échappement [205] [206] [207]. Il est important de garantir un contrôle adéquat de l'huile et d'assurer une circulation adéquate du liquide de refroidissement autour des soupapes et des zones soumises à des contraintes thermiques élevées [208] , si cela est possible. Le retardement de l'injection de carburant peut également contribuer à créer une période de refroidissement de l'air en utilisant soit un collecteur synchronisé, soit une injection directe. Enfin, il est recommandé d'adopter des techniques de piégeage appropriées, par exemple en utilisant des calages variables [191] [209], afin de réduire la température des gaz résiduels.

2.8 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre un récapitulatif l'utilisation de l'hydrogène comme carburant en changeant certains principes et organes. Ensuite, on a trouvé que l'hydrogène causé un problème c'est le retour de flamme. En fin, pour résoudre ce problème, on a démontré quelque solution adaptée comme l'injection directe, l'injection d'eau, l'admission séparé et le refroidissement des points chauds.

Chapitre 3 Modélisation

3.1 Equations de l'aérothermochimie

Le domaine de l'aérothermochimie utilise des équations de transport et des hypothèses pour fermer les systèmes correspondants. L'hypothèse de continuité est utilisée pour établir les équations fondamentales qui décrivent les lois de conservation des grandeurs considérées. Cette hypothèse est satisfaite lorsque le rapport du libre parcours moyen des molécules sur la dimension caractéristique de la particule de fluide étudiée est petit. Cela permet de considérer les volumes élémentaires suffisamment grands pour faire abstraction de la structure moléculaire discontinue et considérer que les propriétés du fluide sont homogènes.

On peut considérer un mélange gazeux homogène composé de plusieurs espèces dans le cadre de l'hypothèse de milieu continu, où chaque espèce est considérée comme un milieu continu et les lois de la mécanique et de la thermodynamique peuvent être appliqués. Cette hypothèse permet également l'adoption d'un certain nombre de grandeurs pour définir le fluide, qui peuvent être liées aux espèces chimiques ou au mélange de ces espèces. Dans ce dernier cas, le mouvement des molécules individuelles n'est pas pris en compte.

Les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie totale constituent le système des équations de Navier-Stokes dans le cadre de la mécanique des fluides classique. Les équations de conservation pour les quantités nécessaires à la description des écoulements réactifs laminaires sont explicitées dans une première partie. Dans une seconde partie, les équations sont moyennées pour obtenir un système d'équations pour la description du mouvement statistique de l'écoulement turbulent. L'application de cet opérateur de moyenne introduit de nouveaux termes de corrélation dont la fermeture dépend du modèle de turbulence retenu.

Dans le cadre des écoulements réactifs ou compressibles, la décomposition de Favre est généralement utilisée. La turbulence est représentée par un modèle du premier ordre (dans le cas le plus simple) qui utilise deux équations : la première pour l'énergie cinétique turbulente et la seconde pour le taux de dissipation de cette énergie.

3.2 Équations de bilan pour un écoulement réactif laminaire

- **Équations de conservation de la masse**

La conservation de la masse totale s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3.1)$$

Où, ρ désigne la masse volumique et u_j est la j^{eme} composante de la vectrice vitesse.

Dans le contexte d'un mélange gazeux composé de N espèces chimiques, l'expression de la conservation de la masse est équivalente pour chaque espèce k. En additionnant les N équations de conservation spécifiques à chaque espèce, nous obtenons l'équation globale de conservation de la masse totale :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} (-J_{jk}^s) + \rho \dot{\omega}_k, \quad k = 1, \dots, N \quad (3.2)$$

Le terme J_{jk}^s représente le flux de diffusion de l'espèce k dans le mélange, dans la direction j. Le symbole $\dot{\omega}_k$ désigne le taux de production ou de consommation de l'espèce k. La diffusion moléculaire est exprimée par la loi de Fick, qui s'écrit de la manière suivante :

$$J_{jk}^s = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho D_k Y_k) \quad (3.3)$$

Le coefficient de diffusion de l'espèce "k" dans le mélange est représenté par le symbole D_k . Dans cette formulation, nous supposons négliger l'effet Soret, c'est-à-dire la diffusion causée par les gradients de température. Les termes de production (ou destruction) instantanée des espèces, $\dot{\omega}_k$ notés sont déterminés par le modèle de combustion.

- **Équations de conservation de la quantité de mouvement**

L'équation de bilan de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - p \delta_{ij}) + \rho S_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.4)$$

Dans cette équation, le symbole "P" représente la pression, tandis que τ_{ij} désigne la composante i, j du tenseur des contraintes visqueuses. De plus, le terme "Si" correspond à la composante i dans la direction donnée du terme source des forces volumiques (telles que la gravité ou les forces électromagnétiques), qui sont négligées dans le cadre de cette étude. Le tenseur des contraintes visqueuses est exprimé par l'équation suivante :

$$\boldsymbol{\tau}_{ij} = 2\mu \left(S_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \quad (3.5)$$

Avec

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.6)$$

Dans cette équation, " μ " représente la viscosité dynamique, " S_{ij} " est le tenseur des vitesses de déformation, et " δ_{ij} " est l'opérateur de Kronecker avec l'indice " l " arbitraire. Les fluides considérés dans cette étude sont assimilés à des fluides newtoniens. La relation entre le tenseur des contraintes de viscosité et le tenseur des taux de déformation est linéaire et isotrope. Les coefficients de viscosité dans cette relation linéaire dépendent uniquement de la température T .

- **Équations de conservation de l'énergie**

Le bilan de l'énergie totale du mélange est défini par :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{e}_t) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \mathbf{e}_t) = \frac{\partial}{\partial x_j} (-J_j^{et} + \sigma_{ij} u_j) + \rho S^{et} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{e}_t = \mathbf{h}_t - \mathbf{p}/\rho \quad (3.8)$$

Avec

$$\mathbf{h}_t = \int_{T_0}^T \mathbf{C}_p dT + \sum_{k=1}^n \Delta h_{f,k}^0 Y_k + \frac{1}{2} \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i \quad (3.9)$$

Où J_j^{et} est le flux d'énergie totale dans la direction j , σ_{ij} est la composante i, j du tenseur défini par :

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - \mathbf{p} \delta_{ij} \quad (3.10)$$

Et S^{et} est le terme source d'énergie totale (travail des forces volumiques, rayonnement, ...), qui seront négligés.

Le flux d'énergie totale dans la direction j s'écrit :

$$\mathbf{J}_j^{e_t} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \rho \sum_{k=1}^N \Delta h_k \mathbf{D}_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \quad (3.11)$$

Dans cette étude, nous prenons en compte à la fois la diffusion de chaleur par conduction selon la loi de Fourier et la diffusion d'espèces. Cependant, nous négligeons la diffusion par gradient de concentration, également connue sous le nom d'effet Dufour, ainsi que le rayonnement. Le symbole " λ " représente la conductivité thermique du mélange.

L'aérothermochimie est représentée par un ensemble de $N + 4$ équations. Le vecteur inconnu est le vecteur des variables conservatives ($\rho Y_1, \dots, \rho Y_N, \rho u, \rho e_t$). Il faut donc compléter le système par une relation d'état pour la pression, $p = f(\rho, T)$.

3.3 Modélisation de l'écoulement réactif turbulent

Dans la chambre de combustion, l'écoulement est turbulent, ce qui signifie que la vitesse des fluides, lorsqu'elle est mesurée en un point donné, fluctue continuellement de manière apparemment aléatoire, même lorsque le régime d'écoulement est parfaitement établi. Cette caractéristique s'applique également à la température et à toutes les autres propriétés du milieu. La turbulence se manifeste par des fluctuations temporelles et spatiales des grandeurs physiques de l'écoulement, telles que la vitesse et la pression, ainsi que par la présence de tourbillons. Les dimensions de ces tourbillons couvrent un spectre dont la taille dépend du régime d'écoulement, qui est caractérisé par le nombre de Reynolds. Pour chaque échelle de turbulence, un nombre de Reynolds correspondant peut être défini par :

$$\mathbf{Re}(r) = \frac{ur}{\nu} \quad (3.12)$$

Dans cette formulation, u représente la vitesse d'un élément caractéristique ayant une taille " r ", et ν est la viscosité cinématique du fluide. À l'échelle intégrale, on retrouve la définition classique du nombre de Reynolds " Re " (où " L " est la taille caractéristique de l'écoulement), qui quantifie le rapport entre les effets d'inertie et les effets visqueux.

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (3.13)$$

- **Equation de conservation de l'espèce chimique**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{Y}_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} [-(\bar{\rho} u_j \tilde{Y}_k - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k) - \bar{J}_{jk}^s] + \bar{\rho} \tilde{\omega}_k, \quad k = 1, \dots, N \quad (3.14)$$

- **Equation de conservation de la quantité de mouvement**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p}) = \frac{\partial}{\partial x_j} [-(\bar{\rho} u_i u_j - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \bar{\tau}_{ij}] + \bar{\rho} \tilde{S}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.15)$$

- **Equation de conservation d'énergie totale**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{e}_t) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_t) = \frac{\partial}{\partial x_j} [-(\bar{\rho} u_j e_t - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{e}_t) + (\bar{\tau}_{ij} u_i - \bar{\tau}_{ij} \tilde{u}_i) - \bar{J}_j^{e_t} + \bar{\tau}_{ij} \tilde{u}_i] + \bar{\rho} \tilde{S}^{e_t} \quad (3.16)$$

Les hypothèses faites au paragraphe (3.2.1) restent valables pour les quantités filtrées. Ainsi, les flux de diffusion filtrés s'écrivent :

$$\bar{J}_{jk}^s = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{D}_k \tilde{Y}_k) \quad (3.17)$$

$$\bar{J}_j^{e_t} = - \hat{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \sum_{k=1}^N \tilde{D}_k \tilde{h}_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} \quad (3.18)$$

De même, le tenseur des contraintes de viscosité filtrée s'écrit

$$\bar{\tau}_{ij} = 2 \hat{\mu} \left(\bar{S}_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) \quad (3.19)$$

Avec

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.20)$$

Les quantités ($\hat{\lambda}$ et $\hat{\mu}$) correspondent aux coefficients de transport moléculaire calculés avec la valeur filtrée de la température \tilde{T} .

- **Fermeture des équations**

La fermeture des contraintes visqueuses turbulentes s'écrit :

$$(\overline{\rho u_j u_j} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_j) = \tau_{ij}^t \quad (3.21)$$

Les fermetures des flux de diffusion turbulents sont:

$$(\overline{\rho u_j Y_k} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_k) = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} D_t \tilde{Y}_k) \quad (3.22)$$

$$(\overline{\rho u_j e_t} - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{e}_t) + (\overline{\tau_{ij} u_i} - \bar{\tau}_{ij} \tilde{u}_i) = -\lambda_t \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \sum_{k=1}^N D_t \tilde{h}_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_j} + \tau_{ij}^t \tilde{u}_j - \overline{\rho k' u_j''} + \overline{\tau_{ij} u_j''} \quad (3.23)$$

Le coefficient de diffusion turbulente D_t est estimé à partir du nombre de Schmidt turbulent

$$D_t = \nu_t / S_{c_t} \quad (3.24)$$

Le coefficient de conductivité thermique turbulent est calculé en fonction du nombre de Prandtl turbulent:

$$\lambda_t = \mu_t C_p / Pr_t \quad (3.25)$$

Le terme $\overline{\rho k' u_j''} + \overline{\tau_{ij} u_j''}$ correspond au terme de diffusion de l'énergie cinétique turbulente.

- **Fermeture du tenseur de Reynolds**

Comme mentionné précédemment, il est important de souligner que la décomposition selon l'approche de Favre est idempotente. L'expression du tenseur de Reynolds peut être formulée de manière concise :

$$\tau_{ij}^t = -\bar{\rho} \overline{u_i'' u_j''} \quad (3.26)$$

En se basant sur la similitude avec la viscosité moléculaire des équations instantanées, il est possible d'appliquer l'hypothèse de Boussinesq afin de caractériser le tenseur des contraintes turbulentes.

$$\tau_{ij}^t = \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{ij} \quad (3.27)$$

Le paramètre k représente l'énergie cinétique turbulente, tandis que μ_t correspond à la viscosité dynamique turbulente. La modélisation du tenseur des contraintes turbulentes dépend de la définition de ces deux paramètres, à savoir k et μ_t . L'une des caractéristiques

essentielles de la turbulence réside dans les fluctuations aléatoires de la vitesse de l'écoulement en un point donné. En pratique, la moyenne temporelle est établie de la manière suivante :

$$\bar{u}_\alpha^t = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t u_\alpha dt \quad (3.28)$$

L'indice α représente la composante de la vectrice vitesse ($\alpha = 1,2,3$), En utilisant l'hypothèse ergodique on peut écrire :

$$\overline{(u_\alpha - \bar{u}_\alpha)^2} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_\alpha^{(i)} - \bar{u}_\alpha)^2 \quad (3.29)$$

$$u'_\alpha = u_\alpha - \bar{u}_\alpha \quad (3.30)$$

Cette variance est directement reliée à la turbulence. La valeur moyenne étant caractéristique de l'écoulement moyen. L'énergie cinétique turbulente est définie alors par:

$$k = \frac{1}{2} [\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}] \quad (3.31)$$

Dans le cas de l'écoulement réactif, la masse volumique ne peut y être constante, les grandeurs moyennes sont pondérés par ρ :

$$\tilde{u}_\alpha = \frac{\overline{\rho u_\alpha}}{\bar{\rho}} = \frac{\overline{(u_\alpha - \bar{u}_\alpha)^2} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho^{(i)} u_\alpha^{(i)}}{\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho^{(i)}} \quad (3.32)$$

On a alors:

$$u'_\alpha = u_\alpha - \tilde{u}_\alpha \quad \text{et} \quad \widetilde{u_p'^2} = \frac{\overline{\rho u_\alpha'^2}}{\bar{\rho}} \quad (3.33)$$

Et :

$$\tilde{k} = \frac{1}{2} [\widetilde{u_1'^2} + \widetilde{u_2'^2} + \widetilde{u_3'^2}] \quad (3.34)$$

Deux modèles turbulence sont utilisés pour la fermeture du système d'équation, le modèle (k, ε) standard et le modèle (k, ε) Réalisable.

- **Le modèle (k, ε) standard**

Ce modèle est réputé pour sa robustesse, économie de calcul et stabilité dans les écoulements complexes. Les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente k , et sa dissipation ε sont données par:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{k}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{k} \tilde{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \tilde{\varepsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \tilde{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \bar{\rho} \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{k} \quad (3.36)$$

Où G_b est le terme lié à l'effet de la gravité, qui est négligé dans ce travail, G_k représente la génération de l'énergie cinétique turbulente due aux gradients de la vitesse moyenne :

$$G_k = \overline{\rho u'_j u'_j} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial \tilde{u}_i} \quad (3.37)$$

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (3.38)$$

$$S \equiv \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (3.39)$$

La viscosité turbulente s'écrit:

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\varepsilon}} \quad (3.40)$$

Les valeurs des constantes du modèle (k , ε) standard, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k et σ_ε sont gardées par défaut :

$$C_{1\varepsilon} = 1,44, C_{2\varepsilon} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,0, \text{ et } \sigma_\varepsilon = 1,3$$

3.4 Modèle de combustion

Les modèles de combustion pour les flammes doivent être en mesure de calculer la composition moyenne du flux réactif à chaque point, ainsi que le terme source de l'équation de conservation de l'énergie lié à la production ou la consommation de chaleur résultant des

réactions exo- ou endothermiques du processus de combustion. Cette approche implique la résolution d'une équation de conservation pour la fraction massique de chaque espèce dans le schéma réactionnel choisi. Cette méthode est connue sous le nom de modèle généralisé du taux fini de réaction. Dans l'équation de conservation de l'espèce i (équation 3.2), le terme source représente la création ou la destruction nette de l'espèce due à la réaction de combustion. Le flux diffusif laminaire de la masse de l'espèce i est relié au gradient de la fraction massique par le coefficient de diffusion moléculaire $D_{i,m}$ de l'espèce i dans le mélange. Un coefficient de diffusion turbulent est ajouté au coefficient moléculaire pour relier le flux diffusif à la fraction massique moyenne. Ce coefficient de diffusion turbulent est défini comme le rapport entre la viscosité turbulente et le nombre de Schmidt turbulent, soit μ/Sct . Le terme source dépend quant à lui de manière fortement non linéaire de la température et des concentrations. Par conséquent, le calcul du terme source moyen à partir des valeurs moyennes de la température et des concentrations peut entraîner des erreurs importantes.

3.5 Modèle des taux finis

Le terme de production chimique $\dot{\omega}_k$ dans un écoulement à M réactions et N espèces chimique :

Réactions $j=1,\dots,M$

$$\sum_1^N \dot{\nu}'_{kj} \mathcal{M}_k = \sum_1^N \dot{\nu}''_{kj} \mathcal{M}_k \quad (3.41)$$

\mathcal{M}_k : Symbole de l'espèce chimique (H_2O, CH_4, CO_2, \dots).

$$\nu_{kj} = \nu'_{kj} - \nu''_{kj} \quad (3.42)$$

Masse de l'espèce :

$$\sum_1^N \dot{\nu}'_{kj} \mathcal{M}_k = \sum_1^N \dot{\nu}''_{kj} \mathcal{M}_k \Rightarrow \sum_1^N \nu_{kj} = 0 \quad (3.43)$$

M_k : masse molaire

$$\dot{\omega}_k = \sum_1^N \dot{\omega}_{kj} \quad (3.44)$$

$$\dot{\omega}_{kj} = Q_j M_k \nu_{kj} \quad (3.45)$$

Q_j : est le taux d'avancement de la réaction en mol/s.

$$Q_j = K_{fj} \prod (n_k)^{v'_{kj}} - K_{rj} \prod (n_k)^{v''_{kj}} \quad (3.46)$$

$$K_{fj} = A_{fj} e^{-E_j/RT} T^{B_j} \quad (3.47)$$

A_{fj} : est le facteur pré-exponentiel (tables des mécanismes cinétiques).

E_j : énergie d'activation (tables des mécanismes cinétiques).

B_j : exposant de température (tables des mécanismes cinétiques).

$$K_{rj} = K_{fj} / K_p \quad (3.48)$$

K_p : est la constante d'équilibre.

3.6 Modèle EDM pour la combustion turbulente

Le modèle de combustion EDM (Eddy Dissipation Model) est basé sur le concept du modèle Eddy Break Up (EBU) développé dans les années 1970 pour le calcul des flammes prémélangées. Le concept de l'EDM a été développé pour étendre le modèle EBU aux flammes non prémélangées. Selon ce modèle, la combustion turbulente peut être représentée par la fragmentation successive (break-up) du domaine des gaz frais en éléments de plus en plus petits (appelés Eddie ou bouffées turbulentes) sous l'effet du frottement turbulent, jusqu'à atteindre une taille limite où ces bouffées, contenant les réactifs mélangés à l'échelle moléculaire, sont en contact suffisant avec les gaz brûlés pour réagir instantanément en raison de leur température élevée. Dans le modèle de Spalding ainsi que dans le modèle de Magnussen et Hjertager, implémenté dans Fluent sous le nom d'EDM, la chimie est considérée comme étant infiniment plus rapide que le mélange (même turbulent) des réactifs, et la composition atteinte dans ces structures fines correspond à celle de l'équilibre chimique. Par conséquent, on peut supposer que la vitesse de réaction moyenne est inversement proportionnelle au temps caractéristique du mélange des grandes échelles de turbulence et indépendante de la cinétique chimique. Ainsi, le taux moyen net de production/destruction de l'espèce i dans la réaction r peut s'exprimer par :

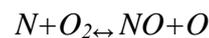
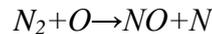
$$\overline{\omega}_i = M_{\omega,i} \sum_{r=1}^{N_r} R_{i,r} \quad (3.49)$$

$$\dot{\omega}_{i,r} = v'_{i,r} \mathbf{M}_{\omega,i} \mathbf{A} \mathbf{B} \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v'_{i,r} \mathbf{M}_{\omega,i}} \quad (3.50)$$

Ceci est un artifice qui permet de simuler l'inflammation du mélange réactif sous l'effet du préchauffage par les produits de combustion, ainsi que cela se produit en pratique dans un équipement de combustion. L'absence de notion de cinétique dans ce modèle ne permet pas de tenir compte de l'effet de la température d'inflammation. On suppose donc que, si des produits de combustion existent, c'est qu'on a atteint localement la température d'inflammation et donc la réaction peut se produire. La conséquence de ceci est que, pour que la réaction de combustion puisse démarrer, il est obligatoire d'imposer une fraction non nulle de produit de combustion quelque part dans le domaine. Dès que la réaction a démarré, elle est supposée se maintenir tant que la turbulence soit présente ($k/\epsilon > 0$) et il est impossible de simuler les phénomènes d'extinction locale ou de décollement des flammes turbulentes.

3.7 La voie thermique (mécanisme de Zel'dovich)

La production de NO par cette réaction devient notable lorsque la température est élevée et qu'il y a présence d'oxygène (c'est-à-dire dans des mélanges avec une faible teneur en carburant ou dans des proportions stœchiométriques). Le processus impliqué peut être décrit de la manière suivante :



C'est la voie principale par laquelle les oxydes d'azote se forment dans les moteurs à combustion interne. La réaction 1 est l'étape clé du mécanisme, car elle nécessite une énergie d'activation élevée (environ 320 kJ/mol) et se produit donc uniquement à des températures élevées. C'est pourquoi on l'appelle le "mécanisme thermique".

$$\dot{\omega}_{i,r} = v'_{i,r} \mathbf{M}_{\omega,i} \mathbf{A} \rho \frac{\epsilon}{k} \min_{\mathcal{R}} \left(\frac{Y_{\mathcal{R}}}{v'_{i,r} \mathbf{M}_{\omega,i}} \right) \quad (3.51)$$

Chapitre 4 Simulation

4.1 Outils de la simulation

4.1.1 Gambit

Gambit est un logiciel qui offre la possibilité de générer des maillages adaptés pour une utilisation avec d'autres logiciels tels que Fluent. Il permet aux utilisateurs de définir et de créer des modèles d'études, que ce soit des surfaces ou des volumes, et de les mailler selon leurs besoins et leurs préférences.

4.1.2 Fluent

Ce domaine se concentre sur l'utilisation de méthodes numériques pour résoudre les problèmes impliquant le transport de fluides et la mécanique des fluides en utilisant des ordinateurs.

4.2 La géométrie

Nous avons créé une géométrie qui est une chambre de combustion, de 0.8 m de long et 0.1 m de large, d'un maillage triangulaire, 2D axisymétric. En bas à gauche c'est l'entrée du carburant (point d'injection) [0-0.001], au-dessus de la zone d'injection [0.001-0.1] c'est l'entrée d'air (l'admission). Après on a raffinez le maillage pour une meilleure précision, comme c'est dans la figure.

Nous avons choisis de travailler avec l'injection directe car elle la meilleure méthode.

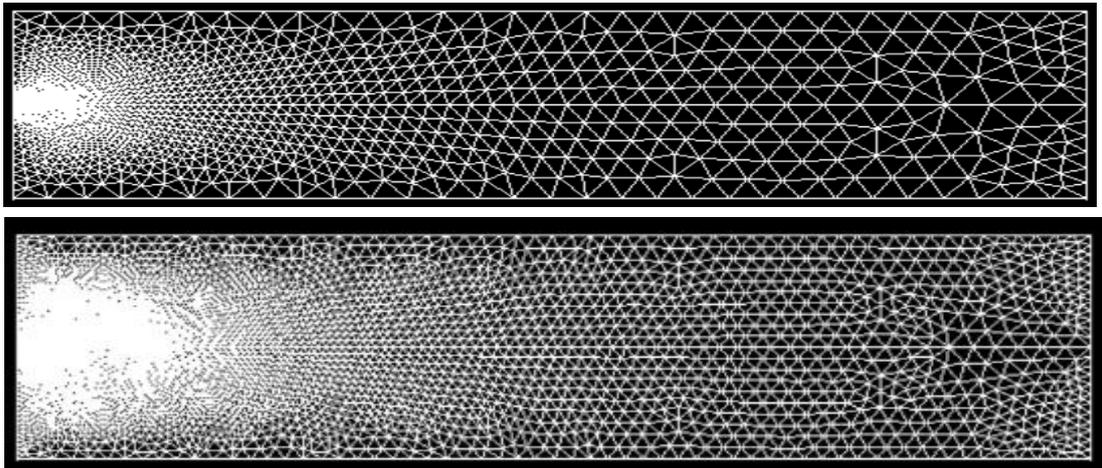


Figure 4.1 : La géométrie.

Grid Size

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	1472	2276	805	1

1 cell zone, 6 face zones.

Zone sizes on domain 1:

- 1472 triangular cells, zone 2.
- 80 2D symmetry faces, zone 3.
- 6 2D pressure-outlet faces, zone 4.
- 30 2D wall faces, zone 5.
- 10 2D velocity-inlet faces, zone 6.
- 10 2D velocity-inlet faces, zone 7.
- 2140 2D interior faces, zone 9.
- 805 nodes.

Grid Size

Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	5888	8968	6162	1

1 cell zone, 6 face zones.

Zone sizes on domain 1:

- 5888 triangular cells, zone 2.
- 1472 triangular parent-cell cells, zone 8.
- 160 2D axis faces, zone 3.
- 12 2D pressure-outlet faces, zone 4.
- 60 2D wall faces, zone 5.
- 20 2D velocity-inlet faces, zone 6.
- 20 2D velocity-inlet faces, zone 7.
- 8696 2D interior faces, zone 9.
- 6 2D parent-face faces, zone 15.
- 30 2D parent-face faces, zone 14.
- 10 2D parent-face faces, zone 13.
- 80 2D parent-face faces, zone 12.
- 2140 2D parent-face faces, zone 11.
- 10 2D parent-face faces, zone 10.
- 160 2D unreferenced faces, zone 16.
- 12 2D unreferenced faces, zone 17.
- 60 2D unreferenced faces, zone 18.
- 20 2D unreferenced faces, zone 19.
- 20 2D unreferenced faces, zone 20.
- 8696 2D unreferenced faces, zone 21.
- 6 2D unreferenced faces, zone 22.
- 30 2D unreferenced faces, zone 23.
- 10 2D unreferenced faces, zone 24.
- 80 2D unreferenced faces, zone 25.
- 2140 2D unreferenced faces, zone 26.
- 10 2D unreferenced faces, zone 27.
- 6162 nodes.

4.3 La combustion d'octane

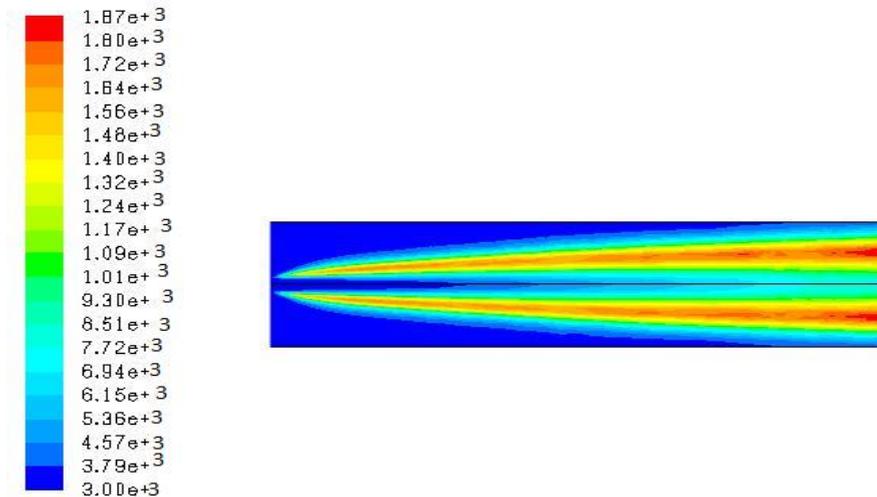


Figure 4.2 : Contour présente la flamme d'octane

D'après ce modèle de simulation, on a fait une injection du carburant (octane) qui entre par le bas de la chambre de combustion et une admission d'air entre par le haut de la chambre. Ce modèle utilise une échelle de couleur, le rouge et l'orange présentent les zones plus chaudes, tandis que la couleur bleue et le vert sont les zones froides. Au début d'injection

on a une petite flamme à cause de la faible diffusion du carburant. Plus la diffusion augmente, plus le mélange air-octane devient homogène, et donc la flamme devient plus grande et la température augmente.

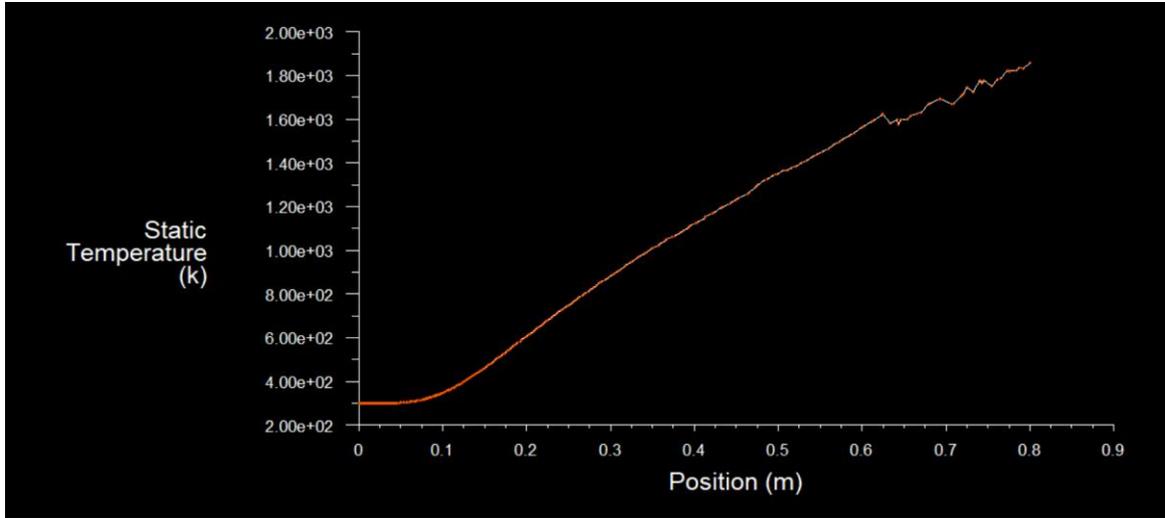


Figure 4.3 : La variation de la température (K) de la combustion par rapport la position X (m)

vu que la température dans le début de la chambre a une température de 300 k ce graphe présenter une augmentation progressive de la température, avec une courbe ascendante , jusqu'à atteindre le point maximal à une position de 0.8 mètre et 1847 K La température élevée de cette combustion résulte d'une relation directe entre diffusion du carburant et l'homogénéité du mélange, où plus le mélange est homogène, plus la combustion être plus parfaite.

4.4 Les émissions NOx d'octane

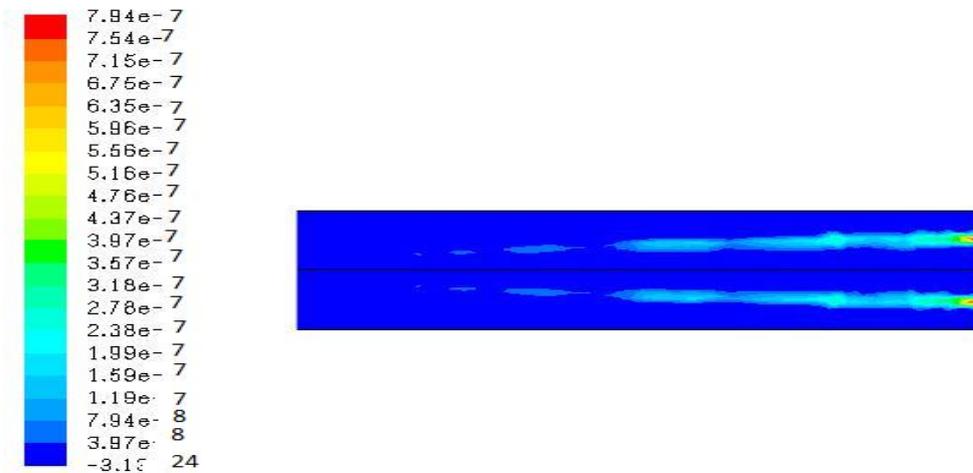


Figure 4.4 :Contour présente les différentes variations de la concentration NOx

Ce contours utilise aussi une palette de couleur les régions où les émissions NOx est plus élevée seraient associées à des teintes chaudes telles que le rouge ou l'orange, tandis que les régions où es polluants est plus baisse seraient représentées par des teintes plus froides comme le bleu ou le vert. Tant que l'azote réagie avec l'O₂ dans des températures plus élevée donc le contour présente une faible formation de NOx au début et augmentation progressive de concentration jusqu'à une concentration maximale à la fin de la combustion.

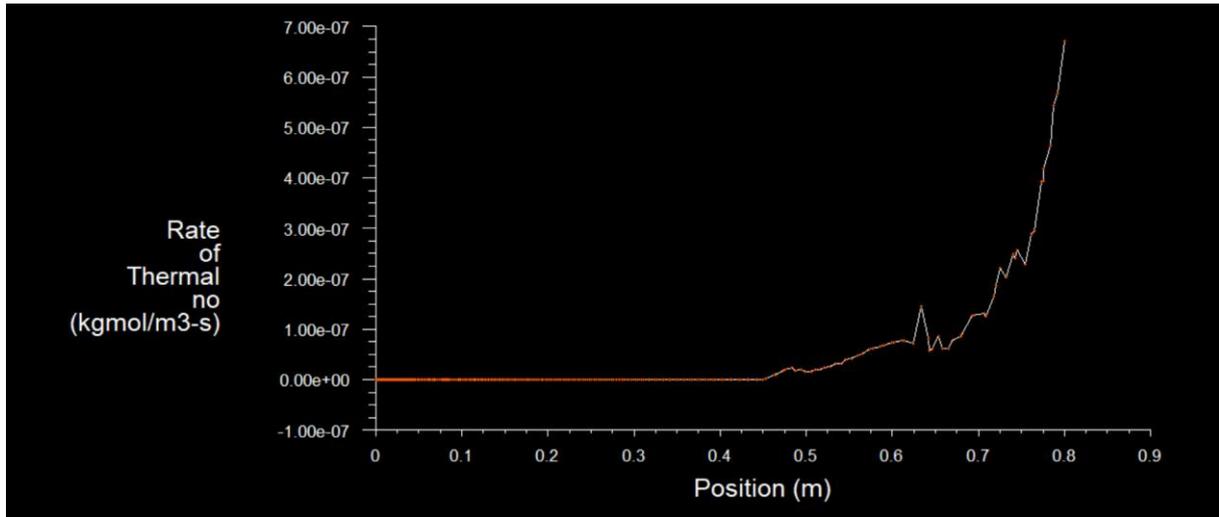


Figure 4.5 : Graphe qui présentent la fraction de masse de polluant NOx a la position X(m)

Sur cette courbe montre que la formation des émissions NOx est nul dans l'intervalle de la position [0-0.45], puis la courbe a commencé à augmenter jusqu'à une valeur maximale de 7.94 e-07 de polluant NOx au point 0.8. La réaction entre l'azote et l'O₂ nécessite une température très élevée, pour cette raison, les polluants NOx étaient inexistantes en premier lieu, car au début de la combustion, la température était basse, puis elle a commencé à se former à mesure que la température augmentait.

4.5 La combustion d'hydrogène

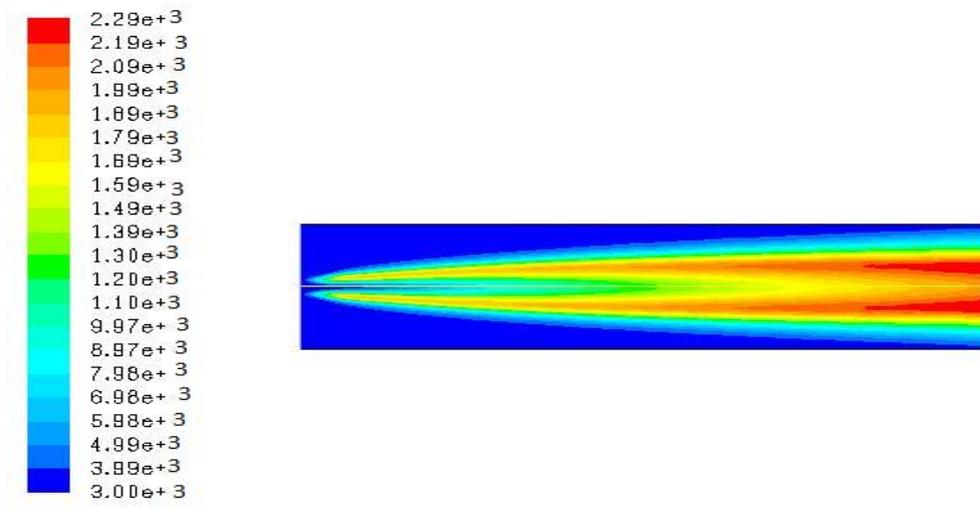


Figure 4.6 : Contour représente la flamme de l'hydrogène

Ici dans ce contour, on a une combustion d'hydrogène nous avons utilisé aussi l'échelle de couleurs, qui représente la haute température en rouge ou l'orange, et la température froide en bleu et verte .en remarque l'hydrogène arrive à des températures très élevée par rapport l'octane a cause de sa vitesse de combustion qui produit rapidement. En ce qui concerne la taille de la flamme de combustion de l'hydrogène, elle est généralement plus grande que celle des autres combustibles en raison de sa réactivité chimique élevée et de sa capacité à se mélanger rapidement avec l'oxygène de l'air. L'hydrogène a une plage de combustion étendue, ce qui signifie qu'il peut brûler dans un large éventail de conditions de mélange air-carburant. Cela permet à la flamme de se propager rapidement, créant une flamme plus grande.

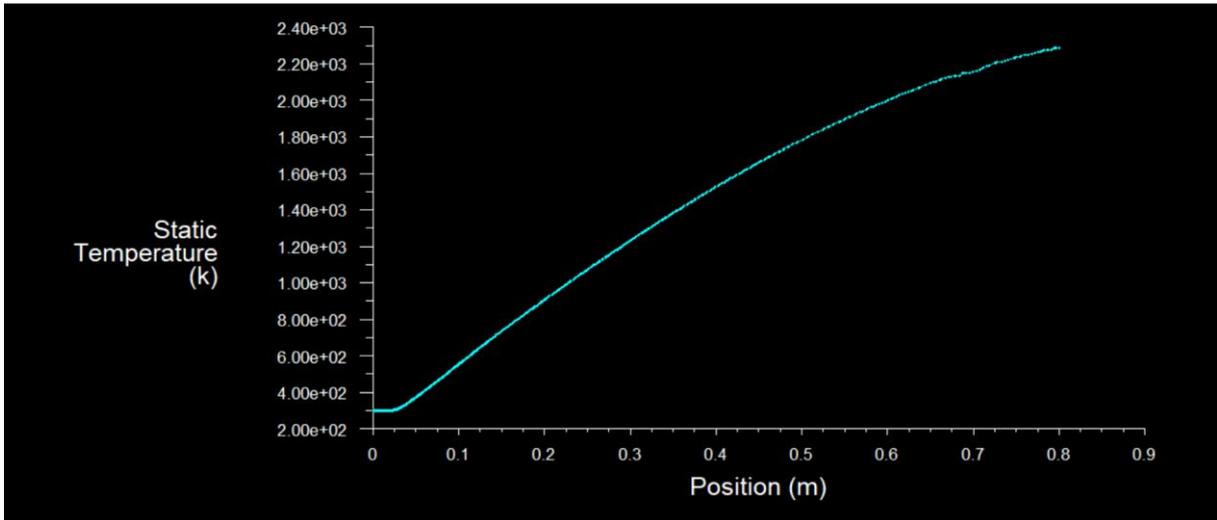


Figure 4.7 : La variation de la température (K) de la combustion d’hydrogène par rapport la position X(m)

Le graphe montre une courbe croissante qui représente l’évolution de la température de combustion en fonction de la position X. Au point de départ (0 mètre), la température de combustion est de 300 kelvin, puis elle augmente progressivement jusqu’à atteindre une valeur maximale de 2290.844 kelvin au point final (0.8 mètre). On note la haute température de combustion de l’hydrogène à un niveau supérieur au niveau d’octane car à sa température de flamme adiabatique.

4.6 Les émissions NOx dans l’hydrogène



Figure 4.8 : Contour présente les différentes variations de la concentration NOx

L’échelle de couleur liée au contour facilite la distinction des différents niveaux d’émissions de NOx. Les couleurs rouge et orange montre les régions où les niveaux de concentrations d’émissions NOx plus élevée, et le bleu et le vert présente les régions où les

niveaux de concentrations d'émissions NOx plus bas. On remarque que le niveau de la formation des émissions NOx est supérieur par rapport l'octane du fait de Les températures élevées de la combustion de l'hydrogène facilite cette formation de NOx,

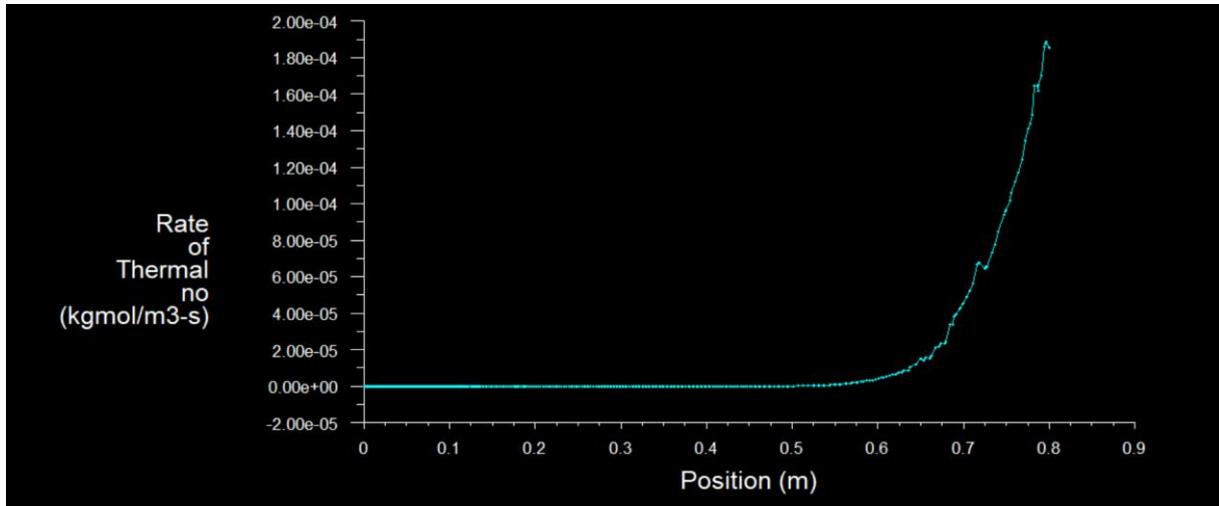


Figure 4.9 : La variation de la fraction de mass de polluant NOx par apport la position X(m)

Le graphique indique que les émissions de NOx sont inexistantes dans la plage de position de 0 à 0.55. Ensuite, la courbe commence à augmenter progressivement, atteignant une valeur maximale de 1.90 e-04 de polluants NOx au point 0.8. Dans ce graphe on observe que les valeurs qui représente les NOx sont plus grand que l'octane, parce que l'hydrogène produit les NOx dans la combustion beaucoup plus. Lors de la combustion de l'hydrogène, certaines réactions chimiques se produisent, ce qui peut entraîner la formation d'oxydes d'azote (NOx) en quantités significatives. L'hydrogène a un pouvoir calorifique élevé, ce qui signifie qu'il libère une grande quantité de chaleur lors de la combustion. Cette chaleur élevée peut entraîner des températures de combustion élevées, favorisant ainsi la formation de NOx.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'adaptation du moteur à allumage commandé pour l'hydrogène présente une solution pour le problème de combustibles fossile. L'utilisation de l'hydrogène comme carburant offre des perspectives intéressantes en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de dépendance aux combustibles fossiles lorsqu'il est produit principalement à partir de l'eau comme une source renouvelable dans un processus durable et efficace. Cependant, il a de hautes performances

A travers notre recherche on a trouvé qu'on peut utiliser l'hydrogène dans un moteur à essence sans changer sa structure ; on peut garder le même principe de fonctionnement. Pour adapter un moteur à essence, des modifications doivent être apportées à certains organes et composants comme le type des injecteurs, les bougies d'allumages et les matériaux des composants. Il est faisable d'utiliser l'hydrogène avec différentes méthodes (directe, secondaire, mélange-hydrocarbure). On a trouvé que l'injection directe est la solution pour éviter le retour de flamme Par contre la technique de carburation et l'injection indirecte.

La simulation d'un moteur à allumage commandé par l'hydrogène a été réalisé à l'aide de Fluent et Gambit, la géométrie qu'on a créé nous avons comparé la combustion d'octane avec la combustion d'hydrogène.

Cette étude nous confirme que la température de flamme d'hydrogène est supérieure à la température de flamme d'octane à raison de ses propriétés.

En ce qui concerne les émissions de NOx, la formation de ses oxyde d'azote dans la combustion de l'hydrogène elle plus élevée que l'octane cette différence elle est principalement influencé par la température élevée de combustion de l'hydrogène car les réactions chimiques responsables de la formation NOx sont favorisées à des températures élevée.

Référence bibliographie :

- [1] S. Hosseini et B. Butler, «An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles,» *Int. J. Green Energy*, pp. 13-37, 2020.
- [2] A. Demirbas, «Biohydrogen,» ; *Springer Publishing Co: London, UK*, 2009.
- [3] X. Chang, T. Ma et R. Wu, «R. Impact of urban development on residents' public transportation travel energy consumption in China: An analysis of hydrogen fuel cell vehicles alternatives,» . *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 16015–16027, 2019.
- [4] How Many Cars Are There in the World Today?, 24 October 2018.
- [5] E. Etefaghi, B. Ghobadian, A. Rashidi, G. Najafi, M. Khoshtaghaza et M. Rashtchi, «A novel bio-nano emulsion fuel based on biodegradable nanoparticles to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions,» *Renew. Energy*, p. 64–72, 2018.
- [6] R. MAAMRI, MODÉLISATION ET EXPÉRIMENTATION DES MOTEURS À COMBUSTION, Québec, NOVEMBRE 2014.
- [7] M. LEFEBVRE, SIMULATION NUMÉRIQUE D'UN MOTEUR À COMBUSTION INTERNE FONCTIONNANT À L'HYDROGÈNE ET TESTS EXPÉRIMENTAUX, Québec, OCTOBRE 2007.
- [8] G. Najafi, B. Ghobadian, T. Yusaf et H. Rahimi, «Combustion analysis of a CI engine performance using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network aid,» *Am. J. Appl. Sci*, p. 759–767, 2007.
- [9] T. Yusaf, I. Hamawand, P. Baker et G. Najafi, «The effect of methanol-diesel blended ratio on CI engine performance. Int,» *J. Automot. Mech. Eng.*, p. 1385–1395, 2013.
- [10] E. Etefaghi, B. Ghobadian, A. Rashidi, G. Najafi, M. Khoshtaghaza et M. Rashtchi, «. A novel bio-nano emulsion fuel based on biodegradable nanoparticles to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions.,» *Renew. Energy*, p. 64–72, 2018.
- [11] S. Hosseini, M. Wahid et A. Ganjehkaviri, «An overview of renewable hydrogen production from thermochemical process of oil palm solid waste in Malaysia,» *Energy Convers. Manag*, p.

415–429, 2015.

- [12] F. Safari et I. Dincer, «A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production.,» *Energy Convers. Manag.*, 2020.
- [13] K. Shivaprasad, G. Kumar et K. Guruprasad, «Performance, emission and fuel induction system of hydrogen fuel operated spark ignition engine,» *A review. Int. J. Mod. Eng. Res.*, p. 565–571, 2012.
- [14] G. Kerkal, K. Pawale et A. Dhumal, «. Diesel Engine with Hydrogen in Dual Fuel Mode,» *A Review. Int. J. Eng. Technol. Manag. Appl. Sci.*, p. 1306–1311, 2017.
- [15] S. Ratiu, «The history of the internal combustion engine,» *Ann. Fac. Eng. Hunedoara*, p. 145–148, 2003.
- [16] M. Henri, «Les voitures automobiles d’Isaac de Rivaz,» *Ann. Valais. Bull. Trimest. Société D’histoire Valais. Romand*, p. 407–433, 1969.
- [17] K. Gillingham, «Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles,» *A Prudent Intermediate Step or a Step in the Wrong Direc-tion? Stanford University: Stanford, CA, USA*, p. 1–28, 2007.
- [18] F. Jervis-Smith, «Cecil’s Gas Engine,» *Nature*, pp. 70, 553, 1904.
- [19] W. Cecil, «On the application of hydrogen gas to produce a moving power in machinery, with a description of an engine which is moved by the pressure of atmosphere upon a vacuum caused by explosions of hydrogen gas,» *Cambridge Philosophical Society.*, pp. 1, 217, 1822.
- [20] L. Das, «Hydrogen engines: A view of the past and a look into the future,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 425–443, 1990.
- [21] M. J.-J. E. L. Richard, «Inventeur du moteur à explosion,» *Rev. Société D’entraide Memb. Légion D’honneur*, p. 16–18, 1990.
- [22] J. Fairbanks, «Engine Maturity, Efficiency, and Potential Improvements.,» *In Proceedings of the Diesel Engine Emission Reduction Conference, Coronado, CA, USA, August 2004.*
- [23] H. Eichseder et M. Klell, « Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik; GWV Facherlage GmbH,» : *Wiesbaden, Germany, 2008.*

- [24] « The Motor Museum in Miniature,» 7/11/2022. [En ligne].
- [25] H. Eichseder et M. Klell, «Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik; GWV Facherlage GmbH,» Wiesbaden, Germany, 2008. [En ligne].
- [26] G. Soloveichik, «Ammonia for Energy Storage and Delivery,» *In Proceedings of the NH3 Fuel Conference 2016, Los Angeles, CA, USA*, 19 September 2016.
- [27] «Hydrogen Fuel Cars,» <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/1807-1986/>, 10 October 2022. [En ligne].
- [28] H. J. L. & R. E. Braun, « Phoenix Project Foundation:,» : *Phoenix, AZ, USA*, 2020.
- [29] D. Bose, «The Hydrogen Alternative. Int. Lett,» *Chem. Phys. Astron.*, p. 15–26, 2015.
- [30] L. Plotnikov et N. Ulman, «Computational and analytical evaluation of the efficiency of using hydrogen as a fuel in an internal combustion engine,» *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*, 2021.
- [31] L. Das, «Hydrogen-fueled internal combustion engines. In Compendium of Hydrogen Energy; Elsevier,» *Amsterdam, The Netherlands,*, vol. 7, p. 177–213, 2016.
- [32] «first Hydrogen Car.,» <https://www.automostory.com/first-hydrogen-car.htm>, 10 October 2022. [En ligne].
- [33] A. Simi, «Hydrogen Direct Injection Inreciprocating Engines Using Commercial Injectors,» *Ph.D. Thesis, Universita Di Pisa, Pisa, Italy*, 2011.
- [34] S. Furuhami, T. Fukuma et H. Sakai, «Conversion of tubro-diesel passenger car into hydrogen powered car,» *In Proceedings of the International Symposium on Hydrogen Systems, Beijing, China*, p. 7–11, May 1985.
- [35] «L'hydrogène : un combustible de futur, hydrogène -tpe-1ere -mon site.com .,» [En ligne].
- [36] M. Faizal, L. Chuah, C. Lee, A. Hameed, J. Lee et M. Shankar, «eview of hydrogen fuel for internal combustion engines.,» *J. Mech. Eng. Res. Dev.*, p. 35–46, 2019.
- [37] Y. Kojima, Y. Kawai, M. Kimbara, H. Nakanishi et S. Matsumoto, «Hydrogen Generation by Hydrolysis Reaction of Lithium Borohydride. Int,» *J. Hydrogen Energy*, p. 1213–1217, 2004.

- [38] F. Safari et I. Dincer, «A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production,» *Energy Convers. Manag.*, pp. 112-182, 2020.
- [39] «Estimating the Carbon Footprint of Hydrogen Production.,»
<https://www.forbes.com/sites/scottmendelson>, 21 August 2020. [En ligne].
- [40] M. O. e. a, Hydrogen production by steam reforming of natural gas: thermodynamic analysis, 2008.
- [41] «Hydrogen Production: Natural Gas Reforming.,»
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production%02natural-gas-reforming>, 03 August 2021. [En ligne].
- [42] Z. L. e. al, Hydrogen Production from Water Electrolysis:, 2018.
- [43] Z. Y. e. al, «Hydrogen production by water electrolysis,» *A review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature a water élyctrolysis*, 2019.
- [44] J. Bockris, Water electrolysis: the simplest way to make hydrogen, 2004.
- [45] E. K. e. al., Water Electrolysis for Hydrogen Production, 2019.
- [46] «How do We Make Hydrogen from Coal, and Is It Really a Clean Fuel?,» o We Make
<https://theconversation.com/explainer-how-do-we-make-hydrogen-from-coal-and-is-it-really-a-clean-fuel94911#:~:text=To%20produce%20hydrogen%20from%20coal,heat%20for%20the%20>, 13 April 2018. [En ligne].
- [47] « Hydrogen Production: Biomass Gasification.,» 5 August 2021. [En ligne].
- [48] «Hydrogen Production: Biomass-Derived Liquid Reforming,» 22 August 2021. [En ligne].
- [49] F. Safari, O. Norouzi et A. Tavasoli, « Hydrothermal gasification of *Cladophora glomerata* macroalgae over its hydrochar as a catalyst for hydrogen-rich gas production.,» *Bioresour. Technol.*, pp. 232-241, 2016.
- [50] F. Safari, N. Javani et Z. Yumurtaci, «. Hydrogen production via supercritical water gasification of almond shell over algal and agricultural hydrochars as catalysts.,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 1071–1080., 2018.

- [51] «. Hydrogen Production: Microbial Biomass Conversion.,» 17 August 2021. [En ligne].
- [52] I. Dincer et C. Zamfirescu, «Sustainable Hydrogen Production;» ; *Elsevier: Amesterdam, NL, USA*, 2017.
- [53] A. Hoskins, S. Millican et C. Czernik, «E. Continuous on-sun solar thermochemical hydrogen production via an isothermal redox cycle.,» *Appl. Energy*, p. 368–376, 2019.
- [54] «U.S. Department of Energy (DOE) Hydrogen Program:»,
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>. [En ligne].
- [55] A. S. P. M. P. & Züttel et T. Kiyobayashi, «. Carbon materials for hydrogen storage,» *ournal of Alloys and Compounds*, pp. 356-357, 514-520, 2004.
- [56] A. & Thomas et M. M. Titirici, «Pore design in nanoporous materials for hydrogen and methane storage.,» *Energy & Environmental Science*, 6(7), pp. 1765-1780, 2013.
- [57] M. Felderhoff, C. Weidenthaler, R. von Helmolt et U. Eberle, «Hydrogen storage: the remaining scientific and technological challenges,» *Phys. Chem. Chem. Phys.*, p. 2643–2653, 2007.
- [58] D. Teichmann, W. Arlt et P. Wasserscheid, «Liquid organic hydrogen carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy.,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 18118–18132., 2012.
- [59] D. Teichmann, W. Arlt, P. Wasserscheid et R. Freymann, «A future energy supply based on liquid organic hydrogen carriers (LOHC).,» *Energy Environ. Sci.*, p. 2767–2773., . 2011.,.
- [60] R. (25) Xu, S. Chakraborty, H. Yuan et W. D. Jones, «Acceptorless, reversible dehydrogenation and hydrogenation of N-heterocycles with a cobalt pincer catalyst.,» *ACS Catal*, p. 6350–6354, 2015.
- [61] P. Preuster, C. Papp et P. Wasserscheid, «Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs):,» *toward a hydrogen-free hydrogen economy. Acc. Chem. Res.*, pp. 74-85, 2017.
- [62] . 12)M. Johansson, «Hydrogen adsorption on palladium and palladium hydride at 1bar,» *Surf Sci*, , pp. 718-729, 2010.
- [63] L. Schlapbach, «Hydrogen in intermetallic compounds I,» *Springer Verlag, Berlin, Germany*,

1988.

- [64] . M. Tousignant, «Hydrogen sorption enhancement in cold rolled LaNi₅,» *J Alloys Compd*, pp. 22-27, 2014.
- [65] . F. M.L. Bosko, «Advances in hydrogen selective membranes based on palladium ternary,» *Int J Hydrogen Energy*, pp. 15572-15594, 2021.
- [66] M.-P. Carlos (Ed.), «Thermodynamics of metal hydrides:», *tailoring reaction Enthalpies of hydrogen storage materials*, 2011.
- [67] . a. C. Zlotea, «Hydrogen sorption in TiZrNbHfTa high entropy alloy,» *J Alloys Compd*, , pp. 667-674, 2019.
- [68] R. T. B. A. S. a. I. M. Charles W. Hamiltona, B–N compounds for chemical hydrogen storage .:
- [69] . a. -O. Friedrichs, *Chem. Eur. J.*,, 2009.
- [70] J. Graetz, *Chem. Soc. Rev.*,, 2008.
- [71] . a. -W.I.F. David, *J. Am. Chem. Soc.*, 2007.
- [72] . B. Bogdanović, *J. Alloys Compd.*,, 1997.
- [73] . a. P. Chen, *Nature*, , 2002.
- [74] C. i, S. Wang, Z. Bo et X. Liu, Emissions performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine-powered passenger car under the New European Driving Cycle., 2013, p. 873–875.
- [75] B. Acikgoz, C. Celik, H. Soyhan, B. Gokalp et B. Karabag, Emission characteristics of an hydrogen–CH₄, fuelled spark ignition engine., 2015.
- [76] H. Fayaz, R. Saidur, N. Razali, F. Anuar, A. Saleman et M. Islam, «An overview of hydrogen as a vehicle fuel,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 5511–5528, 2012.
- [77] K. Zeng et D. Zhang, «Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications.,» *Energy Combust. Sci*, p. 307–326, 2010.
- [78] M. Pagliaro et A. Konstandopoulos, «Solar Hydrogen: Fuel of the Future; Royal Society of

Chemistry:», Cambridge, UK, 2012.

- [79] M. Balat et M. Balat, «Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen», *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 3589–3603, 2010.
- [80] R. Reitz, «Directions in internal combustion engine research», *Combust Flame*, p. 1–8, 2013.
- [81] C. White, R. Steeper et A. Lutz, «The hydrogen-fueled internal combustion engine:», *A technical review. Int. J. Hydrogen Energy*, p. 1292–1305, 2006.
- [82] F. Salek, M. Zamen et S. Hosseini, «Experimental study, energy assessment and improvement of hydroxyl generator coupled with a gasoline engine.», *Energy Rep*, p. 146–156, 2020.
- [83] F. Salek, M. Zamen, S. Hosseini et M. Babaie, «Novel hybrid system of pulsed HHO generator/TEG waste heat recovery for CO reduction of a gasoline engine», *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 23576–23586, 2020.
- [84] L. Walter, «Hydrogen Use In Internal Combustion Engines. In Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies», *College of the Desert: Palm Desert, CA, USA,,* pp. 3-9–3-14, 2001.
- [85] J. Heffel, «NO_x emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation.», *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 901–908, 2003.
- [86] J. Ogden, «Prospects for Building A Hydrogen Energy Infrastructure.», *Annu. Rev. Energy Environ.*, p. 227–279, 1999.
- [87] J. Bockris, «A Hydrogen Economy. In Comprehensive Treatise of Electrochemistry», *Plenum Press: New York, NY, USA*, p. 505–526, 1981.
- [88] J. Surygała, «Wodór Jako Paliwo; Wydawnictwa Naukowo-», *Techniczne PWN: Warszawa, Poland*, 2008.
- [89] H. . Du, Z. Chen, B. Peng, F. Southworth, S. Ma et Y. Wang, «What drives CO₂ emissions from the transport sector? A linkag]».
- [90] J. D. e. A. Mcbride, «Hydrogen combustion: A review of the combustion properties of hydrogen», *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005.

- [91] P. Soroushian, «Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles,» *Handbook of Clean Energy Systems*, 2015.
- [92] S. K. e. al., «Hydrogen combustion: Performance and emission evaluation of hydrogen powered internal combustion engines,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017.
- [93] M. A. R. S. e. a. al., «Hydrogen Combustion in Internal Combustion Engines,» *International Journal of Energy Research*, 2018.
- [94] «- : //TPE Fénelon 2011.,» TPE Hydrogène /http. [En ligne].
- [95] M. M. W. e. al., «Hydrogen as a transportation fuel: Costs and greenhouse gas emissions for different production pathways,» *the International Journal of Hydrogen Energy*, 2018.
- [96] H. W. e. al, «Comparison of performance and emissions of a hydrogen internal combustion engine with and without a regenerative braking system,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018.
- [97] J. Ogden, «Prospects for Building A Hydrogen Energy Infrastructure.,» *Rev. Energy Environ.*, p. 227–279., 1999.
- [98] S. Z. e. al, «Development of hydrogen internal combustion engine vehicles: a review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016..
- [99] H. Gurbuz, «The effect of H₂ purity on the combustion, performance, emissions and energy costs in an SI engine.,» *Therm. Sci.*, p. 37–49, 2020.
- [100] J. Baronas et G. Achtelik, «Joint Agency Staff Report on Assembly Bill 8: 2019 Annual Assessment of Time and Cost Needed to Attain 100 Hydrogen Refueling Stations in California,» *California Energy Commission: Sacramento, CA, USA,,* 2019.
- [101] Z. Luo, Y. Hu, H. Xu, D. Gao et W. Li, «Cost-Economic Analysis of Hydrogen for China’s Fuel Cell Transportation Field.,» *Energies*, 2022.
- [102] «Clean Cities Alternative Fuel Price Report; U.S.,» *Department of Energy: Washington, DC, USA,* , 2022.
- [103] F. D.-L. e. P. MALBRUNOT, «Danger de l’hydrogène et sécurité Combustible hydrogène,»

Technique de l'ingénieur, 2013.

- [104] M. A. Bouaroudj, *Etude par modélisation cinétique du mécanisme de combustion de l'hydrogène*, 2011.
- [105] «Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Limitations,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019.
- [106] «Hydrogen as an Energy Carrier: Prospects and Challenges,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018.
- [107] «"Hydrogen Internal Combustion Engines: A Review,» *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2018.
- [108] «"Hydrogen Storage,» *US Department of Energy*, 2021.
- [109] «Recent Advances in Hydrogen Storage Materials and Technologies,» *Chemical Society Reviews*, 2018.
- [110] «Hydrogen Storage Materials: Current State and Future Perspectives,» *Materials Today*, 2018.
- [111] «Hydrogen Transport,» *US Department of Energy*, 2021..
- [112] «Hydrogen Transportation: Pipeline and Truck Delivery,» *National Renewable Energy Laboratory*, 2019.
- [113] «Hydrogen Transportation Infrastructure,» *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*, 2019.
- [114] «Emissions from Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines,» *US Department of Energy*, 2021.
- [115] «A Review of NO_x Formation and Control in Hydrogen Combustion,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017.
- [116] «Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engine: NO_x Formation and Mitigation,» *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2015.
- [117] « <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-internal-combustion-engine-vehicles>,» Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles" de l'US Department of Energy. [En ligne].

- [118] « <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66189.pdf>,» Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles" de National Renewable Energy Laboratory (NREL). [En ligne].
- [119] «<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911001118>,» Design and optimization of hydrogen internal combustion engines" de Applied Energy. [En ligne].
- [120] « <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689041730408X>,» Performance analysis of a hydrogen fueled internal combustion engine with variable compression ratio" de Energy Conversion and Management. [En ligne].
- [121] D. N. Y. e. al, «Hydrogen Internal Combustion Engine,» *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, pp. 594-600, 2013.
- [122] R. M. W. e. al, «Hydrogen-fueled internal combustion engines,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, n° %1 12, pp. 1885-1904, 2007.
- [123] S. A. e. al, «Hydrogen combustion in internal combustion engines,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n° %14, pp. 2080-2093, 2011.
- [124] «Hydrogen-fueled internal combustion engines L.M.,» *Das Indian Institute of Technology, New Delhi, India*, November 2012.
- [125] J. W. e. W. Liu, «Hydrogen Internal Combustion Engine,» *la revue Energies*, 2018.
- [126] X. Z. e. G. Z. Zhijun Peng, «"Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines,» *la revue Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 2016.
- [127] Z. H. e. J. Zheng, «Combustion Characteristics of Hydrogen in Internal Combustion Engines,» *la revue Energies* , 2017.
- [128] K. J. H. e. a, «(<https://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28346.pdf>),» Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines. [En ligne].
- [129] J. B. e. al, « (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307336>,» Hydrogen-fueled Internal Combustion Engines: A Review. [En ligne].
- [130] V. M. D. e. al, « (<https://link.springer.com/article/10.1007/s40033-018-0129-3>,» Hydrogen as a fuel for internal combustion engines: a review of hydrogen engine research and development.

[En ligne].

- [131] A. K. e. al, « (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218319692>),» Potential of hydrogen-fuelled internal combustion engines in heavy-duty vehicles: . [En ligne].
- [132] L. L. e. al, « (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815219310685>),» Fuel injectors for hydrogen internal combustion engines: . [En ligne].
- [133] S. S. e. al, « (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219308334>),» The future of internal combustion engines in a decarbonized environmen. [En ligne].
- [134] I. Z. e. M. H. D. Othman, «Hydrogen Fuel Injection System for Internal Combustion Engines,» *Journal of Physics: Conference Series*, 2017.
- [135] M. B. e. A. B. Federico Millo, «Investigation of Hydrogen Fuel Injection in a Spark-Ignition Engine,» *le SAE Technical Paper Series*, 2013.
- [136] K. H. e. S. Tamura, «Development of Hydrogen Fuel Injection System for Internal Combustion Engines,» *le SAE Technical Paper Series* , 2006.
- [137] F. Curran, «Liquid Hydrogen Fuel Injection for Rocket Engines,» *le SAE Technical Paper Series* , 1963.
- [138] C. A. e. M. Megaritis, «An Experimental Investigation of Liquid Hydrogen Injection in a Spark Ignition Engine,» *SAE Technical Paper Series*, 1995.
- [139] A. B. F. M. e. A. P. M. Bassetti, «Design and simulation of a liquid hydrogen injector for spark-ignition engines,» *le Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011.
- [140] T. E. e. M. K. J. Williams, «Modeling of a hydrogen gas jet injector for a stationary plasma thruster,» *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013..
- [141] S. Munja, «Injection and Mixing in Hydrogen-Fueled Combustors,» *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004.
- [142] C. R. e. M. S. B. Krieger, «• "Optimization of the Gas Injector and Mixing Process in Hydrogen Engines",» *le SAE Technical Paper Series* , 2011..

- [143] T. Y. e. al, «• "Spark Plug and Ignition System Developments for Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines,» *SAE Technical Pape*, 2001.
- [144] P. V. B. e. al, «Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines",» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 29, pp. 599-625, 2003.
- [145] D. L.M, « Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application.,» *International Journal Hydrogen Energy*, pp. 479-487, 2002.
- [146] I. S. a. H. M. Kondo T., «A study on the mechanism of backfire in external mixture formation hydrogen engines,» *about backfire occurred by the cause of the spark plug - SAE*, n° %1°971704, 1997.
- [147] «Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Background and Technical Considerations",,,» *Congressional Research Service Report for Congress*, , January 2006..
- [148] J. T. d. S. e. al, «A review on hydrogen as a fuel for internal combustion engines: Challenges and opportunities",,,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, p. 109355., 2019.
- [149] T. X. e. al., Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development. SAE,, , 2002..
- [150] «Project Coordinator Motor VehicJes and Road Transport, TUY Rheinland e.V. for the Federal Ministry for Research and Technology. Alternative energy sources for road transport,» *hydrogen drive test. Technical report, TUY Rheinland,, 1990..*
- [151] I. S. a. H. M. Kondo T., « A study on the mechanism of backfire in external mixture formation hydrogen engines,» *about backfire occurred by the cause of the spark plug - SAE,, 1997..*
- [152] G. F. e. al, *Fisita World Automotive Congress, , Barcelona, Spain, 2004.*
- [153] L. G. a. M. L.E., « The backfire problem of the hydrogen engine.,» *Symposium organized by the university's internal combustion engine group, King's College, London, UK, , 1980..*
- [154] «• "Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines",,,» *article de recherche publié dans le journal Energies*, 2018.
- [155] «• "Development of a hydrogen internal combustion engine for vehicle applications",,,» *article de recherche publié dans le journal International Journal of Hydrogen Energy* , 2019.

- [156] K. Sasaki, « "Hydrogen engines for transportation and power generation" ,,» 2019.
- [157] « "Hydrogen Internal Combustion Engine: A Review of State-of-the-Art Technology" ,,» *article de recherche publié dans le journal Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 2016.
- [158] « "Hydrogen-fueled internal combustion engines: performance, emissions and carbon nanotube-based electrocatalysts" ,,» *article de recherche publié dans le journal International Journal of Hydrogen Energy*, 2019..
- [159] D. L.M., « Hydrogen-oxygen reaction mechanism and its implication to hydrogen engine combustion. ,,» *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 703- 715, 1996..
- [160] S. W. e. al, . Ford P2000 hydrogen engine design and vehicle development program. SAE,, 2002..
- [161] B. N. L. F. a. M. L. Olavson L.G., . Hydrogen fuel for underground mining machinery, 1984..
- [162] T. Tsujimura, S. Mikami, N. Achicha, Y. Tokunaga, J. Senda et H. Fujimoto, . A study of direct injection diesel engine fueled with hydrogen. SAE Trans., 2003, p. 390–405.
- [163] Dipioglu, I. Investigation of Production of Hydrogen on Vehicle and Usage of Internal Combustion Engines with Petroleum Origin Fuels. Master's Thesis, G.U., Turkey,, 1998.
- [164] A. Murcak, Experimental Analysis of the Effect of Hydrogen Fuel on Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions. Master's Thesis, Automotive Department, S.U., Turkey,, 2003..
- [165] E. Birsen, . Use of Hydrogen Fuel in Internal Combustion Engines. Master's Thesis, Natural Sciences Institute, Erciyes University, Kayseri, Turkey,, 2008..
- [166] D. Akal, S. Öztuna et M. Büyükakın, «. A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect.,,» *Int. J. Hydrogen Energy*, 2020.
- [167] I. Elsemary, A. Attia, K. Elnagar et A. Elaraqy, «. Experimental investigation on performance of single cylinder spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline mixture.,,» *Therm. Eng*, p. 850–854, 2016.
- [168] X. Yu, G. Li, Y. Du, Z. Guo, Z. Shang, F. He, Q. Shen, D. Li et Y. Li, «. A comparative study on

effects of homogeneous or stratified hydrogen on combustion and emissions of a gasoline/hydrogen SI engine.,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 25974–25984, 2019.

- [169] B. Acikgoz et C. Celik, « An experimental study on performance and emission characteristics of a methane–hydrogen fuelled gasoline engine,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 18492–18497., 2012.
- [170] C. Gong, Z. Li, L. Yi et F. Liu, «Comparative study on combustion and emissions between methanol port-injection engine and methanol direct-injection engine with H₂ -enriched portinjection under lean-burn conditions.,» *Energy Convers*, 2019.
- [171] A. Kak, N. Kumar, B. Singh, S. Singh et D. Gupta, «. Comparative study of emissions and performance of hydrogen boosted SI engine powered by gasoline methanol blend and gasoline ethanol blend.I.,» *SAE Techno*, p. 1677–1776., 2015.
- [172] Y. Karagöz, T. Sandalçı, L. Yüksek, A. Dalkılıç et S. Wongwises, « Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines.,» *Adv. Mech. Eng.*, p. 1–13., 2016.
- [173] B. Nuthan Prasad, J. Pandey et G. Kumar, «. Effect of hydrogen enrichment on performance, combustion, and emission of a methanol fueled SI engine.,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 25294–25307, 2021.
- [174] J. Yamin et M. Hamdan, « The performance of hydrogen-powered 4-stroke SI engine using locally designed fuel regulator.,» *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.,,* p. 195–199, 2010.
- [175] H. Pan, S. Pournazeri, M. Princevac, J. Miller, S. Mahalingam, M. Khan, V. Jayaram et A. Welch, «. Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine.,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 11336–11345., 2014.
- [176] F. . Christodoulou et Megaritis, «, A. Experimental investigation of the effects of simultaneous hydrogen and nitrogen addition on the emissions and combustion of a diesel engine.,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 2692–2702, 2014.
- [177] S. Wang, C. Ji, B. Zhang et X. Liu, « Lean burn performance of a hydrogen-blended gasoline engine at the wide open throttle condition.,» *Appl. Energy*, p. 43–50, 2014.

- [178] B. Salvi et K. Subramanian, «. Experimental investigation on effects of compression ratio and exhaust gas recirculation on backfire, performance and emission characteristics in a hydrogen fuelled spark ignition engine.,,» *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016.
- [179] W. Vorst et J. Finegold, « Automotive hydrogen engines, and Onboard storage Methods.,» *In Hydrogen Energy Fundamentals; Sun-Sentinel: Miami Beach, FL, USA,, 1975..*
- [180] H. Koten, «. Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions.,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 10511–10519, 2018.
- [181] M. Masood, M. Ishrat et A. Reddy, «. Computational combustion and emission analysis of hydrogen–diesel blends with experimental verification.,» *Int. J. Hydrogen Energy*, p. 2539–2547, 2007.
- [182] B. Chen, L. Zhang, J. Han et X. Chen, «. Investigating the effect of increasing specific heat and the influence of charge cooling of water injection in a TGD engine.,» *Appl. Therm. Eng.*, p. 1105–1113., . 2019.
- [183] A. Li, Z. Zheng et T. Peng, Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine., 2020.
- [184] E. Overend, « Hydrogen Combustion Engines.,» *Master's Thesis, The University of Edinburgh, Scotland, UK, , 1999..*
- [185] H. Gadallah, A. Elshenawy, M. Elzahaby, A. El-Salmawy et H. Bawady, « Effect of direct water injection on performance and emissions of a hydrogen fuelled direct injection engine,» . *In Proceedings of the Ecologic Vehicles and Renewable Energies Monaco* , p. 178–191., March 2009.
- [186] H. Kose, « Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition in Dual Fuel Mode on Engine Performance and Emission.,» *Master's Thesis, Natural Sciences Institute, Selçuk University, Konya, Turkey,, 2012.*
- [187] N. Saravanan et G. Nagarajan, «. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source.,» *Appl. Energy*, p. 2218–2229., 2010.

- [188] B. M. a. H. R.G, «. The hydrogen research of R.O. King.,» *14th World Hydrogen Energy Conference, invited paper, Montreal, Canada,, 2002..*
- [189] M. c.A, «. A study of factors influencing thermally induced backfiring in hydrogen fuelled engines, and methods for backfire control.,» *16th IECEC conference, Atlanta, USA,, 1981..*
- [190] L. G. a. M. L.E., « The backfire problem of the hydrogen engine.,» *Symposium organized by the university's internal combustion engine group, King's College, London, UK, ., 1980.*
- [191] D. L.M., « Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application.,» *International Journal Hydrogen Energy, , pp. 479-487, , 2002..*
- [192] B. M. e. al., « Potentials of a charged SI-hydrogen engine. SAE, paper N°2003-01-3210, 2003.B,» *erckmuller M. et al. Potentials of a charged SI-hydrogen engine. SAE, , pp. 1- 3210, 2003..*
- [193] S. W. e. al, . Ford P2000 hydrogen engine design and vehicle development program. SAE, paper ,, 2002..
- [194] project Coordinator Motor Vehicles and Road Transport, TUV Rheinland e.V. for the Federal Ministry for Research and Technology. Alternative energy sources for road transport - hydrogen drive test. Technical report, TUV Rheinland,, 1990..
- [195] S. G. a. S. M. Swain M.R., Design and testing of dedicated hydrogen fueled engine. SAE, 1996.
- [196] H. M. a. F. S. Koyanagi K., Study on mechanism of backfire in hydrogen engines. SAE,, 1994..
- [197] K. Y. L. C. a. C. J. Lee J.T., « An investigation of a cause of backfire and its control due to crevice volumes in a hydrogen fueled engine.,» *ASME Spring Technical Conference, paper N°2000-ICE-284, San Antonio, USA,, 2000..*
- [198] T. X. e. a. F, ,Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development, 2002..
- [199] Y. H. a. K. E. Lee S.J., «. Combustion characteristics of intake port injection type hydrogen fueled engine.,» *International Journal Hydrogen Energy:, pp. 317-322, , 1995..*
- [200] R. Rajpu, « Internal Combustion Engines.,» *Laxmi Publications (P) LTD, p. 59, 2005.*

- [201] G. F. e. al, *Fisita World Automotive Congress, , Barcelona, Spain, , 2004.*
- [202] D. M.A., « Hydrogen vehicles: an evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts, and cost.,» *Int. J Hydrogen Energy, , 1989..*
- [203] P. Chitragar, K. Shivaprasad et G. Kumar, « Use of Hydrogen in Internal Combustion Engines:,» *A Comprehensive Study. J. Mech. Eng. Biomech. , p. 84–96, 2016.*
- [204] O. H. M. N. Shudo T, «The influence of fuel properties on combustion and emissions in a DI stratified charge engine.,» *JSAE Rev, p. 27–33, 1995.*
- [205] C. W. K. T. H. T. Shudo T, «. Reduction of cooling loss by direct injection stratified charge in hydrogen combustion engines.,» *SAE Trans J Fuels Lubricant, 2004.*
- [206] W. W. M. B. King RO, *The hydrogen engine and the nuclear theory. Can J Res, 1948.*
- [207] N. R. K. D. R. L. T. X. H. S. e. a. Stockhausen WF, . *Ford P2000 hydrogen engine design and vehicle development program., 2002, pp. -01-0240.*
- [208] P. Andrew, «, Jaaskelainen Hannu, Walsh Janette «NOx emission study .,» *An investigation of water-based emission control technologies», October 2005..*
- [209] G. G. G. B. DUQUET Denis, . *Le Guide de l'auto 2006,, 2006.*